БИБЛИОТЕКА «ПРИБОРОСТРОЕНИЕ»

А.Е. Курносенко

ПОДДЕРЖКА ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ОБЪЕКТОВ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

BAUMANPRESS
ИЗДАТЕЛЬСТВО МГТУ им. Н.Э. БАУМАНА

Передовые инженерные школы

БИБЛИОТЕКА «ПРИБОРОСТРОЕНИЕ»

Серия основана в 2022 году

Том 8

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

В.А. Шахнов	— главный редактор, д-р техн. наук, профессор, чл.-корр. РАН, зав. кафедрой МГТУ им. Н.Э. Баумана
А.И. Власов	— зам. главного редактора, канд. техн. наук, доцент МГТУ им. Н.Э. Баумана
М.Ф. Булатов	— д-р физ.-мат. наук, профессор, гл. научный сотрудник факультета космических исследований МГУ им. М.В. Ломоносова
В.А. Быков	— д-р техн. наук, профессор, президент Нанотехнологического общества России
Дун Гэ	— профессор Университета Цинхуа (КНР)
А.Н. Козырев	— начальник производства ООО «Резонит»
А.С. Комшин	— д-р техн. наук, профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана
И.Г. Мироненко	— д-р техн. наук, профессор СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
С.Б. Нестеров	— д-р техн. наук, профессор, президент Российского научно-технического вакуумного общества имени С.А. Векшинского
В.В. Одиноков	— заместитель генерального директора по науке Акционерного общества «Научно-исследовательский институт точного машиностроения»
И.А. Покровский	— Генеральный директор Информационно-аналитического центра современной электроники
Ю.С. Сахаров	— д-р техн. наук, профессор Университета «Дубна»
А.Л. Стемпковский	— д-р техн. наук, профессор, академик РАН, научный руководитель Института проблем проектирования в микроэлектронике РАН
В.Б. Стешенко	— канд. техн. наук, доцент, заместитель генерального конструктора по электронной компонентной базе АО «Российские космические системы»

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)»

А.Е. Курносенко

Поддержка жизненного цикла объектов приборостроения

Допущено Федеральным учебно-методическим объединением в системе высшего образования по укрупненной группе специальностей и направлений подготовки высшего образования 09.00.00 «Информатика и вычислительная техника» в качестве учебного пособия

BAUMANPRESS
Москва
ИЗДАТЕЛЬСТВО
МГТУ им. Н.Э. Баумана
2024

УДК 621.382
ББК 32.85
К93

Издание доступно в электронном виде по адресу
https://press.bmstu.ru/catalog/item/8209/

Издание учебно-методического комплекса по укрупненным группам специальностей и направлений «Информатика и вычислительная техника», «Электроника, фотоника, приборостроение и связь» подготовлено в рамках реализации программы развития передовой инженерной школы «Системная инженерия ракетно-космической техники» МГТУ им. Н. Э. Баумана

Рецензенты:
д-р техн. наук, профессор *Н.К. Юрков*, заведующий кафедрой «Конструирование и производство радиоаппаратуры» Пензенского государственного университета, заслуженный деятель науки РФ;
д-р техн. наук, профессор кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем» Тамбовского государственного технического университета *Д.Ю. Муромцев*

Курносенко, А. Е.

К93 Поддержка жизненного цикла объектов приборостроения : учебное пособие / А. Е. Курносенко. — Москва : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2024. — 500 с. : ил. (Библиотека «Приборостроение». Т. 8).

ISBN 978-5-7038-6098-4
ISBN 978-5-7038-6322-0 (т. 8)

Учебное пособие по дисциплине «Поддержка жизненного цикла объектов приборостроения» содержит нормативную базу дисциплины, рекомендации по организации и проведению лекций, практических занятий и другие дидактические материалы для работы профессорско-преподавательского состава и студентов по данной дисциплине.

Соответствует стандартам WorldSkills по компетенции «Производство и инженерные технологии», а также содержанию и уровню подготовки студентов по укрупненным группам специальностей и направлений «Информатика и вычислительная техника», «Электроника, фотоника, приборостроение и связь». Может представлять интерес для преподавателей, студентов, а также специалистов, занимающихся вопросами приборостроения и созданием цифровых систем.

Материалы учебного пособия имеют свободный доступ — их можно читать, загружать, копировать, распространять, печатать и ссылаться на их полные или частичные тексты с указанием авторства без каких-либо ограничений. Тип лицензии CC: Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

УДК 621.382
ББК 32.85

Уважаемые читатели! Пожелания, предложения, а также сообщения о замеченных опечатках и неточностях Издательство просит направлять по электронной почте: press@bmstu.ru

ISBN 978-5-7038-6322-0 (т. 8)
ISBN 978-5-7038-6098-4

© Курносенко А.Е., 2024
© Оформление. Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2024

Предисловие

Учебно-методические комплексы дисциплин по направлению «Приборостроение» разработаны в рамках адаптации образовательных программ высшего образования к требованиям Перечня специальностей и укрупненных направлений подготовки высшего образования — бакалавриата и магистратуры (Приказ Министерства образования и науки РФ от 12 сентября 2013 г. № 1061 «Об утверждении перечней специальностей и направлений подготовки высшего образования» (с изменениями и дополнениями)). Они направлены на изучение и освоение компетенции Future Skills в рамках актуализированных образовательных программ высшего образования в соответствии с запросом цифровой трансформации промышленности.

В настоящее время трудно представить какую-нибудь отрасль промышленности, медицины, сельского хозяйства, оборонной техники и т. д., где бы не использовались приборы различных классов, назначения, функциональной сложности. Это киберфизические системы, сенсорная техника, приборы для научных исследований, радиоэлектронные и электронно-вычислительные приборы и устройства, системы управления разного уровня, бытовая электроника.

Основная особенность предметной области «Приборостроение» — ее междисциплинарный характер, который требует особых методических приемов и подбора соответствующего научного и учебного материала. Современные образовательные программы должны обеспечивать приобретение студентами профессиональных навыков и компетенций, необходимых для эффективной самостоятельной работы в приборной индустрии. В связи с этим актуальной задачей является разработка и издание учебно-методических комплексов, которые обеспечат учебно-методическую поддержку подготовки бакалавров и магистров по основным образовательным программам высшего профессионального образования по тематическому направлению «Приборостроение» образовательными учреждениями высшего профессионального образования на территории Российской Федерации.

Целью создания данного комплекта учебно-методических комплексов является повышение эффективности междисциплинарной подготовки бакалавров и магистров путем распространения передового опыта среди вузов, осуществляющих подготовку по тематическому направлению «Приборостроение», и внедрения компонентов вариативного маршрутного обучения на базе адаптированного сетевого учебно-методического комплекса дисциплин и командной работы.

Трансформация подготовки инженерных кадров для технологического суверенитета страны предполагает переход к командной проектной

подготовке. Необходимость перемен в обучении вызвано потребностью в реверс-инжиниринге, разработке и эксплуатации в РФ принципиально новых технологий.

Образование будущего предусматривает переход от рутинного обучения инженеров к подготовке членов инженерных команд, способных конфигурироваться для решения конкретных практических задач приборостроения, для чего предусматривается глубокая интеграция образования с промышленностью, наукой и органами власти.

Создание комплекта учебно-методических комплексов «Библиотека “Приборостроение”» направлено на развитие образовательных технологий, базирующихся на основе проектного опыта, что позволит выпускникам работать над практическими проектами, спрос на которые создает «технологическая суверенитизация Российской Федерации.

Современное инженерное образование призвано сформировать компетенции для работы на всех уровнях готовности технологий — от исследования до реализации продуктовых решений.

Авторы выражают благодарность рецензентам: заведующему кафедрой «Конструирование и производство радиоаппаратуры» Пензенского государственного университета Н.К. Юркову и научному руководителю кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем» Тамбовского государственного технического университета Д.Ю. Муромцеву, замечания которых позволили улучшить содержание учебно-методического комплекса.

Разработанные учебно-методические пособия обеспечат подготовку специалистов по основным образовательным программам высшего профессионального образования по направлениям 09.03.01 «Информатика и вычислительная техника» (уровень бакалавриата) и 12.03.01 «Приборостроение» (уровень бакалавриата) образовательными учреждениями высшего профессионального образования на территории Российской Федерации.

Сетевые версии учебно-методических комплексов дисциплин на основе web-версии, соответствующие стандарту SCORM 2004, 3rd edition, размещены на портале Электронной образовательной системы МГТУ им. Н.Э. Баумана (e-learning.bmstu.ru).

Авторы будут признательны читателям за все замечания по содержанию учебно-методического комплекса, которые следует направлять по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., кафедра ИУ4, МГТУ им. Н.Э. Баумана.

В.А. Шахнов

Список сокращений

АСТПП — англ. Computer Aided Manufacturing (CAM) — автоматизированное технологическое проектирование, автоматизированная подготовка производства
ГЭ — геометрический элемент
ЖЦИ — жизненный цикл изделия
ИМС — интегральная микросхема
КД — конструкторская документация
КИМ — координатно-измерительная машина
КМО — компонент, монтируемый в отверстия
КМП — англ. Surface Mount Device — компонент поверхностного монтажа
КТПП — конструкторско-технологическая подготовка производства
КЭСИ — конструкторский электронный состав изделия
МКО — метод конечных объемов
МКР — метод конечных разностей
МКЭ — метод конечных элементов
МПП — многослойная печатная плата
ОПОП — основная профессиональная образовательная программа
ПК — персональный компьютер
ПО — программное обеспечение
ПОУ — плоскость обозначений и указаний
ПП — печатная плата
РКД — рабочая конструкторская документация
САПР — система автоматизированного проектирования
СУОС — самостоятельно устанавливаемый образовательный стандарт
СЧ — составная часть изделия
ТЗ — техническое задание
ТКР — температурный коэффициент расширения
ТП — технологический процесс
ТПП — технологическая подготовка производства
ТУ — технические условия
ТЭСИ — технологический электронный состав изделия
УГО — условные графические обозначения
УТП — управляющая технологическая программа (для оборудования с ЧПУ)
ЧПУ — числовое программное управление
ЭА — электронная аппаратура
ЭК — электронный компонент
ЭМ — электронная модель

ЭМД — электронная модель детали
ЭМИ — электронная модель изделия
ЭМСЕ — электронная модель сборочной единицы
ЭМТО — электронная модель технологической операции
ЭС — электронные средства
ЭСИ — электронная структура изделия

API — интерфейс программирования прикладных приложений
BREP — англ. Boundary Representation — граничное представление
CAD — англ. Computer Aided Design — автоматизированное конструкторское проектирование
CAE — англ. Computer Aided Engineering — компьютерное моделирование, автоматизированный инженерный анализ конструкций
CALS — англ. Continuous Acquisition and Life cycle Support — непрерывная информационная поддержка поставок и жизненного цикла изделия
CAM — англ. Computer Aided Manufacturing — автоматизированное технологическое проектирование, автоматизированная подготовка производства
CFD — англ. Computational Fluid Dynamics — вычислительная гидро- и газодинамика
COM — англ. Component Object Model — объектная модель компонентов
ECAD — англ. Electronic Computer-Aided Design — автоматизированное проектирование электронных средств
EFD — Engineering Fluid Dynamics — инженерная гидро- и газодинамика
ERP — англ. Enterprise Resource Planning — система автоматизированного планирования производства и управления материально-техническими, временны́ми, финансовыми и людскими ресурсами предприятия-изготовителя
MBD — англ. Model Based Definition — моделеориентированное проектирование, информация об изделии на основе модели, цифровое описание изделия
MBE — англ. Model Based Enterprise — моделеориентированное предприятие
MCAD — англ. Mechanical Computer-Aided Design — автоматизированное проектирование механических изделий
MES — англ. Manufacturing Execution System — система управления производственными процессами на уровне цеха, участка
MU — подвижный объект
OLE — англ. Object Linking and Embedding — технология связывания и внедрения объектов в другие документы и объекты
PCB — англ. Printed Circuit Board — печатная плата

PDM — англ. Product Data Management — система управления проектными данными об изделии

PLM — англ. Product Lifecycle Management — управление жизненным циклом изделия

PMI — англ. Product Manufacturing Information — технологические атрибуты модели изделия

QMS — англ. Quality Management System — система управления качеством

RANS — англ. Reynolds Averaged Navier — Stokes (equations) — уравнения Навье — Стокса, осредненные по Рейнольдсу

SCADA — англ. Supervisory Control and Data Acquisition — система диспетчерского управления и сбора данных

SMD — англ. Surface Mount Device — компонент поверхностного монтажа

SPC — англ. Statistical Process Control — статистическое управление процессами

TC — англ. Teamcenter — система управления жизненным циклом изделия (PLM-система) компании Siemens DI

THT — англ. Through Hole Technology — технология монтажа в отверстия

TSB — англ. Task Simulation Builder — генератор сценария работы человека

VPL — англ. Valor Parts Library — библиотека электронных компонентов от компании Mentor Graphics

VPP — англ. Valor Process Preparation — программное обеспечение для подготовки производства модуля на печатной плате от компании Mentor Graphics

Термины и определения

Аналитическое моделирование	—	метод, в котором результирующие параметры модели вычисляются по формулам с жестко детерминированным результатом
Верхний (первый) уровень декомпозиции	—	разбиение технологического процесса сборки на отдельные операции с последующей классификацией этих операций, выполняемых как полностью на автоматизированном оборудовании, так и вручную с возможным применением средств автоматизации
Время обслуживания	—	время, состоящее из времени на организацию рабочего места (обеспечение необходимыми деталями, комплектующими, материалами), техническую подготовку (настройку аппаратуры, его включение и выключение) и времени на перерывы в работе
Вспомогательное время	—	время на установку и снятие обрабатываемой детали, пуск и остановку оборудования, на перемещение инструмента, измерение детали и другие приемы, повторяющиеся при обработке каждой детали
Второй (нижний) уровень декомпозиции	—	разбиение технологических операций сборки на отдельные технологические переходы, сопровождаемое декомпозицией технологического оборудования и оснащения на отдельные функциональные узлы, выполняющие переход или группу переходов
Вычислительная гидро- и газодинамика (CFD)	—	одна из ветвей механики жидкости и газа, которая использует численные методы и алгоритмы для решения и анализа проблем, включающих в себя анализ потоков жидкости и газа
Граничное представление (BREP)	—	метод представления объемного тела путем описания его границ. Трехмерное тело представляется набором связанных друг с другом поверхностей, задающих границу между представляемым телом и остальным пространством. Модель данных BREP является основным способом представления геометрических форм в современных системах геометрического моделирования

Имитационное моделирование — метод, позволяющий создавать модель на основе последовательности событий, управлять ею во времени, вносить случайные флуктуации и накладывать ресурсные и прочие ограничения, получать результаты в виде статистически обработанных данных, наблюдаемых и фиксируемых в процессе работы моделирующей программы

Ленточный питатель — устройство последовательной подачи компонентов из катушки с лентой

Моделирование — замещение реального физического объекта его условным образом, т. е. моделью, с целью изучения свойств объекта-оригинала

Моделеориентированное проектирование (MBD) — подход к описанию модели изделия, в рамках которого вся необходимая для подготовки производства и непосредственно производства информация закладывается в 3D-модель изделия

Моделеориентированное предприятие (MBE) — подход к описанию модели изделия, в рамках которого подход MBD распространяется на всю деятельность по поддержке жизненного цикла изделия

Объекты потока — объекты моделирования, содержащие объекты, которые будут производить какие-либо действия над подвижными объектами

Оптимизация сборочного состава — операция, выполняемая с целью исключения незначимых стандартных компонентов, унифицированных и заимствованных узлов, иных компонентов, структура которых доподлинно не известна или эксплуатационные характеристики которых указаны в соответствующих сопроводительных документах

Основное время — время, на протяжении которого происходит обработка детали; может быть автоматическим (если обработка детали и подача инструмента осуществляется оборудованием), автоматизированным (если обработка детали обеспечивается оборудованием, а подача инструмента ручная) или ручным

Плоскость обозначений и указаний (ПОУ) — плоскость в модельном пространстве, на которой располагается визуально воспринимаемая информация в виде 3D-аннотаций

Подвижные объекты — объекты моделирования, перемещающиеся по линии производства и преобразуемые в его процессе

Подготовительно-заключительное время — время, необходимое для изучения чертежа детали, операционной карты, получения и сдачи инструментов, требующихся для выполнения данной операции, наладки станка, сохраняющейся при обработке всей партии деталей; относится ко всей партии деталей и не зависит от количества деталей в данной партии

Подготовка производства — комплекс взаимосвязанных мероприятий, обеспечивающих создание новых и совершенствование выпускаемых видов продукции, внедрение передовой технологии, эффективных методов организации труда, производства и управления

Постпроцессор — часть CAE-системы, обеспечивающая визуализацию результатов моделирования в различных режимах отображения, сохранение данных и интеграцию с другими инструментальными средствами САПР

Препроцессор — часть CAE-системы, обеспечивающая анализ исходных данных, их приведение к необходимому формату, начальную параметризацию и генерацию сеток конечных элементов; решает задачи построения макромоделей и их детализации

Прослеживаемость — ретроспективное отслеживание конкретных компонентов до уровня модулей на печатных платах и готовых изделий, включая техпроцессы производства, хранения, подготовки производства, упаковки, логистики и отношения с поставщиками

Процессор — часть CAE-системы, обеспечивающая выполнение процедур расчета и анализа согласно назначенным на этапе препроцессора задачам

Производительность — количество деталей, сборочных единиц или изделий, изготавливаемых или собираемых в единицу времени

Ресурсы — объекты моделирования, предназначенные для обеспечения технологического процесса любыми ресурсами, например человеческим трудом

Среда АСТПП — совокупность модулей, решающих задачи создания, компоновки, имитационного моделирования и оптимизации производственных участков и цехов, программирования промышленных роботов, трехмерной симуляции производственных процессов, включая работу персонала

Типовой представитель изделия	—	изделие, наиболее полно отражающее состав компонентов, технологический процесс и операции изготовления/сборки, характерные для конкретного класса аппаратуры
Цифровой двойник (англ. digital twin)	—	виртуальный аналог реального объекта или процесса; представляет собой цифровую программную модель, состоящую из связанных цифровых аналогов физических объектов, с возможностью отображения динамических изменений в процессе их взаимодействия
Фичер	—	законченный конструктивный элемент построения 3D-модели детали; отображается в навигаторе модели в виде отдельного объекта
Электронная геометрическая модель	—	электронная модель, описывающая в формате САПР конструкторского проектирования (CAD-системы) геометрическую форму и размеры изделия
Электронная модель (ЭМ)	—	комбинация геометрической модели, 3D-аннотаций и атрибутов, описывающая изделие в формате CAD-системы
Электронная модель изделия (ЭМИ)	—	электронная модель детали или сборочной единицы
Электронная модель сборочной единицы (ЭМСЕ)	—	электронный конструкторский документ, содержащий электронную модель сборочной единицы, соответствующие электронные модели составных частей, свойства, характеристики и другие данные, необходимые для сборки (изготовления) и контроля изделия
Электронная модель детали (ЭМД)	—	электронный конструкторский документ, содержащий электронную модель детали и требования к ее изготовлению и контролю
Электронная структура изделия	—	электронный конструкторский документ, содержащий описание изделия, отражающий иерархические отношения между его составными частями и другие данные в зависимости от его назначения
3D-аннотация модели	—	размеры, допуски, обозначения, тексты, таблицы, символы, осевые линии, обозначения центров отверстия, требуемые для описания геометрии изделия или его характеристики, отображаемые в модельном пространстве. Данная информация, внесенная в ЭМИ, предназначена для разработки технологии изготовления изделия и контроля изделия после изготовления на основании ЭМИ

1. КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ

Цель дисциплины — изучение моделей, методов и средств автоматизированной поддержки жизненного цикла изделий приборостроения на этапах конструкторского и технологического проектирования.

Предметом изучения являются математические модели, методы и программные средства, используемые для автоматизации поддержки жизненного цикла изделий приборостроения.

Задача дисциплины — формирование у обучающихся знаний, умений и навыков по следующим направлениям деятельности:

1) изучение концепции цифровой трансформации промышленности «Индустрия 5.0»;

2) изучение и освоение концепции цифрового двойника;

3) освоение программных средств поддержки жизненного цикла электронных средств на этапах конструкторского и технологического проектирования;

4) освоение подходов к инженерному анализу конструкций на этапе конструкторского проектирования;

5) получение навыков выполнения автоматизированной технологической подготовки производства.

При освоении дисциплины планируется формирование компетенций, предусмотренных основной профессиональной образовательной программой (ОПОП) на основе самостоятельно устанавливаемого образовательного стандарта (СУОС) по направлению подготовки 12.03.01 «Приборостроение» (уровень бакалавриата).

В конце каждой лекции приведены тесты для контроля знаний студентов, состоящие из вопросов и ответов на них, из которых следует выбрать правильный.

1.1. ВВЕДЕНИЕ В КОНЦЕПЦИЮ ПОДДЕРЖКИ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ИЗДЕЛИЙ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

Цель лекции — ознакомление с курсом, изучение основных положений концепции поддержки жизненного цикла изделий приборостроения, подходов к построению таких систем, определению их состава, функций и решаемых задач.

1.1.1. СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ПОСТРОЕНИЮ СИСТЕМ ПОДДЕРЖКИ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА

В современной отрасли проектирования и производства изделий приборостроения, как и в прочих высокотехнологичных отраслях промышленности, сформировался и укрепился подход, связанный с использованием концепции и систем PLM (Product Lifecycle Management — управление жизненным циклом изделия). Данные системы реализуют интегрированный подход к управлению информацией об изделии на всех этапах жизненного цикла: от предпроектных исследований, проектирования и производства до применения, обслуживания, вывода из эксплуатации и утилизации. Электронный документооборот в составе системы PLM реализуется при помощи PDM (Product Data Management — управление данными об изделии) — системы управления проектными данными, которая отслеживает, учитывает, организует доступ и совместную работу, контролирует изменение, утверждение и преобразование данных, обеспечивая единую информационную среду на всех этапах жизненного цикла изделия.

Предшественницей PLM-систем являлась разработанная в 1980-е гг. военно-промышленным комплексом США концепция CALS-технологий (Continuous Acquisition and Life cycle Support — непрерывная информационная поддержка поставок и жизненного цикла изделия), реализация которых предполагает организацию единого информационного пространства (интегрированной информационной среды), объединяющего автоматизированные системы, предназначенные как для эффективного решения задач инженерной деятельности, так и для планирования и управления производством и ресурсами предприятия.

Применение PLM-систем в противовес использованию разрозненных САПР узкоспециализированного назначения позволяет разработчику и производителю реализовать ряд конкурентных преимуществ, среди которых:

– сокращение сроков вывода продукции на рынок;

– ускорение процедур согласования и утверждения проектных решений и рабочей документации;

– согласованная и эффективная организация работы коллектива сотрудников, распределенных в пространстве рабочих мест;

– обеспечение работы в мультиплатформенной среде;

– обеспечение целостности проектных данных, сокращение числа ошибок, неоднозначностей и спорных ситуаций при проектировании и производстве;

– цифровизация процессов проектирования, доводки и испытаний;

– повышение гибкости в организации взаимоотношений с поставщиками, подрядчиками, заказчиками, конечными потребителями продукции;

– наличие возможностей для обеспечения вариантного проектирования с большим числом исполнений конечной продукции;

– широкие возможности по накоплению и использованию наработок во вновь разрабатываемых изделиях.

Данный подход реализован в ряде отечественных и зарубежных программных продуктов, среди которых можно отметить Лоцман: PLM (АСКОН), T-FLEX PLM (Топ Системы), Teamcenter (Siemens DI), Windchill (PTC), ENOVIA (Dassault Systemes). Основы данного подхода применительно к изделиям электронного приборостроения рассмотрены в многочисленной научной литературе, представленной в конце книги и в лекции 1.2 данного курса.

Современный подход предусматривает следующие основные этапы жизненного цикла изделия:

- маркетинг и изучение рынка;
- составление технического задания на проектирование;
- проектирование изделия;
- разработка техпроцессов;
- закупки;
- планирование;
- производство, контроль;
- упаковка и хранение;
- реализация, поставка;
- инсталляция и ввод в эксплуатацию;
- эксплуатация и послепродажная деятельность;
- техническая поддержка, обслуживание, ремонт;
- вывод из эксплуатации, утилизация и переработка по окончании срока службы.

Каждому этапу цикла соответствует одна или несколько систем автоматизации. Например, на этапе производства — это система автоматизированного планирования производства и управления материально-техническими, временны́ми, финансовыми и людскими ресурсами предприятия-изготовителя изделия ERP (Enterprise Resource Planning); система управления производственными процессами на уровне цеха, участка MES (Manufacturing Execution System), а также на уровне производственного оборудования — система диспетчерского управления и сбора данных (SCADA).

Вместе с тем следует отметить, что системы PLM требуют для своего развертывания, внедрения, эксплуатации и обслуживания значительных

ресурсов: финансовых, временны́х, кадровых. Для ряда предприятий сравнительно небольшого размера с малым (10–20) количеством рабочих мест, выпускающих ограниченную номенклатуру изделий, при локальном размещении разработчиков возможности крупномасштабных систем PLM могут оказаться избыточными, а затраты на переход и эксплуатацию не окупятся даже в долгосрочной перспективе. Чтобы удовлетворить потребности таких предприятий и рабочих коллективов, в последнее время наметилась следующая тенденция: разработчики САПР расширяют портфолио своих продуктов среднего уровня, превращая их в полноценные среды, наделенные многими возможностями классических систем PLM без высоких требований к развертыванию, освоению и поддержке. Такая система при необходимости масштабируется до полноценной PLM системы. В данном курсе рассмотрен именно такой подход, при этом в качестве основы главным образом использованы продукты среды проектирования Solid Edge от компании Siemens DI.

1.1.2. СПЕЦИФИКАЦИЯ КОНСТРУКТОРСКОЙ САПР КАК ОСНОВА ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА

Ядром спецификации является конструкторская САПР Solid Edge – современная система автоматизированного проектирования, обладающая инструментами для создания, редактирования и инженерного анализа трехмерных цифровых макетов изделий и предназначенная для проектирования изделий в таких областях, как машиностроение, приборостроение, энергетика, электроника, проектирование технологических линий, производство технологической оснастки, потребительских товаров и пр.

Вокруг данной САПР и в тесной связи с ней организованы дополнительные модули, расширяющие ее функционал в части смежных задач поддержки жизненного цикла. Для студентов, изучающих данный курс в рамках приборостроительных специальностей, будут актуальны следующие темы и задачи:

А. Общие положения

1. Общие сведения о системах поддержки жизненного цикла.
2. Управление проектными данными.

Б. Поддержка жизненного цикла электронных средств на этапе конструкторского проектирования

3. Проектирование «сверху вниз».
4. Работа с данными в сторонних форматах.
5. Генеративное проектирование.
6. Аддитивное производство.
7. Обратный инжиниринг.
8. Объединенное моделирование.
9. Моделирование свободных форм.
10. Информация об изделии на основе модели. Бесчертежная технология подготовки конструкторской документации (КД) — технологические атрибуты модели изделия (PMI).

11. Подготовка технических публикаций.

12. Совместная работа в системах проектирования механических и электронных изделий (в ECAD/MCAD-системах). Электропроводка (провода, кабели, жгуты).

13. Совместная работа в системах проектирования механических и электронных изделий(в ECAD/MCAD-системах). Печатные платы.

В. Поддержка жизненного цикла электронных средств на этапе инженерного анализа

14. Вычислительная/инженерная гидрогазодинамика (CFD/EFD).

15. Система FloEFD — моделирование тепловых режимов электронной аппаратуры (ЭА).

Г. Поддержка жизненного цикла электронных средств на этапе подготовки производства

16. Концепции «Industry 4.0» и цифрового двойника.

17. Цифровая модель технологического процесса (ТП) сборки электронной модели (ЭМ) на печатных платах (ПП).

18. Цифровая модель автоматизированных операций.

19. Цифровая модель ручных операций.

20. Моделирование технологического оснащения.

Основные изучаемые компоненты спецификации САПР приведены на рис. 1.1.

Рис. 1.1. Изучаемые компоненты спецификации САПР Solid Edge

В темах, в которых круг решаемых задач выходит за пределы спецификации Solid Edge, в целях диверсификации используемого программного обеспечения (ПО) привлекаются дополнительные программные среды: Tecnomatix (Siemens DI) в части подготовки производства, Creo/Simulate (PTC) — в части инженерного анализа и т. д.

Практические задания, представленные в части «Методические материалы»), помогут студентам освоить изучаемые темы на практике.

Тесты к лекции 1.1

1. ***Понятия PLM и CALS соотносятся следующим образом:***

а) CALS-технологии сформировали предпосылки развития PLM-систем;

б) это эквивалентные понятия;

в) CALS-технологии относятся к электронному документообороту, а PLM-системы охватывают весь комплекс задач по поддержке жизненного цикла.

2. ***С непосредственным сбором данных с оборудования с числовым программным управлением (ЧПУ) связана система организации внутрицехового управления производством:***

а) ERP;

б) MES;

в) SCADA.

3. ***В модели для автоматизированного инженерного анализа конструкций (CAE) содержатся*****:**

а) данные пре- и постпроцессинга (исходные данные анализов, результаты расчетов, параметры визуализации);

б) маршрутный и операционный техпроцессы изготовления деталей/сборки;

в) исходные данные и результаты анализа собираемости, кинематики, динамики сборки.

4. ***В состав жизненного цикла изделия не входит этап:***

а) маркетинга и изучения рынка;

б) закупки;

в) разработки стандартов в области проектирования и производства.

5. ***Назовите основное достигаемое преимущество применения PLM-систем*****:**

а) существенное сокращение сроков разработки и вывода изделия на рынок;

б) обеспечение вариантного проектирования;

в) организация эффективного электронного документооборота.

1.2. ОСНОВЫ ТРАДИЦИОННОГО ПОДХОДА К ПОДДЕРЖКЕ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ЭЛЕКТРОННЫХ ИЗДЕЛИЙ НА ПРИМЕРЕ PLM-СИСТЕМЫ TEAMCENTER

Цель лекции — изучение традиционного подхода к управлению жизненным циклом электронных изделий на примере PLM-системы Teamcenter, модульного состава системы, назначения отдельных модулей, типового алгоритма проектирования электронного устройства.

1.2.1. КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ НАЗНАЧЕНИЯ СИСТЕМЫ TEAMCENTER

Рассмотрим применение классических систем поддержки жизненного цикла для изделий приборостроения. Одна из практических реализаций систем такого класса — Teamcenter от компании Siemens DI (рис. 1.2). Система Teamcenter позволяет предприятию перейти от использования 3D-моделей в качестве исходных данных для оформления 2D-документации к использованию моделей в качестве основного документа, несущего информацию об изделии, а также дает возможность упорядочить процессы разработки и использования моделей. Это приводит к резкому повышению эффективности использования автоматизированных систем конструкторского проектирования, инженерного анализа и подготовки производства (CAD/CAE/CAM) и сокращению сроков от начала разработки до изготовления первых образцов.

Функционалы системы Teamcenter предназначены для ускорения процессов создания разработок и вывода изделия на рынок, обеспечения соответствия управленческим и законодательным требованиям, оптимизации использования ресурсов предприятия и поддержки сотрудничества с партнерами.

Рассмотрим применение системы Teamcenter на этапе конструкторского проектирования изделий приборостроения.

Как показывают исследования, интенсивность отказов ЭА за три года обычно превышает 15%. Большинство этих отказов вызвано трудностями управления удаленными командами разработчиков, слабо контролируемым процессом разработки продуктов, применением разных комплектов инструментальных средств с отдельными базами данных, библиотеками и, как результат, — противоречивым пониманием того, как именно вся система должна функционировать.

Очевидно, что проблемы, не выявленные на этапе проектирования, после запуска производства приведут к возврату продукции, задержке сбыта и огромным гарантийным затратам.

Рис. 1.2. Основной функционал PLM-системы Teamcenter

Исключить вероятность создания такой ситуации позволит использование современных конструкторских САПР (CAD-систем) под управлением системы Teamcenter, что обеспечит гибкое управление моделями в процессе разработки и внесения в них изменений, наследование данных от предыдущих проектов, организацию совместной работы подразделений компании над моделями и их эффективное использование производственными подразделениями.

Система Teamcenter предоставляет свободу выбора используемой CAD-системы. Существует множество активно развивающихся направлений интеграции системы Teamcenter с различными CAD, PDM, PLM и ERP-системами (рис. 1.3).

Рис. 1.3. Направления интеграции системы Teamcenter с CAD, PDM, PLM и ERP-системами

Интеграция системы Teamcenter с любой CAD-системой предоставляет следующие основные возможности:

– доступ к функциям системы Teamcenter непосредственно из интерфейса CAD-системы;

– использование настраиваемой двунаправленной синхронизации структуры изделия (CAD-Teamcenter);

– использование настраиваемой двунаправленной синхронизации атрибутов (CAD-Teamcenter);

– сохранение 3D-моделей CAD в формате JT;

– управление блокировкой данных для обеспечения коллективной параллельной работы над проектом.

Благодаря использованию формата JT для обмена данными между CAD-системами система Teamcenter хорошо подходит для организации

Multi-CAD среды, что дает возможность разрабатывать различные узлы изделия в разных CAD-системах. Такая необходимость может возникнуть, когда несколько предприятий (или подразделений одного предприятия) совместно проектируют и производят одно изделие, но используют разные CAD-системы.

Система Teamcenter поддерживает интеграцию практически со всеми широко распространенными CAD-системами, однако наиболее тесная интеграция обеспечивается с «родными» системами проектирования NX и Solid Edge. Это дает возможность отслеживать соответствие модели предъявляемым требованиям в процедурах утверждения или выпуска.

Далее рассмотрим некоторые модули системы Teamcenter, которые непосредственно относятся к работе с изделиями электроники.

1.2.2. КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ОТДЕЛЬНЫХ МОДУЛЕЙ СИСТЕМЫ TEAMCENTER

Управление электромеханическими данными — Mechatronics Process Management

Мехатроника — это область техники, основанная на объединении данных об электрике, электронике и ПО физического изделия, представляющая их как единую электромеханическую систему (рис. 1.4).

Модуль Mechatronics Process Management системы Teamcenter включает в себя:

– управление интегрированным ПО — Teamcenter Embedded Software Management;

– управление данными об электропроводке — Wiring Harness Design;

– управление данными об электронных компонентах — Electronic Design Automation.

Использование этих модулей позволяет обеспечить управление данными, описывающими разрабатываемое изделие электроники.

Управление встроенным программным обеспечением — Embedded Software Management

Данное приложение предназначено для управления интегрированным в изделие ПО как его составной частью. Приложение обеспечивает все необходимые функции для хранения и управления такими объектами, как электронные компоненты (интегральные схемы, микроконтроллеры и пр.), сигналы, ПО, файлы конфигурации.

Основные возможности приложения заключаются в управлении зависимостями между ПО и аппаратной частью, на которой оно установлено, и расширяют тем самым стандартную модель данных. Обеспечивается управление следующими видами зависимостей:

– между различными элементами ПО;

– между элементами ПО и электронными блоками;

– между электронными блоками.

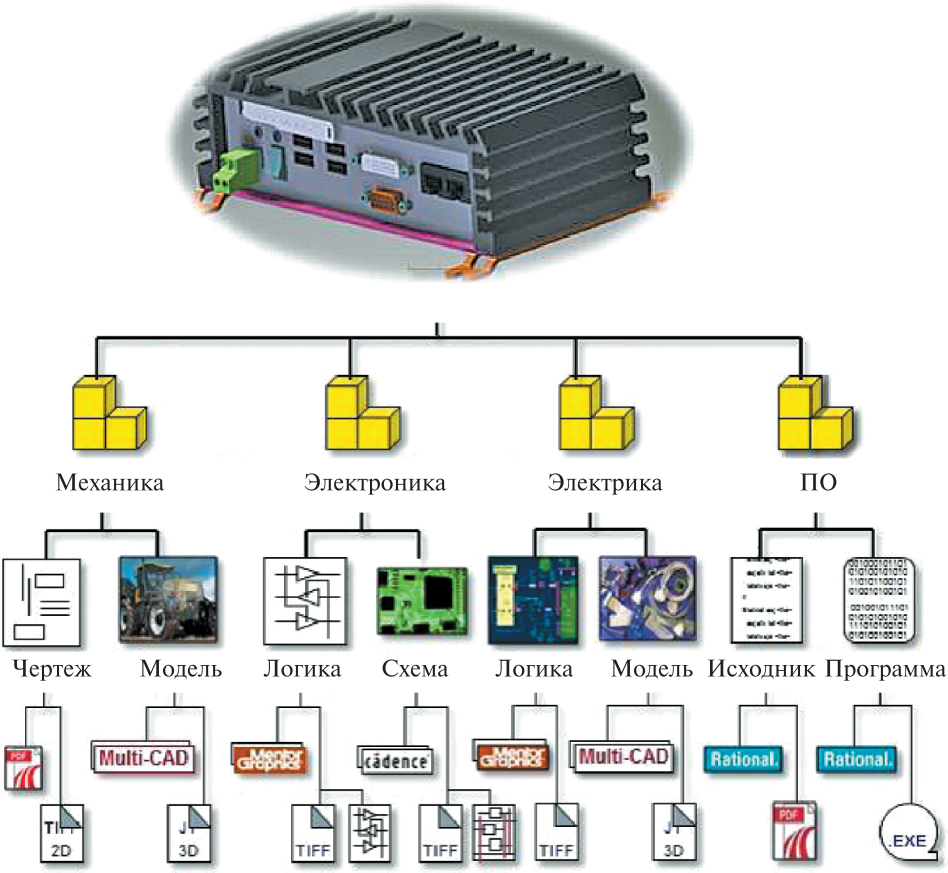


Рис. 1.4. Система структуры типового изделия мехатроники

Таким образом, в системе Teamcenter можно описать полную архитектуру разрабатываемого программно-аппаратного комплекса, а также выполнить декомпозицию используемого в изделии ПО на модули.

Управление конфигурацией встроенного ПО реализует следующий функционал:

– управление конфигурацией ПО для заданной конфигурации изделия;

– управление этапами разработки ПО в контексте этапов проектирования изделия в целом;

– внесение изменений в ПО в контексте внесения изменения в изделие, на котором оно установлено;

– управление вариантностью ПО в соответствии с вариантностью изделия, на котором оно установлено;

– повторное использование ПО в разных изделиях.

Для обеспечения управления конфигурацией ПО доступен весь стандартный набор механизмов системы Teamcenter, обеспечивающий управление составом изделия: правила выбора ревизий, управление вариантами,

альтернативами, заменами и др. При работе со встроенным ПО доступны все функции приложения Change Management. Наличие в системе Teamcenter полного состава разрабатываемого программно-аппаратного комплекса дает возможность осуществить анализ влияния вносимого изменения как на программную, так и на аппаратную части изделия. Это позволяет точно определить, на что повлияет вносимое изменение, оценить объем работ, создать единый пакет изменения и проследить последовательность его внесения. В данном случае система Teamcenter выступает как единый источник и хранилище данных.

Управление электронными компонентами — Electronic Design Automation

Приложение предназначено для организации разработки электронных компонентов на протяжении всего жизненного цикла изделия от концептуального проектирования до производства.

Основные функции:

– управление разработкой принципиальных схем, печатных плат через интеграцию со сторонними приложениями. Управление размещением печатных плат в изделии осуществляется в стандартных CAD приложениях, имеющих интеграцию с системой Teamcenter: SolidWorks, Solid Edge, NX, CATIA, Creo и др.;

– просмотр данных ECAD во встроенном визуализаторе системы Teamcenter, который позволяет отображать не только данные об электронных компонентах и печатных платах, но и информацию о внутренней логике устройства;

– управление библиотекой электронных компонентов, включая управление поставщиками компонентов через приложение системы Teamcenter Vendor Management (рис. 1.5).

Используя управление библиотекой системы Teamcenter, можно легко осуществлять поиск и обновлять данные и их атрибуты в ECAD-системах,

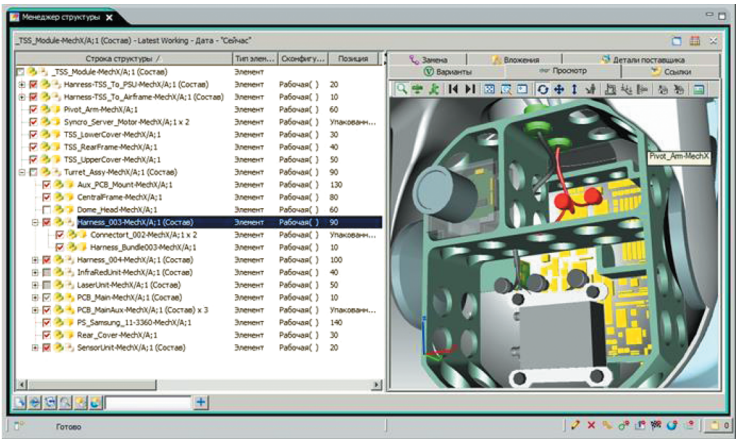


Рис. 1.5. Интерфейс приложения для управления библиотекой компонентов

а также управлять производством печатных плат с использованием приложения Tecnomatix MES for PCB.

Разработка и управление жгутами электропроводки — Wiring Harness Design

Приложение предназначено для обеспечения работы со специализированными ECAD приложениями, управления данными в системе Teamcenter и дальнейшей передачи информации в CAD-систему, создания 3D-моделей жгутов в едином электронном макете изделия.

Для представления информации об электрожгутах, разрабатываемой в ECAD и CAD приложениях, в системе Teamcenter расширена базовая модель на основе индустриальных стандартов STEP, AP212 и KBL.

Приложение обеспечивает интеграцию со следующими ECAD-системами: Cadence, Mentor и Zuken. На основе стандартного формата обмена данными может быть обеспечена интеграция с большинством ECAD-систем, представленных на рынке. Кроме того, некоторые ECAD-системы имеют интеграцию с системой Teamcenter собственной разработки.

Интеграция обеспечивает хранение и управление ECAD-данными, управление прокладкой электрожгута в 3D, создание развертки жгута и резерва пространства под размещение электрооборудования. В данном случае CAD-система получает данные, необходимые для прокладки жгута электропроводки из Teamcenter, а не из ECAD-системы (рис. 1.6).

Приложение также обеспечивает:

– управление требованиями, предъявляемыми к электросистеме, а также контроль обеспечения заданных требований;

– управление составом жгутов электропроводки и электрооборудования с использованием механизмов конфигурирования структуры в системе Teamcenter — правила выбора ревизий и вариантные правила. При использовании САПР NX в качестве CAD-системы обеспечивается передача из системы Teamcenter сконфигурированного состава сборки жгутов электропроводки и электрооборудования;

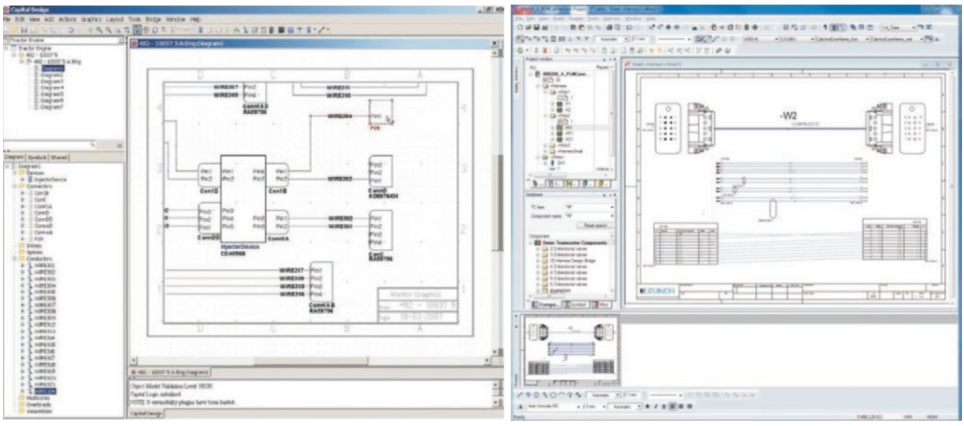


Рис. 1.6. Пример формирования жгутов электропроводки

– управление библиотекой электрических компонентов, являющейся единым источником данных как для CAD, так и ECAD-системы;

– экспорт/импорт данных в стандартные промежуточные форматы для обеспечения обмена данными с различными системами, не имеющими прямой интеграции с системой Teamcenter.

1.2.3. ТИПОВОЙ АЛГОРИТМ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННОГО УСТРОЙСТВА С ПРИМЕНЕНИЕМ СИСТЕМЫ TEAMCENTER

Рассмотрим процесс проектирования электронного устройства с жесткой логикой (без ПО) с применением системы Teamcenter. Типовой алгоритм такого процесса проектирования представлен на рис. 1.7.

В приложении Requirements Manager («Менеджер требований») формируются единые технические требования, предъявляемые к изделию на всех этапах его жизненного цикла. Процесс разработки нового или модификации существующего изделия управляется различными требованиями стандартов, заказчиков, рынка, условий эксплуатации. Например, это требования по виброустойчивости изделия, надежности, соответствию директиве RoHS Европейского Союза об ограничении применения определенных опасных

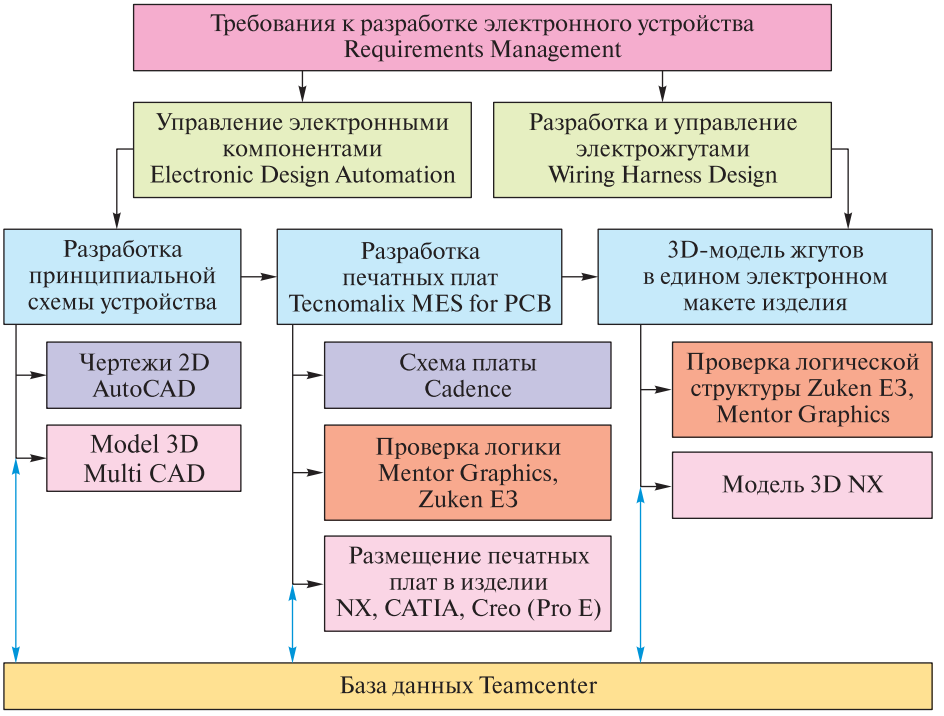


Рис. 1.7. Типовой алгоритм проектирования электронного устройства с жесткой логикой

и вредных веществ в электрическом и электронном оборудовании (прежде всего в отношении применения бессвинцовых технологий), к тепловым режимам и т. д. Чтобы обеспечить соответствие изделия всем предъявляемым требованиям, необходим быстрый доступ к этой информации на протяжении всех этапов его жизненного цикла.

Как правило, требования оформляются в виде документа (технического задания, технических условий, исходных технических требований) или набора документов. Приложение позволяет загружать их из внешних источников и представлять в виде структурированного дерева объектов, соответствующих параграфам, абзацам или отдельным положениям исходного документа. Приложение также позволяет создавать версии требований и проводить процедуры их согласования и утверждения в форматах MS Word и Excel. Это позволяет упорядочить работу с ними, а также отслеживать изменения в них.

На базе полученных требований в приложении по управлению электронными компонентами Electronic Design Automation проводится разработка принципиальных схем устройства в виде комплекта чертежей в формате AutoCAD и разрабатывается 3D-модель устройства в среде Multi-CAD.

Эти данные поступают в приложение Tecnomatix MES for PCB, где проводится разработка печатных плат и их размещение в изделии. Схемы печатных плат разрабатываются в среде Cadence. Одновременно проводится проверка логики работы устройства в средах Mentor Graphics, Zuken E3. При положительных результатах проверки логики осуществляется размещение печатных плат в изделии в выбранной САПР: например, в NX, CATIA, Creo (Pro/Engineer).

Предъявляемые к изделию требования и данные результатов работы приложения по управлению электронными компонентами Electronic Design Automation поступают в приложение по разработке и управлению электрожгутами Wiring Harness Design. Проводится проверка логической структуры работы устройства в средах Mentor Graphics, Zuken E3, а затем разрабатывается 3D-модель жгутов в едином электронном макете изделия в среде NX.

Составленный алгоритм проектирования электронного устройства с жесткой логикой в системе Teamcenter позволяет рационально управлять изделием на разных этапах его жизненного цикла. При этом единая база данных системы Teamcenter обеспечивает хранение разных наборов данных, описывающих один и тот же объект, а также управление изменениями в едином информационном поле.

Тесты к лекции 1.2

1. ***Для обеспечения соответствия изделия нормативным требованиям система Teamcenter*** (выберите один или несколько правильных ответов):

а) документирует и фиксирует нормативные требования к изделию на ранних стадиях проектирования;

б) обеспечивает для изделия соблюдение требований международных законодательных актов;

в) обеспечивает участие в разработке новых редакций отраслевых стандартов.

2. ***Между собой PLM- и PDM-системы соотносятся следующим образом:***

а) функционируют параллельно и независимо;

б) PLM — составляющая PDM-системы;

в) PDM — составляющая PLM-системы.

3. ***В рамках PLM-системы одного производителя можно эффективно работать с ПО прочих вендоров:***

а) да, работа ведется совершенно одинаково и бесшовно с САПР разных разработчиков;

б) работа ведется с САПР разных разработчиков, но наиболее полная интеграция возможна с САПР разработчика PLM-системы;

в) нет, PLM-системы работают только с ПО разработчика PLM-системы.

1.3. ГЕНЕРАТИВНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ

Цель лекции — изучение принципов, методов и средств генеративного проектирования, процедуры создания генеративного анализа, технологических настроек с точки зрения выбранного метода изготовления детали, критериев проектирования, рассмотрение сходств и различий в задании исходных данных и результатах оптимизации, выполняемой в модулях генеративного проектирования и классического инженерного анализа.

В настоящее время активно развивается концепция так называемого объединенного моделирования (Convergent Modeling), в рамках которой предусматривается совместная практически «бесшовная» работа над конструкторскими моделями, оформленными в виде твердотельной и фасетной геометрии. Составляющие данной концепции, приведенные на рис. 1.8, последовательно рассмотрены в курсе лекций и практических занятий.

Рис. 1.8. Составляющие концепции объединенного моделирования (Convergent Modeling)

Одной из важных составляющих концепции объединенного моделирования является генеративное проектирование (англ. Generative Design). Модуль генеративного проектирования (другие наименования — топологическая оптимизация, бионический дизайн) позволяет автоматически создать деталь минимальной массы с одновременным выполнением требований к прочности и достижением формы, пригодной для изготовления как аддитивными (3D-печать), так и традиционными субтрактивными (литье, штамповка, фрезерование, сверление и пр.) методами формообразования, что повышает показатели эффективности производства конечного изделия

и сокращает расходы на материалы. В результате в общем случае получается деталь «органической» формы, представляющая собой фасетную модель. Примеры полученных с помощью генеративного проектирования форм деталей приведены на рис. 1.9.

Рассмотрим возможности данной технологии проектирования на примере модуля Generative Design Pro из спецификации САПР Solid Edge. С помощью данного модуля можно задавать несколько генеративных анализов в документе детали, использовать полученную геометрию в дальнейших целях объединенного моделирования, в частности обратного инжиниринга или 3D-печати.

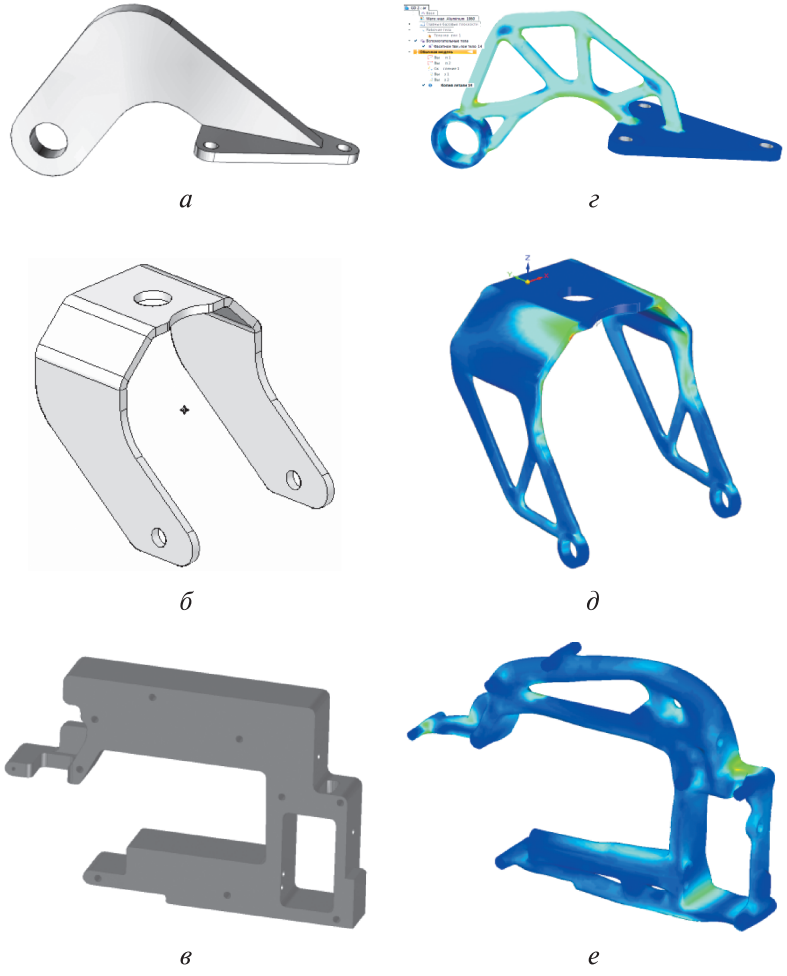


Рис. 1.9. Примеры форм деталей, полученных в результате генеративного проектирования: исходные модели (*а*, *б*, *в*); модели как результат генеративного проектирования с показом эпюры напряжений (*г*, *д*, *е*)

Следует также отметить, что полученную модель конструктор может использовать как отправную точку для дальнейших изысканий, выстраивая обычную твердотельную (B-REP) 3D-модель, исходя из рекомендаций и направлений по совершенствованию формы и минимизации массы, предложенных в фасетной модели по результатам генеративного проектирования. Структурная оптимизация больше всего подходит для анализа начальной, базовой геометрии с минимальным количеством конструктивных элементов. Чтобы иметь возможность использовать полученную фасетную модель в дальнейшем конструкторском проектировании, ее следует предварительно открепить от генеративного анализа.

Задание параметров генеративного анализа во многом соответствует вводу исходных данных статического анализа прочности (рис. 1.10). Должны быть заданы материал детали (непосредственно в анализе либо как материал конструкторской модели), механические нагрузки (доступны: сила, давление, крутящий момент, сила тяжести) и ограничения (доступны: зафиксировать, запретить перемещение, применить перемещение).

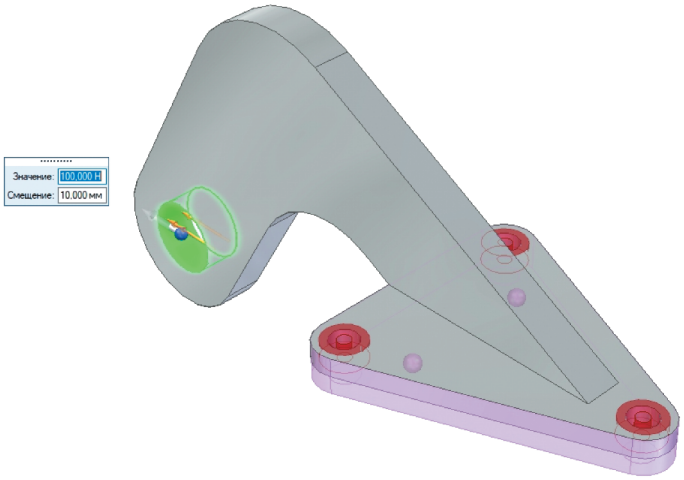


Рис. 1.10. Задание значения нагрузки «Сила»

Отличием от традиционного инженерного анализа является, в частности, возможность задавать неизменяемые области (рис. 1.11), которые не претерпят изменений в результате оптимизации, — это, как правило, крепежные отверстия, поверхности прилегания и сопряжения с другими деталями в сборке и др. Геометрия неизменяемых областей не претерпевает изменений в результате анализа и не затрагивается процедурами формообразования и изъятия геометрии в целях сокращения массы. Неизменяемые области также автоматически формируются при приложении нагрузок и закреплений на заданную конструктором глубину по нормали к поверхности приложения нагрузки/закрепления (см. рис. 1.10, параметр «Смещение»).

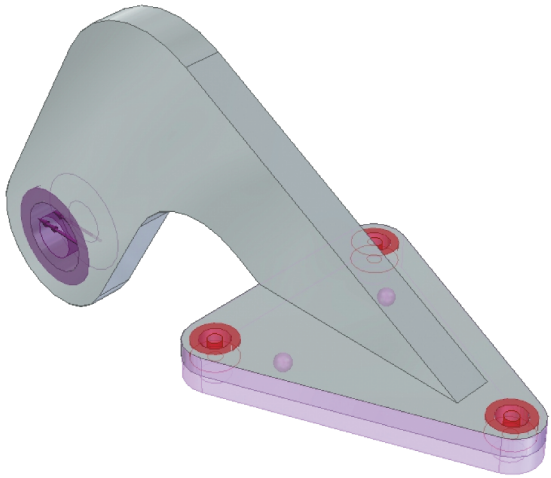


Рис. 1.11. Задание неизменяемых областей: основания кронштейна (задана закреплением); большого отверстия (задана нагрузкой); крепежных отверстий основания (заданы отдельно командой «Неизменяемая область»)

Рассмотрим несколько случаев нагружения, позволяющих реализовать оптимизацию по разным сценариям с использованием разных нагрузок/ограничений, набранных из общей коллекции. Например, приведенные на рис. 1.12 два варианта нагружения одной детали различаются направлением приложенной силы и закрепленными гранями. Результаты топологической

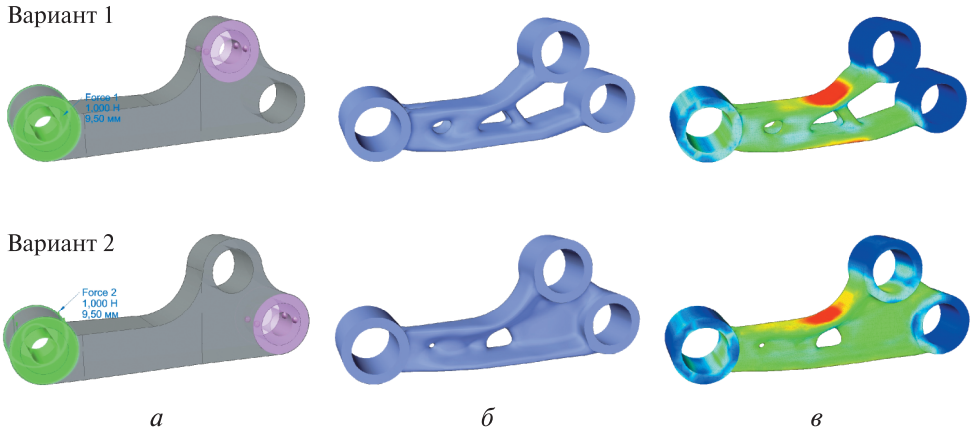


Рис. 1.12. Исходные данные и результаты генеративного проектирования двух вариантов нагружения с разными направлениями приложенной силы и закрепленными гранями: нагрузка и закрепление (*а*); результирующее тело (*б*); эпюра напряжений (*в*)

оптимизации, полученные для каждого из вариантов, также различаются. Такой подход позволяет проанализировать состояние детали в различных условиях нагружения и выработать подходы к оптимизации ее геометрии, учитывающие данные варианты.

Требуемое снижение массы задается целевым значением массы, значением ее уменьшения в процентах либо выполняется на основе задания коэффициента запаса прочности: отношения предела текучести материала детали к максимальным допустимым напряжениям в модели. Задается также качество анализа в относительных единицах. Повышение качества анализа улучшает точность и сбалансированность результатов, но увеличивает время анализа (рис. 1.13).

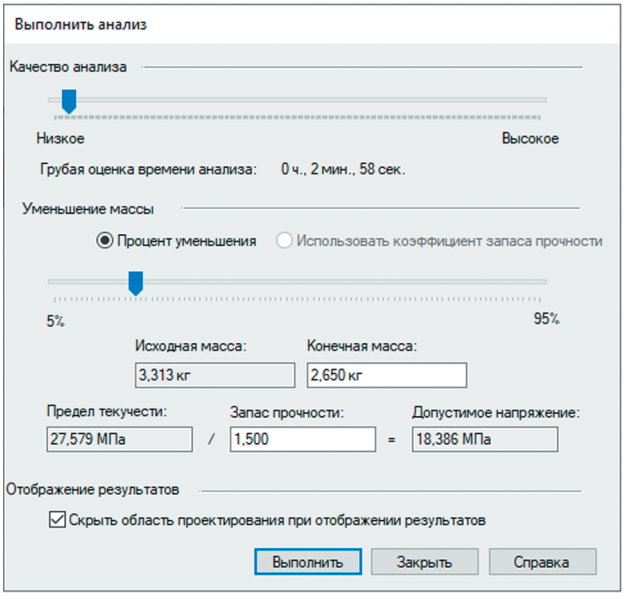


Рис. 1.13. Настройки качества выполнения анализа и уменьшения массы

Технологические настройки позволяют управлять формой получаемой оптимизированной детали. Окно «Технологические настройки» показано на рис. 1.14.

Задавая разные технологические настройки генерации формы, можно, например, получить результат, пригодный для перспективных аддитивных (рис. 1.15, *а*) способов изготовления деталей, а также заполнить полости по какой-либо оси, устранив провисание материала (рис. 1.15, *б*). Результат на рис. 1.15, *в*, *г* достигнут при настройках, которые обеспечивают получение перпендикулярных заданной оси одной (в положительном или отрицательном направлении) либо двух (в обоих направлениях) поверхностей, обрабатываемых традиционными методами (литьем, фрезерованием и т. д.).

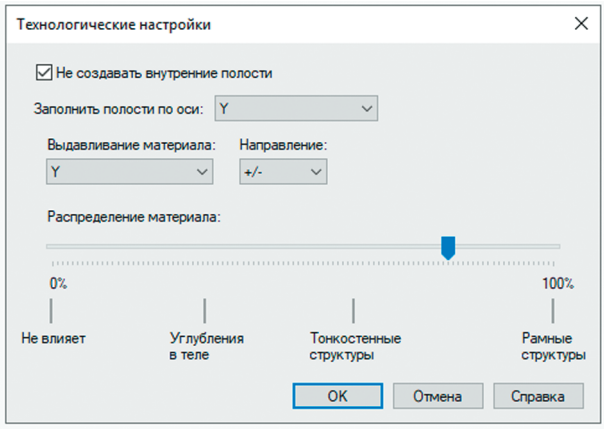


Рис. 1.14. Окно «Технологические настройки»

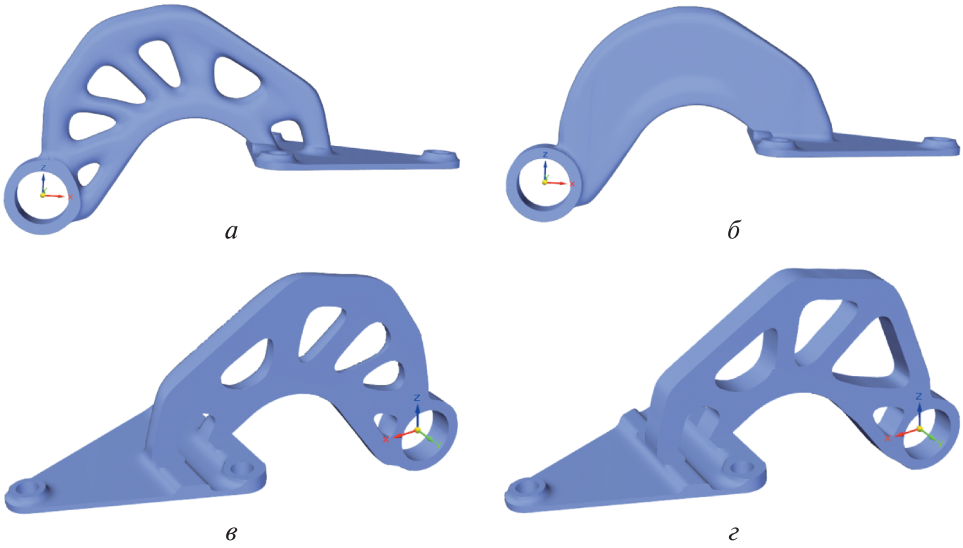
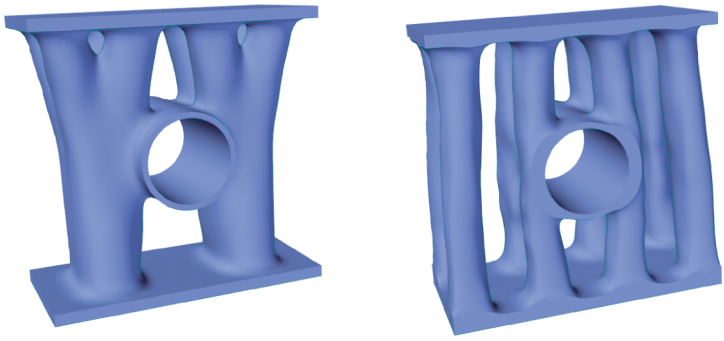


Рис. 1.15. Результат применения разных технологических настроек: с исходными настройками (*а*); с заполнением полостей по оси *Z* (*б*); с выдавливанием материала в положительном направлении по оси *Y* (*в*); с выдавливанием материала в обоих направлениях по оси *Y* (*г*)

С помощью технологических настроек можно также управлять распределением материала в оптимизированной модели. Например, в этом случае формирование модели будет происходить посредством создания углублений, тонкостенных и рамных структур, опор (рис. 1.16).

Результатом генеративного проектирования является графический вывод эпюры напряжений без возможности оценки количественных значений



а *б*

Рис. 1.16. Результат управления распределением материала при помощи технологических настроек: распределение материала не влияет на форму модели (*а*); в модели создаются рамные структуры (*б*)

полученных напряжений (рис. 1.17). Тем не менее эпюра позволяет определить критичные области максимальных напряжений в модели.

Существующая утилита пакетного запуска генеративного проектирования на основе интерфейса программирования прикладных приложений (API) обеспечивает выполнение анализа в фоновом режиме и может быть доработана пользователями.

Остановимся на сходствах и различиях в задании исходных данных и результатах оптимизации, выполняемой в модуле генеративного проектирования и модуле классического инженерного анализа Solid Edge Simulation.

Главное различие заключается в том, что однокритериальная оптимизация конструкции, выполняемая в модуле Solid Edge Simulation, для достижения поставленной цели (в обоих случаях — это минимизация массы) изменяет параметрическую модель (геометрические размеры детали в соот-

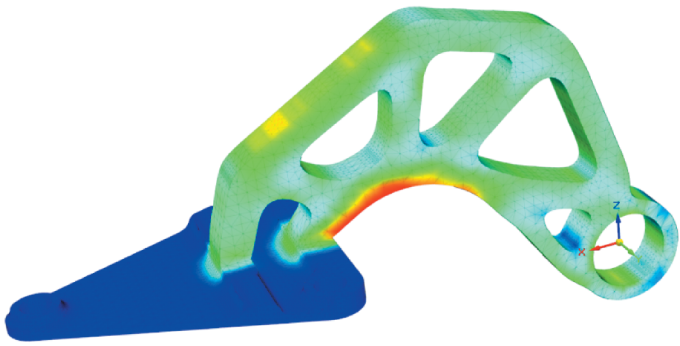


Рис. 1.17. Эпюра напряжений модели, созданной методом генеративного проектирования. Красным цветом отображена область максимальных напряжений в модели

ветствии с заданным набором проектных переменных и диапазонов их изменения), не изменяя при этом структуру или топологию модели.

Структурная оптимизация, выполняемая в модуле генеративного проектирования, не требует задания проектных переменных, но при этом реально изменяет форму и структуру модели — зачастую радикальным образом. В итоге структура модели может стать похожей на скелетную (древовидную), что принципиально невозможно при обычной параметрической оптимизации. Сравнение результатов представлено на рис. 1.18.

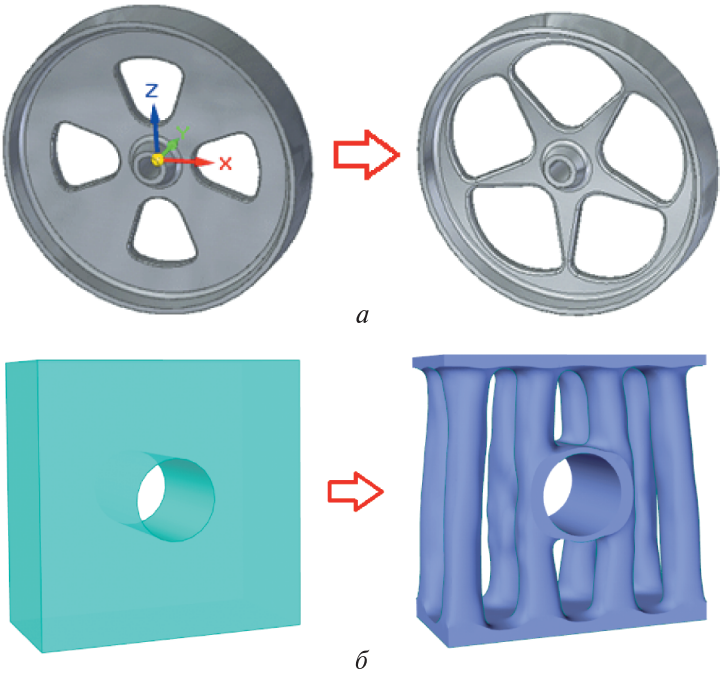


Рис. 1.18. Сравнение результатов классической параметрической (размерной) оптимизации (*а*) и структурной оптимизации при генеративном проектировании (*б*)

Результатом структурной оптимизации является фасетное тело, а результатом оптимизации конструкции — твердое тело с граничным представлением модели (BREP).

Оба типа оптимизации минимизируют массу, но в модуле генеративного проектирования можно задать только один вид ограничений — на максимально допустимые напряжения, возникающие в модели (непосредственно либо через задание коэффициента запаса прочности). Обычная оптимизация позволяет учесть набор произвольных ограничений на геометрию и физические параметры модели.

Нагрузки и ограничения используются в обоих типах оптимизации и реализуются с помощью похожих команд, при этом модуль генеративного

проектирования обладает меньшим набором доступных типов нагрузок и ограничений.

При структурной оптимизации используют входные данные, которые не задают при параметрической оптимизации, в частности, не задают области модели и конструктивные элементы (например, отверстия), которые не должны изменяться в процессе оптимизации, а также желаемый процент уменьшения массы.

Тесты к лекции 1.3

1. ***При генеративном анализе и анализе статического нагружения:***

а) задание параметров выполняется аналогичным образом;

б) только в генеративном анализе задаются неизменяемые области;

в) набор возможных видов нагрузок в генеративном анализе шире, чем в статическом анализе.

2. ***В результате генеративного проектирования получают:***

а) BREP-модель;

б) фасетную модель;

в) фасетную модель с отдельными BREP-элементами.

3. ***Чтобы воспользоваться результатами генеративного анализа*****:**

а) полученную модель необходимо вычесть из исходного тела-заготовки с помощью булевой операции;

б) дополнительных действий не требуется;

в) полученную модель следует открепить от анализа с помощью соответствующей команды.

4. ***Технологические настройки генеративного проектирования позволяют:***

а) создать модель, пригодную к производству аддитивными методами формообразования;

б) создать модель, пригодную к производству традиционными методами формообразования;

в) создать модель, пригодную к производству аддитивными либо традиционными методами формообразования в зависимости от настроек.

5. ***Однокритериальная параметрическая и структурная оптимизации различаются тем, что*** (выберите один или несколько правильных ответов):

а) однокритериальная оптимизация изменяет параметрическую модель, не изменяя структуру (топологию) модели;

б) структурная оптимизация не требует задания проектных переменных, но при этом реально изменяет форму и структуру модели;

в) в результате структурной оптимизации формируется многотельная модель, каждое тело которой отражает итерацию изменения структуры.

1.4. ОБРАТНЫЙ ИНЖИНИРИНГ И ОБЪЕДИНЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Цель лекции — изучение принципов, методов и средств обратного инжиниринга и объединенного моделирования, рассмотрение процесса восстановления аналитической геометрии модели, функционала работы с сеткой и модификации фасетной геометрии, возможностей моделирования с использованием фасетных и твердотельных элементов в составе одной модели с помощью универсальных инструментов.

В процессе работы над 3D-моделью изделия может возникнуть необходимость использовать уже существующие наработки, например модели ранее произведенных деталей. При этом проблемой может стать отсутствие для данной детали КД в каком-либо виде, пригодном для построения модели на ее основе. В том случае, когда в наличии исключительно физическая деталь, а документация на нее отсутствует, возможно применение методов обратного инжиниринга (англ. Reverse Engineering) для восстановления аналитической геометрии 3D-модели детали. Предварительно выполняют сканирование существующей физической детали в 3D с получением в результате сеточной (фасетной) модели как основы для обратного инжиниринга.

Процесс восстановления аналитической геометрии модели в этом случае предусматривает следующие этапы (рис. 1.19):

– импорт фасетной модели, полученной из внешнего источника, например в результате 3D-сканирования реального объекта и записи файла в формате STL;

– восстановление фасетной геометрии, что предусматривает, в частности, удаление артефактов, сглаживание поверхностей, удаление части поверхностей с последующим заполнением удаленных участков и т. д.;

– анализ импортированной фасетной геометрии;

– распознавание областей в виде графических примитивов: плоскостей, цилиндров, конусов и пр. для последующего их извлечения;

– извлечение распознанных аналитических поверхностей;

– модификация поверхностей, например обрезков, продление и сшивание, чтобы впоследствии создать из них твердое тело;

– создание твердого тела и его последующая модификация с целью добавления детализированной геометрии: фасок, скруглений и пр.

Восстановленную таким образом геометрию модели можно использовать, например, для проведения инженерного анализа конструкций, подготовки чертежной документации, отправки на аддитивное производство и т. д. (рис. 1.20).

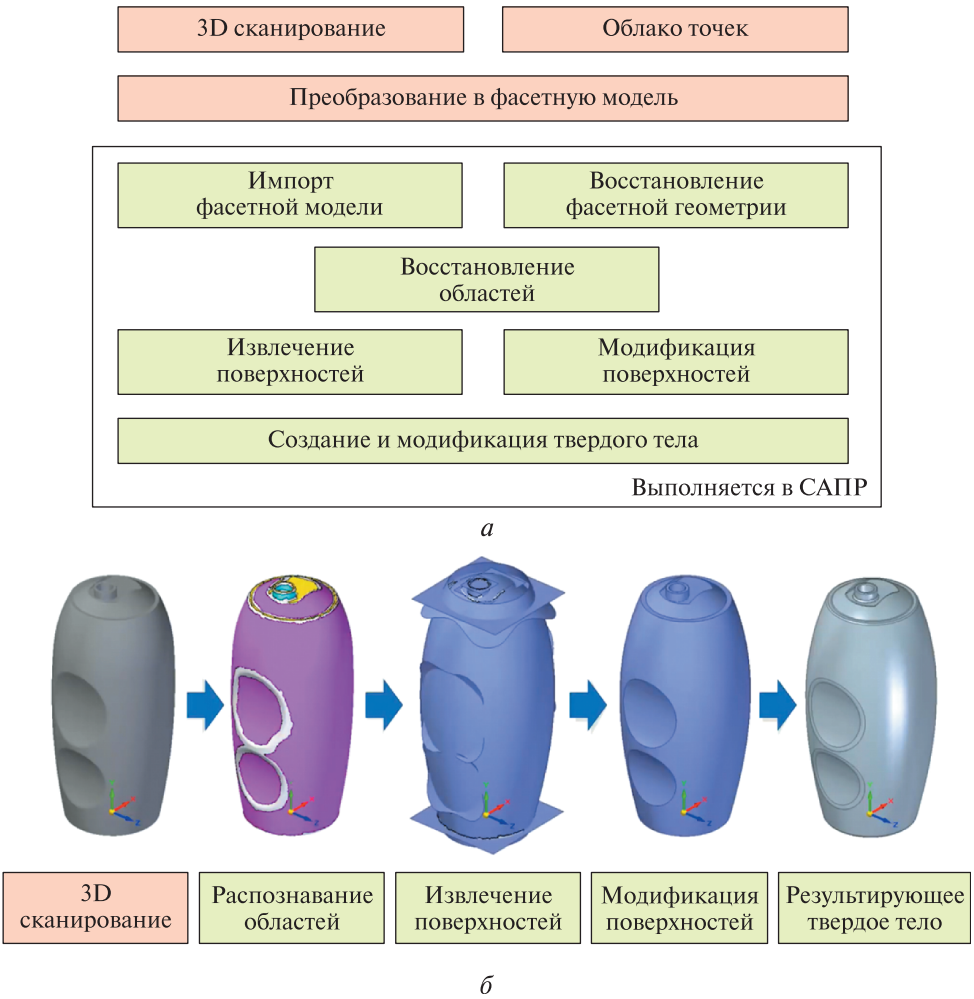


Рис. 1.19. Процесс восстановления аналитической геометрии методом обратного инжиниринга: этапы (*а*); пример восстановления 3D-модели (*б*)

Процесс восстановления начинается с импорта сеточной (фасетной) геометрии модели в формате STL. Необходимо отметить, что исходная сетка импортированной модели может быть не оптимальной по размеру, однородности фасетов, а также может содержать ряд дефектов и ошибок геометрии. В современных САПР существует ряд инструментов, позволяющих исправить сеточную геометрию. Рассмотрим некоторые из них на примере САПР Solid Edge.

В первую очередь необходимо сгладить сетку, которая изначально может быть слишком грубой, с помощью команды «Сгладить сетку». Выбирается область сглаживания, задается коэффициент гладкости (1–100) и количество итераций (до 1000). Полученный результат можно оценить на рис. 1.21.

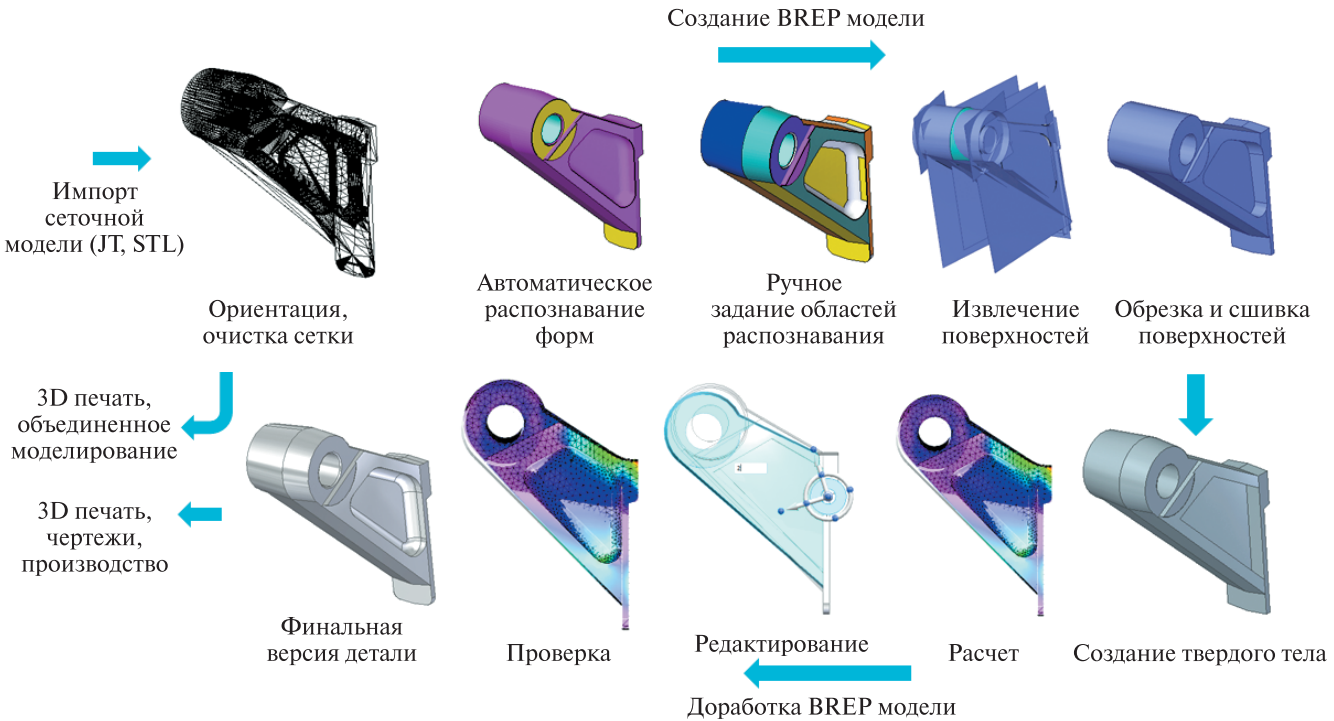


Рис. 1.20. Создание и последующее применение 3D-модели, восстановленной методом обратного инжиниринга

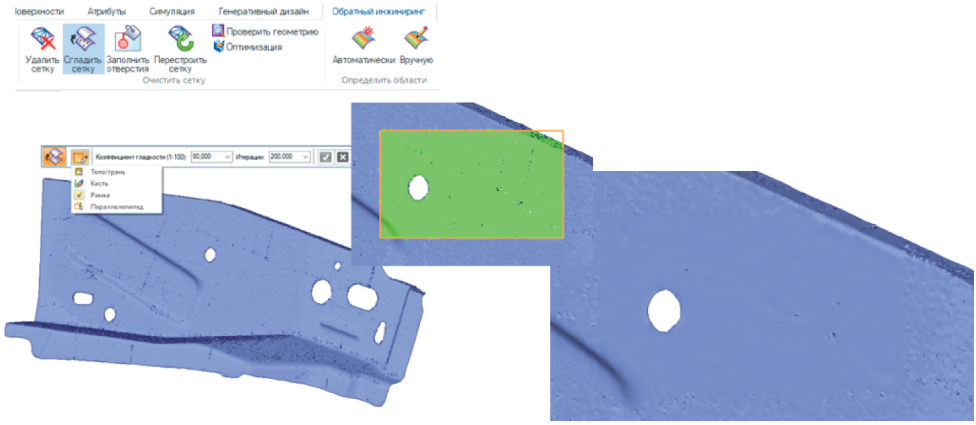


Рис. 1.21. Результат сглаживания сетки

Можно также перестроить размер элементов сетки (фасетов) с помощью команды «Перестроить сетку». У данной команды есть три основных параметра.

Параметр «Целевой размер» — это вычисленный средний размер граней у выбранных тел. По умолчанию минимальный размер равен 50 % от целевого размера, а допуск по хорде — 10 %. Эти значения малы для слишком густой сетки (в случае отсканированных моделей) и очень велики для разреженной сетки (в случае моделей, созданных в конструкторской САПР). При увеличении целевого размера увеличивается размер фасета, и сетка упрощается; при уменьшении — уменьшается размер фасета, и сетка становится более плотной и однородной.

Параметр «Минимальный размер» задает наименьшую предельную длину фасетных ребер в сетке. Уменьшение этого параметра обеспечивает более густую сетку при ее регенерации на сложных конструктивных элементах.

Параметр «Допуск по хорде» задает максимальное отклонение по хорде для областей с большой кривизной.

Результат перестроения размера сетки показан на рис. 1.22.

Размер сетки существенно влияет на качество последующего автоматического распознавания областей. С более однородной сеткой вероятность успешного распознавания поверхностей повышается, что продемонстрировано на рис. 1.23. После перестроения сетки плоские (желтые) и цилиндрические (бирюзовые) грани были успешно распознаны, чего не произошло для сетки с исходным размером фасетов.

Как уже было отмечено, важно устранять дефекты и ошибки геометрии. Команда «Проверить геометрию» с опцией «Все фасетные модели» может указать проблемные места в модели и автоматически исправить их (рис. 1.24).

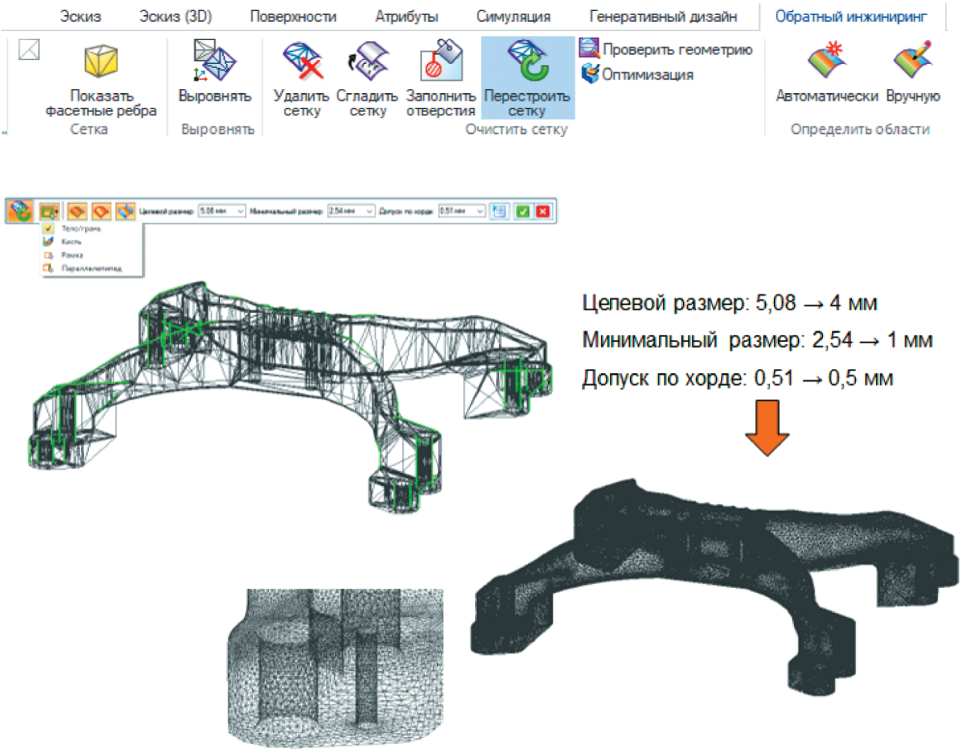


Рис. 1.22. Результат перестроения размера сетки с помощью команды «Перестроить сетку»

Чтобы эффективно работать с геометрией, необходимо правильно ориентировать ее относительно системы координат. Возможность управлять ориентацией предоставляет команда «Выровнять» с несколькими опциями:

– использовать главные оси;
– использовать оптимальный ограничивающий параллелепипед;
– использовать задаваемый ограничивающий параллелепипед;
– использовать ссылочную геометрию.

Результаты применения разных опций демонстрирует рис. 1.25.

Наилучшие результаты с точки зрения выравнивания базовых осей системы координат обеспечивает опция «Использовать задаваемый ограничивающий параллелепипед» (рис. 1.25, *в*), однако ее применение требует предварительного распознавания геометрии. В примере систему координат можно в этом случае ориентировать вдоль распознанной плоскости, что удобно для последующего редактирования геометрии.

Если часть геометрии модели не нужна, ее можно удалить с помощью команды «Удалить сетку». Выделить фасетные грани для последующего удаления можно с помощью 2D-прямоугольника, 3D-параллелепипеда или

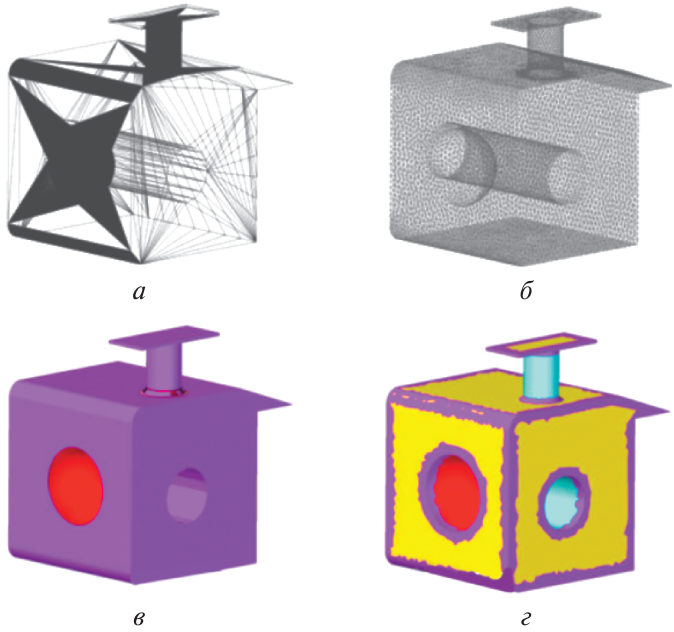


Рис. 1.23. Автоматическое распознавание областей при разной организации сетки: сетка модели до перестроения (*а*) и после перестроения (*б*); результат автоматического распознавания областей в модели с сеткой до перестроения (*в*) и после перестроения (*г*)

интерактивно (кистью). Результаты применения двух первых методов представлены на рис. 1.26.

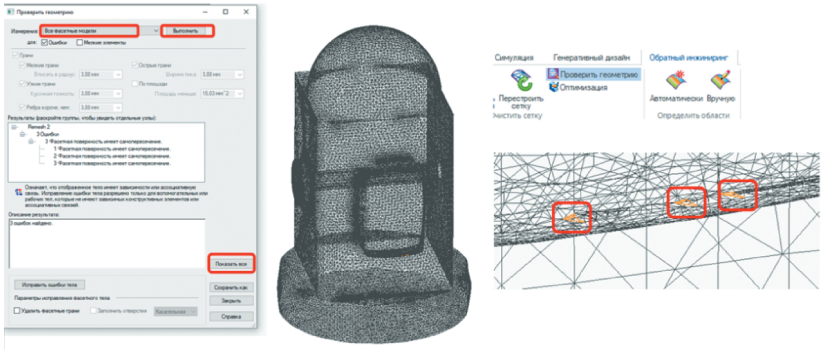
Участки на месте удаленной геометрии можно заполнить с помощью команды «Заполнить отверстия» (рис. 1.27), выбрав тип заполнения:

– «Касательно»;
– «Линейно»;
– «Кривизна»;
– «Сгущение».

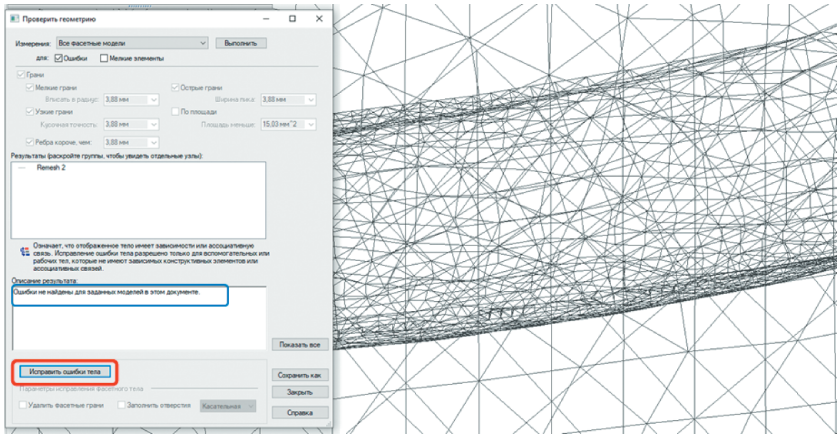
Закончив подготовку, можно приступать к распознаванию объектов аналитической геометрии (регионов фасетной модели). Существует возможность выделения плоскостей, цилиндров, сфер и B-сплайнов. Каждому типу аналитического объекта соответствует свой цвет:

– желтый — плоскости;
– голубой — цилиндры;
– красный — сферы;
– синий — конусы;
– пурпурный — B-сплайны.

Автоматическое выделение выполняется с помощью команды «Автоматически» (рис. 1.28).



а



б

Рис. 1.24. Работа команды «Проверить геометрию»: поиск проблемных участков геометрии модели (*а*); автоматическое исправление ошибок (*б*)

Объекты геометрии можно выделить также вручную с помощью команды «Вручную» (рис. 1.29), закрасив область кистью либо заливкой выбранного цвета. Белый цвет отвечает за области, исключаемые из распознавания (например, фаски и скругления). Эти элементы можно сформировать в модели позднее. Смежные области с одинаковым цветом объединяются.

Распознавание аналитических поверхностей геометрии происходит с помощью команды «Выделить», которая считывает цвет области и распознает поверхности (рис. 1.30). Выбранные поверхности можно также удалить.

Если области не распознаны либо окрашены в цвета, отличные от желтого, голубого, красного или пурпурного, можно воспользоваться командой «Аппроксимировать», чтобы вписать плоскость, сферу, конус или B-сплайн в выбранную область (рис. 1.31). Эту команду можно использовать также для удаления уже распознанных поверхностей.

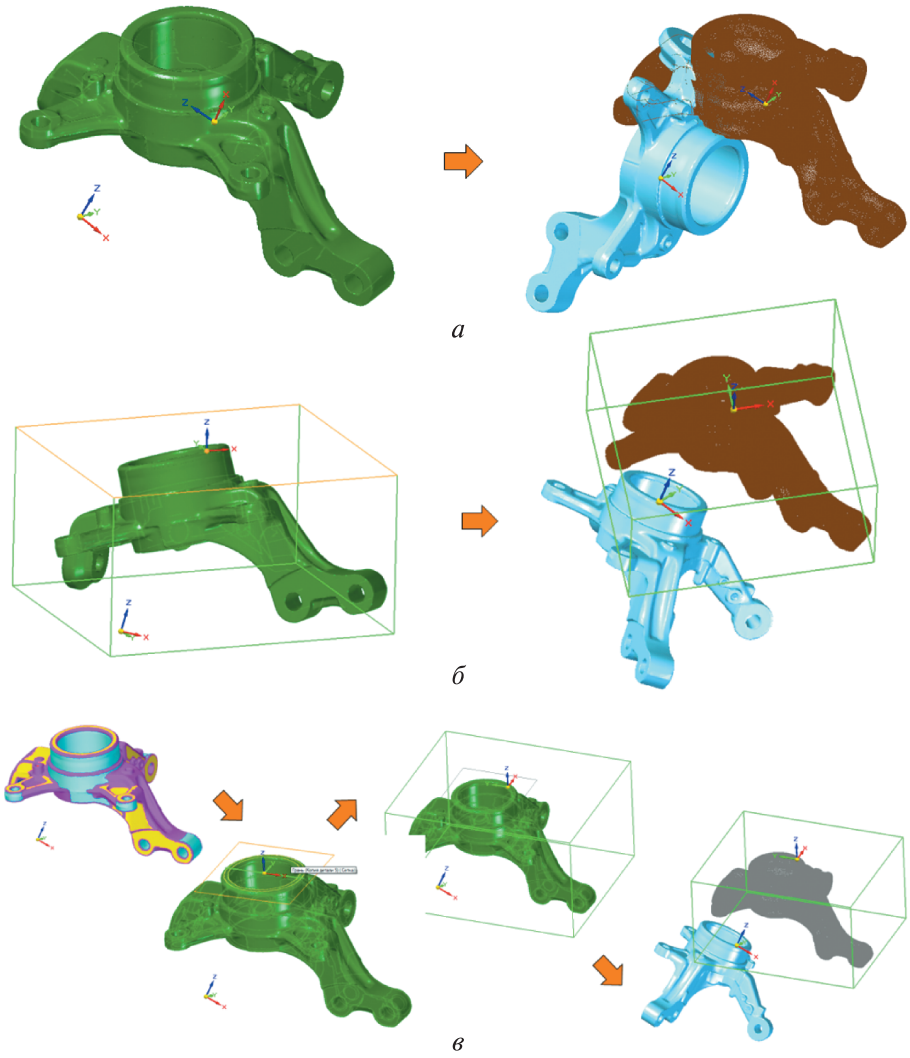


Рис. 1.25. Результаты применения опций команды «Выровнять»: «Использовать главные оси» (*а*); «Использовать оптимальный ограничивающий параллелепипед» (*б*); «Использовать задаваемый ограничивающий параллелепипед» (*в*)

Далее наступает этап редактирования поверхностей, так как результатом предшествующего этапа является несшитая геометрия с произвольными размерами граней и расположением границ. Таким образом, грани необходимо продлевать/обрезать, сшивать с помощью команд группы «Изменить поверхности»:

– «Поверхность пересечения»;

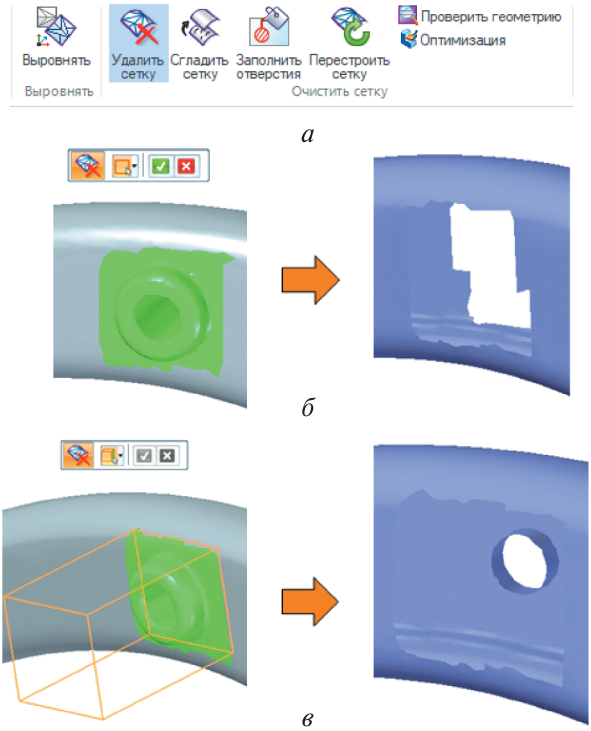


Рис. 1.26. Команда «Удалить сетку» на панели команд (*а*) и результаты удаления фасетных граней при выборе рамкой (*б*) и параллелепипедом (*в*)

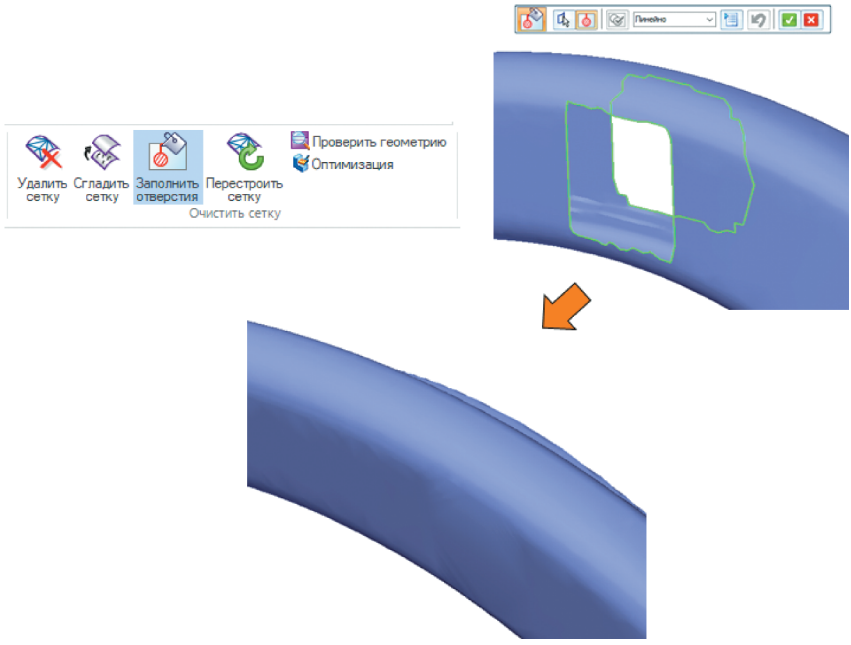


Рис. 1.27. Заполнение отверстий после удаления участков геометрии

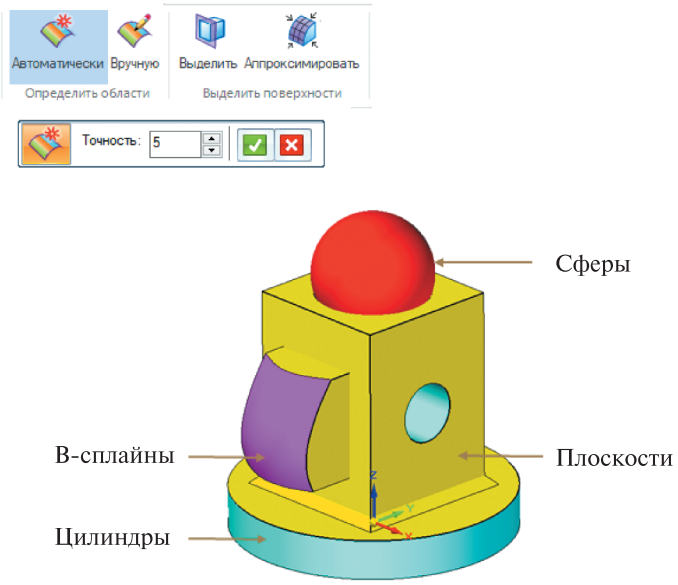


Рис. 1.28. Автоматическое выделение объектов аналитической геометрии

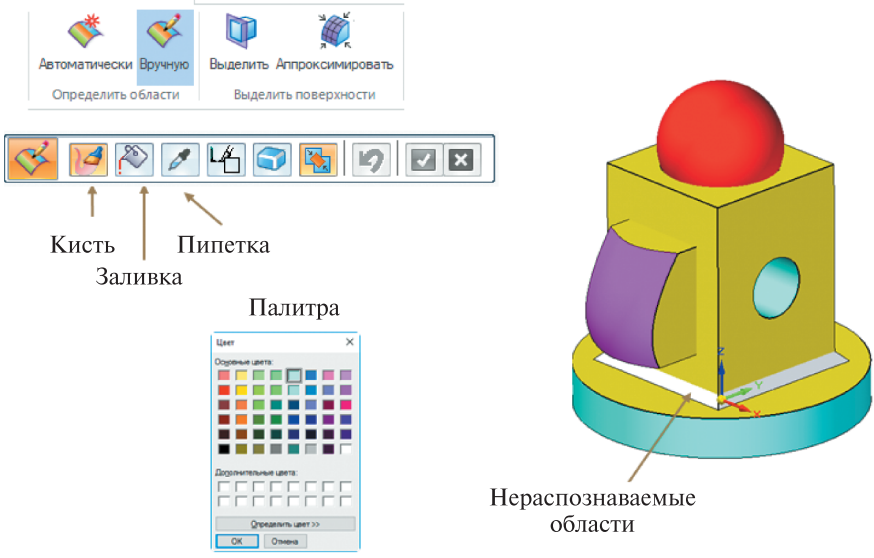


Рис. 1.29. Ручное выделение областей распознавания

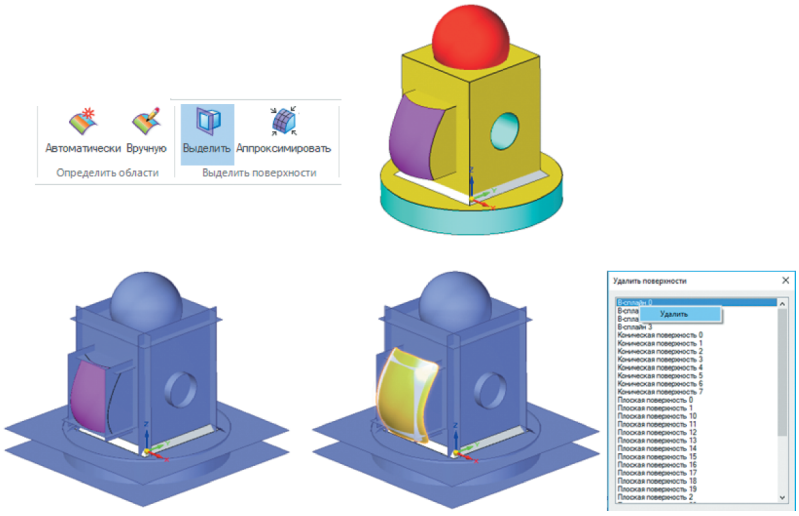


Рис. 1.30. Распознавание аналитических поверхностей с помощью команды «Выделить»

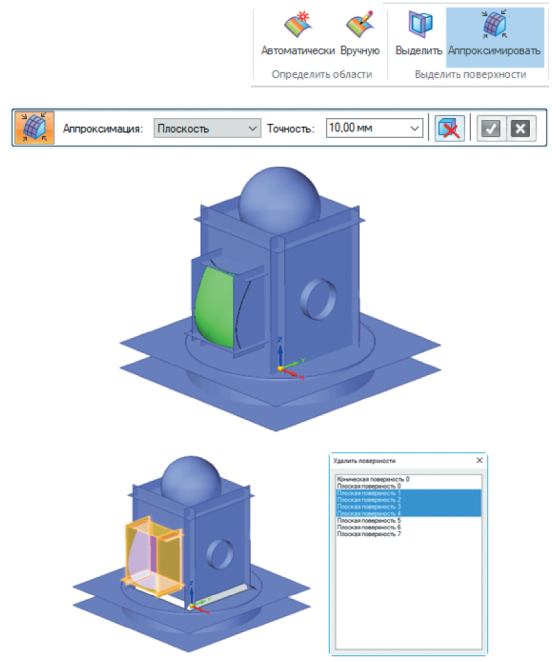


Рис. 1.31. Распознавание аналитических поверхностей с помощью команды «Аппроксимировать»

– «Усечь»;
– «Продлить»;
– «Сшить»;
– «Преобразовать в рабочее тело».

Пример такого редактирования представлен на рис. 1.32.

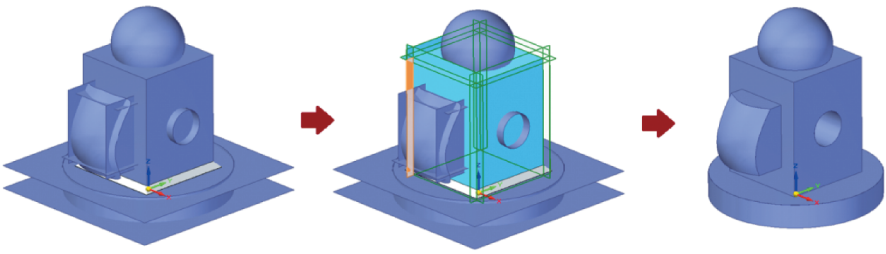


Рис. 1.32. Редактирование распознанной геометрии поверхностей в целях получения сшитого рабочего тела

В результате получается аналитическая твердотельная (BREP) модель, которую можно далее использовать в процессе проектирования без каких-либо ограничений.

Таким образом, обратный инжиниринг является составляющей технологии объединенного моделирования (англ. Convergent Modeling), дающей возможность моделирования с использованием фасетных и твердотельных элементов в составе одной модели с помощью универсальных инструментов моделирования. При этом существует возможность редактировать фасетную геометрию, конвертировать обычную модель в фасетный формат для применения в операциях с фасетами, использовать фасетную геометрию (полученную, например, из STL-файла) как основу для проектирования изделия. Это дает возможность добавлять/удалять геометрию из фасетных моделей, использовать существующие модели для булевых операций с фасетными телами. Фасетные модели могут найти применение в сборках и чертежах.

Объединенное моделирование постоянно развивается, благодаря чему различия в представлении, редактировании и применяемом инструментарии для твердотельных и фасетных моделей постепенно стираются. Например, для фасетных моделей с некоторыми ограничениями доступны булевы операции; BREP и фасетные тела могут присутствовать в одной модели; для фасетных тел можно применять такие основные команды добавления и удаления материала, как «Выдавливание», «Круговое выдавливание», «Отверстие», «Ребро», «Сетка ребер» и т. д.; поддерживаются также команды «Скругление» и «Фаска», но они создают фасетные грани. Пример редактирования с помощью такого объединенного инструментария представлен на рис. 1.33.

Таким образом, при объединенном моделировании возможна одновременная работа с BREP и фасетами в одной модели, при этом не требуется

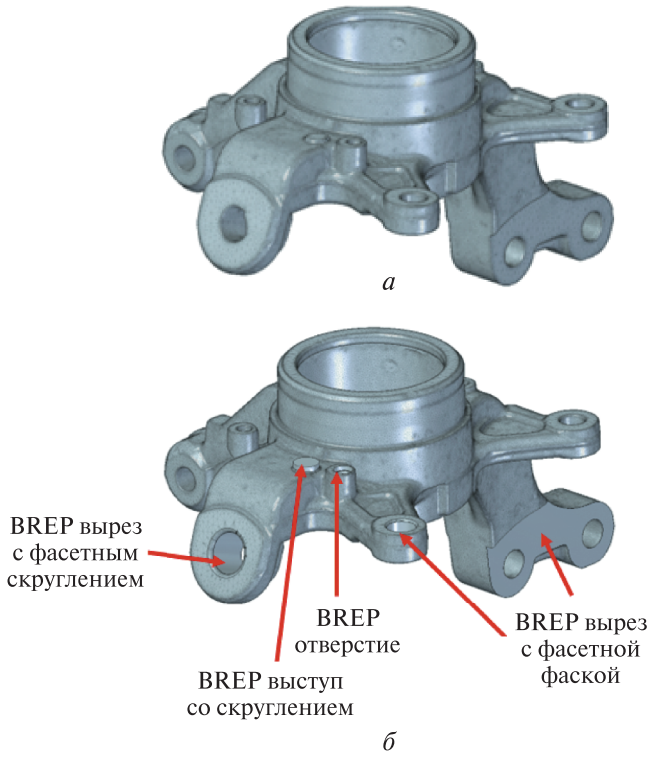


Рис. 1.33. Редактирование фасетной модели с применением универсального инструментария: исходная отсканированная модель (*а*); модель, измененная методами объединенного моделирования (*б*)

конвертации данных, традиционные операции редактирования выполняются напрямую, а для работы с сеточными моделями доступно большинство команд моделирования.

Тесты к лекции 1.4

1. ***Чтобы успешно распознать области в автоматическом режиме, сетка должна быть по размеру:***

а) однородной;

б) с крупными фасетами;

в) с мелкими фасетами.

2. ***Чтобы распознать поверхность, окрашенную в произвольный цвет, необходимо:***

а) перекрасить поверхность;

б) воспользоваться командой «Аппроксимировать»;

в) в этом случае распознавание невозможно.

3. ***Чтобы наиболее оптимально ориентировать фасетную модель в пространстве следует:***

а) использовать оптимальный ограничивающий параллелепипед;

б) использовать главные оси;

в) использовать задаваемый ограничивающий параллелепипед.

4. ***Чтобы завершить формирование тела из заготовок аналитических поверхностей следует выбрать команду:***

а) «Продлить до пересечения»;

б) «Усечь»;

в) «Сшить поверхности».

5. ***Суть объединенного моделирования заключается:***

а) в возможности моделирования с использованием фасетных и твердотельных элементов в составе одной модели с помощью универсальных инструментов;

б) в преобразовании BREP-моделей в фасетные с сохранением точности геометрии;

в) в объединении синхронных и параметрических технологий проектирования деталей и сборочных единиц.

1.5. МОДЕЛИРОВАНИЕ СВОБОДНЫХ ФОРМ

Цель лекции — изучение принципов, методов и средств моделирования свободных форм на примере проектирования полукорпуса изделия ЭА; рассмотрение традиционного инструментария твердотельного параметрического моделирования для дальнейшей модификации модели.

Помимо традиционных методов проектирования — прежде всего твердотельного и поверхностного моделирования — для ряда типовых деталей ЭА используют специальные методы моделирования. Так, одной из составляющих цепочки сквозного проектирования ЭА является проектирование корпусных деталей, изготавливаемых из различных конструкционных материалов. Выбор материала обусловливает технологию изготовления корпуса: для пластиковых деталей это, в частности, метод литья под давлением и технологии 3D-печати. Таким образом, на этапе проектирования корпуса требуется обеспечить технологичность конструкции в соответствии с выбранным методом изготовления. Комплексная цифровизация проектирования и производства в рамках концепции «Индустрия 4.0» предусматривает сквозную автоматизацию всего цикла проектирования и подготовки производства изделия, поэтому проектирование и изготовление корпусных деталей также должно подчиняться требованиям данной концепции. Следовательно, начиная с ранних этапов необходимо обеспечить автоматизацию процесса проектирования таких деталей, увязывая конструкцию корпуса с его наполнением (электронными модулями, элементами индикации, управления, питания, разъемами и пр.) и учитывая при этом требования к технологичности конструкции.

Одна из проблем автоматизации процесса проектирования деталей указанного типа заключается в том, что на ранних этапах в качестве исходных данных, помимо технического задания, может быть в наличии лишь весьма обобщенное описание корпуса, выраженное в дизайнерских набросках и эскизах (рис. 1.34). Могут отсутствовать точные пропорции и размеры корпуса, разбиение на отдельные детали; может оказаться невыполненным окончательный выбор комплектующих деталей, характерных для типового корпуса электронного прибора: разъемов, дисплея, кнопок, переключателей и пр. В связи с этим разработка окончательной 3D-модели корпуса может быть сопряжена с рядом трудностей.

На предварительных стадиях проектирования решают такие задачи, как проработка компоновки, разбиение корпуса на отдельные детали с учетом механизмов их соединения, анализ собираемости изделия, отработка конструкторско-технологических решений (например, внедрение элементов

а *б*

Рис. 1.34. Дизайнерские эскизы изделий ЭА в качестве исходных данных: портативная радиостанция (*а*); пульт управления промышленным оборудованием (*б*)

жесткости), анализ и выбор элементов дизайна, включая форму и цвет, проработка эргономики изделия. Для того чтобы решить данные задачи, необходима полноценная 3D-модель корпуса будущего изделия.

Рассмотрим подход, облегчающий реализацию автоматизированного 3D-проектирования корпусных деталей на ранних стадиях в условиях незавершенного конструкторского замысла с возможностью внесения изменений в конструкцию на более поздних этапах разработки.

Принятые подходы к проектированию корпусных деталей из пластика предусматривают применение традиционных параметрических методов проектирования с использованием поверхностного моделирования. Результатом такого проектирования служат модели в граничном представлении (англ. BREP, boundary representation), реализующие точные аналитические формы граней и их сопряжений. Основными достоинствами такого подхода являются строгая параметризация, однозначная и согласованная реакция на вносимые изменения, пригодность к непосредственной передаче модели в технологические модули (например, в модуль проектирования пресс-форм для литья под давлением).

Однако данному подходу присущ ряд неотъемлемых недостатков, среди которых сложность и продолжительность проектирования независимо от стадии проработки, необходимость наличия завершенного конструкторского замысла до начала проектирования, а также высокие требования к навыкам владения САПР конструктором.

Проектирование корпусных деталей ЭА на ранних стадиях необходимо осуществлять в условиях незавершенного конструкторского замысла, при этом метод проектирования должен обладать гибкостью, достаточной для внесения незапланированных изменений в конструкцию, а также устойчивостью к сохранению целостности конструкции при внесении таких изменений, простотой и высокой скоростью работы. Учитывая приведенные соображения, для проектирования корпусных деталей целесообразно использовать гибридный подход, сочетающий гибкое проектирование основной формы детали и строгое моделирование точных элементов конструкции.

В качестве метода гибкого проектирования следует использовать моделирование свободных форм (Subdivision/Sub-D Modeling), в рамках которого создаваемое трехмерное тело модели окружается настраиваемой многоугольной клеткой и управление формой тела осуществляется за счет изменения положения вершин и ребер клетки. Клетка может произвольным образом разбиваться на сегменты в целях более точного управления геометрией. Тело при этом создается с помощью набора правил, которые многократно применяются к каждой грани/ребру/вершине многоугольника, образуя тем самым вершины многоугольников следующего уровня и обеспечивая их связность. Наиболее распространенной реализацией данной технологии является платформа Pixar Surface Subdivision с открытым исходным кодом.

Результатом моделирования свободных форм является вспомогательное фасетное тело, которое можно преобразовать в рабочее. Результирующая модель впоследствии может быть доработана с применением любого метода проектирования:

– традиционного параметрического/синхронного;

– обратного инжиниринга в целях выделения аналитических поверхностей;

– объединенного (конвергентного) моделирования.

Обобщенная схема этапов проектирования корпусной детали представлена на рис. 1.35. Она заключается в применении моделирования свободных форм на начальном этапе проектирования и дальнейшей модификации модели с участием прочих методов моделирования, среди которых методы обратного инжиниринга и объединенного моделирования являются опциональными этапами (выделены пунктирной линией).

Рассмотрим основные этапы обобщенного процесса проектирования на примере детали — крышки корпуса пульта управления. Исходными данными для построения является эскизный набросок фронтального вида корпуса (рис. 1.36, *а*). Процесс построения модели начинается с создания

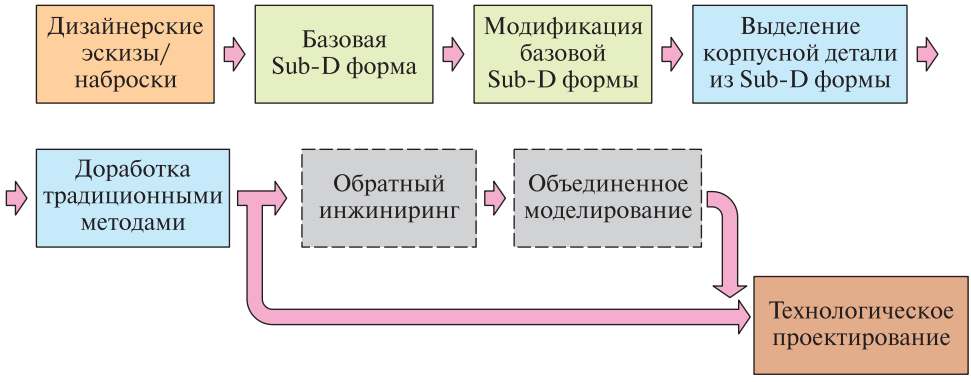
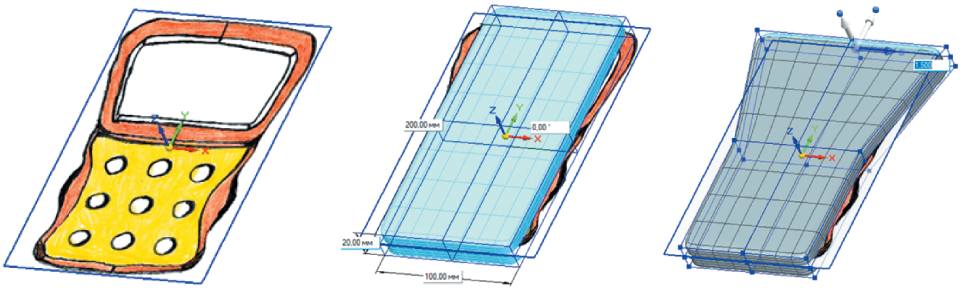


Рис. 1.35. Обобщенная схема этапов проектирования корпусной детали с участием моделирования свободных форм

базовой формы, в данном случае — параллелепипеда, при этом размеры соотносятся с размерами эскиза, спроецированного на плоскость построения (рис. 1.36, *б*). Затем модель масштабируется по одной оси с коэффициентом 1,5 в целях создания расширения верхней части корпуса (рис. 1.36, *в*). Количество исходных сегментов по каждой оси выбрано равным двум, но это количество может при необходимости настраиваться.



а *б* *в*

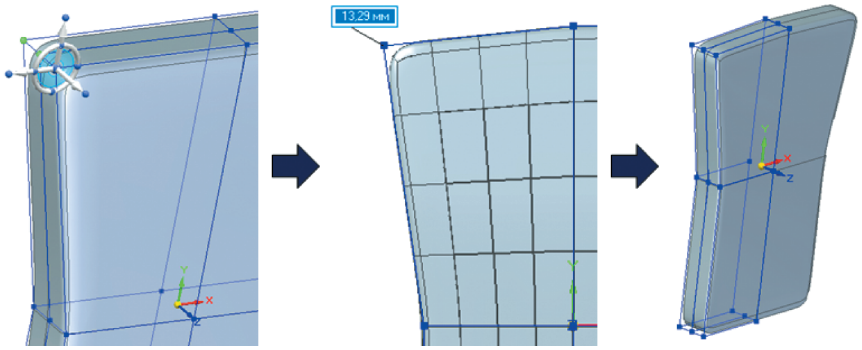
Рис. 1.36. Создание и первичная модификация базовой формы: исходный дизайнерский набросок (*а*); создание базового параллелепипеда (*б*); масштабирование базовой формы по одной оси (*в*)

Основной смысл применения моделирования свободных форм заключается в модификации базовой формы с помощью управления вершинами/ребрами окружающей ее клетки. Так, можно изменять наклон граней, а также относительное значение уровня сглаживания для ребер и вершин (рис. 1.37).

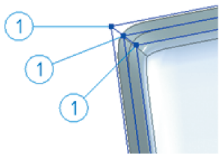
Далее рассмотрим создание эргономичных выступов на боковых сторонах корпуса под схват пальцами. Метод моделирования свободных форм позволяет сначала разбить два сегмента боковой грани клетки на 7 сегментов меньшего размера (рис. 1.38, *а*) с последующим подъемом (смещением) сегментов в ортогональном направлении с опцией наклона соседних граней (рис. 1.38, *б*). Полученный результат также подвергается дополнительному сглаживанию вершин и ребер (рис. 1.38, *в*). Следует отметить, что задействование режима симметрии позволяет выполнять данные манипуляции только на одной из симметричных граней с автоматическим выполнением аналогичных преобразований на второй.

С помощью моделирования свободных форм можно создавать достаточно сложные элементы, например буртик вокруг дисплея (рис. 1.39). Данный элемент выполняется посредством разбиения сегментов и одновременного их смещения, управляемого коэффициентом, и дальнейшего подъема образованных сегментов будущего буртика с помощью опции поднятия граней.

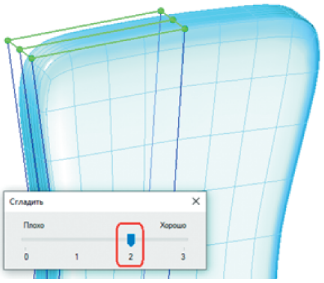
Незапланированные изменения в дизайнерский и конструкторский замыслы можно вносить непосредственно в процессе проектирования. Так,



а



Текущая степень сглаживания



б

Рис. 1.37. Дальнейшая модификация базовой формы с помощью управления вершинами/ребрами окружающей клетки (*а*) и изменения относительного уровня сглаживания с 1 на 2 (*б*)

на рис. 1.40 показано изменение формы нижней грани корпуса с помощью подстройки ее под нарисованную эскизную кривую (рис. 1.40, *а*), а также выполнения проушины с помощью команды «Мостик» по эскизной направляющей с последующим сглаживанием (рис. 1.40, *б*). Кривая при этом может иметь произвольную форму или быть параметризованной.

По окончании моделирования методом свободных форм необходимо выделить из полученного фасетного тела оболочку, соответствующую в нашем примере половине (крышке) корпуса (рис. 1.41). Перед данной операцией тело опционально подвергается обработке в модуле поверхностного моделирования с целью переопределения поверхностей, чтобы удалить образованные кусочные поверхности (рис. 1.41, *а*). Операция создания

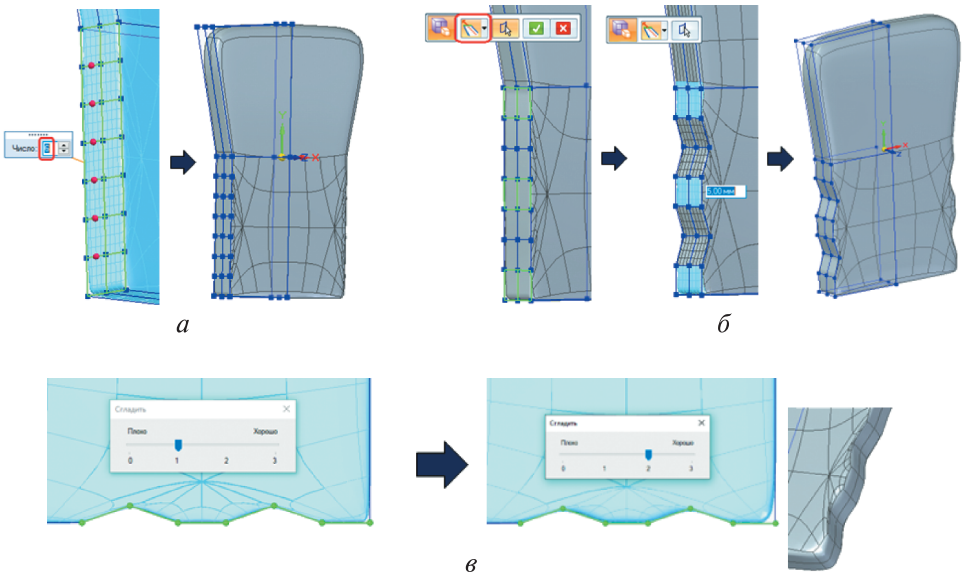


Рис. 1.38. Создание выступов на боковых гранях с помощью разбиения на сегменты (*а*) с последующим наклоном соседних граней (*б*) и изменением относительного уровня сглаживания с 1 на 2 (*в*)

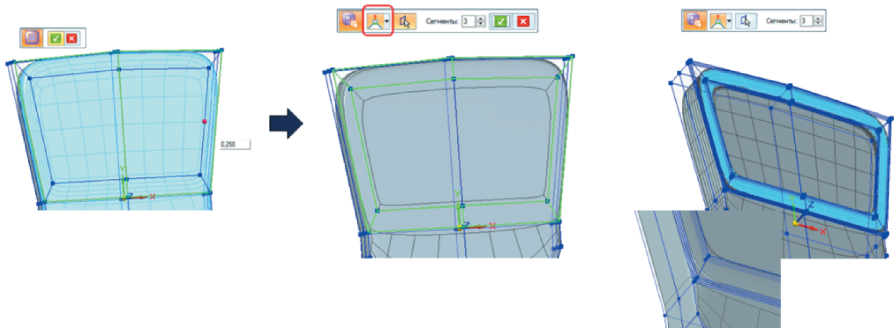
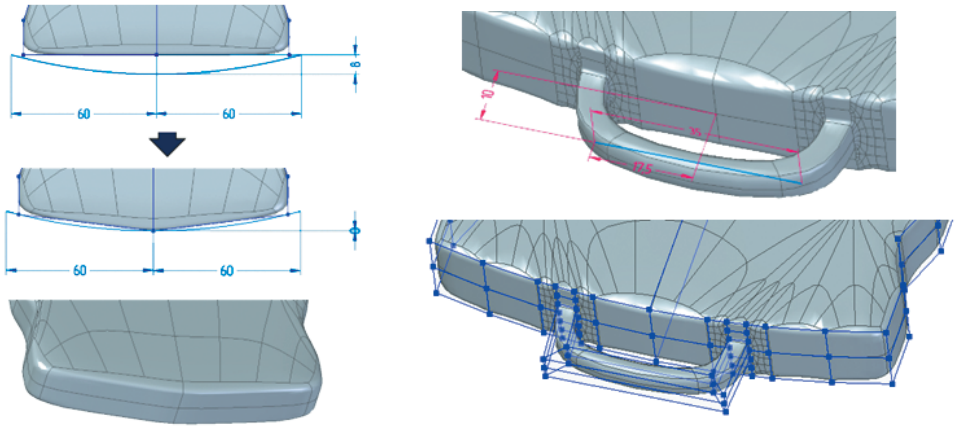


Рис. 1.39. Создание буртика вокруг дисплея с помощью разбиения сегментов со смещением и подъемом

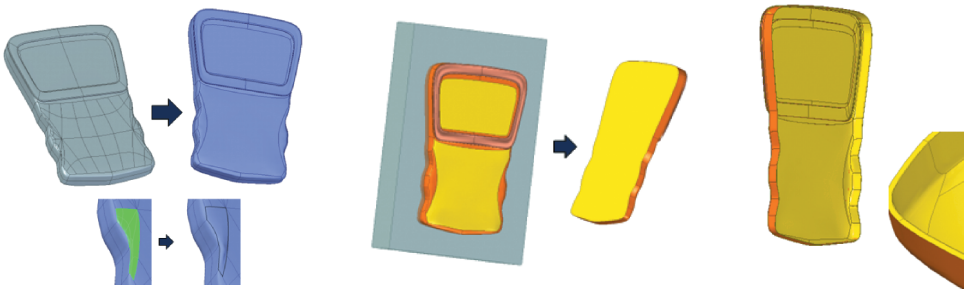
оболочки выполняется с помощью простой булевой операции вычитания из результирующего тела инструмента-параллелепипеда с заведомо бóльшими габаритами, построенного таким образом, чтобы грань параллелепипеда совпадала с плоскостью раздела корпуса на крышку и основание (рис. 1.41, *б*). Можно также выполнить цветовое выделение граней. Завершает этап выделения корпусной детали формирование тонкостенного тела заданной толщины (рис. 1.41, *в*).

Дальнейшая модификация полученной 3D-модели, как уже упоминалось, может проводиться разными методами. Рассмотрим некоторые при-



а *б*

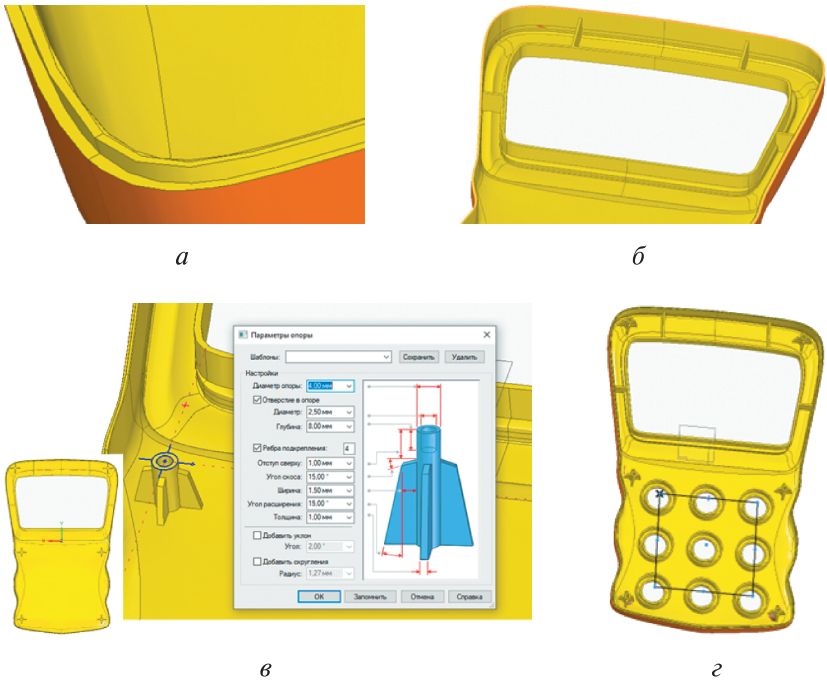
Рис. 1.40. Внесение незапланированных изменений в конструкторский замысел с помощью подстройки формы грани под эскизную кривую (*а*) и выполнения проушины по эскизной кривой (*б*)



а *б* *в*

Рис. 1.41. Выделение корпусной детали из тела свободной формы: устранение кусочных поверхностей (*а*); булева операция вычитания (*б*); формирование тонкостенного тела (*в*)

меры применения традиционного инструментария твердотельного параметрического моделирования (рис. 1.42). Так, с помощью команды «Кромка» формируется паз под соединение с ответным выступом основания корпуса (рис. 1.42, *а*); с помощью команд «Вырез», «Выступ» и «Сетка ребер» создаются элементы обрамления дисплея, служащие для его крепления и обеспечения жесткости (рис. 1.42, *б*), формируется массив опор с подкреплением (рис. 1.42, *в*), а также массив элементов обрамления кнопок (рис. 1.42, *г*). Следует отметить, что применение подобного инструментария непосредственно после выделения корпусной детали из тела свободных форм не требует дополнительных промежуточных преобразований.



а *б* *в* *г*

Рис. 1.42. Дальнейшая модификация полученной 3D-модели традиционными методами твердотельного параметрического моделирования: формирование паза (*а*); создание элементов обрамления дисплея (*б*); формирование массива опор с подкреплением (*в*); формирование массива элементов обрамления кнопок (*г*)

Окончательный результат моделирования представлен на рис. 1.43. Полученную модель можно:

– доработать с помощью методов обратного инжиниринга/объединенного моделирования;

– параметризовать/назначить размеры;

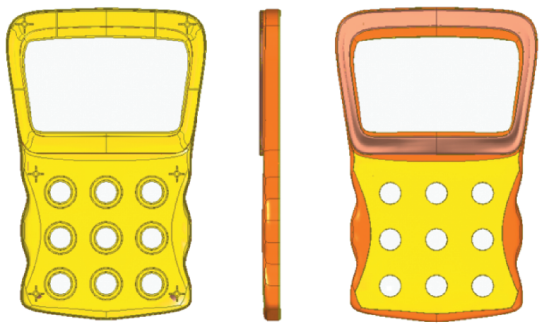


Рис. 1.43. Окончательный результат моделирования

– передать в среду создания чертежей;
– передать в модуль проектирования пресс-форм/электродов;
– передать в модуль подготовки аддитивного производства.

Применение обратного инжиниринга оправдано на завершающих этапах проектирования, когда необходимо извлечь из модели аналитические поверхности, продлить/обрезать их до пересечения, сшить образовавшуюся оболочку и получить полноценное твердое (BREP) тело. Следует отметить, что современные возможности объединенного моделирования позволяют достаточно эффективно работать с фасетной геометрией традиционными методами, универсальными как для твердотельной, так и для фасетной геометрии, поэтому использование обратного инжиниринга, возможно, имеет смысл в ряде случаев ограничить исключительно преобразованием сетки в целях обеспечения лучшей пригодности модели к выполнению расчетов в среде инженерного анализа конструкций.

Проанализировав предложенный подход, можно выделить следующие его достоинства:
– упрощение и ускорение процесса проектирования;
– независимость относительно целевого назначения модели;
– возможность свободного управления формой;
– возможность внесения незапланированных изменений в конструкторский замысел;
– доступность традиционных методов моделирования;
– возможность организации сквозной цепочки конструкторско-технологического проектирования.

Среди недостатков подхода можно отметить невозможность прямой параметризации клетки, а также получение результата в виде фасетной модели, которой присущ ряд ограничений в рамках выполнения объединенного моделирования.

Описанный подход позволяет ускорить и упростить процесс моделирования сложных корпусных деталей, предоставляя возможность уточнять конструкторский замысел в процессе проектирования. Дальнейшая обработка модели возможна с помощью традиционных методов проектирования. Подход не привязан к конкретной отрасли и может быть распространен на процессы проектирования деталей с наличием сложных, в том числе дизайнерских, поверхностей. Рекомендуется применять его на предварительных этапах проектирования, при отработке и оценке вариантов конструктивных исполнений деталей.

Тесты к лекции 1.5

1. ***В рамках метода моделирования свободных форм конструктор управляет:***
а) поверхностной геометрией модели;
б) узлами и ребрами клетки, окружающей геометрию модели;
в) отдельными фасетами в составе геометрии модели.

2. ***Для того чтобы эффективно применять метод моделирования свободных форм для проектирования корпусных деталей электронной аппаратуры, необходимо:***

а) подготовить дизайнерские эскизы модели, составив из них ортогональные виды;

б) иметь точные габаритные размеры корпусных деталей с допусками;

в) никаких специальных приготовлений не требуется.

3. ***Дальнейшая модификация 3D-модели, полученной методом моделирования свободных форм, возможна с помощью традиционных методов твердотельного параметрического моделирования:***

а) да, при помощи методов поверхностного моделирования;

б) да, при помощи сочетания методов поверхностного и твердотельного моделирования;

в) да, при помощи сочетания методов поверхностного и твердотельного моделирования, в том числе командами проектирования деталей из пластика.

4. ***Изготовление пресс-формы под деталь, смоделированную методом свободных форм:***

а) возможно;

б) невозможно;

в) возможно, но после преобразования в BREP-модель.

5. ***Окончательный результат моделирования свободных форм можно*** (выберите один или несколько правильных ответов):

а) передать в среду создания чертежей;

б) доработать с помощью методов обратного инжиниринга/объединенного моделирования;

в) параметризовать/назначить размеры.

1.6. БЕСЧЕРТЕЖНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПОДГОТОВКИ КОНСТРУКТОРСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ

Цель лекции — изучение принципов, методов и средств моделеориентированного проектирования по уровням цифровизации, отечественного и зарубежного опыта в области стандартизации бесчертежной технологии подготовки КД; требований к составу электронных моделей детали и сборочной единицы; правил размещения технологических атрибутов на видах 3D-модели.

Одной из важных современных тенденций в автоматизированном проектировании изделий является переход на так называемое моделеориентированное проектирование (англ. MBD — Model Based Definition), в других терминах именуемое «Информация об изделии на основе модели» или «Цифровое описание изделия». Основной смысл такого подхода заключается в том, что вся необходимая для подготовки производства и непосредственно для производства информация закладывается непосредственно в 3D-модель изделия.

Подход базируется на использовании моделей, снабженных технологическими атрибутами (Product & Manufacturing Information, PMI) в форме 3D-аннотаций, ассоциативно связанных с геометрическими объектами этой модели. Это дает возможность сделать 3D-модель главным конструкторским документом и источником данных для изготовления и контроля изделия и позволяет отказаться от чертежа как обязательного документа. Пример набора видов модели с расставленными PMI представлен на рис. 1.44.

Ключевой момент в моделеориентированном проектировании заключается в том, что 3D-модель с PMI должна быть читаемой как человеком, так и машиной с полной автоматизированной прослеживаемостью по процессам.

В модель в виде 3D-аннотаций могут быть заложены и затем считаны оттуда при подготовке производства и контроля:

– размеры с допусками;
– посадки в сборке;
– допуски формы и расположения;
– базовые поверхности;
– резьбовые отверстия и резьбы;
– шероховатости поверхностей;
– таблицы, технические требования, выноски, примечания;
– неразъемные соединения (сварные, паяные, клеевые);
– зоны покрытий;
– позиции в сборке и пр.

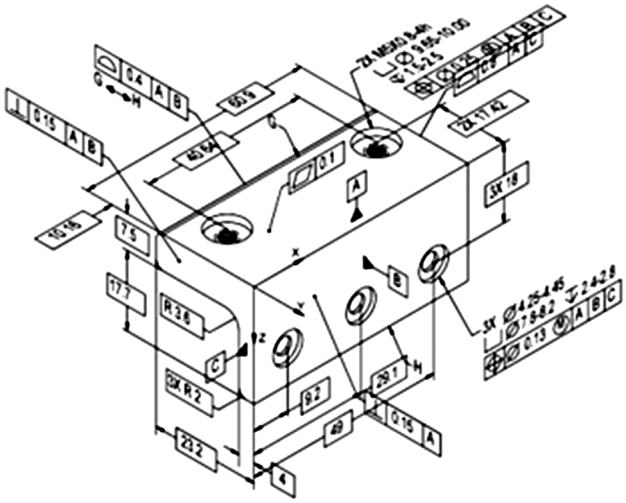


Рис. 1.44. Пример набора видов 3D-модели детали с расставленными PMI

Механизмы цифрового описания изделия позволяют также выполнять различного рода анализы безошибочности проектирования:

– анализ размерных цепей;

– анализ достаточности простановки трехмерных аннотаций для полного описания изделия;

– анализ геометрической целостности на соответствие критериям точности геометрии;

– анализ технологичности изготовления по определенной технологии по специальным алгоритмам.

Условно можно выделить пять уровней развития процессов цифровизации проектирования и производства с последовательным повышением их эффективности (рис. 1.45).

1. **Электронный чертеж (Drawing based)**. На этом уровне происходит замена инструмента проектирования: кульмана на компьютер, но носителем информации по-прежнему является 2D-чертеж.

2. **Электронная модель и чертеж (Model centric)**. Конструктор создает электронную 3D-модель изделия, но все еще выпускает чертежи как привычный узаконенный ЕСКД документ. Информация в технологические, производственные, плановые и другие подразделения передается в виде бумажных чертежей и ведомостей. Компьютерная модель остается нелегитимной. Производительность повышается не более чем на 30%.

3. **Электронная модель с данными для изготовления (Model based definition I)** — первоисточник (узаконенный носитель) конструкторской и технологической информации. Конструктор создает электронную модель изделия, внося в нее в том числе информацию для подготовки производства и контроля в виде 3D-аннотаций.

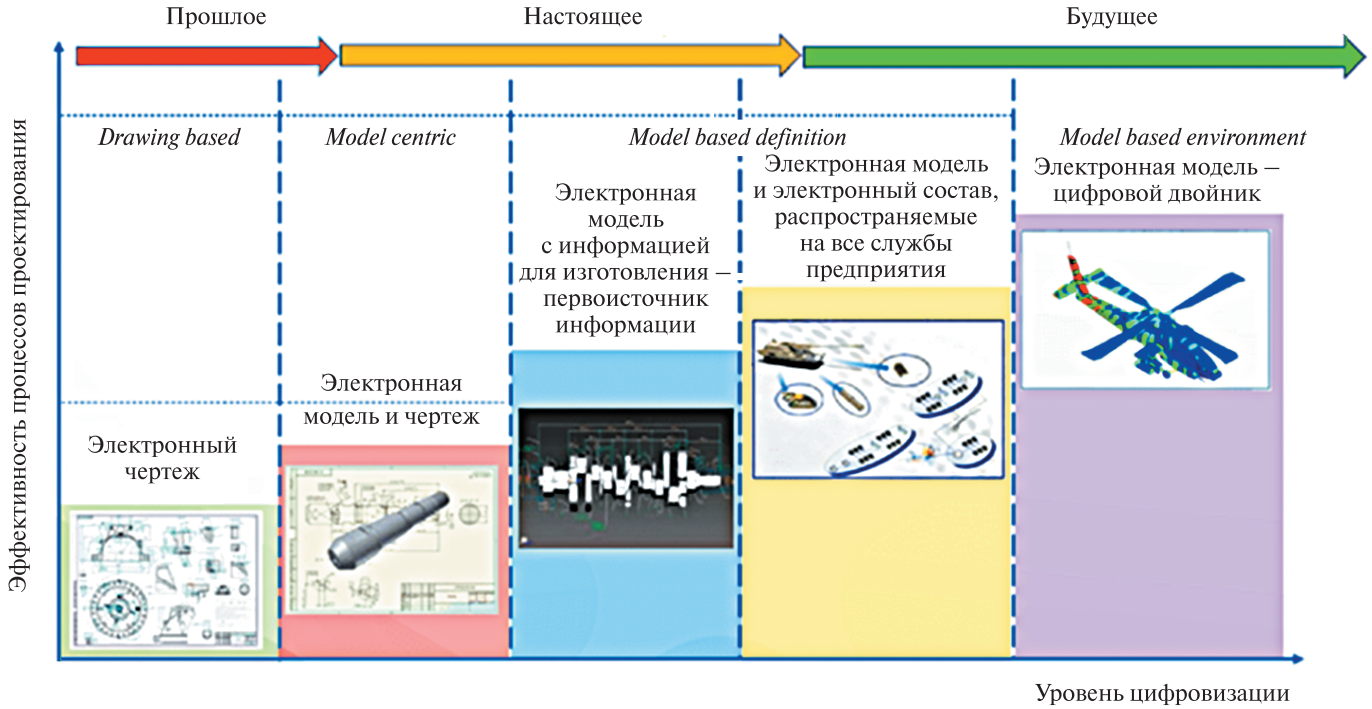


Рис. 1.45. Эффективность процессов проектирования в зависимости от уровня цифровизации

4. **Электронная модель и электронный состав (Model based definition II),** применяемые уже не локально в подразделениях, а **распространяемые на все службы предприятия**, включая склад, сбыт, закупки, комплектацию, сервис, маркетинг. Это существенно экономит время на повторный ввод данных и значительно сокращает число ошибок.

5. **Электронная модель — цифровой двойник (Model based environment)**. Если на предыдущих уровнях компьютерная модель была только «геометрической», то на этом уровне она насыщается физическими характеристиками, что позволяет создать идентичный реальному изделию цифровой двойник в целях проведения виртуальных расчетов и испытаний, а также для моделирования процессов производства. Это кардинально другой, высокоэффективный уровень конструкторско-технологической подготовки производства, обеспечивающий существенное сокращение сроков выпуска изделий на рынок, повышение качества и снижение себестоимости, особенно при выпуске технически сложной продукции.

Здесь важно отметить, что моделеориентированное проектирование — не синоним бесчертежной технологии. Оно не запрещает использование 2D-чертежей, но даже если они используются, то являются вторичными. Главным конструкторско-технологическим документом является 3D-модель с аннотациями (PMI) и физическими характеристиками-атрибутами (рис. 1.46). При необходимости можно в любой момент выпустить чертежи, но с ограниченным периодом годности.

Системы поддержки жизненного цикла изделия (PLM) способны хранить такую документацию, отображать ее в реальном времени авторизованным пользователям, обрабатывать для получения различных отчетов, передавать по этапам производственных процессов, т. е. управлять всем массивом конструкторско-технологических данных.

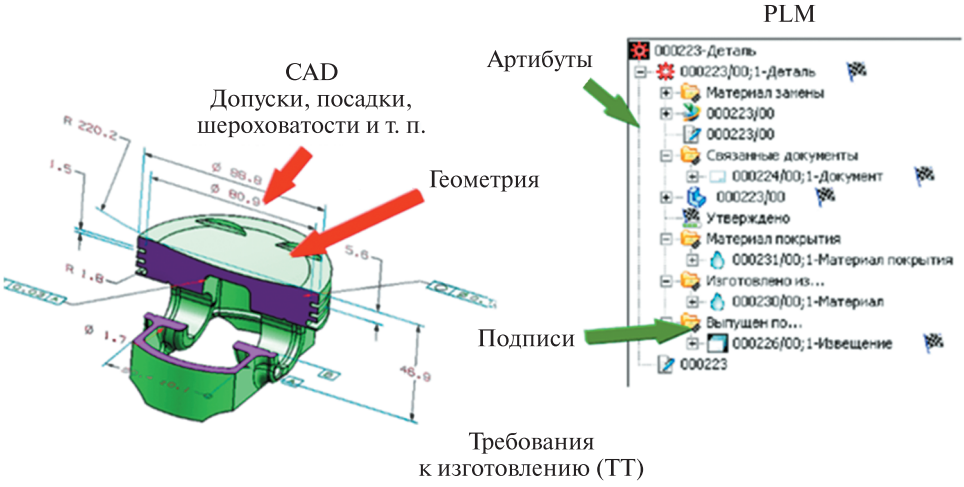


Рис. 1.46. Условное изображение 3D-модели изделия с PMI и атрибутами

Далее 3D-аннотации могут использоваться в следующих процессах:

– передача в технологические документы;

– автоматическое программирование станков с ЧПУ для ряда задач;

– автоматическое формирование контрольных характеристик для планов контроля качества;

– автоматическое программирование координатно-измерительных машин (КИМ).

В настоящее время принят ряд отечественных стандартов, нацеленных на использование 3D-модели как законного и главного конструкторско-технологического документа. Среди таких стандартов можно выделить следующие:

– ГОСТ 2.102–2013 ЕСКД. Виды и комплектность конструкторских документов;

– ГОСТ 2.051–2023 ЕСКД. Электронная конструкторская документация;

– ГОСТ 2.052–2021 ЕСКД. Электронная модель изделия;

– ГОСТ 2.053–2013 ЕСКД. Электронная структура изделия;

– ГОСТ 2.054–2013 ЕСКД. Электронное описание изделия;

– ГОСТ 2.055–2014 ЕСКД. Электронная спецификация;

– ГОСТ 2.056–2021 ЕСКД. Электронная модель детали;

– ГОСТ 2.057–2019 ЕСКД. Электронная модель сборочной единицы;

– ГОСТ 2.058–2016 ЕСКД. Правила выполнения реквизитной части электронных конструкторских документов.

Краткое описание назначения данных стандартов приведено в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Стандарты РФ в области подготовки бесчертежной КД

Наименование	Описание
ГОСТ 2.102–2013 ЕСКД. Виды и комплектность конструкторских документов	Введены понятия электронной модели детали, электронной модели сборочной единицы, электронной структуры изделия. Эти документы определяются как обязательные в комплекте основной КД на стадии разработки рабочей КД. Требования к данным документам описаны в ГОСТ 2.056–2021, ГОСТ 2.057–2019, ГОСТ 2.053–2013
ГОСТ 2.051–2023 ЕСКД. Электронная конструкторская документация	Установлены общие требования к выполнению электронных КД. Приведено описание частей электронного документа и видов электронных документов. Декларируется, что КД в принципе можно разрабатывать, согласовывать, учитывать и хранить в электронном виде
ГОСТ 2.052–2021 ЕСКД. Электронная модель изделия	Установлены общие требования к выполнению электронных моделей изделия (деталей и сборочных единиц). Определены основные понятия и термины компьютерного моделирования, виды электронных моделей изделия

Окончание табл. 1.1

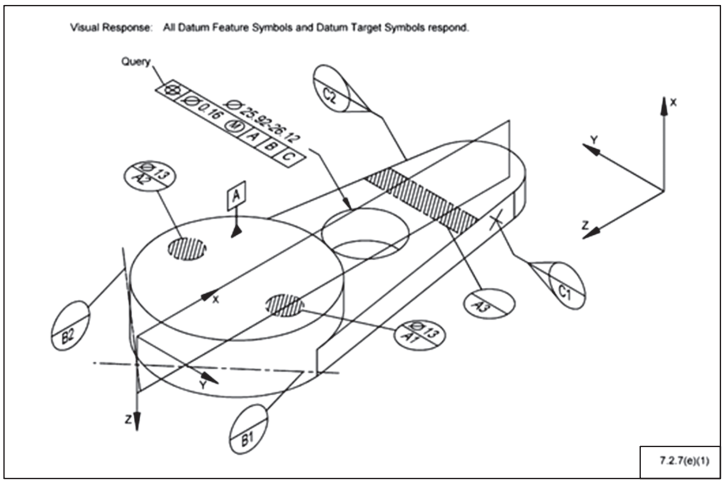
Наименование	Описание
ГОСТ 2.053–2013 ЕСКД. Электронная структура изделия	Установлены общие требования к электронной структуре изделия (ЭСИ). На основе ЭСИ формируются отчеты по изделию, которые традиционно в бумажном варианте выполнялись в виде спецификаций и ведомостей
ГОСТ 2.054–2013 ЕСКД. Электронное описание изделия	Определены понятия об информационных технических системах (PLM, PDM и др.), с помощью которых можно вести хранение, учет и описание электронной КД
ГОСТ 2.055–2014 ЕСКД. Электронная спецификация	Определены понятия электронной спецификации и сводных ведомостей, параметры хранения содержательной части с использованием PDM-систем
ГОСТ 2.056–2021 ЕСКД. Электронная модель детали.	Установлены некоторые требования к выполнению и оформлению моделей деталей и представлению их с помощью CAD-систем, дополняющие требования ГОСТ 2.052–2021
ГОСТ 2.057–2019 ЕСКД. Электронная модель сборочной единицы	Установлены некоторые требования к выполнению и оформлению моделей сборочных единиц и представлению их с помощью CAD-систем, дополняющие требования ГОСТ 2.052–2021
ГОСТ 2.058–2016 ЕСКД. Правила выполнения реквизитной части электронных конструкторских документов	Установлены правила выполнения в электронной форме реквизитной части электронных КД на изделия машиностроения и приборостроения. На его основе допускается при необходимости разрабатывать стандарты, учитывающие особенности выполнения реквизитной части электронной КД на изделия конкретных видов техники в зависимости от их специфики

В числе недостатков указанных стандартов можно отметить малый объем примеров оформления электронных моделей изделий, снабженных 3D-аннотациями (PMI). Примеры таких построений можно найти в ряде зарубежных стандартов, среди которых:

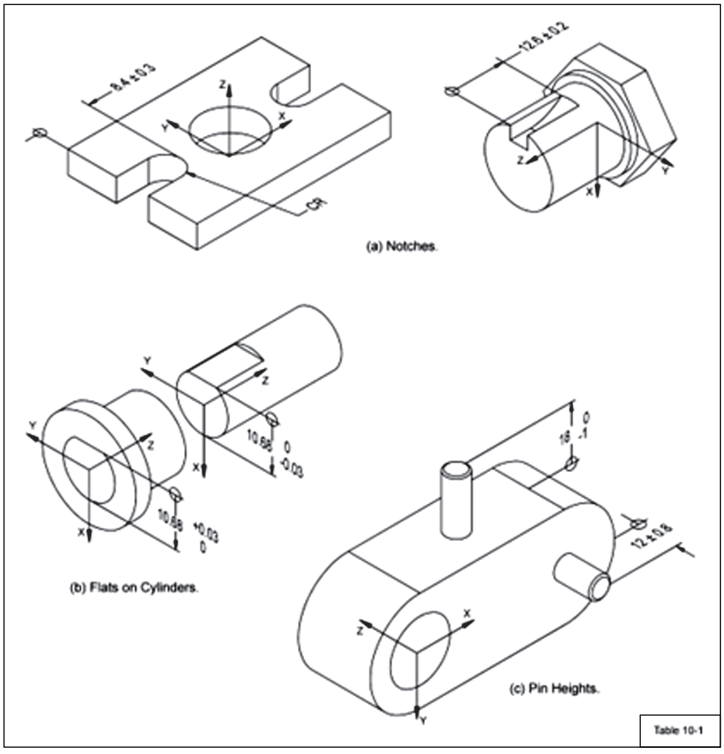
– ASME Y14.41 — 2019 Digital Product Definition Data Practices;
– ASME Y14.47 — 2023 Model Organization Practices;
– ASME Y14.5 — 2018 Dimensioning and Tolerancing.

Несколько взятых из стандарта ASME Y14.41 примеров приведены на рис. 1.47.

Отечественные компании, поставляющие и внедряющие ПО для проектирования и производства, ведут дополнительную работу над стандартизацией в области цифрового описания изделий, расширяя тем самым наполнение и возможности стандартов ЕСКД. В качестве примеров таких работ можно, в частности, выделить документы, разработанные группой компаний «PLM Урал». Приведенные в этих и подобных документах практические рекомендации могут существенно облегчить конструктору работу по правильному оформлению цифровой модели изделия. Далее приведем

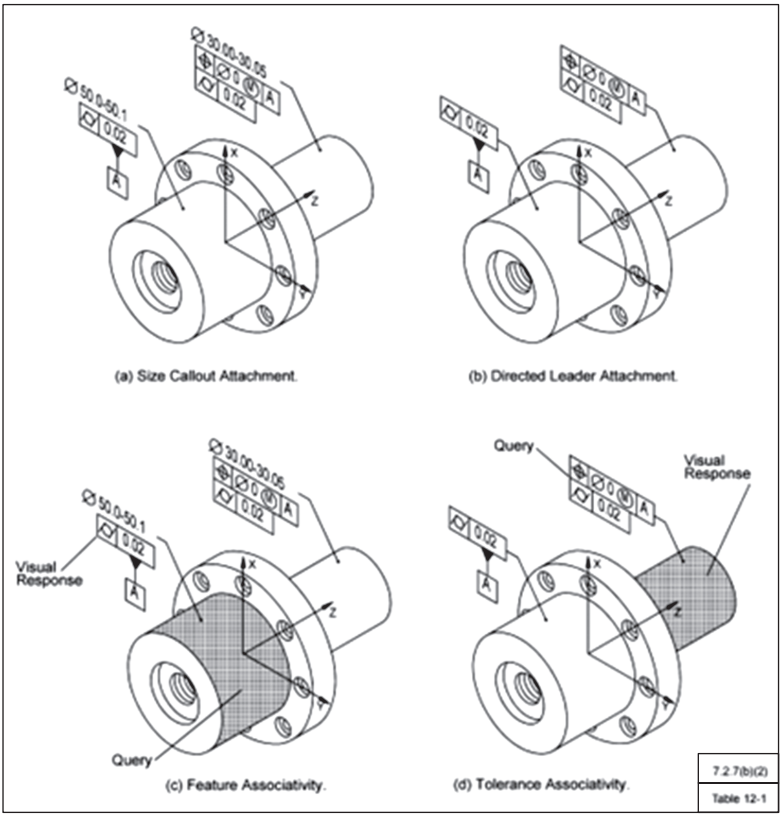


а



б

Рис. 1.47 (начало). Примеры оформления 3D-моделей изделий, согласно стандарту ASME Y14.41: представление и размещение символов баз (*а*); размещение и присоединение размеров (*б*)



в

Рис. 1.47 (окончание). Примеры оформления 3D-моделей изделий, согласно стандарту ASME Y14.41: задание геометрических допусков формы и расположения (*в*)

наиболее важные из этих рекомендаций и требований. Так, существенное внимание следует уделять правильному расположению плоскости обозначений и указаний (ПОУ) (рис. 1.48).

Рассмотрим оформление электронной модели изделия (ЭМИ), которая состоит из геометрической 3D-модели изделия, произвольного необходимого количества атрибутов и технических требований к изготовлению и контролю в виде 3D-аннотаций, ассоциированных с моделью в модельном пространстве (рис. 1.49).

К электронной модели изделия как к электронному документу предъявляют ряд требований и условий. Перечислим наиболее существенные из них:

– все номинальные значения размеров должны определяться из геометрической модели, т. е. каждая точка геометрии ЭМИ должна быть определена в выбранной системе измерения;

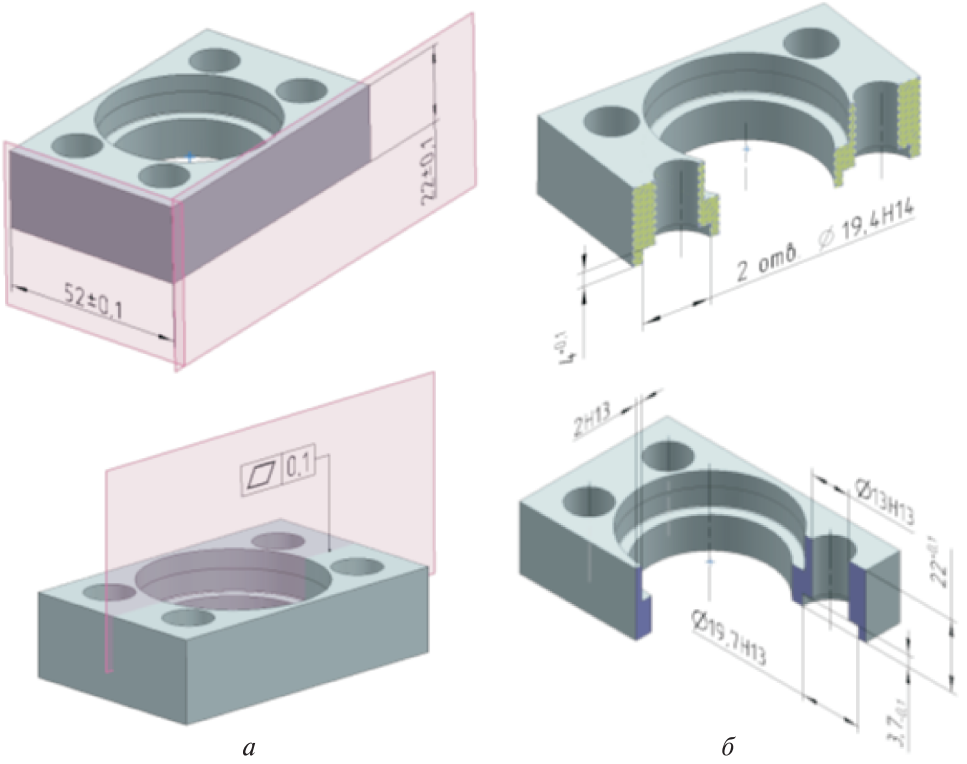


Рис. 1.48. Примеры расположения ПОУ: совпадающая с гранью или перпендикулярная ей (*а*) и образованная сечением детали одной или несколькими плоскостями (*б*)

– 3D-аннотации, выполненные в модели, должны быть необходимыми и достаточными для указанной цели выпуска ЭМИ (например, для изготовления и контроля изготовления изделия);

– если в геометрии ЭМИ и 3D-аннотациях, ассоциированных с моделью, не содержатся все необходимые данные, то недостающие данные должны быть указаны в технических требованиях (например: «Маркировать заводской номер с внутренней стороны корпуса по ТУ...»);

– в ЭМИ допускается включать ссылки на стандарты и технические условия, если они полностью и однозначно определяют соответствующие требования. Допускается давать ссылки на технологические инструкции, когда требования, установленные этими инструкциями, являются единственными, гарантирующими требуемое качество изделия. Данные ссылки размещаются в технических требованиях;

– не допускается давать ссылки на нормативные документы, определяющие форму и размеры конструктивных элементов (отверстий, фасок, канавок и т. п.), если в этих документах нет геометрического описания этих элементов. В этом случае все данные для изготовления должны быть приведены в ЭМИ;

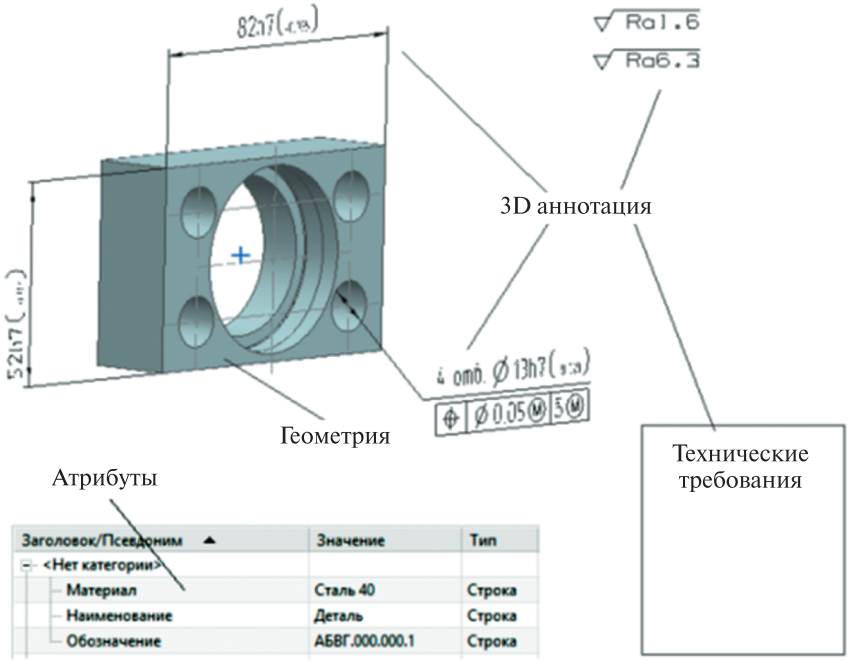


Рис. 1.49. Оформление ЭМИ

– допускается включать ссылки на документы другого вида в технические требования ЭМИ при условии, что ссылочный документ выполнен в электронной форме. При передаче КД другому предприятию эти документы должны быть включены в комплект КД на изделие. Комплектность КД определена ГОСТ 2.102–2013 «Единая система конструкторской документации. Виды и комплектность конструкторских документов».

К читаемости PMI человеком и расположению 3D-аннотаций также предъявляется ряд требований. Наглядность должна обеспечиваться таким образом, чтобы при различной ориентации модели все PMI сохраняли читаемость (рис. 1.50).

Электронная модель детали (ЭМД) на стадии создания рабочей конструкторской документации (РКД) должна содержать:

– технические требования к изготовлению и контролю;

– обозначения классов точности размеров и их отклонений, допусков размеров;

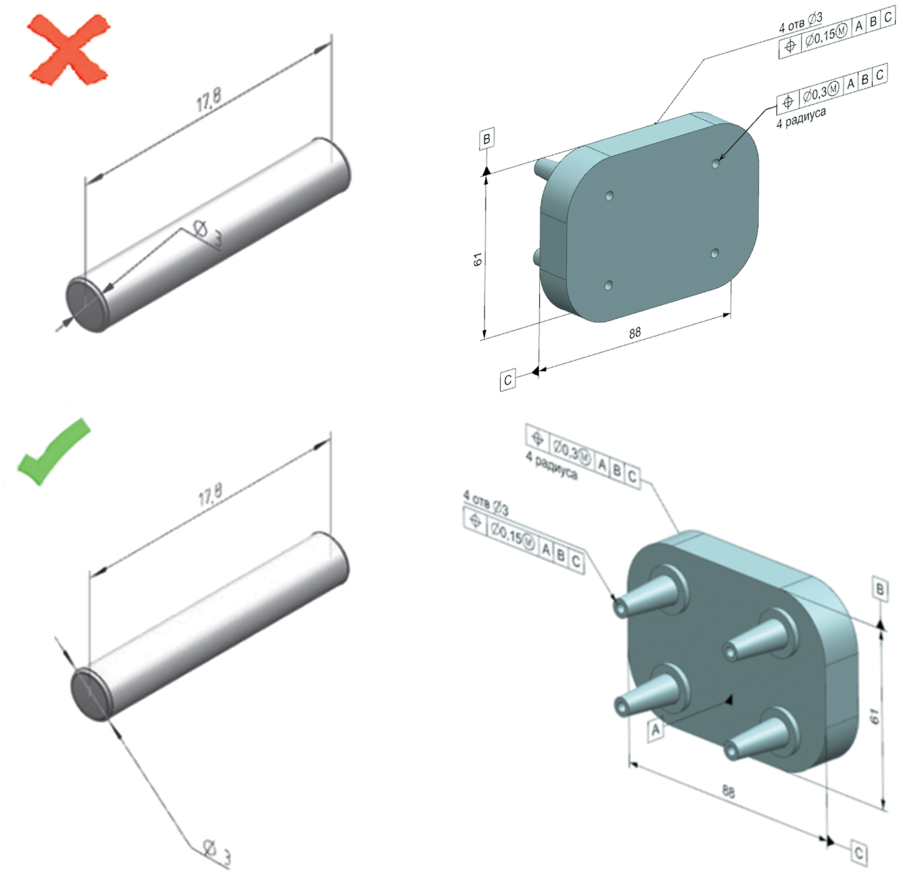
– обозначения шероховатости поверхностей;

– обозначения допусков формы и расположения;

– обозначения базовых поверхностей;

– обозначения стандартизованных элементов при их наличии (подсечек, выштамповок);

– обозначения покрытий;



а *б*

Рис. 1.50. Реализация требований к наглядности расположения 3D-аннотаций (*а*) и читаемости 3D-аннотаций при повороте модели (*б*)

– обозначения резьб;
– указания зон термообработки и покрытий;
– указания о клеймении и маркировке;
– другие данные (при необходимости).

Основные требования к ЭМД:

– ЭМД следует выполнять по номинальным (без допусков) размерам в масштабе 1:1;

– конечная форма ЭМД на стадии РКД должна быть представлена одним твердым телом;

– моделирование технологических припусков в ЭМД не допускается;

– в процессе разработки на ранних этапах проектирования ЭМД может содержать ассоциативные ссылки на пограничные (соседние) ЭМД

и размеры, определяющие их взаимное расположение («контекст»). При этом следует обеспечить условие: в разработанную ЭМД на этапе РКД изделия «контекст» входить не должен;

– ЭМД, геометрия которых зависит от базовой геометрии и окружающего «контекста», необходимо выполнять в системе координат изделия;

– ЭМД, геометрия которых не зависит от базовой геометрии и окружающего «контекста», могут выполняться в собственной (рабочей) системе координат;

– на стадии оформления РКД ЭМД должна содержать все конструктивные элементы, включая фаски, скругления и т. д. На этой стадии ЭМД должна быть снабжена 3D-аннотациями, необходимыми и достаточными для ее изготовления;

– в ЭМД допустимо упрощенное представление частей модели типа резьбовых отверстий, резьб, лент, пружин и др. с использованием частичного определения геометрии модели, ее атрибутов или их комбинации;

– в ЭМД указываются все размеры с классом точности и допусками. Размеры без указания предельных отклонений, определенных в технических требованиях, показывать не требуется;

– для указания технических требований следует использовать 3D-аннотации типа текстовых заметок.

Размещают 3D-аннотации на создаваемых видах модели, которые можно при необходимости сочетать с разрезами и сечениями (рис. 1.51).

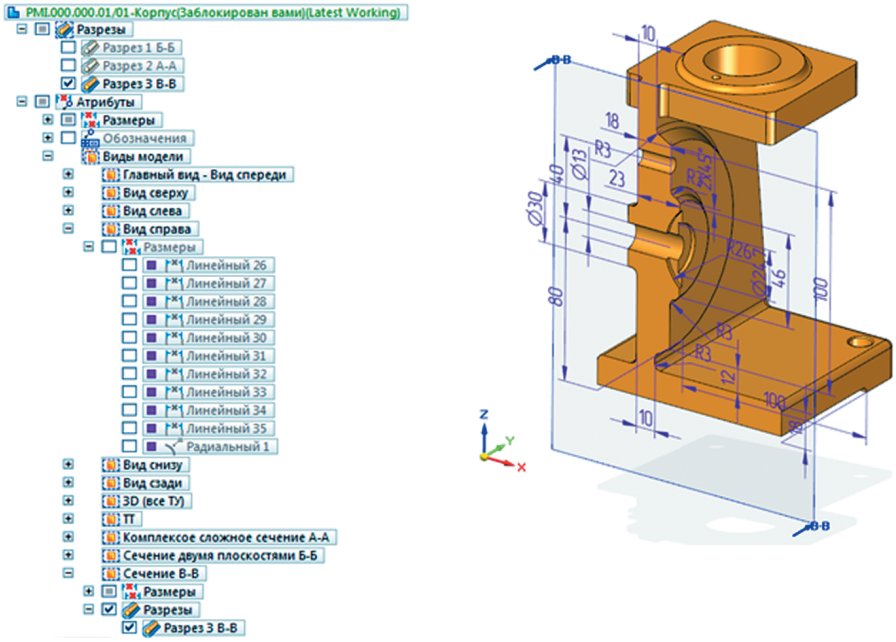


Рис. 1.51. Пример ЭМД с разрезом

Далее в иерархии располагается электронная модель сборочной единицы (ЭМСЕ), являющаяся объектом верхнего уровня по отношению к комплекту ЭМД и электронной структуре изделия (ЭСИ) (рис. 1.52).

Пример ЭМСЕ с обозначением позиций представлен на рис. 1.53.

Основные требования к ЭМСЕ:

– в ЭМСЕ должны быть заданы необходимые базы, оси, привязочные плоскости для позиционирования составных частей изделия (СЧ);

– без привязки к системе координат изделия с последующим позиционированием в ЭМСЕ допускается выполнять электронные модели покупных

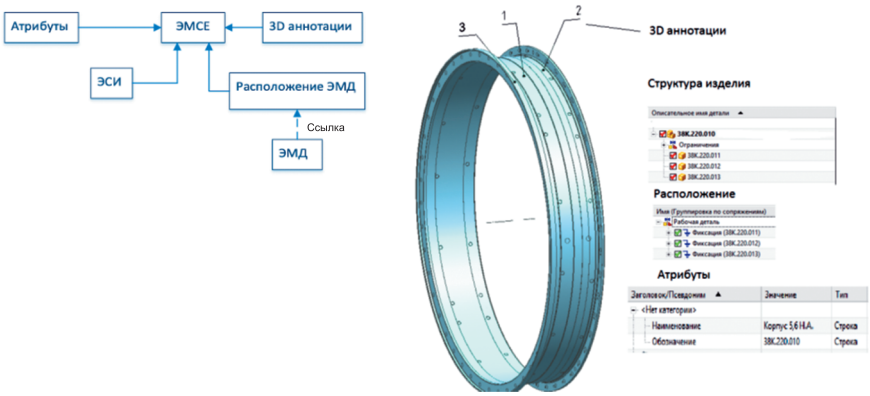


Рис. 1.52. Представление ЭМСЕ

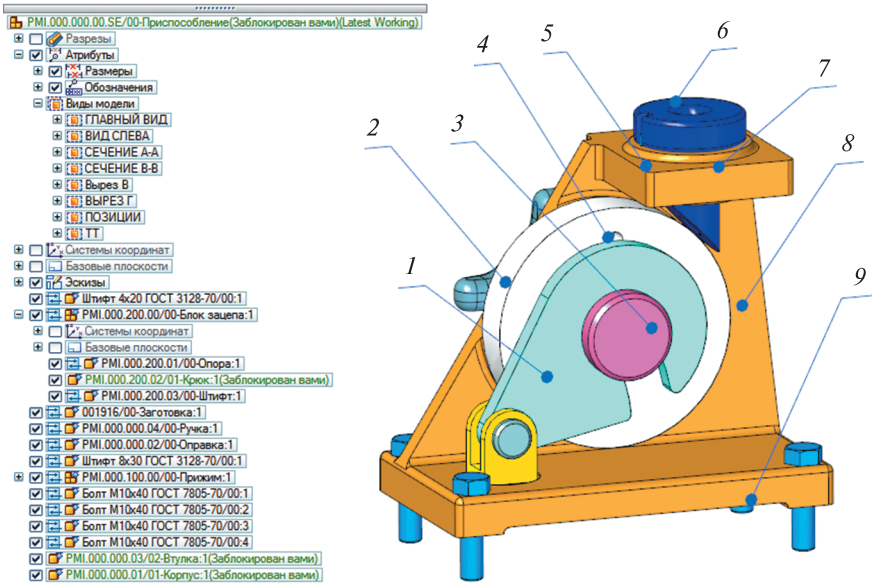


Рис. 1.53. Пример ЭМСЕ с обозначением позиций

(в том числе стандартных) деталей (например, крепежных изделий) и деталей, выполняемых без привязки к расчетным (теоретическим) плоскостям и осям разрабатываемой сборочной единицы;

– добавление элементов окружающей геометрии в ЭМСЕ рекомендуется выполнять в виде ссылочных копий окружающих ЭМИ либо в виде их части, создаваемой методом ассоциативного копирования геометрии;

– ЭМСЕ не должны содержать элементов геометрии, кроме объектов окружающей и ссылочной геометрии. Наличие отдельных твердых тел основной геометрии в файле ЭМСЕ недопустимо;

– в ЭМСЕ компоненты должны быть зафиксированы или полностью сопряжены. Исключение составляют элементы механизмов, степень свободы которых определена конструкцией;

– после позиционирования всех ЭМД в модельном пространстве ЭМСЕ разработчик должен проверить пересечения СЧ ЭМСЕ;

– слой герметика, клея и заполнителя толщиной до 0,3 мм, а также покрытия из смазки, лакокрасочных и других материалов толщиной до 0,1 мм в ЭМСЕ моделировать не следует. При этом позиционирование деталей, подбор длины крепежных изделий и т. д. выполняются с учетом размеров зазоров между деталями и толщины слоя не моделируемого материала. В состав ЭСИ материал включается через PDM-систему;

– если материалы в ЭМСЕ принимают форму, влияющую на расположение и увязку деталей, или их толщина более 0,1 мм для клея, смазки, лакокрасочных покрытий и более 0,3 мм для заполнителей, контровочной проволоки и т. п., то они должны представляться в виде ЭМ.

В составе 3D-аннотаций ЭМСЕ должна быть представлена следующая информация:

– установочные и присоединительные размеры;

– габаритные размеры;

– размеры и классы точности, посадки, необходимые для сборки;

– размеры, достигаемые при регулировке, настройке, юстировке;

– размеры, необходимые для увязки проектируемой конструкции с конструкцией вышестоящих сборок, агрегатов и устанавливаемым оборудованием, если необходимо;

– виды выполняемых соединений (в том числе неразъемных; например, сварных, паяных, клееных);

– массо-инерционные и массо-центровочные характеристики сборочной единицы;

– технические требования;

– позиционные обозначения СЧ ЭМСЕ;

– значения шероховатости поверхностей, обрабатываемых при сборке;

– зоны обработки и нанесения покрытий;

– клеймение и маркировка сборочной единицы.

В качестве формата данных в 3D-аннотациях активно используется 3D PDF. При цифровом описании модели в данном формате возникают дополнительные возможности:

– создавать, редактировать, хранить и использовать шаблоны публикации 3D PDF;

– передавать в 3D PDF PMI (техническими условиями (ТУ)) и виды 3D-модели с PMI;

– создавать 3D PDF с машиночитаемыми PMI (ТУ) согласно протоколу STEP AP242;

– опционально сохранять дополнительные документы (требования, JT или STEP файлы);

– выпускать электронную КД, согласно промышленным стандартам (MIL-STD-31000A, ASME 14.41, ГОСТ 2.051...058).

Пример страницы документа в формате 3D PDF со структурой изделия, видами изделия с 3D-аннотациями, а также техническими требованиями представлен на рис. 1.54.

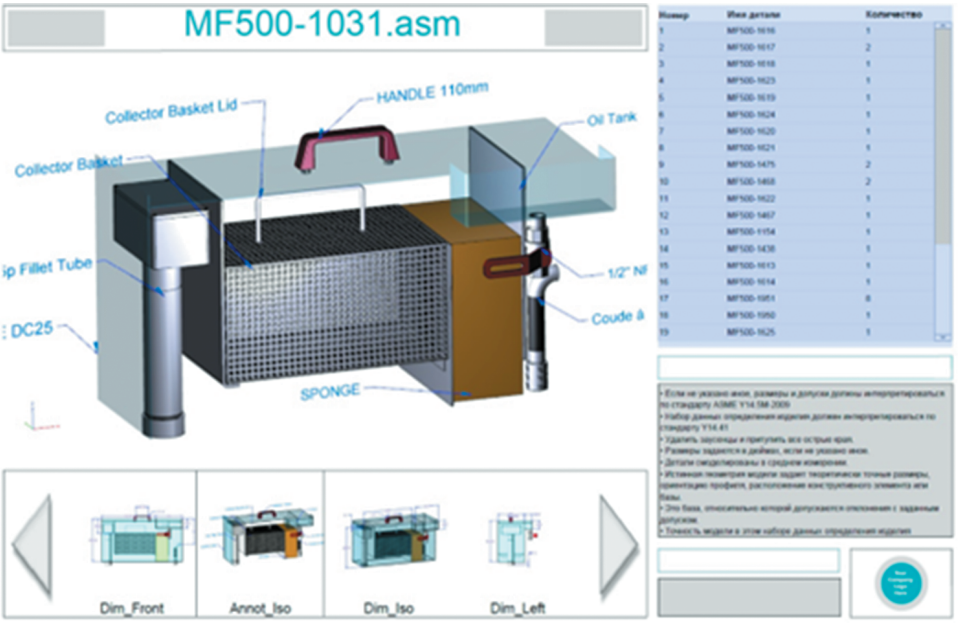


Рис. 1.54. Пример страницы документа в формате 3D PDF

В дальнейшем в задачах технологической подготовки производства (ТПП) цифровое описание изделий можно применять следующим образом. Разработка технологии в электронном виде использует электронную модель технологической операции (ЭМТО) путем ассоциативного копирования геометрии и необходимых PMI с конструкторской модели. Нанесенные на конструкторскую модель или ЭМТО PMI можно использовать в тексте перехода. Если эти параметры в дальнейшем необходимо контролировать, у них ставится соответствующий признак и под операцией создается контролируемый параметр в отдельном объекте, который в дальнейшем можно передавать в другие системы, например в систему управления качеством (QMS).

В итоге формируется комплект технологической документации, созданный эскиз из ЭМТО попадает в карту эскизов, а контролируемые параметры — в операционную карту контроля.

После того как подготовлена КД и сформирован техпроцесс, задача инженера по качеству или технолога — скомпоновать перечень значимых параметров, которые будут подвергаться контролю в процессе производства и после него (составить планы контроля для производства). Решение этой задачи может облегчить работа с 3D-моделями, на которые нанесены PMI (3D-аннотации). Атрибуты 3D-аннотаций используются для формирования списка характеристик, который далее входит в инструкции плана испытаний. Соответствующий графический эскиз может выводиться в карту контроля. Этот функционал распространяет подходы безбумажного проектирования на стадию производства.

С помощью подсистемы управления качеством в составе систем поддержки жизненного цикла изделий можно спланировать контроль на основе электронного состава изделия и технологии, а также данных 3D-модели. Посредством ручного ввода или связки с автоматизированными средствами измерений можно собрать данные, далее проанализировать неудовлетворительные значения параметров, определить причины и разработать мероприятия по их устранению, таким образом реализовав известный в области качества цикл PDCA (Plan-Do-Check-Act — планирование–действие–проверка–корректировка). При этом все данные будут привязаны к параметрам, изначально взятым из 3D-модели.

Как показала практика, снабжение модели изделия полным набором 3D-аннотаций вместо нанесения их на чертеж может вместо ожидаемого эффекта увеличения производительности, напротив, увеличить трудоемкость подготовки производства.

Для получения положительного эффекта от использования 3D-аннотаций следует оптимизировать как объем, так и тип наносимой информации, а также обеспечить ее считывание не только человеком, но и машинными способами.

Отсюда и появились подходы, развивающие моделеориентированное проектирование до уровня моделеориентированного предприятия (MBE) (рис. 1.55).

В качестве примера оценки трудоемкости можно привести исследование «THE ROI OF MBD», в рамках которого были оценены четыре варианта организации выпуска КД на предприятии.

1. ВЫПУСК ЧЕРТЕЖЕЙ С АННОТАЦИЯМИ — трудоемкость 8,8 ч (базовая оценка для сравнения с другими способами).

2. ПЕРЕХОД от модели К ЧЕРТЕЖУ С МИНИМАЛЬНЫМ ЧИСЛОМ АННОТАЦИЙ — трудоемкость 5,2 ч.

Недостаток: 2D-чертеж, экспортированный или сохраненный в нейтральном или другом формате, можно отредактировать без обновления 3D-модели. Такой подход приводит к различию в определениях 3D-модели и 2D-чертежа и дорогостоящим ошибкам в процессе производства. Переход

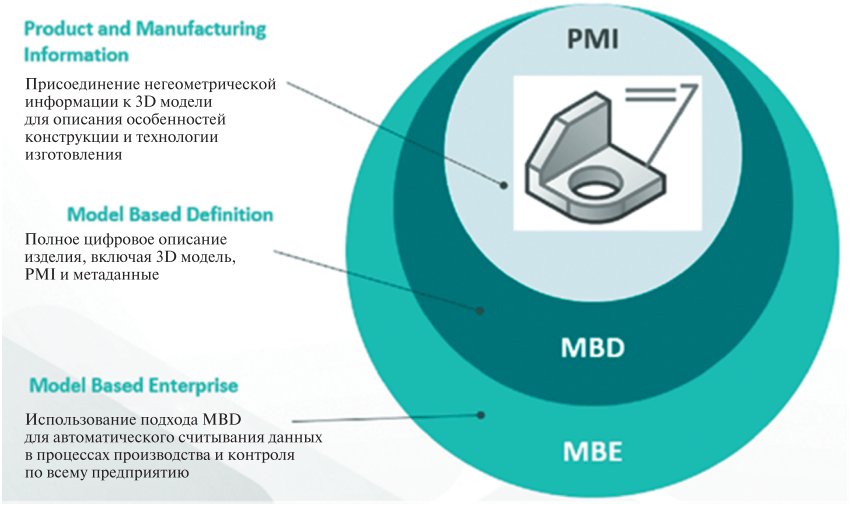


Рис. 1.55. Расширение концепции моделеориентированного проектирования на предприятие в целом

выгоден только проектным отделам, поскольку сокращает время на создание инженерной документации, но для компании данный подход выгоды не приносит.

3. ВЫПУСК 3D-МОДЕЛЕЙ С АННОТАЦИЯМИ при сохранении подхода как к чертежу — трудоемкость 11,7 ч. Почему создание 3D-модели с аннотациями занимает больше времени по сравнению с созданием чертежа? Разработка определения изделия на основе модели является более сложным процессом (необходимо ориентировать размеры и допуски на представлениях плоскостей, сгруппировать их в наборы, которые можно скрыть). Недостаток: вероятность осуществления попытки снабдить модель аннотациями так же, как чертеж, что повторяет традиционный способ добавления размеров для точной передачи геометрической формы детали несмотря на то, что геометрия 3D-модели уже выполняет эту функцию. В итоге переход от чертежа с аннотациями к модели с аннотациями выгоден для компании, так как приводит к уменьшению проблем при производстве, но не для проектных отделов, которые затрачивают больше времени на создание такого вида документации.

4. ВЫПУСК 3D-МОДЕЛЕЙ С МИНИМУМОМ АННОТАЦИЙ — трудоемкость 6,7 ч. За счет чего снижается трудоемкость? Теоретически для детали, которая будет обрабатываться на станке с ЧПУ с использованием управляющих программ, автоматически сгенерированных в CAM-программе, аннотировать размеры не нужно. С другой стороны, в некоторых случаях размеры и примечания необходимы и должны быть добавлены в модель. Их тип и количество как раз и определяются технологиями, в которых они используются в дальнейшем. Модель с сокращенным количеством аннотаций выполняет все функции инженерной документации и требует меньше затрат.

Тесты к лекции 1.6

1. ***PMI — это:***

а) цифровая модель изделия;

б) 3D-аннотации, размещаемые на видах модели и ассоциативно связанные с геометрическими объектами этой модели;

в) конструкторский документ в электронном виде.

2. ***В моделеориентированном проектировании использование 2D-чертежей:***

а) не запрещено; если 2D-чертежи используются, то являются вторичными с ограниченным периодом годности;

б) полностью запрещено;

в) 2D-чертеж является главным конструкторским документом наряду с 3D-моделью.

3. ***В перечень требований к составу 3D-аннотаций ЭМСЕ входят*** (выберите один или более правильных ответов):

а) обозначения размеров и классов точности, посадок, необходимых для сборки;

б) технические требования;

в) позиционные обозначения.

4. ***Возможно ли создание 3D PDF документов с машиночитаемыми PMI:***

а) нет, не возможно;

б) да, в рамках протокола STEP AP242;

в) да, в рамках любых действующих протоколов STEP.

5. ***3D-модель с PMI должна быть читаемой:***

а) человеком;

б) машиночитаемой;

в) машиночитаемой с полной автоматизированной прослеживаемостью по процессам.

1.7. МЕТОДЫ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ В ECAD- И MCAD-СИСТЕМАХ

Цель лекции — изучение принципов, методов и средств совместного проектирования электронной и механической частей изделия на примере создания электропроводки с выполнением синхронизации и организации двунаправленного обмена данными между ECAD- и MCAD-системами проектирования.

Важной составляющей проектирования изделий ЭА является создание электропроводки в составе проводных, кабельных и жгутовых соединений. Работа над проектом электропроводки может выполняться в специализированной электротехнической САПР, однако в рамках поддержки жизненного цикла изделий на этапе конструирования важно снабдить конструктора базовым инструментарием создания электрических соединений, а также обеспечить возможность параллельной работы над электрической и механической частями проекта с обменом данными между соответствующими модулями проектирования. Разработчики САПР в настоящее время включают в портфолио своих программных продуктов модули проектирования не только механической, но и электрической/электронной составляющих изделия, обеспечивая бесшовный обмен данными между ними.

Рассмотрим совместную работу над проектом электромеханического изделия на примере модулей САПР Solid Edge. Задачу создания электропроводки в данной системе решают встроенная среда «Электропроводка» (изучается в курсе конструкторского проектирования и подробно рассмотрена в [27]) и на более детальном уровне проработки среда Solid Edge Electrical в составе двух специализированных модулей Wiring/Harness Design.

Модуль Solid Edge Wiring Design представляет собой рабочее место разработчика электрических схем электропроводки и включает в себя инструменты моделирования и валидации, например обрыва цепи или короткого замыкания, падения напряжения, перегрева, вызванного неправильным выбором сечения проводов. С помощью функциональных проверок существует возможность, например, правильно подбирать сечение проводов, определять достаточную площадь сечения жилы. Встроенные проверки правил проектирования позволяют найти и исправить ошибки на ранних стадиях. В систему встроены пополняемые и настраиваемые библиотеки компонентов, условных графических обозначений (УГО) и моделей. В результате можно создавать виртуальные прототипы электрических цепей. Модуль рассчитывает технологические припуски по необходимым предприятию

критериям и генерирует документацию с учетом требований производства. Данный модуль обладает возможностью непосредственного взаимодействия с интерфейсом Active Workspace PLM-системы Teamcenter.

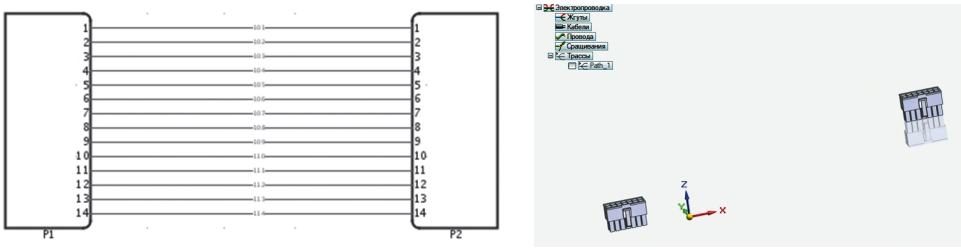
Модуль Solid Edge Harness Design представляет собой рабочее место разработчика КД на кабели и жгуты, в том числе плоские раскладки (плазы) для производства. Модуль включает в себя встроенную интеллектуальную библиотеку с автоматическим выбором деталей и символов (клемм, разъемов, соединителей), инструменты для валидации и составления технологических отчетов для производства (спецификаций, кабельных журналов, таблиц распайки разъемов).

Важной особенностью обоих модулей является их тесная интеграция с конструкторской САПР Solid Edge с поддержкой связанного (синхронного) режима работы с двунаправленным бесшовным обменом и обновлением ECAD/MCAD-данных в реальном режиме времени, что дает возможность обеспечить эффективную параллельную работу инженеров-конструкторов с механической и электрической частями изделия.

Интеграция с Solid Edge позволяет импортировать длины проводов/трубок бандажа и длины/топологию жгутов, разработанные во встроенной среде «Электропроводка» Solid Edge. Выполненная маршрутизация проводки автоматически передается из Solid Edge в модуль Harness Design, и на ее основе конструктор имеет возможность развернуть модель на плоскости и создать двумерное представление жгута.

Итак, рассмотрим процесс совместной работы конструкторов электрической и механической частей изделия в САПР Solid Edge на простом примере, иллюстрирующем основные принципы и этапы процесса.

Допустим, перед нами стоит задача передать электрическую схему проводного соединения двух соединителей (рис. 1.56, *а*) из электротехнической в конструкторскую САПР, где подготовлено конструктивное исполнение данных соединителей (рис. 1,56 *б*) и осуществлена их компоновка в пространстве. Далее необходимо создать жгут и передать обратно в электротехнический модуль конструктивные длины проводов для последующего до-

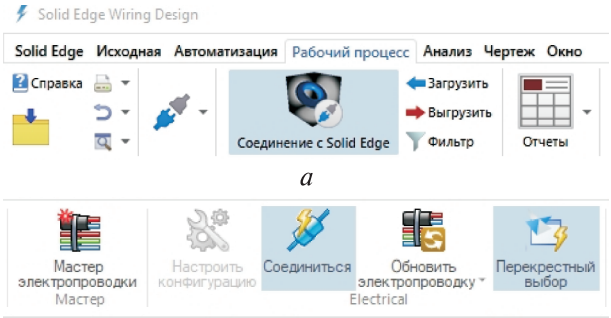


а *б*

Рис. 1.56. Совместная работа в электротехническом и механическом модулях САПР: подготовленная в ECAD-модуле принципиальная схема (*а*); подготовленные в MCAD-модуле модели электрических соединителей (*б*)

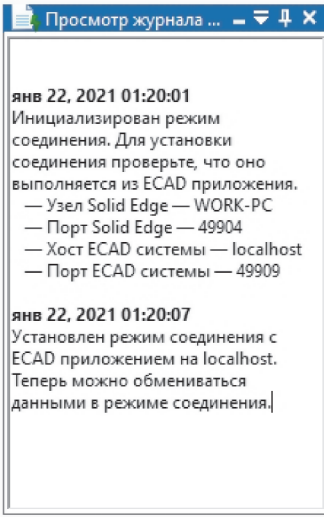
бавления технологических припусков на провисание и обработку и создания спецификации.

В модуле Wiring Design инициируется соединение с Solid Edge с помощью команды «Соединение с Solid Edge» (рис. 1.57, *а*), а в самом Solid Edge данное соединение инициализируется и подхватывается с помощью команды «Соединиться» (рис. 1.57, *б*). Задействованный режим называется режимом соединения («Connected mode»). Этим обеспечивается последующая передача данных между модулями в реальном масштабе времени. Переключатель «Перекрестный выбор» (см. рис. 1.57, *б*) позволяет перекрестно выбирать компоненты электропроводки в MCAD/ECAD-модулях с подсветкой/выделением аналогичного компонента во втором модуле.



а

б

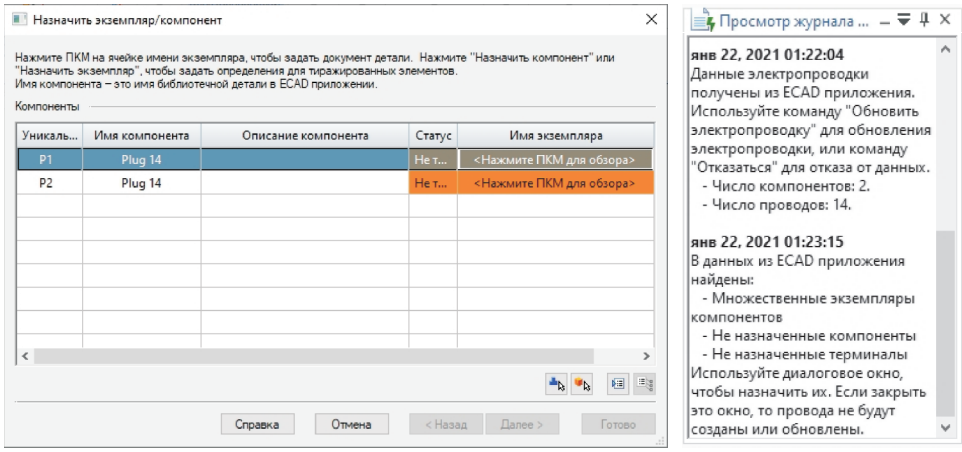


в

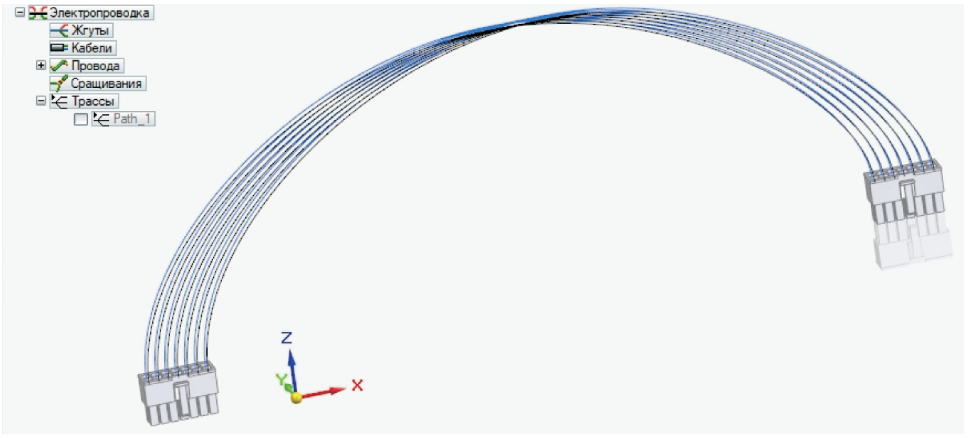
Рис. 1.57. Установка соединения между ECAD/MCAD-модулями САПР: инициация на стороне ECAD-модуля (*а*); инициализация на стороне MCAD-модуля (группа команд Electrical) (*б*); журнал установки соединения (*в*)

Далее происходит процедура выгрузки данных из модуля Wiring Design в Solid Edge с помощью кнопки «Выгрузить» (см. рис. 1.57, *а*). Данные принимаются на стороне MCAD-системы, после чего текущее состояние электропроводки обновляется нажатием кнопки «Обновить электропроводку» (см. рис. 1.57, *б*). Собственно сама передача данных выполняется путем скрытой передачи файлов компонентов и соединений (*.con и *.cmp соответственно), это аналогично работе с мастером электропроводки при его ручном запуске.

Затем в MCAD-системе запускается «Мастер электропроводки» с целью назначения компонентов/терминалов (рис. 1.58, *а*). Результат автоматиче-



а



б

Рис. 1.58. Формирование электропроводки в механическом модуле САПР по данным, полученным из ECAD-системы: окна «Мастера электропроводки» и журнала принятых данных из ECAD-системы (*а*); результат автоматического формирования проводных соединений между разъемами (*б*)

ского формирования проводных соединений между разъемами показан на рис. 1.58, *б*.

Средствами встроенной среды «Электропроводка» Solid Edge формируется жгут из скомпонованных проводов по заданной трассе, создается физическое представление проводов и жгута (рис. 1.59).

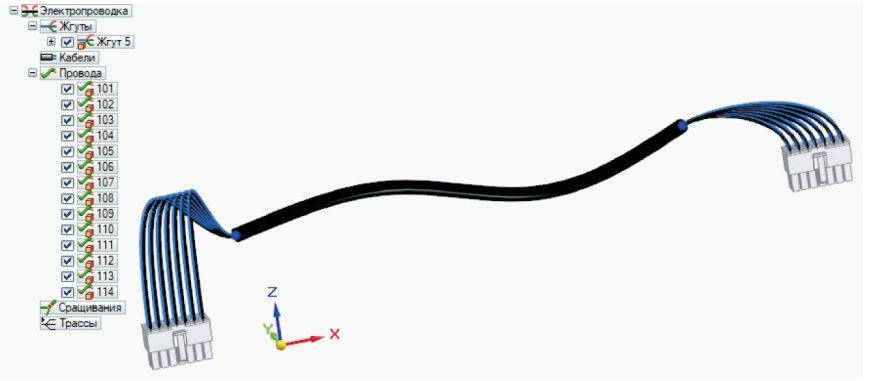


Рис. 1.59. Жгут, сформированный в среде «Электропроводка» MCAD-системы

В завершение выполняется обратный процесс: с помощью кнопки «Загрузить» (см. рис. 1.57, *а*) среды ECAD-модуля выполняется обратная выгрузка сформированных проводников в модуль Wiring Design. Теперь эта среда снабжена информацией о длинах проводов (рис. 1.60), соответствующих их реальному расположению в конструкции устройства. Пользуясь этой информацией, можно назначить припуски и создать спецификацию.

В разделе практических занятий рассмотрен более сложный пример совместной работы с электропроводкой в ECAD/MCAD-системах.

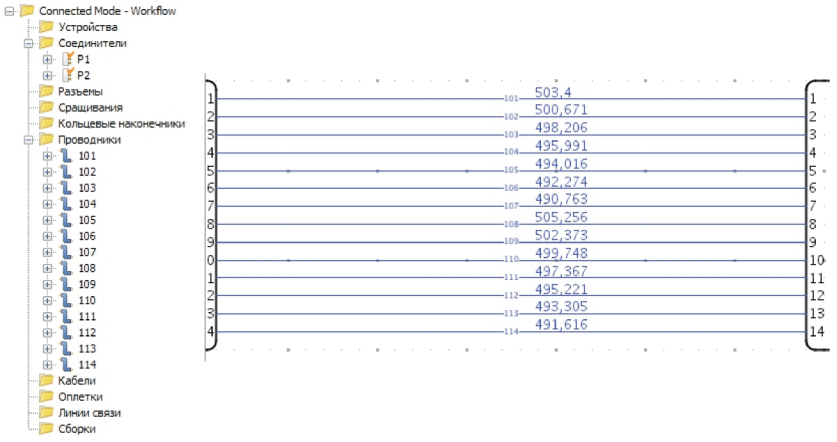


Рис. 1.60. Переданная в ECAD-модуль информация о длинах проводов

Тесты к лекции 1.7

1. ***Задачу создания электропроводки в конструкторских САПР можно решить на уровне:***

а) исключительно встроенной среды;

б) исключительно внешнего модуля/сторонней САПР;

в) взаимодействия встроенной среды и внешнего модуля/сторонней САПР.

2. ***Чтобы организовать параллельную работу конструкторов электрической и механической частей изделия в САПР Solid Edge, необходимо:***

а) задействовать режим соединения модулей Wiring Design и Solid Edge;

б) выгрузить данные из модуля Wiring Design в нейтральный формат и затем загрузить в Solid Edge с преобразованием;

в) такой вид работы возможен только с помощью промежуточного интерфейсного модуля.

3. ***Обратная выгрузка сформированных проводников в модуль Wiring Design:***

а) осуществляется для снабжения информацией о длинах проводов, соответствующей их реальному расположению в конструкции устройства;

б) осуществляется для контроля целостности электрических соединений;

в) осуществляется формально, обратная выгрузка не несет дополнительной информации.

1.8. СОВМЕСТНАЯ РАБОТА В ECAD- И MCAD-СИСТЕМАХ. КОММУТАЦИОННЫЕ СТРУКТУРЫ

Цель лекции — изучение принципов, методов и средств совместного проектирования электронной и механической частей изделия на примере проектирования коммутационных структур — электронных модулей на печатных платах — с выполнением синхронизации и организации двунаправленного обмена данными между ECAD- и MCAD-системами проектирования в перспективном формате idx.

Большое значение в поддержке жизненного цикла изделия на этапе конструирования является обеспечение совместной работы между механической и электронной составляющими изделия. Проектирование электронной составляющей (как правило, это модули на печатных платах и прочих основаниях) ведется в специализированных ECAD-системах, которые не являются предметом рассмотрения данного курса. Нашей задачей является рассмотрение эффективных механизмов обмена данными между ECAD- и MCAD-системами, позволяющих обеспечить максимально быструю, бесшовную и свободную от ошибок и неоднозначностей передачу информации.

До недавнего времени практически единственным доминирующим форматом обмена данными между такими системами был формат IDF в составе файлов компонентов, соединений и (опционально) мультиплицированной панели. Обмен данными в формате IDF, как правило, проводится с помощью специализированных приложений, выпускаемых как компаниями-разработчиками MCAD-систем (например, CircuitWorks для SOLIDWORKS), так и сторонними компаниями-разработчиками (пример — кроссплатформенный двунаправленный преобразователь данных IDF Modeler от компании Desktop EDA). Ограниченное применение также находят форматы STEP и DXF. Формат IDF и методы работы с ним, а также алгоритм совместной работы над механической и электронной составляющими изделия подробно рассмотрены в научной литературе.

Обратимся к вопросу применения формата, расширяющего возможности обмена данными между ECAD- и MCAD-системами, — формата idx, используемого в рамках созданного под эгидой комитета ProSTEP iViP в 2006 г. стандарта EDMD (Electronic Design Mechanical Design).

Данный формат обеспечивает следующие основные преимущества по сравнению с форматами idf, step и dxf:

– инкрементный обмен данными: передаются только данные по элементам конструкции, которые были добавлены, изменены или удалены;

– каждому элементу конструкции (контур платы, вырез, отверстие и пр.) назначается уникальный идентификатор, что позволяет отслеживать индивидуальные изменения по каждому из этих элементов;

– перед внесением изменений возможна визуализация текущего и предложенного состояний проекта;

– есть возможность принимать и отклонять изменения, при этом непосредственно в файле *.idx фиксируется история взаимодействия с указанием информации об авторе и дате изменений, а также с опциональным комментарием, описывающим суть предлагаемых изменений.

Цель передачи данных из ECAD- в MCAD-систему — проверка массогабаритных и инерционных характеристик изделия, компоновочных зазоров, а также получение информации для проведения инженерных анализов собственных частот, тепловых режимов и расчетов на механические воздействия.

При передаче данных по электронным компонентам существует проблема их корректного отображения. Следует отметить, что далеко не во всех случаях в MCAD-системе необходимо иметь точные представления компонентов по форме корпуса и выводам. Для инженерных анализов такая информация, наоборот, является избыточной и затрудняющей идеализацию моделей, приводит к неоправданному усложнению сетки конечных элементов, увеличению времени анализа и зачастую даже к невозможности его корректного завершения. В этой связи представляется целесообразным использование для всех компонентов взятых из ECAD-системы длины, ширины и высоты (рис. 1.61, *а*) либо задание точных моделей только для критически важных компонентов (соединителей, радиаторов и т. д.), при котором остальные компоненты (микросхемы, пассивные компоненты) остаются без точного определения (рис. 1.61, *б*). Если необходимо точное представление всего модуля на печатной плате (например, для визуализации или рендеринга при создании информационных материалов, инструкций и т. д.), следует задать точные модели для каждого компонента. Сопоставление (маппинг) компонентов между ECAD и MCAD-системами осуществляется через стандартизированное название компонента в обеих системах или через файл отображения.

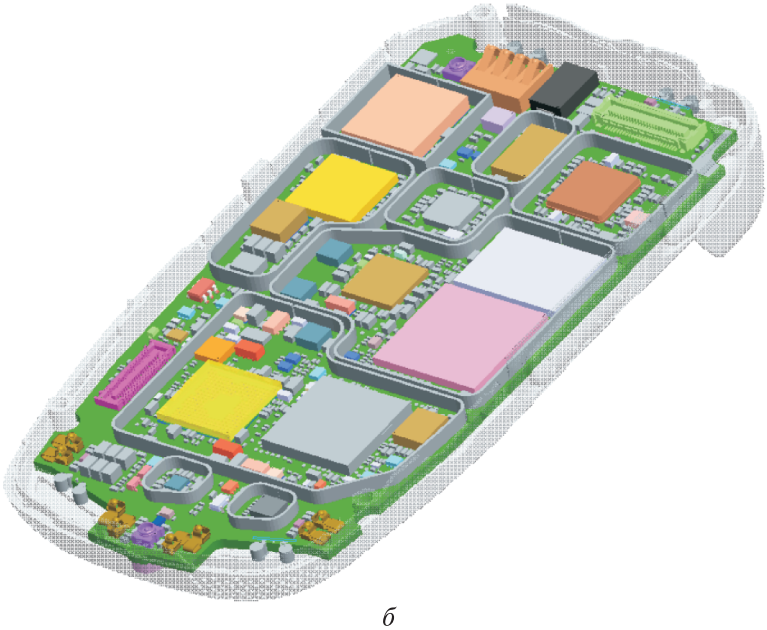
Отметим, что важно также обеспечить одинаковую ориентацию моделей библиотечных компонентов ECAD-системы и 3D-компонентов MCAD-системы относительно системы координат моделей. Например, если в качестве начала координат модели соединителя в MCAD-системе используется геометрический центр компонента, а в ECAD-системе — вывод 1, то возникнут проблемы выравнивания, приводящие к неправильной ориентации компонентов при импорте из ECAD-системы.

Рассмотрим средства обмена данными с помощью формата idx на примере САПР Solid Edge. В данной САПР задачу обмена данными выполняет модуль интеграции PCB Collaboration (рис. 1.62).

Модуль предлагает ряд возможностей:

– двунаправленную передачу данных: контур платы с вырезами, включая толщину; высота элементов и сторона их расположения; отверстия

а



б

Рис. 1.61. Представление компонентов модуля на печатной плате при импорте в MCAD-систему из ECAD-системы: все компоненты в неопределенном представлении (модель по длине, ширине, высоте) (*а*); важные компоненты в точном представлении, остальные — в неопределенном (*б*)

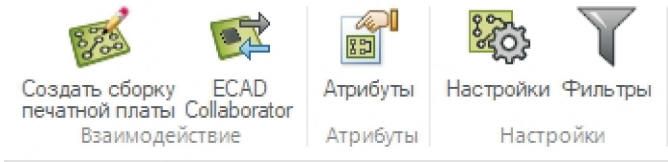


Рис. 1.62. Инструментарий модуля обмена данными Solid Edge PCB Collaboration

с заданными атрибутами; запрещенные зоны (keep-outs); позиционные обозначения и артикульные номера компонентов;

– проектирование, управляемое со стороны MCAD либо ECAD-системы: возможность создания исходной печатной платы средствами Solid Edge либо при помощи импорта данных из ECAD-системы в формате idx;

– добавление, изменение или удаление компонентов модели платы в Solid Edge в соответствии с выполненными действиями пользователя ECAD-системы;

– инкрементный импорт/экспорт в формате idx — передаются только данные, соответствующие выполненным изменениям;

– принятие либо отклонение изменений;

– 2,5D- либо 3D- (при наличии компонента в библиотеке) представление компонентов на плате;

– использование собственного навигатора, включающего дерево вырезов, отверстий, запрещенных зон и компонентов с подсветкой элементов в графическом окне и возможностью изменения атрибутов;

– импорт из ECAD-системы проводящего рисунка (включая контактные площадки, металлизированные монтажные отверстия, переходные отверстия, полигоны, контрольные точки) в виде эскизов;

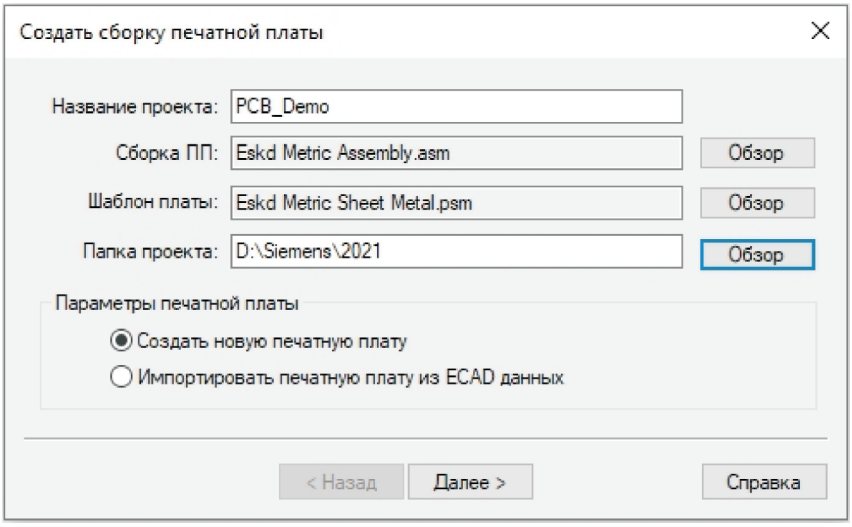
– использование фильтров отображения компонентов на плате по высоте, слою, владельцу компонента, проводнику;

– настройку расположения библиотеки 3D-моделей компонентов;

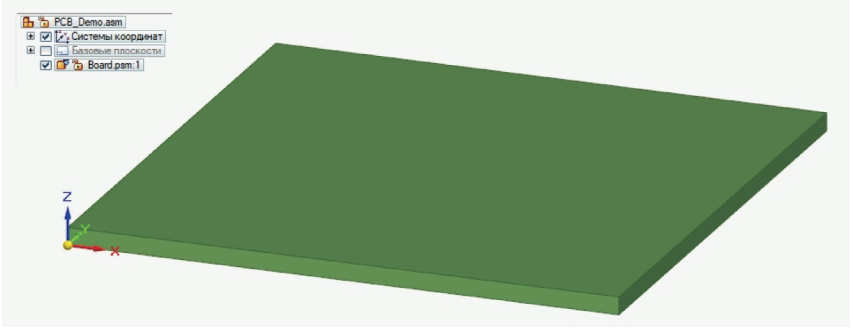
– протоколирование транзакций по обмену данными MCAD/ECAD.

Таким образом, модуль позволяет взаимодействовать в реальном режиме времени инженеру-разработчику печатной платы и инженеру-конструктору электромеханического изделия: просматривать изменения в проекте печатной платы, принимать либо отклонять эти изменения. Результатом работы модуля является 3D-модель печатной платы, которую можно использовать в общем макете изделия.

С помощью модуля PCB Collaboration можно создать исходную модель сборки на печатной плате непосредственно в MCAD-системе с помощью команды «Создать сборку печатной платы» . Для этого предварительно необходимо задать название проекта, выбрать шаблоны документов сборки (asm) и платы (листовая деталь, psm), а также задать папку проекта (рис. 1.63, *а*). Плату можно создать в виде тонкой пластины (рис. 1.63, *б*) либо сразу импортировать сборку из ECAD-системы.



а



б

Рис. 1.63. Создание сборки на печатной плате в MCAD-системе: выбор параметров (*а*); готовая плата в виде листовой детали (*б*)

Основные параметры настройки обмена данными в модуле PCB Collaboration (раздел «Установка» окна “ECAD Collaborator”, вызываемого по одноименной команде, см. рис. 1.62) приведены на рис. 1.64. Основная настройка в этом окне — «Папка совместных данных», в ней будут создаваться файлы idx, содержащие инкрементную информацию о проекте. Следует также отметить возможность задания высоты компонента по умолчанию, разрешение/запрет импорта монтажных и переходных отверстий, а также проводящего рисунка в целом, включая проводники и контактные площадки, и 3D-моделей компонентов.

Чтобы осуществить обмен данными в какую-либо сторону (экспорт/импорт), необходимо выполнить команду “ECAD Collaborator”. Открывшееся окно представлено на рис. 1.65. Если сборка содержит только одну

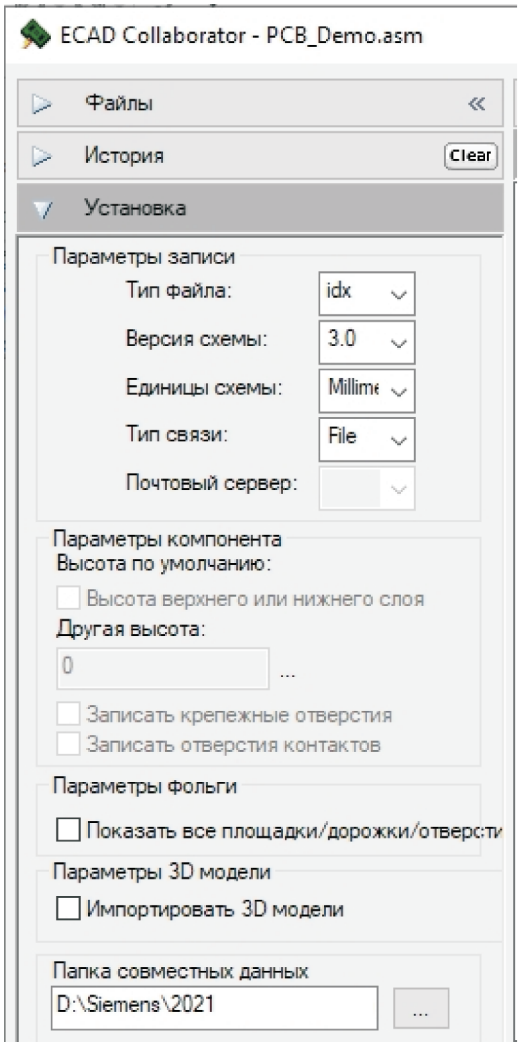


Рис. 1.64. Параметры настройки обмена данными в модуле PCB Collaboration

плату, активен режим «Получить данные печатной платы». В разделе «Файлы» необходимо выбрать подготовленный в ECAD-системе файл инкрементного обмена данными (в примере — baseline_00.idx). Тип “Baseline” означает, что передается базовый набор данных без предлагаемых изменений; тип “Proposal” — что передаются изменения, на которые необходимо отреагировать принятием либо отказом. Соответственно тип “Changes” означает, что импортированы предложенные изменения, а тип “Response” является ответом на предложенные изменения. После считывания файла в разделе «Совместные данные» будет показан набор передаваемых данных: контур

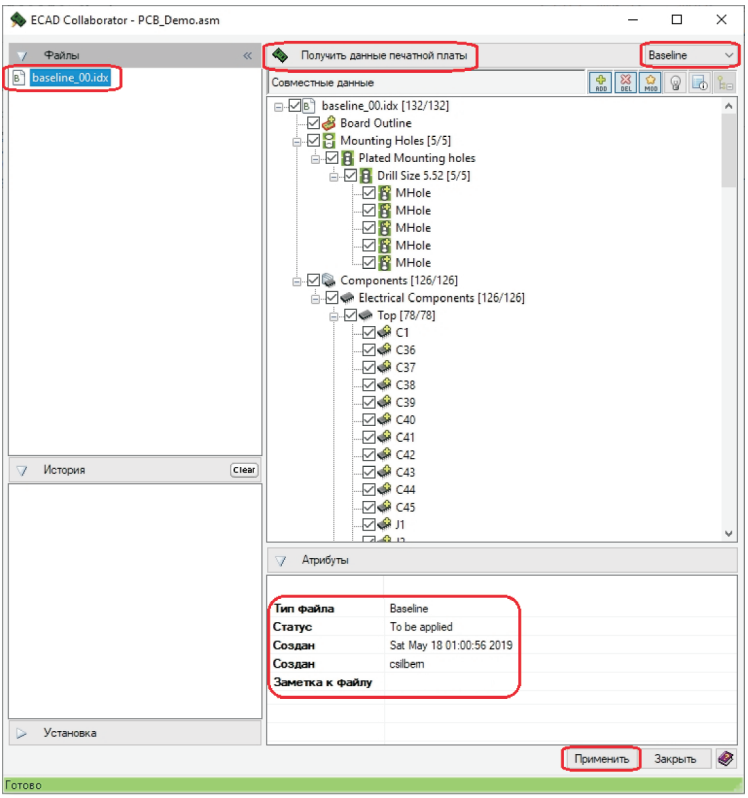


Рис. 1.65. Окно “ECAD Collaborator”

платы (Board Outline), отверстия (Mounting Holes), в том числе металлизированные (Plated), а также компоненты (Components), включая электрические/электронные (Electrical), разделенные по слоям (сторонам монтажа). Любой компонент можно исключить из процесса импорта/экспорта, сняв флажок рядом с его обозначением.

Обратим внимание на атрибуты: статус “To be applied” означает, что данный набор готов к импорту, “To be sent” — готов к экспорту. В строке «Заметка к файлу» можно записать поясняющую информацию по набору передаваемых данных.

Нажатие кнопки «Применить» запускает процесс передачи данных. Результат импорта (с неопределенными 3D-моделями) представлен на рис. 1.66.

Обратим также внимание на то, что файл обмена данными baseline_00.idx переместился в раздел «История», а строка состояния сигнализирует о готовности к дальнейшему обмену данными.

Импортированные компоненты также размещаются в навигаторе модуля на печатной плате на вкладке “PCB Collaboration” (рис. 1.67).

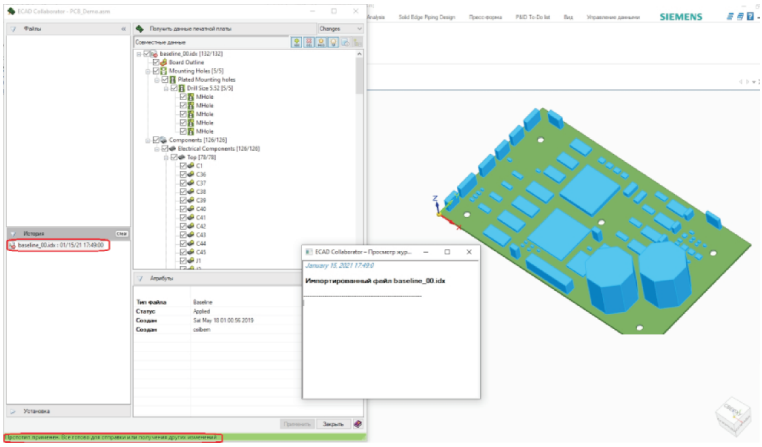


Рис. 1.66. Результат импорта из ECAD-системы в MCAD-систему данных модуля на печатной плате

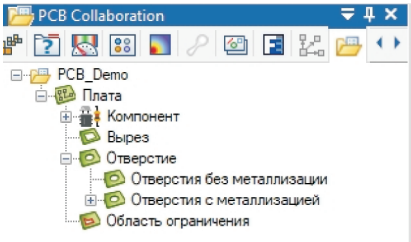


Рис. 1.67. Навигатор модуля на печатной плате

Импортированные компоненты можно отфильтровывать для показа с помощью набора фильтров (команда «Фильтры», см. рис. 1.62) по высоте, слою (стороне платы), владельцу (создан в ECAD- или MCAD-системе), а также по проводнику на слое (стороне платы). Результат фильтрации показа компонентов по высоте представлен на рис. 1.68 (отображены только компоненты ниже 5,00 мм).

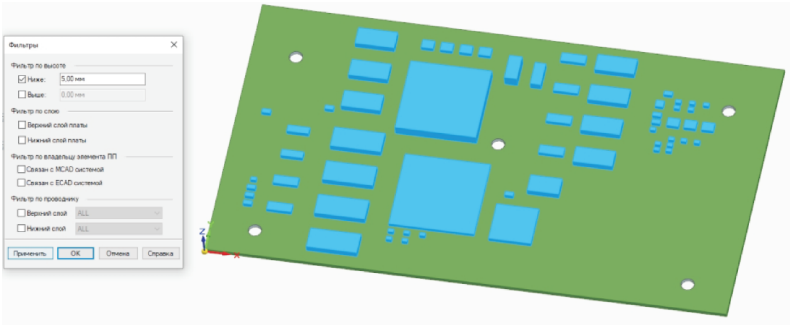


Рис. 1.68. Результат фильтрации показа компонентов на печатной плате по высоте

Результат импорта модуля с точными моделями компонентов представлен на рис. 1.69.

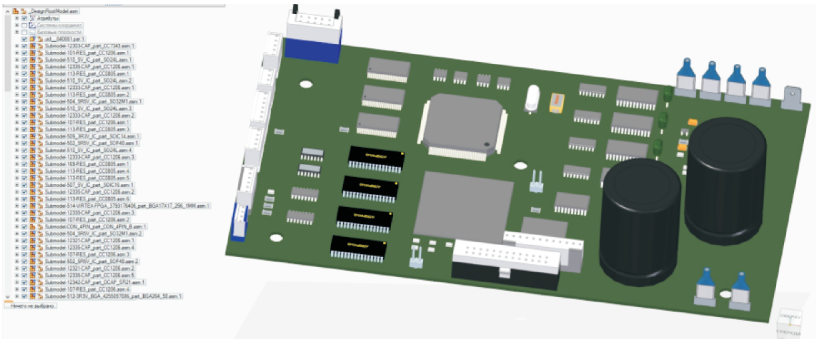


Рис. 1.69. Результат импорта модуля на печатной плате из ECAD-системы с точными моделями компонентов

В разделе практических занятий рассмотрен типовой процесс обмена данными с изменениями, вносимыми в конструкцию модуля.

Тесты к лекции 1.8

1. ***Инкрементный обмен данными обеспечивает формат:***

а) IDF;

б) IDX;

в) STEP и IDX.

2. ***Если в базе данных САПР отсутствуют 3D-модели компонентов, электронные компоненты на печатной плате после импорта в MCAD-систему будут представлены в виде:***

а) точных детализированных 3D-моделей;

б) контуров основания, выдавленных на высоту компонента в пространство;

в) плоских контуров на печатной плате.

3. ***При использовании формата IDX для обмена данными:***

а) есть возможность полностью принимать и отклонять изменения;

б) нет возможности принимать и отклонять изменения;

в) есть возможность частично принимать и частично отклонять изменения.

4. ***Конструктор механической части изделия расставляет на печатной плате некоторые из электронных компонентов:***

а) нет, такие работы выполняет исключительно конструктор электронной части изделия;

б) это выполняется для компонентов, отсутствующих в базе ECAD-системы;

в) это выполняется для компонентов, занимающих строго определенное местоположение в конструкции изделия.

5. ***Данные при совместной работе конструкторов электронной и механической частей изделия хранятся:***

а) в произвольных папках ECAD- и MCAD-систем;

б) исключительно на сервере PLM-системы;

в) в предварительно настроенной папке хранения совместных данных.

1.9. УПРАВЛЕНИЕ ПРОЕКТНЫМИ ДАННЫМИ

Цель лекции — изучение принципов, методов и средств управления проектными данными в рамках небольшого предприятия с рассмотрением вопросов настройки индексированного хранилища документов, набора используемых атрибутов, автоматического присвоения имен документам, мест хранения документов с определенными статусами.

Перед любым предприятием, занимающимся проектированием ЭА, вне зависимости от объема выпуска и сложности выпускаемой продукции стоит задача автоматизации управления проектными данными. Среди основных задач, решаемых в рамках организации электронного документооборота, можно выделить следующие:

– поддержание целостности данных;

– обеспечение полной ассоциативности — единого места хранения и представления данных для всех приложений и пользователей;

– наличие функционала поиска по ключевым словам, атрибутам, в том числе связанных документов (чертежей и пр.);

– упорядоченность хранения данных — обеспечение защиты от появления дубликатов документов, наличие инструментария выявления таких дубликатов;

– наличие механизма упорядоченного назначения наименований документов с обеспечением непротиворечивости;

– наличие механизмов работы с ревизиями;

– возможность назначения статусов документов (утвержден, устарел и пр.) и управления ими: разграничение доступа, ограничение несанкционированных изменений;

– копирование и перемещение документов без нарушения целостности связей;

– упаковка проекта в один архивный файл, включая связанные документы;

– работа с существующими локальными, сетевыми и, опционально, облачными хранилищами.

Разработчики САПР предлагают ряд масштабируемых решений по управлению данными, нацеленных на различный уровень поставленных задач с точки зрения сложности самого объекта проектирования, количества вовлеченных в процесс работников, их распределения по предприятиям внутри компании, а также в смежных организациях, номенклатуры используемых средств проектирования и подготовки производства. Для больших компаний, выпускающих сложные изделия в кооперации с подрядчиками, имеющих большой штат разработчиков, пользующихся разными САПР,

эффективна связка системы управления жизненным циклом (PLM — например, Teamcenter) и клиентов этой системы в составе рабочих мест конструкторов, работающих в САПР высокого и среднего уровня (например, NX и Solid Edge соответственно). Для таких компаний актуальным будет решение следующих глобальных задач организации процесса проектирования:

– организация сквозного процесса конструкторско-технологической подготовки производства (КТПП) на базе единого решения;

– организация коллективной работы над проектом;

– организация взаимодействия со всеми службами предприятия;

– организация взаимодействия с поставщиками;

– автоматическое присвоение обозначений согласно стандартам предприятия;

– использование единых баз материалов, стандартных и покупных изделий;

– управление изменениями;

– управление рабочими процессами в электронном виде;

– поддержка работы в среде MultiCAD.

Согласно проведенному исследованию, среди пользователей САПР среднего уровня Solid Edge около 70 % пользователей — это небольшие коллективы проектировщиков, численностью не более пяти человек. Для таких и подобных компаний, насчитывающих до 10–15 разработчиков и работающих локально либо удаленно, но в среде САПР одного производителя, достаточно реализации основного функционала управления данными, без подключения специализированных систем PLM или PDM. Необходимо отметить, что развертывание и поддержка полноценной системы поддержки жизненного цикла требуют существенных затрат и ресурсов: материальных, временных и кадровых, что для небольшого предприятия с высокой вероятностью окажется нерентабельным. Для таких компаний разработчики САПР предлагают инструментарий встроенного управления данными, не требующий специального сложного развертывания, обслуживания и наличия специальной квалификации и навыков у пользователя. Например, для САПР Solid Edge, согласно данным исследования, около 60 % пользователей используют именно функционал встроенного управления данными. Далее этот функционал будет рассмотрен в двух аспектах: с точки зрения внедрения и типовых рабочих операций.

В курсе лекций рассмотрена настройка управления данными, а практические задачи по работе с проектами приведены в разделе практических занятий.

Настройка встроенного управления данными Solid Edge сводится к заданию хранилища документов, атрибутов для индексированного поиска, настройке правил именования и статусов документов. Прежде всего необходимо включить функционал управления данными, установив соответствующий переключатель в настройках САПР (рис. 1.70).

Далее во вкладке «Хранилище» задается путь к хранилищу документов — папке (локальной или сетевой) для всех рабочих документов, кото-

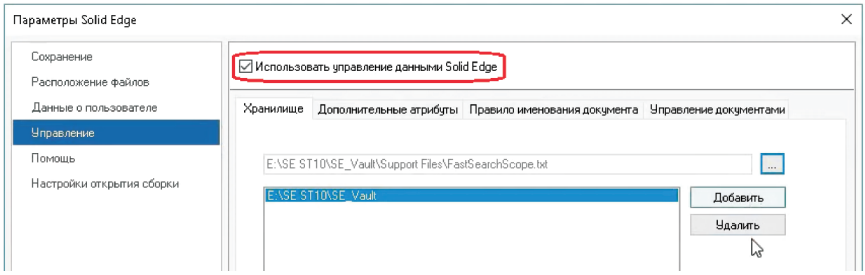


Рис. 1.70. Включение функционала управления данными и работа с путями к хранилищу

рая будет впоследствии проиндексирована в целях обеспечения их быстрого поиска. Пути (локальные и сетевые) к папкам хранилища записываются в специальный текстовый файл FastSearchScope.txt, который также размещается в подпапке Support Files хранилища. По нажатию кнопки «Добавить» путь добавляется в указанный файл.

Перед выполнением дальнейших настроек следует проверить некоторые настройки индексации ОС Windows. Во-первых, необходимо проверить, что запущена служба индексирования Windows Search, а ее опция запуска находится в значении «Автоматически» (рис. 1.71). Во-вторых, необходимо проверить установку разрешения на индексацию содержимого папки хранилища («Свойства папки» — «Другие», рис. 1.72). Опция «Разрешить

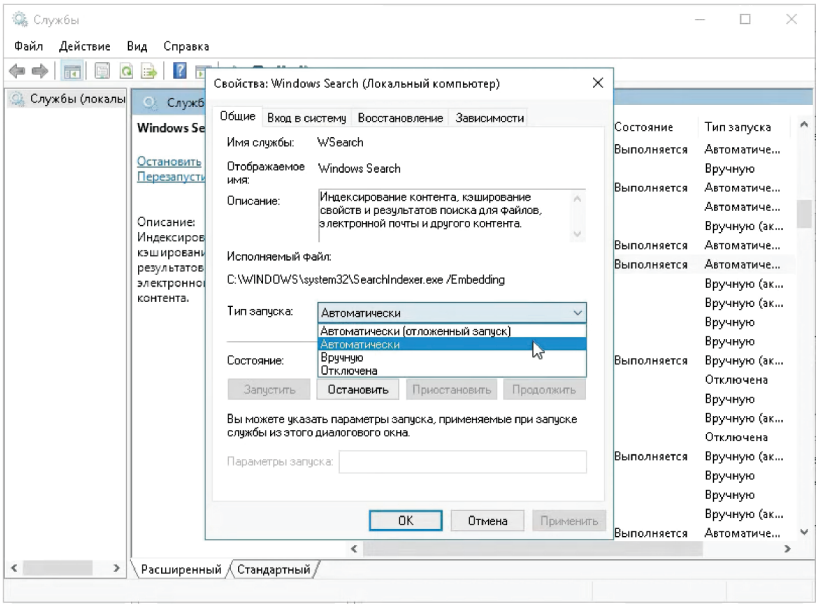


Рис. 1.71. Окно свойств службы индексирования Windows Search

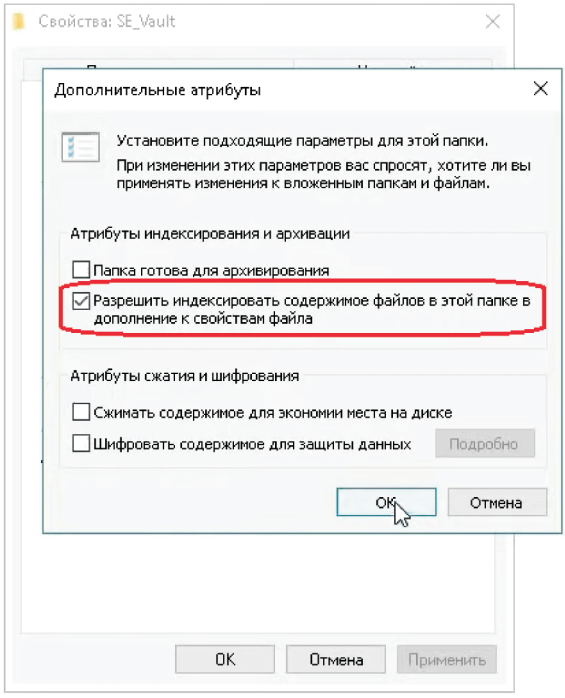


Рис. 1.72. Проверка разрешения на индексацию содержимого папки хранилища

индексировать содержимое файлов в этой папке в дополнение к свойствам файла» должна быть включена.

Далее во вкладке «Дополнительные атрибуты» следует задать атрибуты, по которым будет осуществляться поиск, и добавить их в индекс Windows. Необходимо установить соответствующий флажок и задать расположение атрибутов (рис. 1.73).

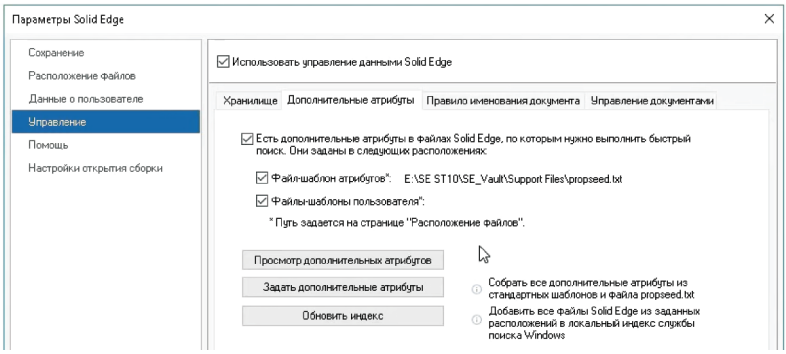


Рис. 1.73. Вкладка «Дополнительные атрибуты» окна настройки параметров управления данными

Атрибуты могут прописываться в специальном файле шаблонов атрибутов propseed.txt (также размещается в подпапке «Support Files» хранилища) либо в файлах шаблонов пользователя. Файл propseed.txt представляет собой конструктор атрибутов — стандартных (неизменяемых) и дополнительных (настраиваемых пользователем). Для каждого атрибута можно задать список типовых значений (впоследствии можно выбирать в раскрывающихся списках) и значение по умолчанию. Атрибутами заполняются различные заголовки, наименования; основные надписи чертежей, списков, ведомостей и спецификаций; поля, содержащие фамилии ответственных специалистов. На каждом предприятии можно гибко настроить содержимое данного файла под конкретные внутренние правила и потребности предприятия, чтобы упростить и автоматизировать дальнейшую работу по заполнению полей документов. Доступ к этому файлу для всех пользователей должен быть обеспечен по крайней мере в режиме чтения.

Фрагмент файла propseed.txt:

```
\\ Секция стандартных атрибутов
\\ Список «Предмет»
Begin Subject
эскизный проект;
технический проект;
рабочий проект;
default=;
End Subject

\\ Список «Ключевые слова»
Begin keywords
1-док.;
2-комплексы;
3-СЕ;
4-дет.;
5-СИ;
6-пр.;
7-мат.;
8-компл.;
default=;
End keywords
...
\\ Секция дополнительных атрибутов
Begin Define Custom
define Покрытие;текст;
define Сортамент;текст;
define ГОСТ Сортамент;текст;
define ГОСТ Материал;текст;
define Разраб.;текст;
define Пров.;текст;
```

```
define Т.контр.;текст;
define Н.контр.;текст;
define Утв.;текст;
define Код документа;текст;
define Вид документа;текст;
define Тип элемента Teamcenter;текст;
End Define Custom

\\ ГОСТ Сортамент
Begin ГОСТ Сортамент
В-30 ГОСТ 2590–88;
БТ-ПН-0-1,0 ГОСТ 19904–90;
БТ-ПН-0-1,5 ГОСТ 19904–90;
БТ-ПН-0-2,0 ГОСТ 19904–90;
20-h11 ГОСТ 7417–75;
Б-ПН-8,0 ГОСТ 19903–74;
20х20х2 ГОСТ 8639–82;
32х32х4-В ГОСТ 8509–93;
default=;
End ГОСТ Сортамент

\\ ГОСТ Материал
Begin ГОСТ Материал
10-3ГП ГОСТ 1050–88;
45-Б-Н ГОСТ 1051–73;
К350 В5-11-Н-45 ГОСТ 16523–97;
К270 В5-11-Н-10 ГОСТ 16523–97;
20-ТО ГОСТ 1577–93;
В10 ГОСТ 13663–68;
Ст3сп3-11 ГОСТ 535–88;
default=;
End ГОСТ Материал

\\ Разраб.
Begin Разраб.
Иванов;
Иванченко;
Иваненко;
Иванович;
Иванец;
default=Иванов;
End Разраб.

\\ Код документа
Begin Код документа
```

```
СБ;
МЧ;
ВО;
ГЧ;
ТЧ;
МЭ;
УЧ;
default=СБ;
End Код документа

\\ Вид документа
Begin Вид документа
Сборочный чертеж;
Монтажный чертеж;
Чертеж общего вида;
Габаритный чертеж;
Теоретический чертеж;
Электромонтажный чертеж;
Упаковочный чертеж;
default=Сборочный чертеж;
End Вид документа
```

Настройку атрибутов необходимо проводить на всех персональных компьютерах (ПК), где хранятся рабочие файлы, на всех ПК, где установлен САПР Solid Edge, а также на всех ПК, где осуществляется поиск файлов Solid Edge с помощью проводника Windows. Если Solid Edge на данном ПК не установлен, то для настройки необходимо воспользоваться специальной утилитой конфигурации быстрого поиска Fast Search, идущей в комплекте поставки САПР. Индексирование же, напротив, необходимо запускать только на ПК с хранилищем. Уже заданные атрибуты можно просмотреть с помощью кнопки «Просмотр дополнительных атрибутов», а новые задать с помощью кнопки «Задать дополнительные атрибуты». Если индекс уже был задан, то по нажатию кнопки «Обновить индекс» он будет обновлен в фоновом режиме со включением в него заданных дополнительных атрибутов.

С помощью вкладки «Правило именования документов» реализуется одна из основных функций управления данными — задается схема назначения имен файлов на основе префикса, номера документа и номера ревизии (рис. 1.74).

В этой вкладке можно изменить формулу составления имени документа, комбинируя различные атрибуты и разделители (рис. 1.75).

Номер документа составляется из префикса и собственно номера (верхняя часть окна на рис. 1.74). Префикс, как правило, задается буквенным с последующим разделителем — точкой или тире. Чтобы включить автоматическую нумерацию документов, необходимо установить флажок

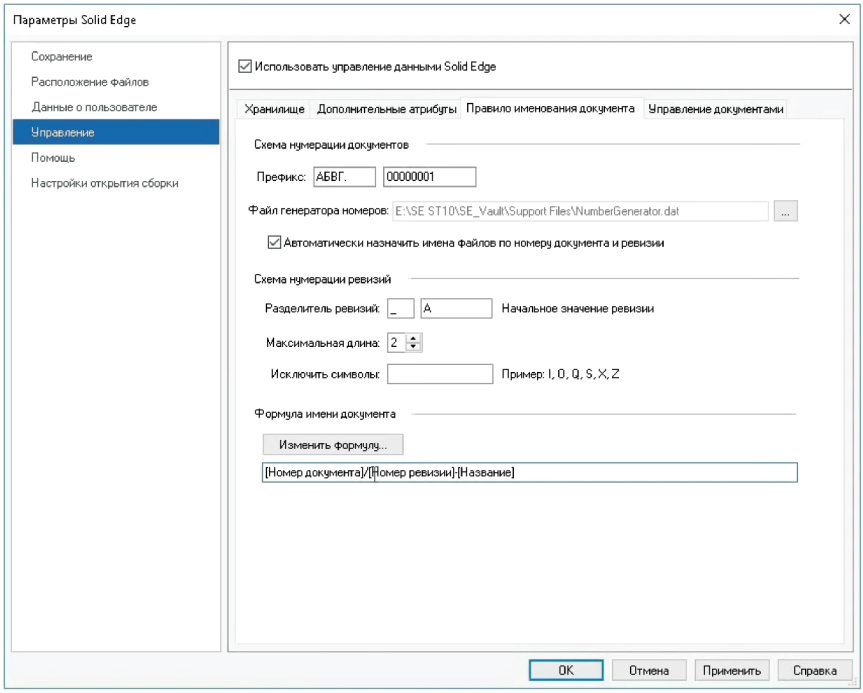


Рис. 1.74. Вкладка «Правило именования документов» окна настройки параметров управления данными

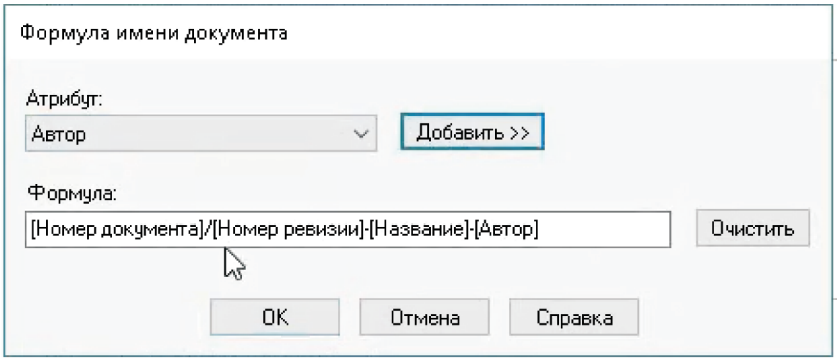


Рис. 1.75. Изменение формулы составления имени документа

«Автоматически назначить имена файлов по номеру документа и ревизии». Инкрементный номер после префикса задается специальным счетчиком, который хранится в файле генератора номеров NumberGenerator.dat (также помещается в подпапку Support Files хранилища). При каждом обращении к счетчику номер документа будет увеличиваться на единицу. Этот файл должен располагаться в папке с правами на запись для всех пользователей, которые могут создавать новые документы.

Во вкладке «Правило именования документов» располагаются инструменты задания номера ревизии: разделитель, начальное значение и максимальная длина. Если, например, начальное значение задано равным A, а максимальная длина задана как 2, то последнее значение номера ревизии составит ZZ. Часть символов можно исключить из номера с помощью специального поля, где их следует перечислить.

Сценарий использования этого механизма нумерации ревизий следующий: при концептуальном проектировании следует снять флажок «Автоматически назначить имена файлов по номеру документа и ревизии» и сохранять предварительные версии документов за пределами хранилища. При рабочем проектировании правило именования документов включается, и файлы утвержденного концепта копируются в хранилище с автоматическим присвоением номеров (например, через окно «Диспетчер проекта»). После этого осуществляется переход к вкладке «Управление документами», где задаются используемые статусы жизненного цикла документов и определяются папки, в которых будут храниться документы с соответствующими статусами (рис. 1.76).

Часть статусов можно отключить, сняв соответствующие флажки (например, «На проверке» и «Отложен») и оставив в работе статусы «Доступен» (папка «Предварительно утвержденные документы»), «Занят», «Утвержден»

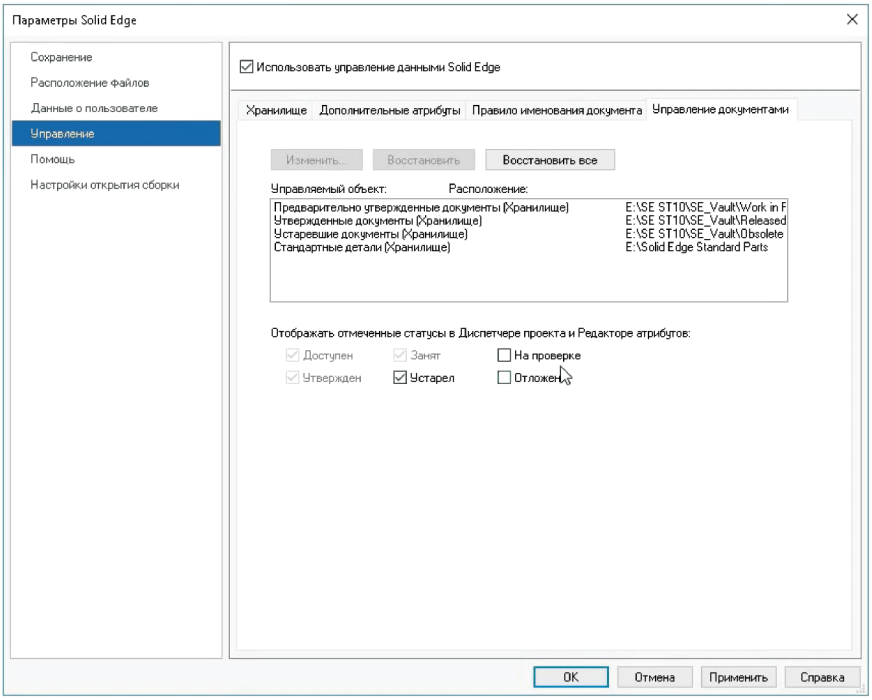


Рис. 1.76. Вкладка «Управление документами» окна настройки параметров управления данными

(папка «Предварительно утвержденные документы) и «Устарел» (папка «Устаревшие документы»).

Внутри данные папки могут быть организованы по проектам, заказчикам либо в соответствии с другими правилами, действующими на предприятии. Документы со статусом «Утвержден» являются документами только для чтения, и этот статус можно снять лишь для копии документа либо новой ревизии. Для папки «Стандартные детали» впоследствии исключается возможность создавать ревизии либо клоны данных документов. У документов со статусом «Занят» запоминается имя пользователя, который присвоил данный статус, и только он может сохранять данный документ.

Назначая с помощью «Диспетчера проекта» указанные статусы, конструктор автоматически инициирует перемещение документов в заданные на данной вкладке папки, соответствующие назначенному статусу, с сохранением целостности связей, структуры проекта и общей структуры папок, при этом новые папки могут быть созданы. Это важное свойство управления данными.

После завершения всех настроек нажатие кнопки OK в окне настройки параметров управления данными запускает процесс индексирования хранилища.

Для удобства навигации, просмотра и поиска документов следует также настроить отображение папок в окне «Проводник» Windows. В свойствах папки хранилища во вкладке «Настройка» выберем шаблон «Документы» и установим флажок «Применять этот же шаблон ко всем подпапкам» (рис. 1.77). В этом случае все подпапки хранилища будут отображаться единообразно.

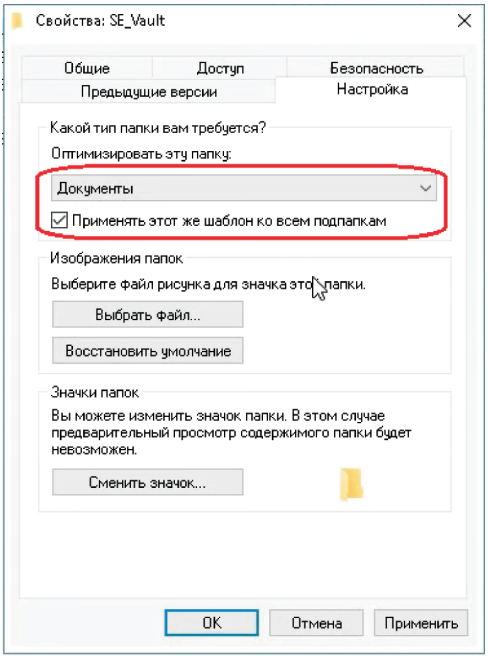


Рис. 1.77. Настройка отображения подпапок хранилища

Теперь переместимся внутрь папки хранилища и добавим столбцы в окне «Проводник», в которых будут отображаться необходимые атрибуты. Выберем их из списка «Document Number», «Revision Number», «SE Status», «Название» (рис. 1.78).

Далее после настройки расположения столбцов вид данной подпапки распространится на остальные подпапки хранилища (типа «Документ»). Для этого в параметрах папок щелкнем по кнопке «Применить к папкам» (см. рис. 1.79).

Результат представления показан на рис. 1.80.

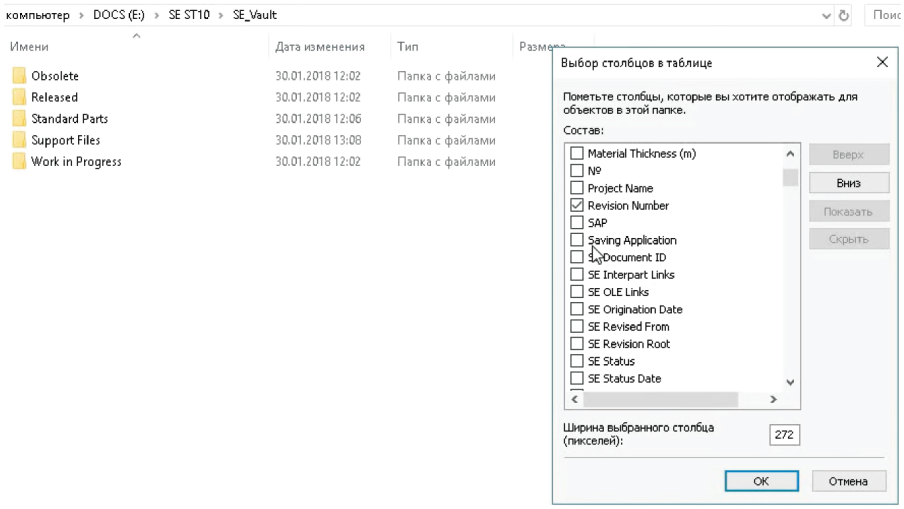


Рис. 1.78. Выбор дополнительных атрибутов для отображения в окне «Проводник»

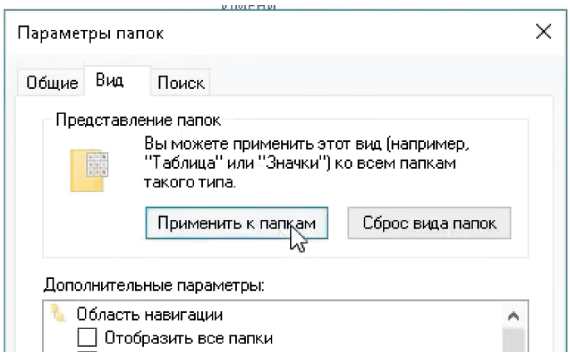


Рис. 1.79. Применение настроенного вида подпапки к остальным подпапкам хранилища

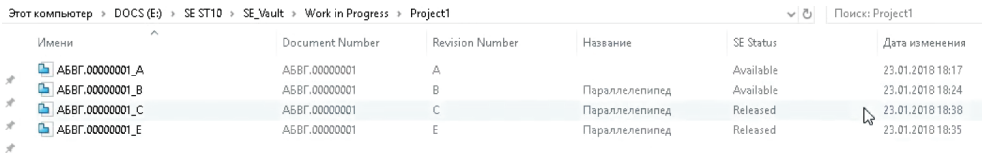


Рис. 1.80. Результат представления папок с дополнительными атрибутами

Последнее, что следует проконтролировать при настройке — это проверить результаты индексирования. В параметрах индексирования следует выбрать папку хранилища и просмотреть результаты (рис. 1.81).

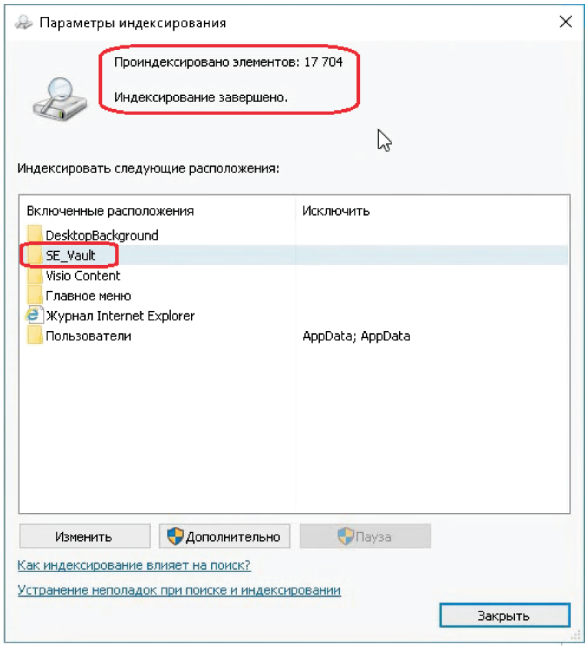


Рис. 1.81. Проверка результатов индексирования

Настройки завершены, начальное индексирование выполнено — и можно приступать к работе с хранилищем, которая будет подробно рассмотрена в разделе практических занятий.

Тесты к лекции 1.9

1. ***Хранилище — это:***

а) индексированное расположение для хранения документов проектов, в котором обеспечивается быстрый поиск и целостность данных;

б) папка хранения резервных копий проектов для быстрого восстановления при необходимости;

в) папка хранения ключевых атрибутов для организации поиска.

2. ***Назначение файла propseed.txt:***

а) это файл базы данных стандартных деталей;

б) это файл, в котором записан набор стандартных и дополнительных атрибутов с набором их типовых значений;

в) это файл атрибутов, отобранных для организации быстрого поиска.

3. ***Формула документа, содержащая его наименование и номер ревизии:***

а) задается при настройке параметров управления данными;

б) жестко формируется САПР и не подлежит изменению;

в) в рамках управления данными не контролируется.

4. ***Если набор атрибутов для управления данными изменился, следует:***

а) обновить настройки папок и поиска;

б) не предпринимать никаких действий;

в) обновить индекс Windows.

5. ***Назначение статусов документам в том числе позволяет:***

а) удалять ненужные более документы автоматически;

б) перемещать документы в заданные папки, соответствующие назначенному статусу;

в) перемещать документы в заданные папки, соответствующие назначенному статусу, с сохранением целостности связей.

1.10. КОНЦЕПЦИЯ СИСТЕМ ИНЖЕНЕРНОГО АНАЛИЗА ИЗДЕЛИЙ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ В РАМКАХ ПОДДЕРЖКИ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА

Цель лекции — изучение применения систем инженерного анализа изделий приборостроения в рамках поддержи жизненного цикла с точки зрения используемого инструментария и набора анализов, функционала и организации пре- и постпроцессинга, визуализации результатов анализа.

Тенденции развития САПР в конструкторско-технологическом проектировании электронных средств характеризуются интеграцией технологий пространственного параметрического моделирования в концепцию поддержки жизненного цикла изделия. Такая тенденция, в частности, предполагает интеграцию конструкторской (CAD) подсистемы и подсистемы инженерного анализа (CAE), что позволяет организовать параллельную работу инженеров и в свою очередь существенно сокращает временны́е затраты на разработку изделия и ускоряет вывод его на рынок. Одной из ключевых проблем интеграции является обеспечение взаимной миграции данных проектных моделей и гибкого изменения параметров проектирования различными подсистемами и реализующими их инструментами. Эта проблема, в частности, возникает на этапе подготовки (препроцессинга) данных для инженерного анализа моделей.

При проектировании изделий приборостроения на печатных платах инженерный анализ, как правило, применяют в целях моделирования тепловых режимов, определения собственных частот конструкции и откликов исследуемой системы на механические воздействия — статические и динамические. На ранних этапах процесса конструирования изделия инструменты моделирования целесообразно использовать для предварительной оценки тепловых и механических режимов работы модулей в заданных условиях эксплуатации. Использование результатов анализа позволяет сократить цикл проектирования устройств путем исключения из него этапа изготовления опытных образцов и соответственно их испытаний на надежность под воздействием тепловых и механических нагрузок. Проблемы, которые могут быть выявлены на этой ранней стадии проектирования изделий, устраняются, как правило, без существенных затрат путем внесения изменений в компоновку модуля или конструкции в целом.

Результаты анализа моделей на тепловые и механические воздействия следует учитывать на смежных этапах сквозного цикла проектирования. Одним из важных этапов проектирования является выбор компонентов и их размещение на печатной плате. Следует учитывать результаты температур-

ного анализа в алгоритмах размещения, в том числе запрещение установки компонентов с жесткими температурными ограничениями близко к мощным источникам тепла. Необходимо использовать данные теплового анализа для оценки соответствия характеристик создаваемого устройства требованиям технического задания путем сравнения значений температур компонентов, полученных в результате моделирования теплового поля, с максимальными заданными значениями. Если рассчитанное значение температуры превышает установленное в техническом задании или собственную максимальную температуру элемента, то необходимо преобразование модели сборки, которое может заключаться в модификации размещения компонентов на плате, в изменении элементной базы, условий охлаждения и пр.

Следующий этап, на котором необходимо учитывать температурные ограничения, — это трассировка коммутационных структур. Алгоритмы трассировки и компоновки должны учитывать распределение плотности тока и изменять геометрию проводников в соответствии с заданными ограничениями по токам в трассах.

Таким образом, в проектировании изделий приборостроения разного уровня можно выделить два ключевых направления инженерного анализа коммутационных структур:

– анализ тепловых полей;

– анализ собственных частот.

Комплексное проектирование изделий приборостроения и их инженерный анализ осуществляются, как правило, посредством применения комплекса инструментов (различных специализированных пакетов САПР). Одна САПР может эффективно решать задачи компоновки и трассировки модулей на печатных платах (ECAD-системы), вторая — задачи проектирования корпусных деталей и сборок (CAD-система), третья — задачи анализа конструкций на механические и тепловые воздействия, расчета принудительного охлаждения, анализа электромагнитной совместимости (CAE-система/системы) и т. д. Задачи проектирования достаточно сложного изделия далеко не всегда можно решить в рамках какой-либо одной САПР. При этом часто возникает проблема, когда для работы в рамках одного предприятия необходима лишь часть функционала от систем разного назначения. Например, для проведения разных видов инженерных анализов зачастую необходимы разные CAE-системы, что приводит к увеличению необходимого количества конверторов между этими системами. Конечно, данной проблемы могло бы не быть, если бы для каждого предприятия или отрасли существовала бы универсальная система, имеющая только необходимый функционал для полного цикла проектирования. В настоящее время создание такой системы для каждой организации является затруднительным и дорогостоящим.

Современные инструменты автоматизированного инженерного анализа конструкций включают следующие основные программные модули: препроцессор, процессор и постпроцессор. Препроцессор обеспечивает анализ исходных данных, их приведение к необходимому формату, начальную параметризацию и генерацию сеток конечных элементов (при необходимо-

сти), решает задачи построения макромоделей и их детализацию. Процессор обеспечивает выполнение процедур расчета и анализа в соответствии с выбранными задачами. Постпроцессор обеспечивает визуализацию результатов моделирования в различных режимах отображения, сохранение данных и интеграцию с другими инструментальными средствами САПР. Здесь важно добиться общей универсальности, благодаря которой пре- и постпроцессор могли бы работать с разными «ядрами» расчетных систем. Вариантом решения этой проблемы синхронного взаимодействия между разными инструментами проектирования является создание универсальных препроцессора и постпроцессора, которые могут обращаться к разным системам через нейтральный формат. Данные препроцессор и постпроцессор могут использоваться для проведения инженерных анализов конструкций на механические и тепловые воздействия и одновременно для интеграции с ECAD-системами. Таким образом, функционал разных систем включается в промежуточную систему, которая создает единую среду для работы в различных инженерных дисциплинах. В данном случае важно, чтобы САПР имели открытую библиотеку и единый стандарт взаимодействия компонентов, например технологию связывания и внедрения объектов в другие документы и объекты/объектную модель компонентов (OLE/COM). Это обеспечивает сокращение времени, затрачиваемого на проектирование, за счет переноса испытаний разрабатываемого изделия на его цифровой макет, а также за счет более тесной интеграции разработчиков электронной и механической частей устройства.

1.10.1. АНАЛИЗ МОДЕЛИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПРЕПРОЦЕССОРА И ПОСТПРОЦЕССОРА

Рассмотрим подробнее концепцию реализации универсальных препроцессора и постпроцессора для инженерного анализа. Представим их в виде модели «черный ящик» (контекстной диаграммы в нотации IDEF) с использованием метода абстрагирования (рис. 1.82). Слева расположим входные воздействия на исследуемый объект (в данном случае на электронный модуль первого уровня); справа — выходные параметры по инженерному анализу; сверху — управляющие воздействия, способствующие изменению параметров электронного модуля; снизу — методы отображения и моделирования сборки.

Под входными понимают воздействия, формирующие 3D-модель электронного модуля первого уровня, которая впоследствии будет подвергаться анализу.

Архитектура препроцессора и постпроцессора для инженерного анализа электронного модуля первого уровня представлена на рис. 1.83. На диаграмме показаны основные факторы, влияющие на работу процессоров, а также управляющие воздействия и методы моделирования.

На основе разработанной модели возможно создание препроцессора и постпроцессора, которые на основе информации о 3D-модели электронно-

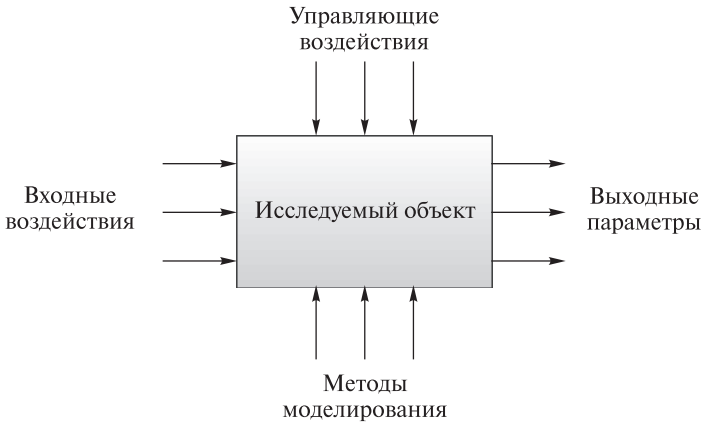


Рис. 1.82. Контекстная диаграмма исследуемого объекта

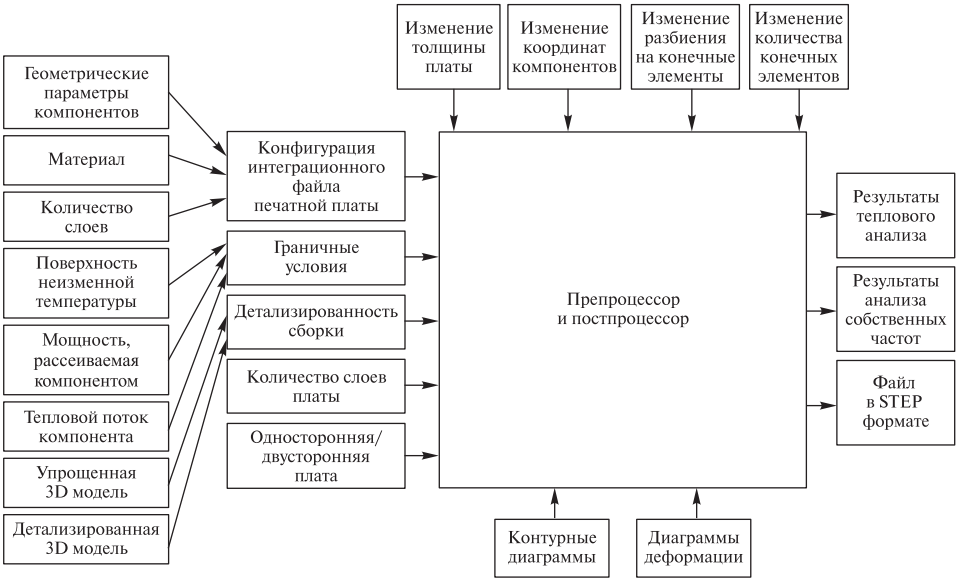


Рис. 1.83. Архитектура препроцессора и постпроцессора для инженерного анализа

го модуля и о граничных условиях способны подготавливать и соответственно визуализировать данные по инженерному анализу. Далее рассмотрены основные критерии, влияющие на работу препроцессора и постпроцессора в рамках проведения инженерного анализа.

Посредством диаграммы вариантов использования представим описание функциональности разрабатываемой подсистемы для инженерного анализа электронных модулей на тепловые и механические воздействия, т. е. выделим «актеров» и «прецеденты», непосредственно относящиеся к ним, а также выявим связи между ними. Разработанная диаграмма вариантов использования представлена на рис. 1.84.

Рис. 1.84. Диаграмма вариантов использования препроцессора для инженерного анализа электронных модулей первого уровня на основе COM-стандарта

Из диаграммы вариантов использования видно, что подсистема для инженерного анализа электронных модулей первого уровня на основе COM-стандарта позволяет регулировать большинство параметров, влияющих на инженерный анализ, а также проводить подготовительные расчеты для передачи в САПР Femap. Диаграмма состояний подсистемы, описывающая проведение инженерного анализа на примере электронных модулей первого уровня, показана на рис. 1.85.

Программе анализа пересылается полностью определенная конечно-элементная модель со всеми параметрами. После проведения анализа полученное решение подготавливается постпроцессором к визуализации.

При анализе механических воздействий чаще всего требуется вывод данных о собственных частотах конструкции, а также о возникающих деформациях и напряжениях. Для этой цели традиционно используют контур-

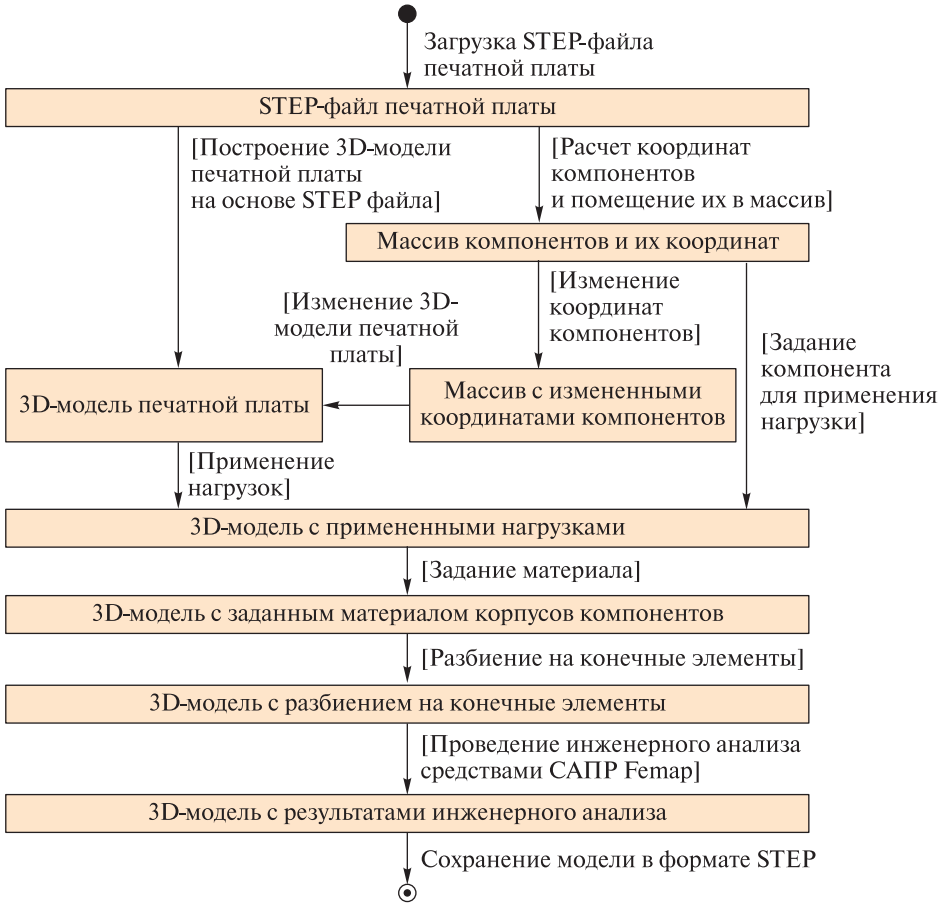


Рис. 1.85. Диаграмма состояний подсистемы для инженерного анализа электронных модулей первого уровня на основе COM-стандарта

ные графики, где отображаемые параметры кодируются разными цветами непосредственно на изображении исследуемого объекта. Данный способ визуализации результатов анализа используется и в разрабатываемых препроцессоре и постпроцессоре как один из самых наглядных способов представления теплового поля и деформации печатной платы (рис. 1.86).

Для динамических анализов, таких как анализ откликов на вибрационные и ударные воздействия, более оправдано применение средств анимации

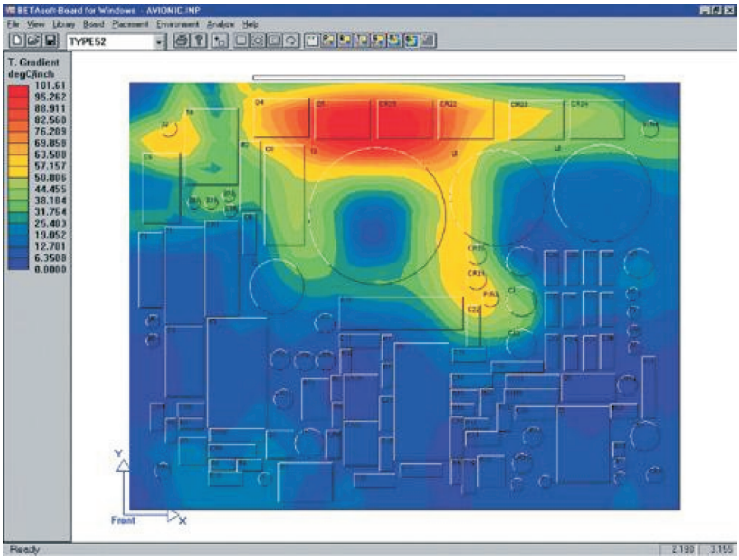


Рис. 1.86. Пример отображения результатов теплового анализа платы в пакете BETASoft-Board

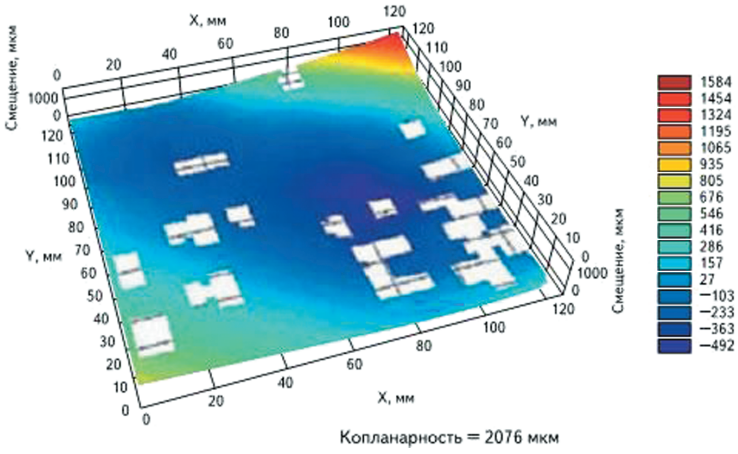


Рис. 1.87. Пример отображения результатов анализа деформации печатной платы

изображения. Препроцессор и постпроцессор позволяют выводить на экран анимированную модель деформации электронного модуля, а также сохранять изображение теплового поля или деформации печатной платы (подобно тому, как в примере, представленном на рис. 1.87) в качестве конечного результата анализа.

Помимо перечисленных способов для представления результатов анализа применяются изолинии и изоповерхности (линии и поверхности равных значений), а также традиционные графики и таблицы.

1.10.2. ОПИСАНИЕ ПОДХОДА К ПРОЦЕССУ МОДЕЛИРОВАНИЯ ИЗДЕЛИЙ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

Моделирование изделий — процесс, требующий от пользователя понимания содержания расчета и цели исследований. Ведущая роль в проведении расчета отведена пользователю — конструктору изделия приборостроения.

Процесс моделирования будет рассмотрен на примере ПО Creo/Simulate — универсального инструмента прочностного и теплового расчета, предназначенного для решения очень широкого круга задач методом конечных элементов. Универсальные инструменты всегда требуют большей подготовки пользователя, нежели специальные, предназначенные для решения какого-либо определенного класса задач. В связи с этим на начальных этапах использования ПО Creo/Simulate начинающим конструкторам или студентам, не имеющим опыта компьютерного или ручного моделирования, рекомендуется получить консультации у опытных преподавателей и инженеров. Более подробно данный материал изложен в [25].

Целью любого инженерного анализа является получение расчетных данных, дающих представление о работоспособности изделия. На каждом этапе моделирования эти данные являются специфическими.

Процесс моделирования состоит из следующих основных этапов:

– упрощение изделия и создание расчетной модели;
– задание граничных условий;
– постановка задачи;
– проведение расчетов;
– анализ рассчитанных данных на этапе постпроцессинга;
– принятие решения о внесении изменений в конструкцию или выработка рекомендаций по проектированию.

Для каждого из видов анализа (статического, вибрационного и т. д.) процесс повторяется за исключением первых двух этапов. Дополнительным этапом моделирования может быть оптимизация конструкции.

Далее в курсе лекций и в описаниях практических занятий подробно рассмотрен обобщенный алгоритм проведения всестороннего анализа изделия на воздействие линейных ускорений, вибраций, ударных воздействий и тепловых нагрузок на примере расчета типового изделия приборостроения с помощью модулей САПР Creo/Parametric и Creo/Simulate (Structure and Thermal Simulation) компании PTC.

Препроцессор обеспечивает анализ исходных данных, их приведение к необходимому формату, начальную параметризацию и генерацию сеток конечных элементов (при необходимости), решает задачи построения макромоделей и их детализацию. Процессор обеспечивает выполнение процедур расчета и анализа в соответствии с выбранными задачами. Постпроцессор обеспечивает визуализацию результатов моделирования в разных режимах отображения, сохранение данных и интеграцию с другими инструментальными средствами САПР.

Тесты к лекции 1.10

1. ***Препроцессор решает следующие основные задачи*** (выберите один или больше правильных ответов):

а) анализ исходных данных и их приведение к необходимому формату;

б) начальная параметризация и генерация сеток конечных элементов (при необходимости);

в) задействование многоядерности при анализе.

2. ***Процессор решает следующие основные задачи*** (выберите один или больше правильных ответов):

а) генерация сеток конечных элементов;

б) построение макромоделей и их детализация;

в) выполнение процедур расчета и анализа.

3. ***Постпроцессор решает следующие основные задачи*** (выберите один или больше правильных ответов):

а) визуализация результатов моделирования в различных режимах отображения;

б) сохранение данных;

в) интеграция с другими инструментальными средствами САПР.

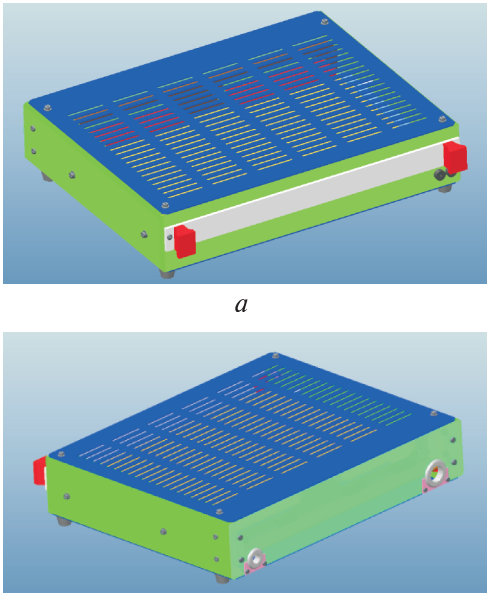
1.11. СОЗДАНИЕ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ

Цель лекции — изучение принципов, методов и средств создания расчетных моделей приборных конструкций с выполнением идеализации, использованием упрощенных представлений, упрощением отдельных элементов геометрии; рассмотрение особенностей назначения материалов, определения контактных взаимодействий и задания граничных условий.

1.11.1. АНАЛИЗ И УЛУЧШЕНИЕ СБОРОЧНОГО СОСТАВА

Анализ и улучшение сборочного состава проводится с целью исключения незначимых, стандартных компонентов, унифицированных и заимствованных узлов, иных компонентов, структура которых доподлинно не известна или эксплуатационные характеристики которых указаны в соответствующих сопроводительных документах.

Работая в рамках системы PDM, следует помнить, что прямое редактирование конструкторской модели нежелательно, так как это может повлиять на сборочный состав изделия, формируемый PDM, а также на остальные части проекта, находящиеся в параметрической зависимости (чертежи, технологические модули и т. д.). В этой связи рекомендуется использовать упрощенные модели, представления, таблицы семейств, скелетоны с мастер-геометрией, подмену реального компонента его упрощенной геометрической моделью.



а

б

Рис. 1.88. Конструкторская модель изделия: вид спереди (*а*); вид сзади (*б*)

Процедура улучшения сборочного состава проводится следующим образом.

В качестве примера рассмотрим конструкторскую модель изделия, показанную на рис. 1.88.

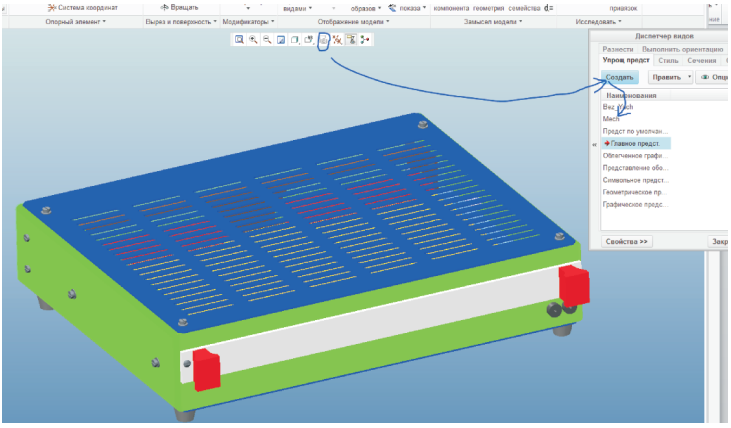
Изделие можно разбить на две части: функциональную и несущую. К несущей относятся алюминиевые листы, ячейка в сборе без элементов. Остальные элементы являются

унифицированными, поэтому их можно исключить. Для этого создадим упрощенное представление с любым именем; здесь и далее будет использоваться имя “Mech” (рис. 1.89).

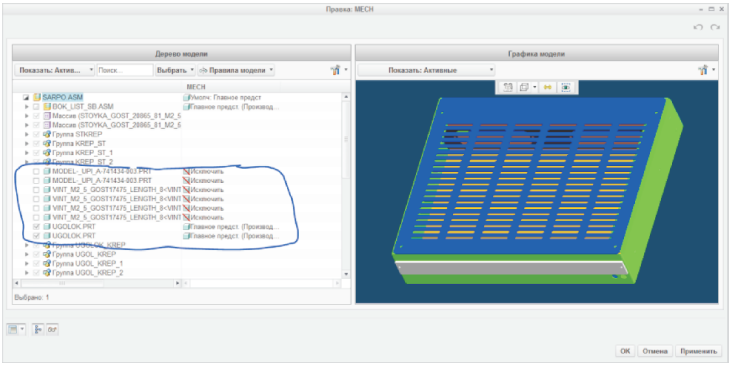
В появившемся меню, показанном на рис. 1.89, *б*, у всех исключаемых деталей следует выставить статус «Исключить» и нажать кнопку «OK». Затем необходимо применить принцип «рекурсии», т. е. открыть последовательно все подсборки, подсборки в подсборках и т. д. и применить ту же процедуру, показанную на рис. 1.89.

Далее следует применить принцип «Упрощенные сборки состоят из упрощенных компонентов», для чего сделать «подмену» подсборок на их упрощенные представления. Потребуется дополнительная корректировка созданного упрощенного представления “Mech” (рис. 1.90).

В меню «Править» выберем команду «Переопределить» (рис. 1.91).



а



б

Рис. 1.89. Создание упрощенного представления: «Диспетчер видов» (*а*); «Диспетчер модели» (*б*)

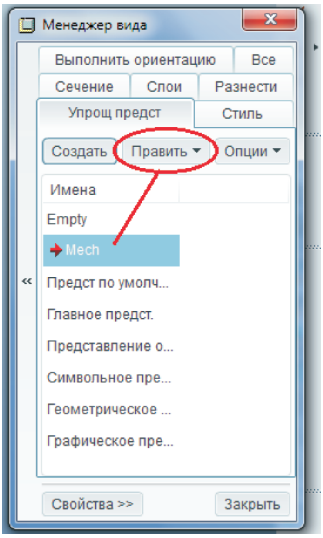


Рис. 1.90. Корректировка созданного упрощенного представления

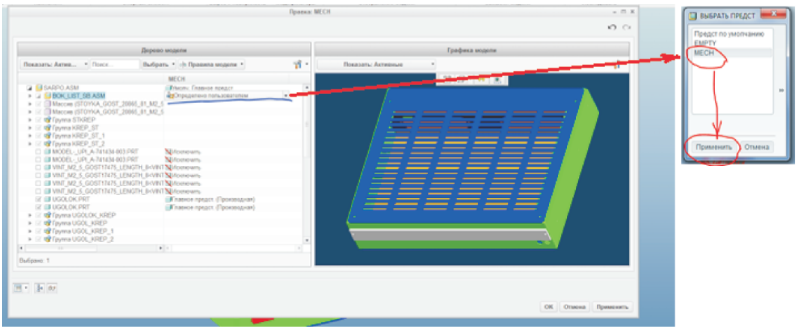


Рис. 1.91. Меню «Править» и команда «Переопределить»

Для каждой сборки переключаем статус на «Определено пользователем» — “Mech”, как показано на рис. 1.91. Процедуру следует начинать с самой нижней по уровню сборки, а заканчивать сборкой верхнего уровня, последовательно открывая их и переопределяя упрощенные представления.

1.11.2. УПРОЩЕНИЕ ГЕОМЕТРИИ

Упрощение геометрии — процедура, направленная на уменьшение количества объемных элементов сетки без существенной потери адекватности модели. Сеточная модель прибора представлена на рис. 1.92.

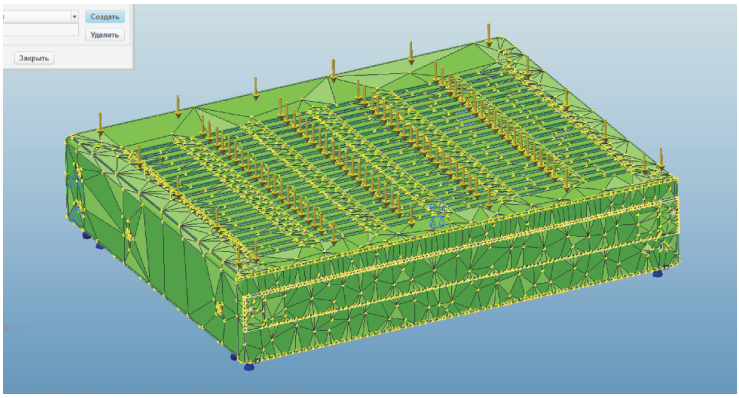


Рис. 1.92. Сеточная модель прибора

Количество элементов сетки называют мощностью или размерностью задачи. Размерность задачи не зависит от габаритов модели. Для ее снижения необходимо провести экспертную оценку геометрии с целью выявления относительно малых несущественных ее элементов. К таким элементам могут относиться фаски кромок, скругления кромок, мелкие отверстия и т. д., которые в обобщенном виде можно охарактеризовать как незначимые относительно мелкие элементы геометрии, располагающиеся в предполагаемых малонагруженных зонах. Выявление таких зон зависит от квалификации конструктора, поэтому рекомендуется проводить экспертную оценку значимости элементов геометрии.

Как и в случае сборочных единиц, упрощение геометрии детали нельзя проводить за счет непосредственного редактирования конструкторской модели, поэтому необходимо применять разные варианты создания расчетных представлений с помощью упрощенных представлений, семейств, наследования геометрии и т. д.

Проведем упрощение вовлеченных в расчет компонентов. Начнем со скобы (рис. 1.93).

Конструктор отметил зоны, которые, по его мнению, являются несущественными для расчета — это фаски на отверстиях под винты с потайной головкой на рис. 1.93. Эти элементы исключаются из расчета при помощи упрощенного представления “Mech” (рис. 1.94).

Далее в появившемся меню следует выбрать строку «Элементы» (рис. 1.95).

Дерево команд разделится на две части. В левой части будет по-прежнему располагаться дерево элементов (фичеров), а в правой — их статус (рис. 1.96).

В верхней строке указан статус фичеров по умолчанию. В данном случае фичеры будут участвовать в расчете по умолчанию. В меню справа надо включить статус «Исключить» и выбрать исключаемые фичеры как непосредственно из модели, так и из дерева. Периодически рекомендуется использовать команду «Обновить экран», чтобы визуализировать совершаемое

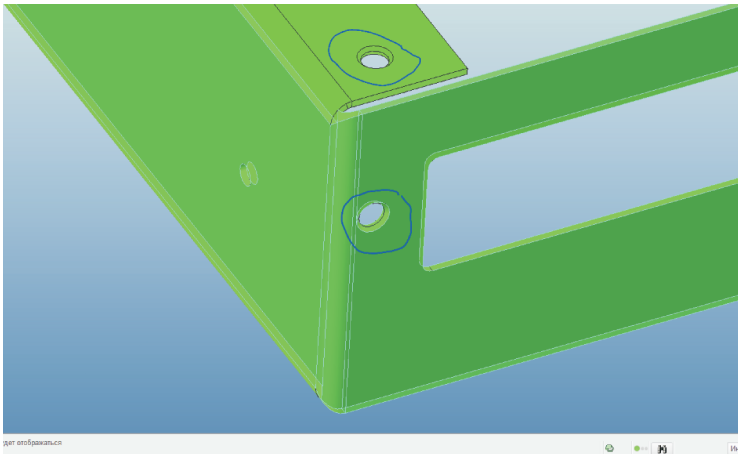


Рис. 1.93. Несущественные для расчета зоны скобы

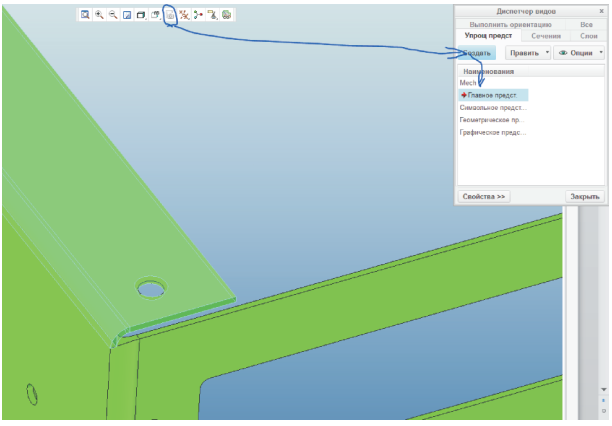


Рис. 1.94. Создание упрощенного представления скобы

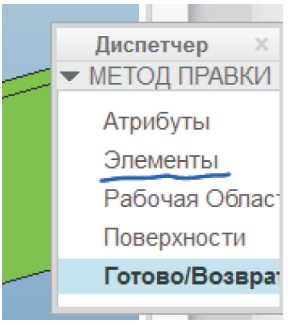


Рис. 1.95. Выбор строки «Элементы» в окне «Диспетчер»

упрощение. Если какой-то элемент исключен ошибочно, то в правом меню выбираем вариант «По умолчанию» и указываем в дереве возвращаемый фичер. По окончании работы щелкаем на кнопке «Готово».

Точно так же поступаем с другими деталями прибора.

После того как все необходимые упрощения сделаны, следует ввести упрощенные представления соответствующих сборок. Для этого нужно открыть сборку, в которую деталь входит непосредственно, и создать или откорректировать соответствующее упрощенное представление.

При переключении с главного представления на представление “Mech” мы должны убедиться в исчезновении исключенных компонентов и увидеть упрощенный вид деталей.

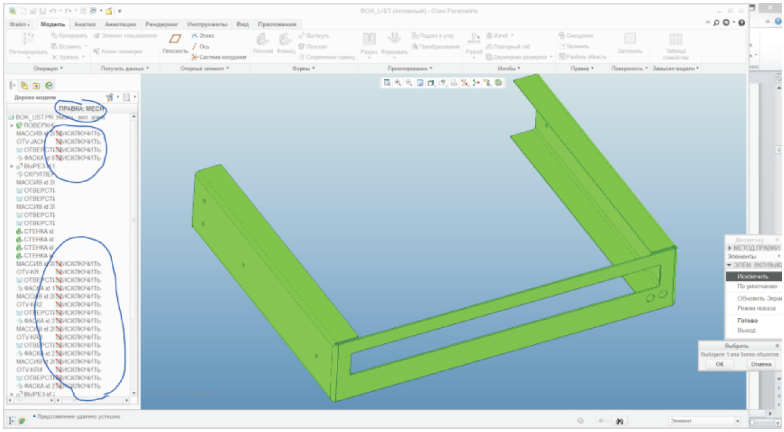


Рис. 1.96. Разделенное дерево команд

Перед началом работы с модулем Creo/Simulate следует настроить систему единиц. Для этого предварительно необходимо включить главное представление, так как смена единиц измерения доступна только для него. В меню «Файл» выбираем команду «Свойства», после чего открывается окно «Свойства модели» (рис. 1.97).

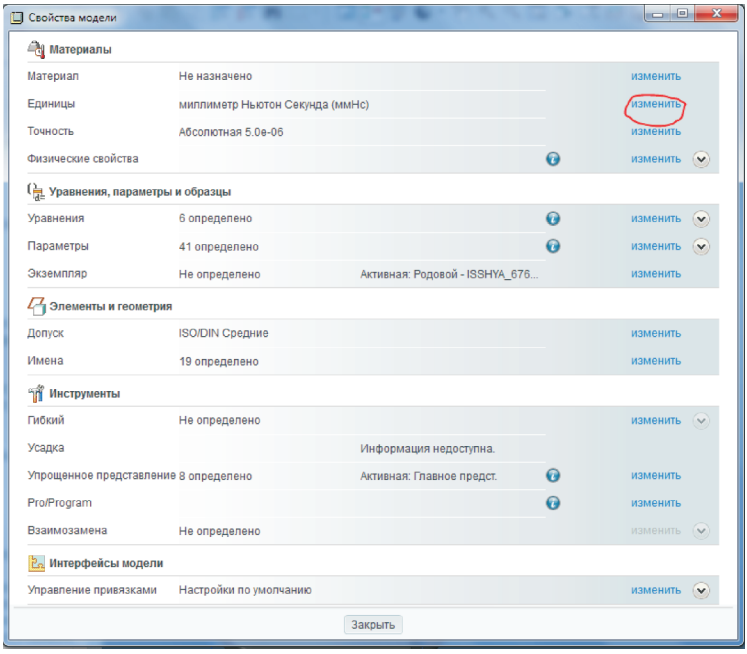


Рис. 1.97. Окно «Свойства модели»

После выбора удобной для расчета системы единиц при необходимости следует указать системе команду «Выполнить преобразование».

Проект необходимо сохранить, геометрическое упрощение закончено.

1.11.3. ЗАДАНИЕ МАТЕРИАЛОВ

Всем вовлеченным в расчет деталям должны быть присвоены физические параметры. Для этого им необходимо назначить материалы.

Назначение можно сделать двумя способами:

– в самой САПР Creo/Parametric, выполнив команды «Файл» — «Свойства» — «Материал»;

– в модуле Creo/Simulate, применив назначение материала.

В первом случае назначение материала отражается на всех модулях Creo/Parametric и как бы становится материалом по умолчанию. Во втором случае назначение отражается только на расчетном модуле, при этом назначенный конструктором материал в Creo/Parametric остается нетронутым.

При назначении материала следует проследить за тем, чтобы все необходимые значения его параметров были введены правильно (рис. 1.98).

Для прочностного анализа необходимо задать следующие параметры (на рис. 1.98 обведены красным):

– плотность;

– коэффициент Пуассона;

– модуль Юнга;

– коэффициент линейного расширения.

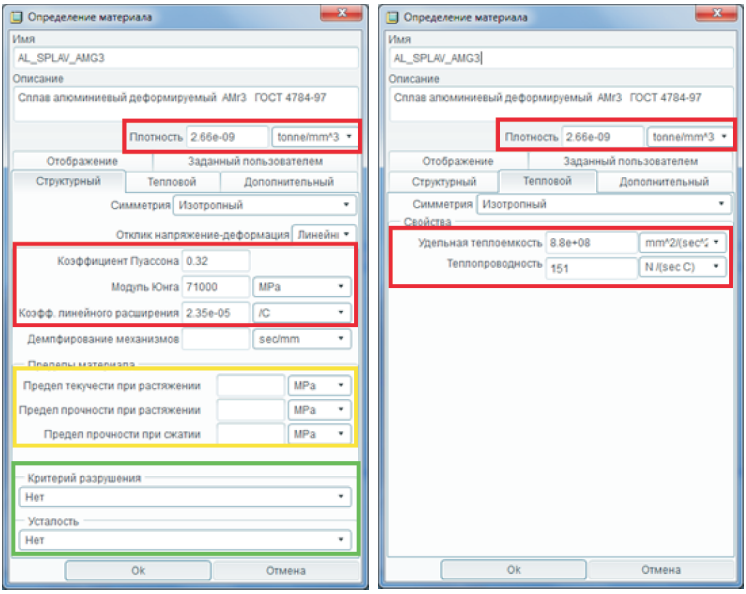


Рис. 1.98. Назначение физических параметров материалов

Для теплового анализа следует задать:
– плотность;
– удельную теплоемкость;
– теплопроводность.

Отсутствие хотя бы одного из этих параметров неминуемо приведет к ошибке в соответствующем расчете.

Перечисленные далее параметры можно опционально вводить для линейного типа материала, а для упруго-пластического типа материала их ввод обязателен (на рис. 1.98 обведено желтым):
– предел текучести при растяжении;
– предел прочности при растяжении;
– предел прочности при сжатии.

Можно также задать «Критерий разрушения» материала (предел текучести или предел прочности, на рис. 1.98 обведено зеленым). В этом случае появится возможность просчитать запас прочности. Критерий «Усталость» обязательно задавать только в том случае, если проводится анализ на усталостные разрушения.

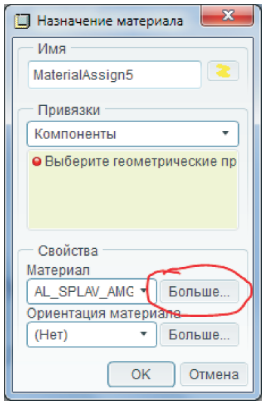


Рис. 1.99. Добавление материалов в модель

Используемые материалы необходимо сначала перенести в модель. Для этого надо нажать кнопку «Больше» (рис. 1.99), после чего появится возможность работать с библиотекой (рис. 1.100).

Далее следует перенести в правый список сразу все необходимые материалы и создать недостающие. После этого каждой детали, если необходимо переопределить материал, назначаем желаемый.

В итоге у тех деталей, материал которых назначен в Simulate, появится особый знак желтого цвета — ярлык (рис. 1.101).

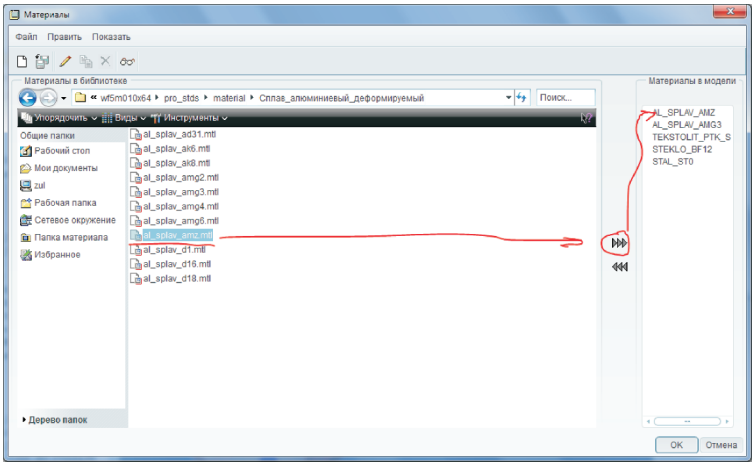


Рис. 1.100. Библиотека материалов

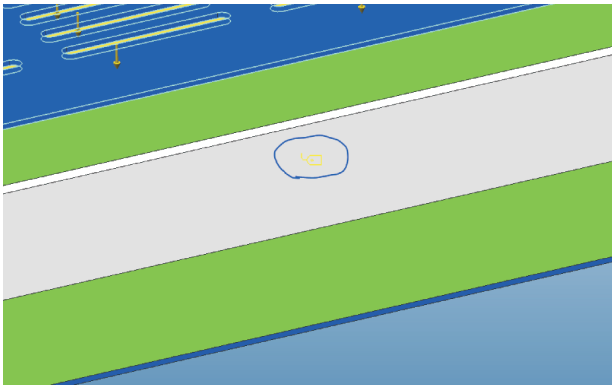


Рис. 1.101. Ярлык детали с назначенным материалом

Отсутствие назначенного для детали материала неизбежно вызовет ошибку решателя на этапе создания сетки конечных элементов при попытке запустить анализ на выполнение.

1.11.4. ИДЕАЛИЗАЦИЯ ВЗАИМОСВЯЗЕЙ

При расчете сборочных единиц необходимо назначить механические или тепловые взаимосвязи. Компонент, не связанный или недостаточно связанный с другими, вызывает сбой в расчете.

Для назначения механических взаимосвязей используют:

– интерфейс по умолчанию,
– частный интерфейс,
– сварку,
– жесткую связь,
– болтовое соединение,
– весовую связь,
– жесткую связь.

Интерфейс по умолчанию отвечает за взаимосвязи, не назначенные явно пользователем. Настраивается такой интерфейс через меню «Начало» — «Настройка модели» (рис. 1.102).

Существует три типа интерфейсов:

– объединяющий,
– свободный,
– контактный.

Объединяющий интерфейс соединяет соприкасающиеся компоненты по всей поверхности соприкосновения.

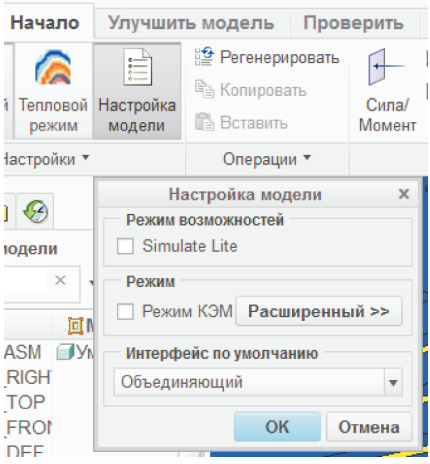


Рис. 1.102. Настройка интерфейса по умолчанию

Пересекающиеся в пространстве компоненты или компоненты с зазором не соединяются.

Свободный интерфейс не связывает детали даже в том случае, если они пересекаются или соприкасаются. В этом случае в обязательном порядке необходимо назначать индивидуальные связи для каждой пары взаимодействующих компонентов.

Контактный интерфейс не позволяет компонентам или поверхностям проникать друг в друга, при этом разойтись в результате деформации такие компоненты могут свободно. Контактный интерфейс по умолчанию применять не рекомендуется, так как это может привести к неоправданной затяжке времени, связанной с попыткой приложения Simulate определить возможные соприкасающиеся компоненты. Как правило, конструктор знает о таких компонентах, их лучше назначать индивидуально.

Частный интерфейс, сварка, болтовое соединение, жесткая связь отменяют действие интерфейса по умолчанию в месте своего применения.

Рассмотрим назначение взаимосвязей на примере изделия, показанного на рис. 1.103. Проведем предварительный экспертный анализ конструкции.

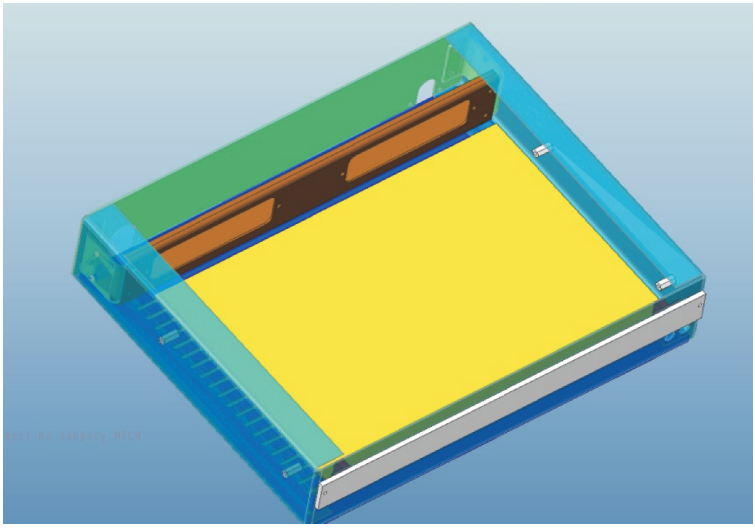


Рис. 1.103. Внешний вид изделия для назначения взаимосвязей

Модель изделия состоит из верхней и нижней перфорированных пластин, боковой и задней изогнутых пластин, задней плоской пластины, ячейки и шестигранных стоек. Разъемов и направляющих для ячейки нет, вместо них будут использованы соответствующие связи.

Преимущественным взаимодействием является плотное прилегание, поэтому включаем объединяющий интерфейс по умолчанию, затем назначаем вручную взаимодействие на стойках через жесткую связь (рис. 1.104).

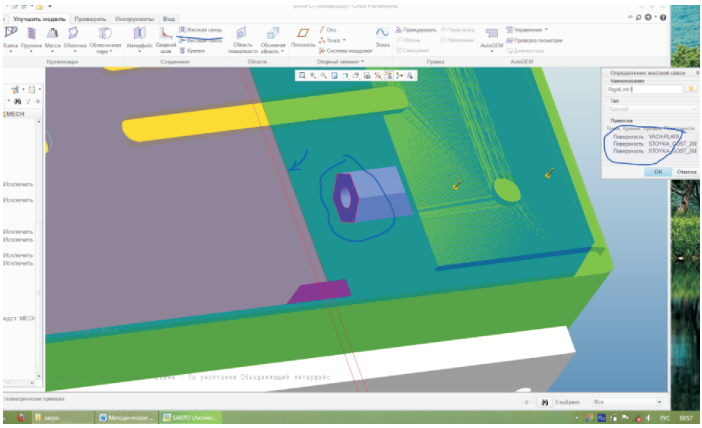


Рис. 1.104. Назначение взаимодействия на стойках

Поверхности стоек и торца платы на одной стороне указываем при нажатой клавише Ctrl, как показано на рис. 1.104. Таким же образом назначаем аналогичную связь с другой стороны, затем соединяем жесткой связью задний торец платы и отверстия разъемов (рис. 1.105).

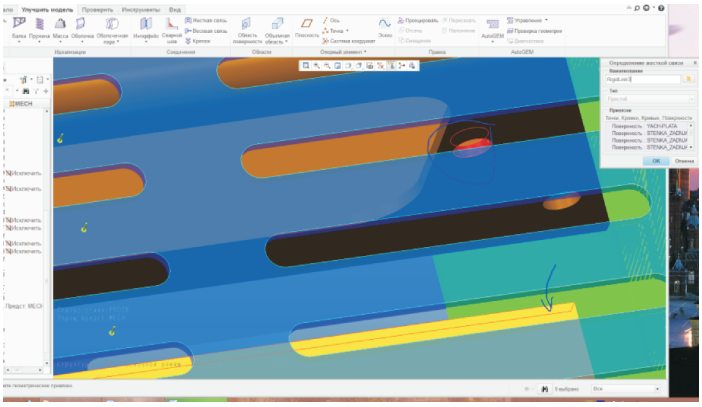


Рис. 1.105. Выполнение соединения жесткой связью

В результате использования интерфейсов и связей не должно оставаться компонентов, не связанных механической связью, в противном случае расчет завершится ошибкой.

Далее зададим болтовые соединения пластин. В отверстиях, в которых были крепежные элементы, зададим болтовое соединение (рис. 1.106).

В данном случае указываются противолежащие кромки смежных деталей, задаются параметры соединения. После создания всех крепежей система автоматически синтезирует измерители. Приложение Simulate не

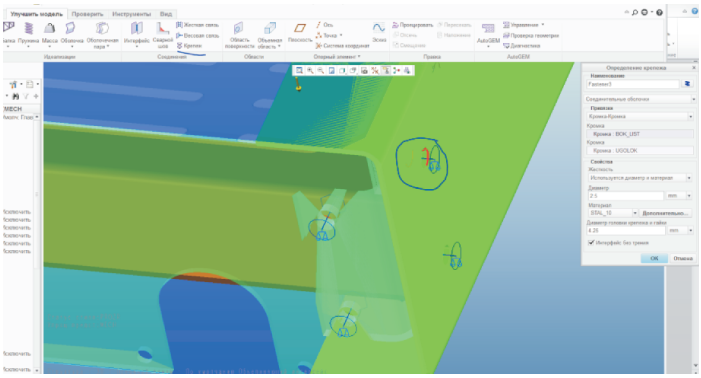


Рис. 1.106. Выполнение болтовых соединений

анализирует прочность болтовых соединений, а лишь учитывает наличие связи. Измерители будут содержать осевые и перерезывающие составляющие реакций, что даст возможность рассчитать соединение на прочность в зависимости от его вида по стандартным формулам.

Иногда возникает необходимость обеспечить соединение в сложных случаях, когда при сборке не обеспечено касание. Тогда следует временно скорректировать модель на предмет устранения зазоров. Этого можно достичь, редактируя сборочную единицу, если есть зазор, или выполняя сборочный вырез, если нужно ликвидировать взаимопроникновение компонентов друг в друга (в режиме сборки меню «Модель» — раздел «Компонент» — подменю «Операции с компонентами» — «Вычесть» и далее следовать подсказкам).

1.11.5. ЗАДАНИЕ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ

Граничные условия предназначены для описания условий эксплуатации изделия. Различают два вида граничных условий: условия нагружения и закрепления. Для правильного описания поведения модели необходимо дать соответствующую экспертную оценку на основе сведений о месте установки и применения изделия и суметь абстрагироваться от реальных воздействий, заменяя их эквивалентными нагрузками, такими как сила, давление, нагрузка в опоре, линейное и центробежное ускорение, температура.

Любое закрепление представляется через шесть степеней свободы, поэтому для задания закрепления следует определить, какое движение оно обеспечивает или не обеспечивает, и освободить или запретить соответствующие степени свободы.

Зададим граничные условия для модели, начнем с нагружений.

По условию задачи изделие испытывает воздействие силы 30 Н, направленной перпендикулярно верхнему перфорированному листу (рис. 1.107).

Зададим граничные условия закрепления.

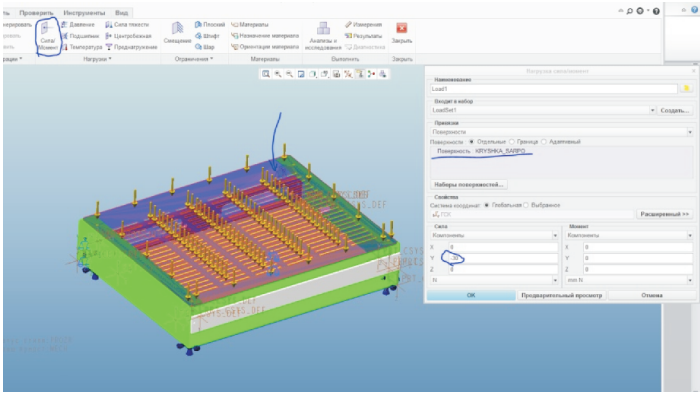


Рис. 1.107. Задание нагружений

Для правильного задания закреплений следует проанализировать место и способ крепления. Изделие крепится при помощи амортизаторов, которых не было в упрощенном представлении. Выполним закрепление отверстий амортизаторов по всем степеням свободы (рис. 1.108).

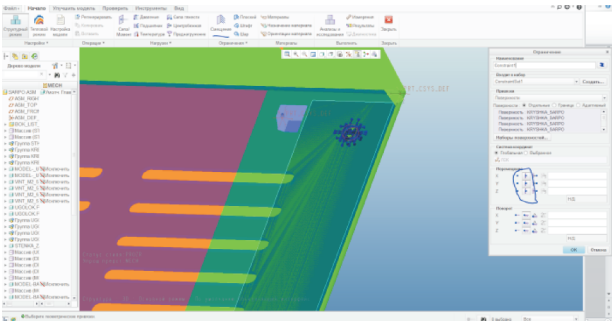


Рис. 1.108. Закрепление отверстий амортизаторов

Необходимо выбрать все четыре отверстия.

1.11.6. ОБОЗНАЧЕНИЕ МАСС ИЗДЕЛИЙ

Изъятые компоненты необходимо «вернуть» на место при помощи массовых идеализаций. Для этого рекомендуется предварительно назначить жесткие связи на элементы крепежа, так как жесткость изъятых компонентов доподлинно не известна. Если компонент был приклеен или еще каким-либо иным образом жестко установлен, следует задать область на поверхности установки, повторяющую силуэт компонента. На эту область назначается масса, и область обозначается как жесткая.

В рассматриваемом изделии больших сосредоточенных масс нет, поэтому опускаем этот шаг.

Тесты к лекции 1.11

1. ***Идеализация модели применительно к инженерному анализу — это:***

а) оптимизация сборочного состава, упрощение геометрии, идеализация взаимосвязей;

б) упрощение геометрии, идеализация взаимосвязей;

в) идеализация взаимосвязей.

2. ***Для прочностного анализа материала упруго-пластического типа необходимо задавать следующие параметры:***

а) предел текучести при растяжении, предел прочности при растяжении, предел прочности при сжатии;

б) предел текучести при растяжении, предел прочности при растяжении;

в) предел прочности при сжатии.

3. ***Укажите три типа интерфейсов по умолчанию:***

а) объединяющий, свободный, контактный;

б) объединяющий, сварка, контактный;

в) болтовое соединение, жесткая связь, контактный.

4. ***Для общего случая закрепления существует:***

а) 3 степени свободы;

б) 6 степеней свободы;

в) неограниченное число степеней свободы.

5. ***Если компоненты могут свободно расходиться в пространстве в результате деформации, но не могут проникать друг в друга, то следует задать такую взаимосвязь:***

а) жесткой связью;

б) свободным интерфейсом;

в) контактным интерфейсом.

1.12. ПРОВЕДЕНИЕ СТАТИЧЕСКОГО И МОДАЛЬНОГО АНАЛИЗОВ

Цель лекции — изучение процессов проведения статического и модального анализов приборных конструкций с выбором способа анализа точности и рассмотрением особенностей задания нагрузок и закрепления модели.

1.12.1. АНАЛИЗ СТАТИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ

Статический анализ проводится с целью расчета прочности и жесткости конструкции при постоянно действующих граничных условиях.

Исходными данными являются наборы нагрузок и наборы закреплений. Допустимо проведение анализа без учета закреплений, в этом случае все приложенные нагрузки должны быть статически уравновешены и необходимо использовать опцию «Освобождение инерции». Допустимо также проводить расчеты без учета нагрузок, тогда в используемых наборах закреплений должна быть задана вынужденная деформация.

Выберем требуемые наборы нагрузок и закреплений (рис. 1.109).

Во вкладке «Сходимость» выберем способ анализа точности:

– *быстрая проверка*: будет проведен расчет без анализа точности. Этот способ используют для проверки целостности модели и введенных данных (правильность данных не может быть проверена);

– *однопроходная адаптация*: будут проведены расчет и анализ точности. Точность расчета будет во многом зависеть от геометрии модели;

– *многопроходная адаптация* — самый трудоемкий способ, позволяющий указать точность расчета. Его стоит использовать только на финальной, чистовой стадии расчета.

Во вкладке «Вывод» следует выбрать величины, которые необходимо рассчитать. Для анализа прочности модели необходимо рассчитать ее внутренние напряжения и сравнить их с предельно допустимыми значениями для каждого материала. Превышение предела текучести вызывает необратимые пластические деформации.

После завершения подготовительных работ становится возможным запуск расчета на исполнение. Следует открыть окно «Состояние проработки», чтобы иметь возможность контролировать ход расчетов. Сигналом завершения расчета будет надпись «Выполнение успешно завершено» (рис. 1.110).

Если расчет завершился с ошибкой, следует проанализировать данные окна «Состояние проработки». В нем будет указана причина остановки расчета. Если причина не выяснилась, следует придерживаться общего алгоритма поиска ошибки:

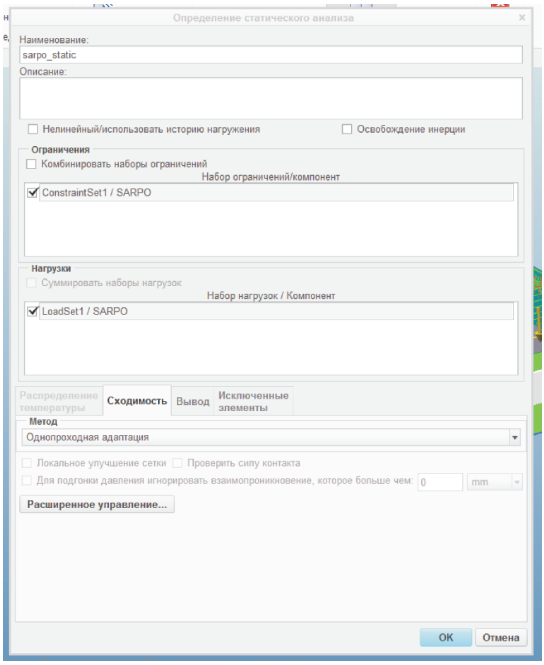


Рис. 1.109. Выбор наборов нагрузок и закреплений

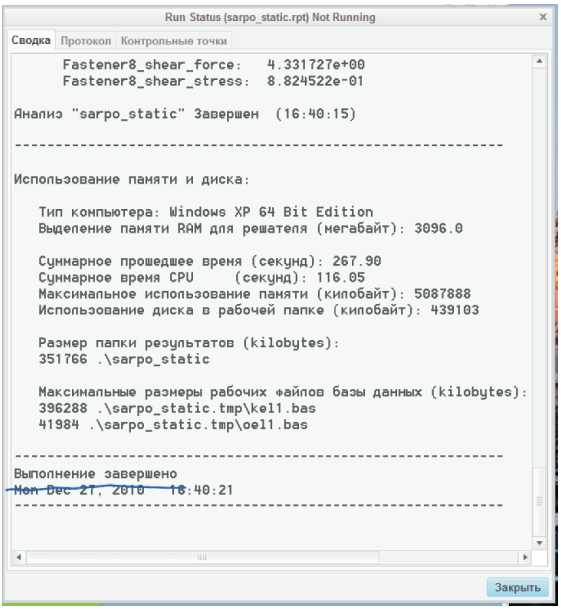


Рис. 1.110. Сообщение об успешном завершении расчета

– проверить используемые материалы;

– проверить геометрию и оболочки через инструмент «Autogem»;

– проанализировать взаимосвязи между компонентами. Все компоненты должны образовывать единую «механическую цепочку», т. е. не должно быть «незакрепленных» компонентов;

– проверить интерфейс по умолчанию, частные интерфейсы, соединения. Следует помнить, что объединяющие интерфейсы объединяют только соприкасающиеся компоненты, а не пересекающиеся или располагающиеся с зазором. Пересечение можно попытаться временно устранить корректировкой расположения деталей сборки или с помощью команды «Вычитание» (в режиме сборки «Править» — «Действия с компонентами» — «Вычесть»);

– создать сетку при помощи команды «Создать» инструмента «Autogem»;

– проверить объем свободного места на диске, объем оперативной памяти, права доступа к используемой папке.

Систему закреплений можно проверить, используя модальный анализ с поиском жестких форм. При просмотре режимов колебаний выявляются плохо закрепленные элементы (см. подразд. «Модальный анализ» далее).

После успешного завершения расчета следует запустить постпроцессор.

В результате расчета получим картину распределения эквивалентных напряжений (von Mises) в модели (рис. 1.111).

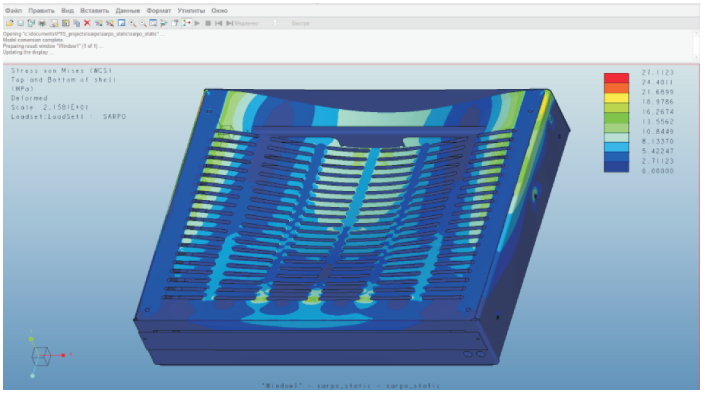


Рис. 1.111. Картина распределения эквивалентных напряжений в модели

С помощью средств построения сечений, динамического запроса, запроса максимума необходимо проверить значения напряжений в модели. В данном случае мы видим «проникновение» перфорированной пластины внутрь стенки. Однако этот эффект объясним утрированным показом деформации. При нормальном показе такого эффекта не будет.

Если эквивалентное напряжение превышает предел текучести, происходит необратимая деформация модели. В этом случае необходимо предпринять шаги по ее доработке или выбору более подходящего материала.

1.12.2. МОДАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

Модальный анализ проводится с целью определения собственных частот и режимов колебаний в исследуемом диапазоне частот. Исходными данными для анализа являются модель и закрепления. Нагрузки в данном случае не учитываются.

Этот анализ является обязательным шагом перед постановкой любой динамической задачи.

Модель должна быть закреплена так, чтобы исключить возможность свободных перемещений. Возможен расчет незакрепленной или не полностью закрепленной модели, в этом случае следует включать опцию «С поиском жестких форм» (рис. 1.112).

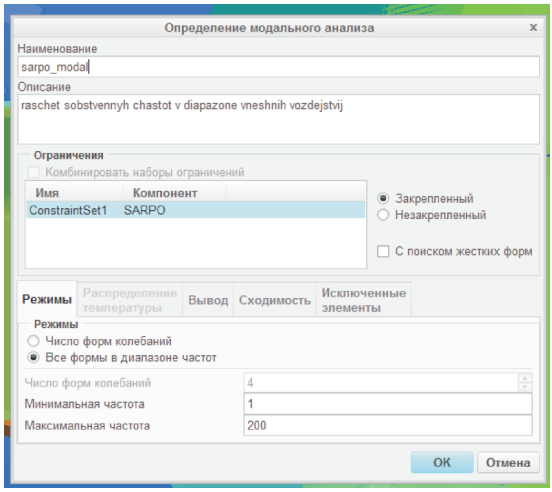


Рис. 1.112. Окно задания параметров модального анализа

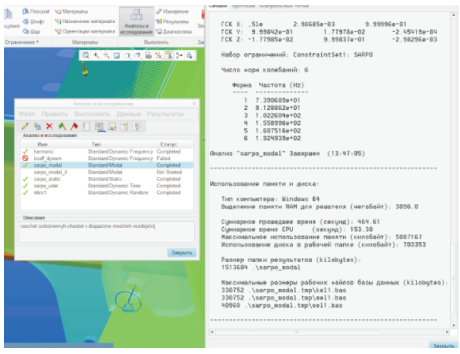


Рис. 1.113. Отчет, включающий значения найденных собственных частот

Содержимое вкладки «Сходимость» имеет те же функции, что и при статическом анализе применительно к точности расчета собственных частот.

В результате расчета получим отчет (рис. 1.113), где указаны найденные собственные частоты. В постпроцессоре можно при помощи анимации увидеть деформированное состояние, чтобы оценить движение колебательной системы при том или ином резонансе. Если проводился поиск «жестких форм», то на низших частотах можно будет увидеть свободное движение модели или отдельных ее компонентов.

Тесты к лекции 1.12

1. ***Статический анализ допустимо проводить без нагрузок и закреплений*** (выберите один или больше правильных ответов):

а) да, допустимо без закреплений, если все приложенные нагрузки статически уравновешены и использована опция «Освобождение инерции»;

б) да, допустимо без нагрузок, если в используемых наборах закреплений присутствует вынужденная деформация;

в) нет, нагрузки и закрепления всегда должны задаваться в параметрах анализа.

2. ***При несложной анализируемой геометрии достаточен следующий способ анализа точности:***

а) быстрая проверка;

б) однопроходная адаптация;

в) многопроходная адаптация.

3. ***Взаимное проникновение деталей друг в друга в картине деформации может быть вызвано:***

а) утрированным показом;

б) наличием пластической деформации;

в) такой эффект невозможен.

4. ***Нагрузки при модальном анализе учитываются:***

а) да;

б) нет;

в) только при неполностью закрепленной модели.

5. ***Модель при модальном анализе можно закреплять неполностью:***

а) да, с включением опции «С поиском жестких форм»;

б) нет;

в) да, если задана хотя бы одна нагрузка.

1.13. РАСЧЕТ НА ВОЗДЕЙСТВИЕ УДАРОВ И ВИБРАЦИЙ

Цель лекции — проведение расчета на воздействие ударов и вибраций приборных конструкций с настройкой вида анализа и характеристик воздействия, назначением коэффициента демпфирования, заданием набора динамических измерителей и выходных параметров расчета.

1.13.1. РАСЧЕТ НА ВОЗДЕЙСТВИЕ УДАРНОГО ИМПУЛЬСА

Расчет, проводимый с целью определения ударного ускорения, действующего на компонентную базу, и напряжений в модели, выполняется в рамках переходного анализа. Перед этим следует провести модальный анализ.

В качестве исходных данных необходимы амплитуда, длительность, форма ударного импульса. Иногда дополнительно задается частота следования импульсов (скважность). Если форма импульса не задана, расчет ведется по синусоидальной форме.

Анализ проводится следующим образом:

– задаются параметры анализа;

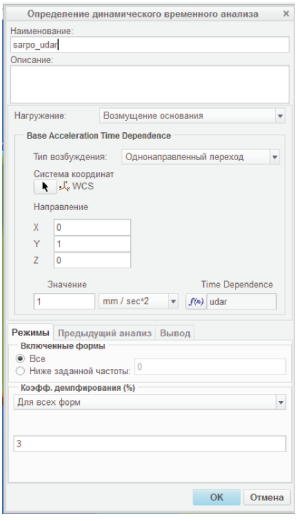


Рис. 1.114. Задание параметров динамического переходного анализа

– создаются и размещаются необходимые динамические измерители, собирающие данные для графиков или вычисляющие максимальные значения;

– проводится расчет;

– анализируется результат.

Итак, создадим анализ («Файл» — «Новый динамический» — «Переходной»), задав вначале его параметры (рис. 1.114).

Выберем в качестве вида воздействия возмущение основания, что соответствует воздействию, приходящему через закрепления.

Зададим функцию, определяющую временны́е характеристики ударного импульса (рис. 1.115). Для синусоидального импульса можно применить следующее выражение:

If (time<0.015,20*9800*sin(time/0.015*pi),0),

где 0.015 — время импульса, с; 20*9800 — амплитуда (20g в мм/с^2); time — переменная времени.

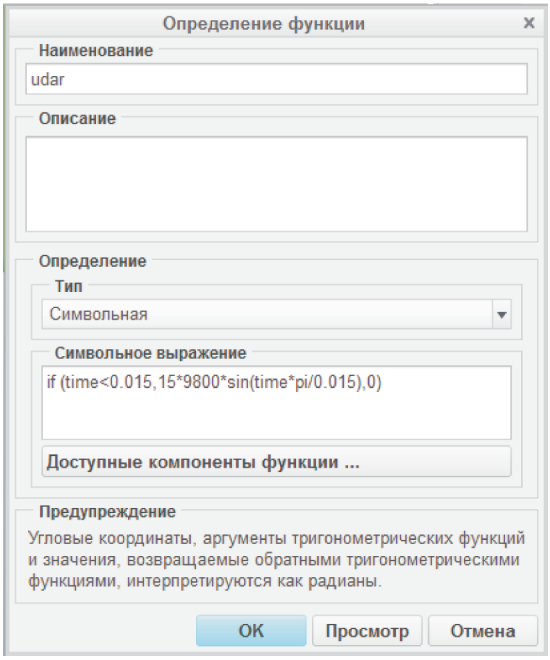


Рис. 1.115. Окно задания функции

Если щелкнуть на клавише «Просмотр», для диапазона от 0 до 0,02 с график входного импульса будет иметь вид, показанный на рис. 1.116.

Возвратимся к исходной форме. Входной импульс в пространстве представляет собой вектор и может воздействовать на изделие в произвольном направлении, поэтому расчет необходимо проводить отдельно для каждого из трех направлений осей координат, задавая последовательно 1,0,0 (X); 0,1,0 (*Y*); 0,0,1 (*Z*). Следует учитывать, что амплитуда этого вектора «умножается» на введенную функцию, поэтому сюда можно выносить постоянный множитель. Задаем расчет относительно «основания», чтобы система вычисляла абсолютные значения ускорений, а не разницу, которую к входному воздействию добавляет модель.

Зададим число используемых форм, коэффициент демпфирования.

Коэффициент демпфирования выбирается, исходя из материала компонента, «соединяющего» модель и носитель. Он определяется как разница между амплитудой соседних периодов колебаний, выраженная в процентах. Коэффициент зависит от частоты колебаний, однако при частотах в диапазоне 0...2 кГц и при относительно небольшой амплитуде в воздушной среде такой зависимостью можно пренебречь. Обычно при колебаниях в воздушной среде используют значения коэффициентов, приведенные в табл. 1.2.

Во вкладке «Предыдущий анализ» необходимо выбрать тот модальный анализ, который будет задействован в расчете. Опция «Использовать результаты проработки» позволяет не перезапускать его, экономя время, однако

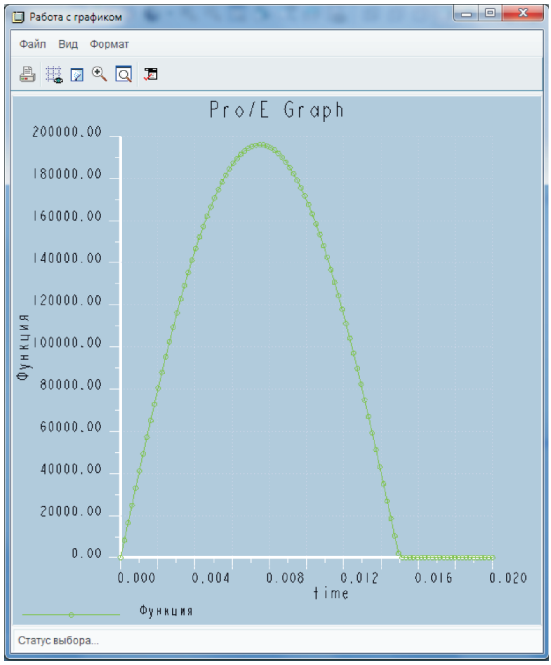


Рис. 1.116. График функции возмущения основания

Таблица 1.2

Коэффициент демпфирования

Материал	Коэффициент демпфирования, %
Металлические сплавы	3
Пластики	4–8
Резина, амортизаторы АД, АЧ	6–10
Амортизаторы АФД	20–40
Амортизаторы АПН	30–60

в этом случае необходимо позаботиться о том, чтобы результаты модального анализа соответствовали модели. Если опцию не использовать, модальный анализ будет вовлечен в переходной, и последовательно будут запущены оба.

Во вкладке «Вывод» необходимо указать, какие величины следует рассчитывать (рис. 1.117).

Вместо автоматических интервалов вывода рекомендуется устанавливать пользовательские, перекрывая по времени анализа как минимум две длительности импульса. Опция «Все результаты» напротив каждого шага означает, что в каждый момент времени будет рассчитана моментальная

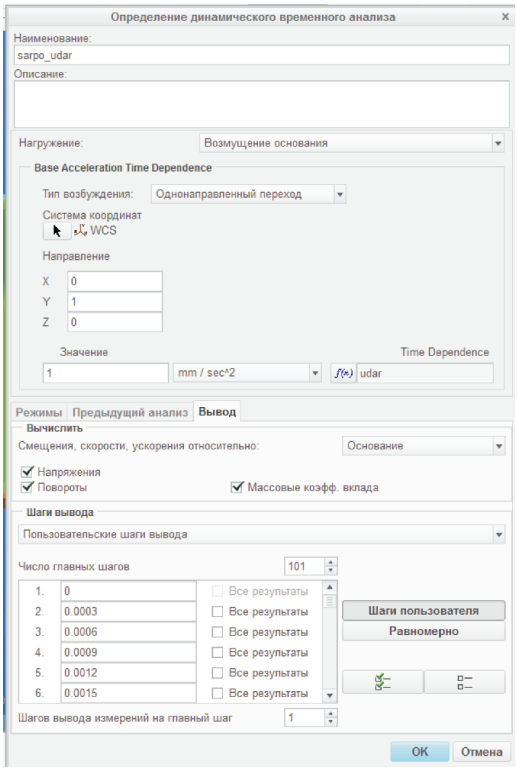


Рис. 1.117. Вкладка «Вывод» окна параметров динамического переходного анализа

картина распределения напряжений и перемещений. Время анализа в этом случае увеличивается.

Перед запуском анализа необходимо создать динамические измерители, иначе ударные ускорения и максимальные значения характеристик за время анализа рассчитаны не будут.

Создадим следующие измерители: ускорения на каждом шаге для поверхности платы, так как там находятся компоненты, и напряжения на каждом шаге для всей модели (рис. 1.118–1.120).

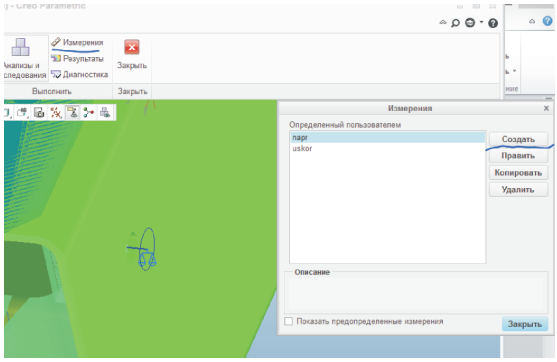


Рис. 1.118. Создание измерителя

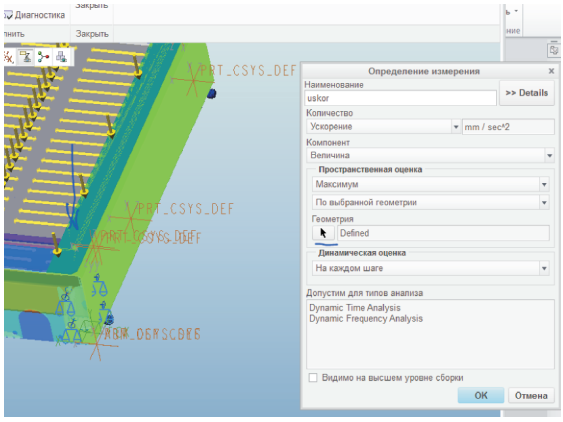


Рис. 1.119. Выбор геометрии для измерителя

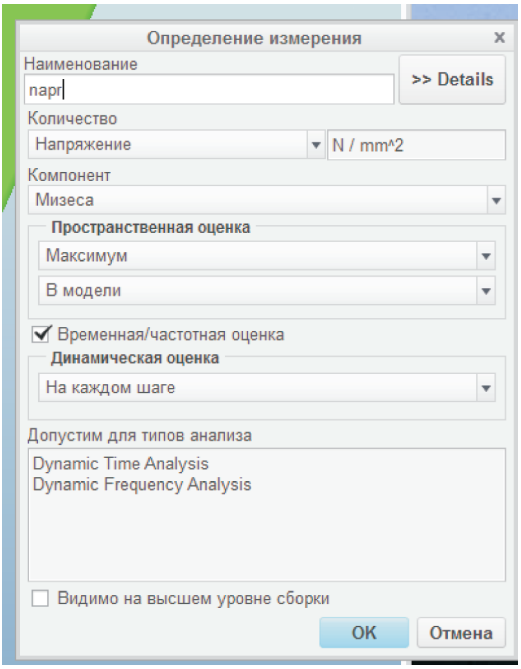


Рис. 1.120. Задание параметров измерителя

В качестве геометрии следует выбрать поверхность печатной платы (в данном случае средствами выбора «скрытых» объектов).

При задании измерителей необходимо проводить оценку по времени и частоте, иначе измерители в динамических анализах работать не будут. Можно также ставить метку времени — это такой измеритель, который со-

держит время возникновения расчетного значения (в данном случае — время возникновения максимального напряжения).

Следует назначать оптимальное количество измерителей, так как чрезмерное их количество увеличивает время анализа.

Далее проводим анализ.

После окончания расчета запускаем постпроцессор, строим графики, выбираем вкладку «Измерения» и затем требуемый измеритель (рис. 1.121). Результат представлен на рис. 1.122.

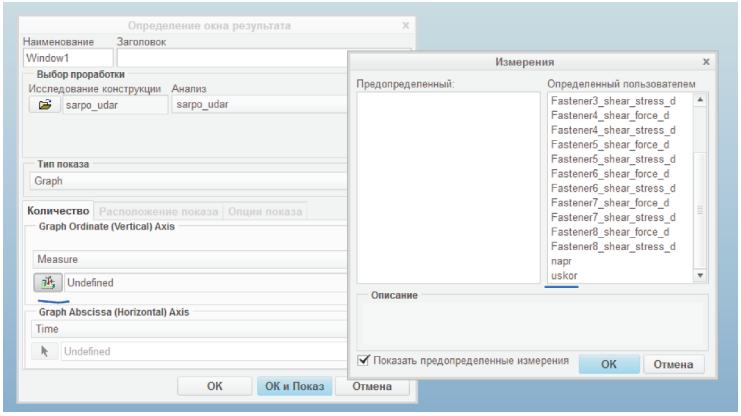


Рис. 1.121. Выбор измерителя для отображения результатов

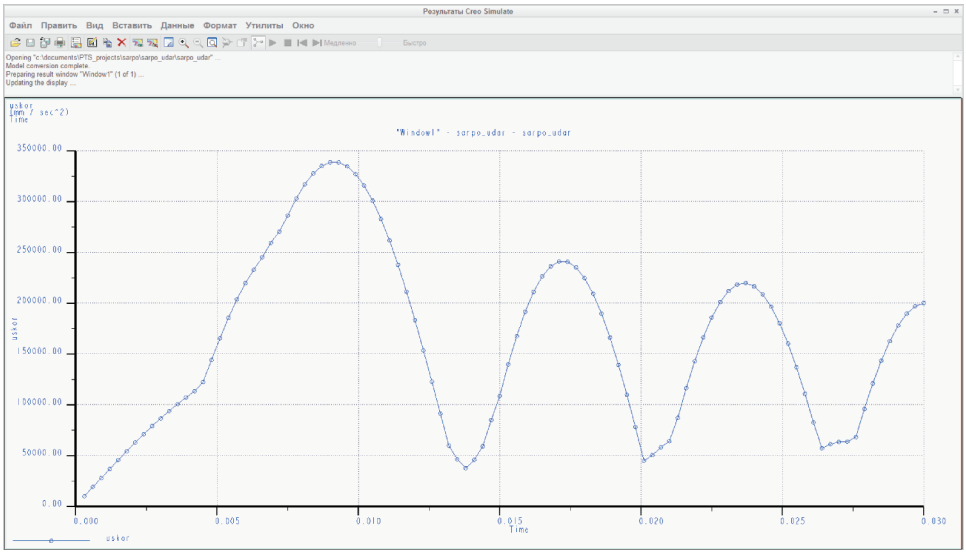


Рис. 1.122. График отклика на приложенное воздействие

В результате анализа графиков принимают решение о внесении изменений в модель. Цель этих изменений — достижение большей разницы между временем импульса и периодом собственных колебаний модели. В итоге применяется амортизация либо ужесточение конструкции.

1.13.2. РАСЧЕТ НА ВОЗДЕЙСТВИЕ ГАРМОНИЧЕСКИХ ВИБРАЦИЙ

Расчет на гармонические вибрационные воздействия проводится аналогично расчету на ударные воздействия, за исключением задания внешних воздействий, поэтому следует изучить материал п. 1.13.1. Отличия указаны далее.

Создадим «Новый динамический» — «Гармонический» анализ. В качестве входной функции выберем на этот раз распределение виброперегрузки по диапазону частот. Обычно распределение задается как амплитуда виброускорения в диапазоне частот, и параметры такого внешнего воздействия удобнее задавать в виде таблицы.

Зададим для примера входное воздействие в диапазоне до 1000 Гц с перегрузкой 20g (рис. 1.123, 1.124).

Расчет проводится также для возмущения основания в трех направлениях. При этом следует использовать динамические измерители, описанные в п. 1.13.1 (рис. 1.125).

Зададим диапазон расчета от 0 до 1000 Гц, 100 шагов (рис. 1.126).

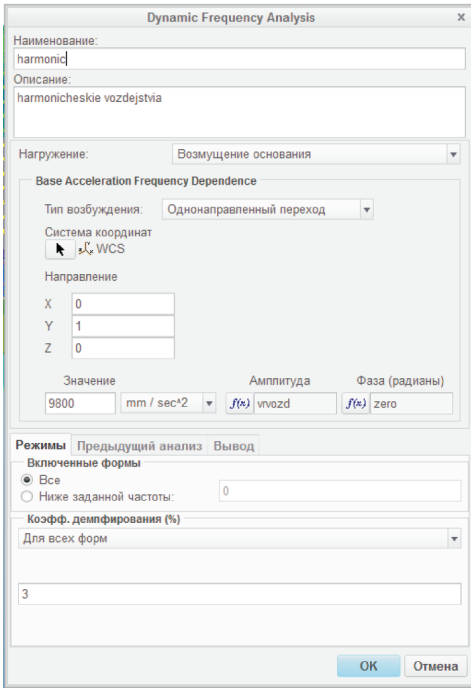


Рис. 1.123. Окно задания параметров динамического гармонического анализа

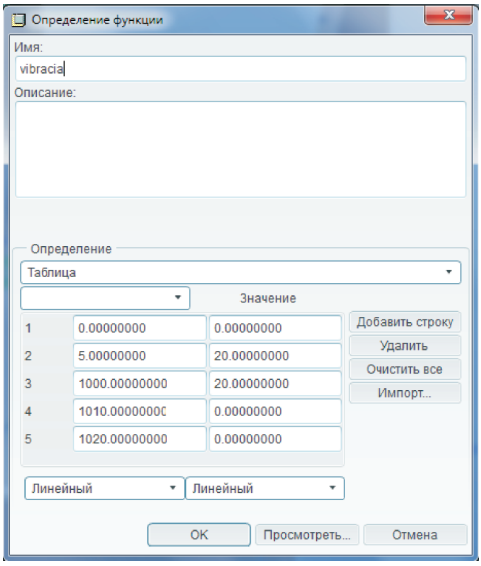


Рис. 1.124. Задание внешнего воздействия в виде таблицы

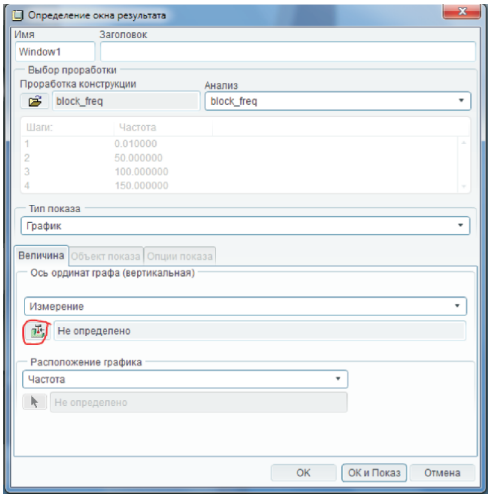


Рис. 1.125. Выбор измерителя для отображения результатов

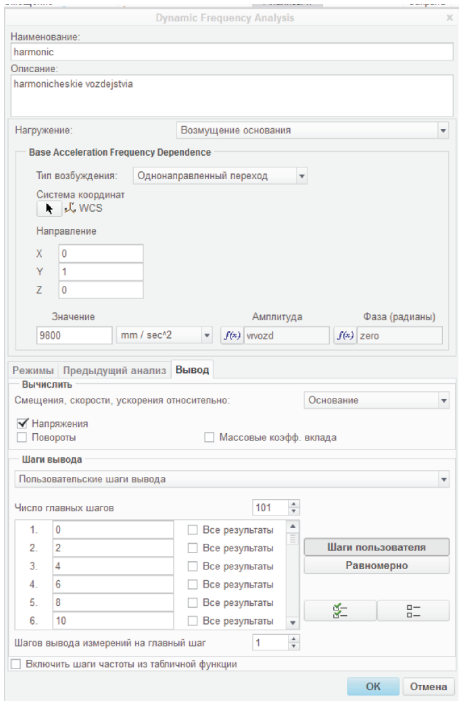


Рис. 1.126. Вкладка «Вывод» окна параметров динамического гармонического анализа

Включим расчет и после его окончания запустим постпроцессор. В итоге получим графики отклика (рис. 1.127).

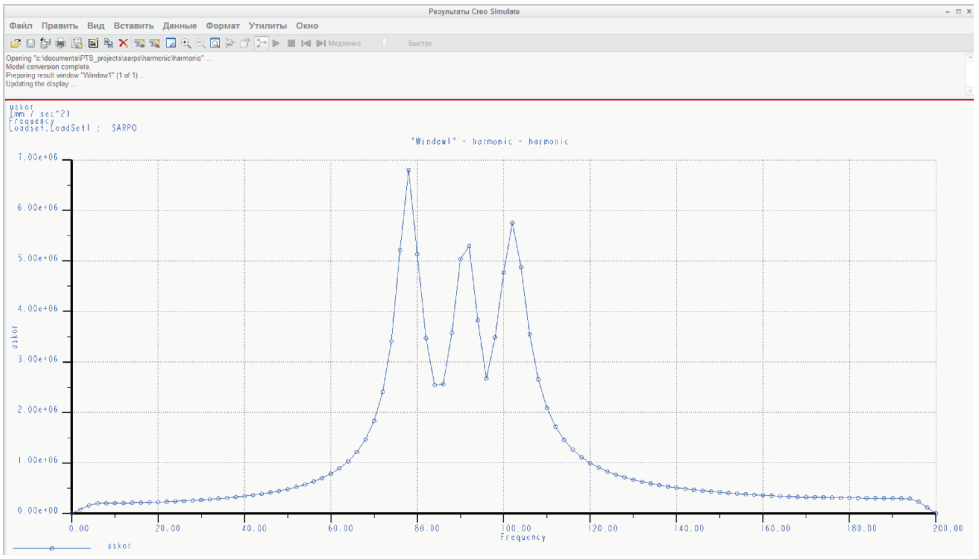


Рис. 1.127. Пример графика отклика на приложенное воздействие

По этим графикам можно сделать вывод о том, выдерживает или нет элементная база возникающие перегрузки. Целью коррекции конструкции здесь также является вывод резонансных частот за пределы внешних воздействий при помощи создания более жесткой конструкции либо введения амортизации.

В случае модуля на печатной плате ужесточения конструкции и, как следствие, увеличения значения ее собственной частоты можно добиться, в частности, путем использования рамки и/или ребер жесткости, увеличения толщины платы, применения более жесткого способа крепления.

1.13.3. РАСЧЕТ НА ВОЗДЕЙСТВИЕ СЛУЧАЙНЫХ ВИБРАЦИЙ

Расчет на воздействие случайных вибраций проводится аналогично расчетам, описанным в п. 1.13.1 «Расчет на воздействие ударного импульса» и 1.13.2 «Расчет на воздействие гармонических вибраций».

В качестве входной функции в данном случае используют плотность вероятности распределения энергии колебаний в зависимости от диапазона частот. Единицей измерения является g^2/Гц. Цель расчета — получение среднеквадратических значений ускорений и напряжений. Рекомендуется изучить ГОСТ 30630.1.9–2002.

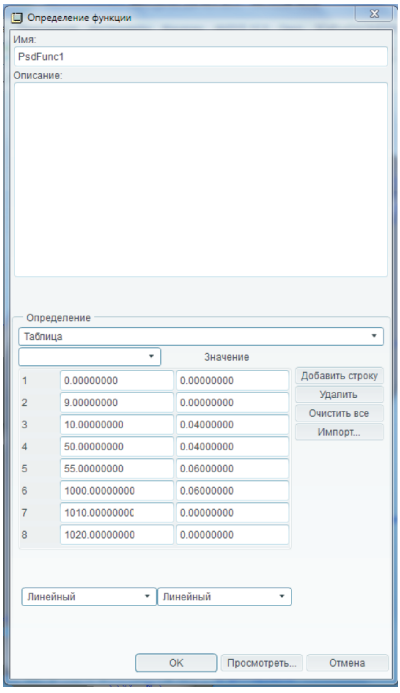


Рис. 1.128. Определение входной функции

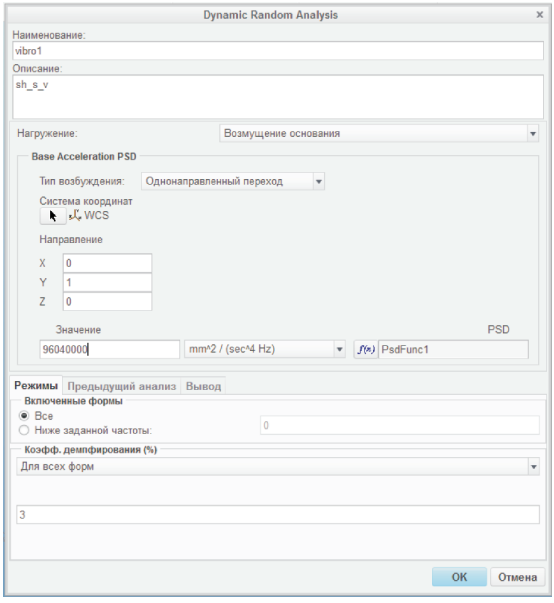


Рис. 1.129. Определение параметров расчета на воздействие случайных вибраций

Введем входную функцию (рис. 1.128).

В соответствии с ГОСТ 30630.1.9–2002 создадим анализ динамических случайных воздействий, зададим частотную дискретизацию и в окне задания параметров анализа (рис. 1.129) во вкладке «Вывод» активируем опцию «Вычислять среднеквадратические значения ускорений и напряжений». Вне зависимости от того, задана или нет частотная функция вблизи значения 0 Гц, входная функция должна описывать значения вблизи нуля. Также следует ввести шаги около нуля в частотную дискретизацию (см. рис. 1.129).

Динамические измерители из рассмотренных ранее подразд. 1.13.1 и 1.13.2 в данном случае неприменимы, так как воздействие происходит повсеместно во всем спектре. В качестве результатов получим распределенные по модели вероятностные среднеквадратические значения напряжений, перемещений, ускорений.

Тесты к лекции 1.13

1. ***Обязательно задаются в качестве исходных данных расчета на воздействие ударного импульса:***

а) амплитуда, длительность, форма ударного импульса;

б) амплитуда, длительность;

в) амплитуда, длительность, скважность ударных импульсов.

2. ***Если форма ударного импульса не задана, то расчет ведется:***

а) по треугольной форме;

б) по синусоидальной форме;

в) по форме единичного импульса.

3. ***Количество длительностей импульса, которые следует перекрывать пользовательскими интервалами вывода:***

а) не имеет значения;

б) равно единице;

в) минимум две.

4. ***Для расчета на воздействие ударного импульса требуется выполнить предшествующий анализ:***

а) нет, не требуется;

б) да, требуется выполнить статический анализ;

в) да, требуется выполнить модальный анализ.

5. ***В расчете на действие случайных вибраций результатом являются:***

а) энергия колебаний;

б) распределение виброперегрузки;

в) среднеквадратические значения напряжений, перемещений, ускорений.

1.14. АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ

Цель лекции — проведение анализа стационарного теплового режима приборных конструкций с заданием тепловых нагрузок, тепловыделения, коэффициентов конвективного теплообмена; использование результатов теплового анализа в смешанном анализе с целью расчета температурных деформаций конструкции.

1.14.1. АНАЛИЗ УСТАНОВИВШЕГОСЯ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ

Цель анализа тепловых режимов — получение распределения температур по модели и передача данных для расчета температурных деформаций.

Анализ проводится аналогично прочностному статическому анализу. В качестве «нагрузок» рассматриваются тепловые нагрузки, в качестве «закреплений» — заданные температуры и конвекция. Необходимо, чтобы для всех используемых материалов в библиотеке были корректно заданы плотность, удельная теплоемкость и теплопроводность. Подготовка модели аналогична описанной в п. 1.11 «Создание расчетной модели», если это не было сделано ранее.

Зададим тепловые нагрузки.

На печатной плате расположены тепловыделяющие компоненты, поэтому зададим поверхностное тепловыделение (рис. 1.130).

Тепловыделение с объема компонента задавать нельзя, так как для платы ранее была применена оболочечная идеализация (оболочечная пара).

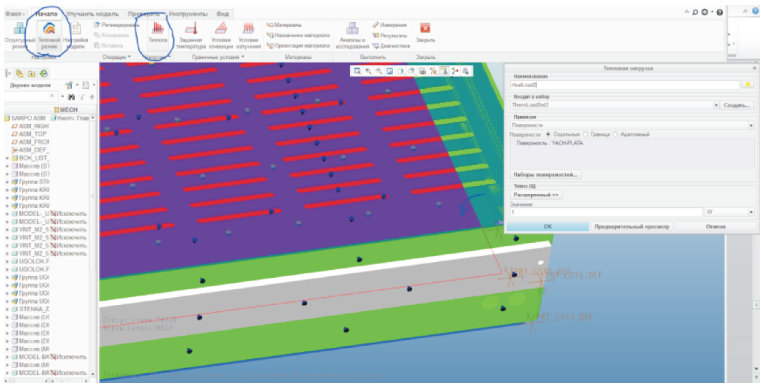


Рис. 1.130. Задание поверхностного тепловыделения

Наружные поверхности корпуса и платы соприкасаются с воздухом. Зададим коэффициенты конвективного теплообмена для корпуса (рис. 1.131) и для платы (рис. 1.132).

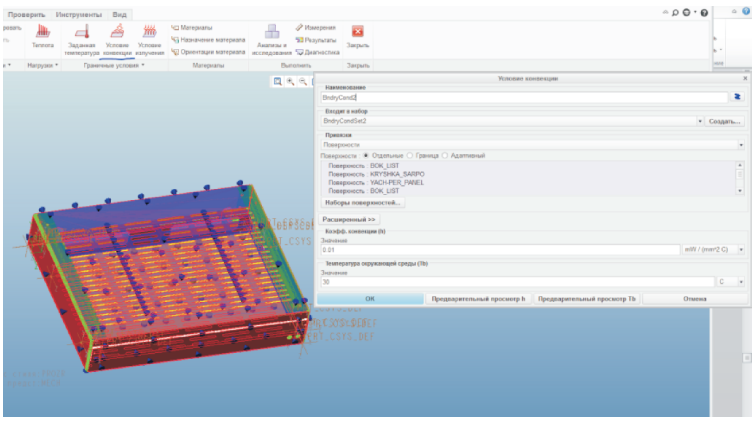


Рис. 1.131. Задание коэффициентов конвективного теплообмена для корпуса

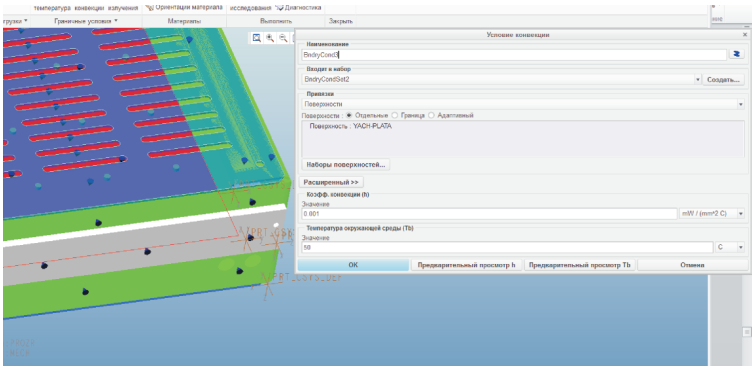


Рис. 1.132. Задание коэффициентов конвективного теплообмена для платы

Расчет коэффициента конвективного теплообмена должен быть проведен заранее. Это наиболее сложная часть теплового анализа, так как коэффициент как бы заменяет реальные процессы конвекции, которые в Creo/Simulate не поддерживаются. Специальные пакеты для такого расчета существуют, однако они требуют глубоких знаний в области гидро- и газодинамики, поэтому для расчетов рекомендуется использовать, например, итерационный подход.

Коэффициент конвекции и температура корпуса для рассматриваемого изделия были рассчитаны заранее по критериям Грасгофа и Прандтля.

Создадим тепловой анализ (рис. 1.133) и запустим расчет на выполнение. В результате расчета получим распределение температур по модели (рис. 1.134).

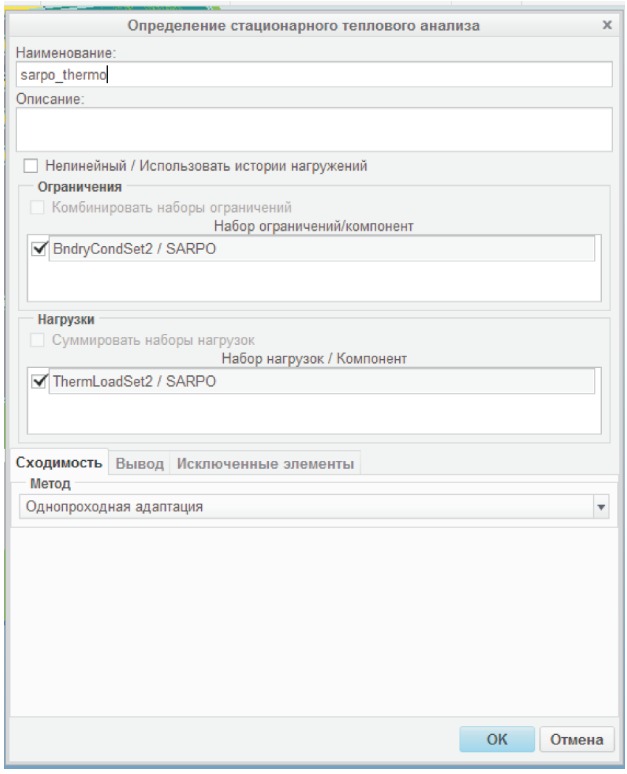


Рис. 1.133. Задание параметров теплового анализа

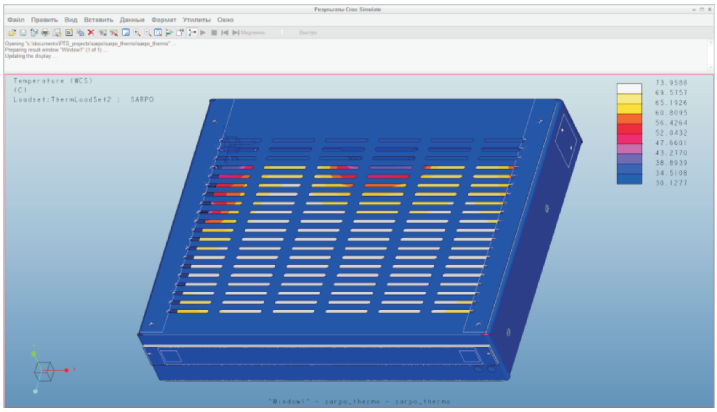


Рис. 1.134. Распределение температур по модели

В полученной картине распределения температур можно брать пробы в конкретных точках конструкции, выделять цветом интересующие диапазоны температур, скрывать отдельные детали конструкции в целях лучшего рассмотрения внутренних компонентов.

1.14.2. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ТЕПЛОВОГО АНАЛИЗА ДЛЯ РАСЧЕТА ТЕМПЕРАТУРНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ

Для того чтобы использовать результаты анализа тепловых режимов, в анализе прочности необходимо предварительно поставить и решить тепловую задачу в тепловом модуле. Затем следует осуществить переход в прочностной анализ, вызвать меню «Нагрузки» — «Нагрузка Mech/T» (рис. 1.135, 1.136), указать, в какой набор эта нагрузка должна войти, а также выбрать

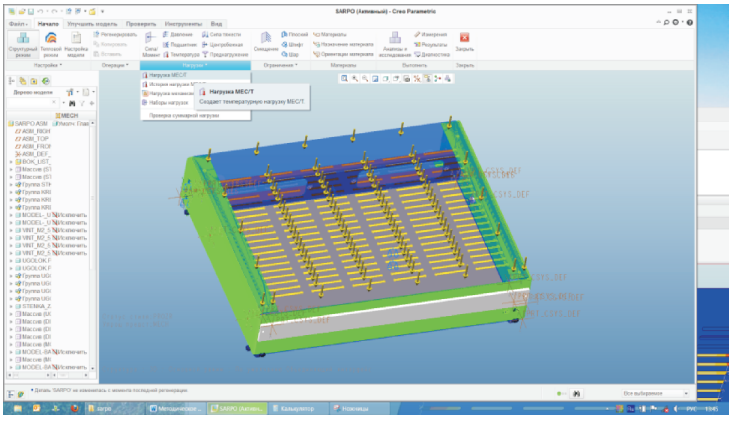


Рис. 1.135. Меню «Нагрузки» — «Нагрузка Mech/T»

опцию «Использовать результаты термального анализа», если нет необходимости каждый раз перезапускать расчет тепловых режимов. В дальнейшем расчет проводится аналогично расчету при проведении статического анализа.

В качестве температуры начала отсчета принимается температура до включения прибора.

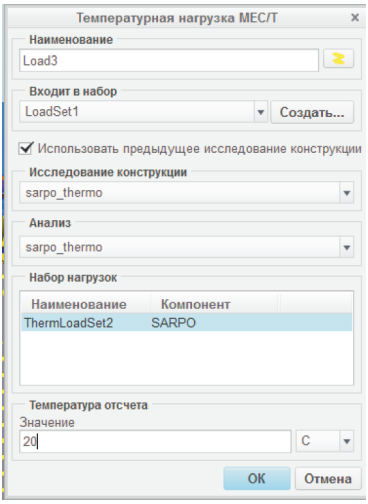


Рис. 1.136. Задание параметров температурной нагрузки Mech/T

Тесты к лекции 1.14

1. ***Значение коэффициента конвективного теплообмена для выполнения теплового анализа:***

а) рассчитывается САПР Creo/Simulate самостоятельно;

б) рассчитывается по критериям подобия;

в) следует брать из справочной литературы.

2. ***Параметры, которые необходимо обязательно задать для материалов в тепловом анализе:***

а) плотность, удельная теплоемкость и теплопроводность;

б) плотность, температурный коэффициент расширения и теплопроводность;

в) удельная теплоемкость, температурный коэффициент расширения и теплопроводность.

3. ***Результаты теплового анализа можно использовать для расчета температурных деформаций:***

а) нет, это разные виды анализов;

б) да, можно, но необходимо добавить температурную нагрузку Mech/T в анализ прочности;

в) да, можно, но необходимо добавить статическую нагрузку Mech/T в тепловой анализ.

1.15. ОСНОВЫ РАСЧЕТА ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ ИЗДЕЛИЙ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ГИДРО- И ГАЗОДИНАМИКИ

Цель лекции — рассмотрение принципов расчета тепловых режимов приборных конструкций методами вычислительной гидро- и газодинамики, изучение математического аппарата анализа: уравнений Навье — Стокса, осредненных по Рейнольдсу, и методов дискретизации алгебраических представлений.

1.15.1. ВВЕДЕНИЕ В ПРОБЛЕМАТИКУ

Расчет тепловых режимов изделий приборостроения — узкоспециализированная задача, для решения которой долгое время требовалось привлечение отдельного класса специалистов, занимающихся исключительно анализом тепловых потоков. Проектирование систем охлаждения осуществлялось на этапе проектирования механической части изделия и практически не учитывало особенности электронной составляющей. Процесс проектирования имел блочный характер, при котором ошибки проектирования могли быть выявлены лишь после конечной компоновки узлов, после чего проект отправлялся на доработку и цикл повторялся заново.

В современных реалиях, когда темпы выпуска новой продукции выросли в разы, а уменьшающиеся размеры устройств стали требовать все более тщательной проработки систем охлаждения, производителям приходится менять свой подход к проектированию и интегрировать этапы проведения тепловых расчетов непосредственно в процесс разработки как механической, так и электронной частей изделия.

Общая тенденция к миниатюризации изделий приводит к тому, что геометрия внутренних компонентов становится чрезвычайно сложной. При этом плотность размещения компонентов настолько высока, что проблема тепловыделения и охлаждения становится особенно актуальной. При уменьшении размеров компонентов и воздушных зазоров между ними возникает необходимость учитывать не только общие параметры источников тепла и систем охлаждения, но и взаимное их воздействие друг на друга в условиях компактной компоновки.

Необходимо, чтобы специалисты, не имеющие глубоких познаний в анализе тепловых процессов, могли эффективно проводить тепловые расчеты непосредственно в конструкторских САПР (CAD-системах). Существующие базовые модули инженерного анализа конструкций (CAE),

встроенные по умолчанию в большинство CAD-систем, не имеют функционала, достаточного для моделирования протекающих процессов с необходимой степенью проработки. Они требуют от конструктора введения множества параметров и свойств среды в явном виде (например, коэффициента конвективного теплообмена для условий охлаждения детали), которые конструктор, как правило, не в состоянии указать с достаточной степенью точности. Набор моделируемых процессов в таких модулях сильно ограничен и не охватывает весь набор исследуемых параметров.

Ведущие поставщики программных пакетов разрабатывают специальные инструменты для проведения анализа газовых и жидкостных потоков — CFD-системы (Computational Fluid Dynamics — вычислительная гидродинамика), которые позволяют создавать математические модели и выполнять тепловой анализ, имеют широкую интеграцию с CAD-системами и лишены тех недостатков, которые имеют базовые CAE решения.

В данном разделе курса будут рассмотрены возможности существующих инструментов для анализа тепловых режимов в электронных модулях I и II уровня (модули на печатных платах и блоки). Задачей является рассмотрение способов анализа типовых конструктивных элементов ЭА и разработка методики проведения теплового расчета типовых изделий ЭА с использованием данных инструментов.

В качестве используемого инструмента выбран CFD-модуль FloEFD. Выбор данного ПО обусловлен широкими возможностями для моделирования основных физических процессов, происходящих в текучей среде, а также его интеграцией в большинство ведущих CAD-систем (Solid Edge, SolidWorks, Creo, NX, Catia).

1.15.2. МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АППАРАТ

Вычислительная гидро- и газодинамика (CFD) — это одна из ветвей механики жидкости и газа, которая использует численные методы и алгоритмы для решения и анализа проблем, в том числе для анализа потоков жидкости и газа. Вычислительные ресурсы компьютеров используются для совершения миллионов необходимых математических операций для симуляции взаимодействия жидкостей и газов со сложными поверхностями физических объектов.

Физические параметры любого потока жидкости или газа определяются тремя основными законами:

- законом сохранения массы;
- вторым законом Ньютона;
- законом сохранения энергии.

Эти законы выражаются с помощью математических уравнений, которые в общем случае являются интегральными уравнениями или уравнениями в частных производных. Особенностью методов анализа CFD является способность замены интегралов или частных производных в этих уравнениях

на дискретизированные алгебраические представления, которые в свою очередь позволяют получить численные значения параметров потока текучей среды в дискретных точках во времени и/или пространстве.

Существуют три метода дискретизации:

- метод конечных разностей (МКР);
- метод конечных объемов (МКО);
- метод конечных элементов (МКЭ).

Метод конечных разностей основан на замене производных разностными схемами. Область расчета обычно делится на шестигранные ячейки (сетку), и расчет ведется для каждой узловой точки.

Метод конечных объемов основан на интегрировании систем дифференциальных уравнений в частных производных. Уравнения частной производной записываются в форме, которая может быть решена для заданного конечного объема (или ячейки). Область расчета дискретизируется на конечные объемы, и затем для каждого объема решаются уравнения. В отличие от МКР данный метод не требует наличия структурированной сетки, что существенно упрощает моделирование процессов для объектов со сложной геометрической формой. Как и в МКР, конечное решение является дискретным, но результаты расчета обычно располагаются не в узловых точках, а в центрах ячеек.

Метод конечных элементов основан на разбиении области расчета на конечное количество подобластей (элементов). В каждом из элементов произвольно выбирается вид аппроксимирующей функции. Значения функций на границах элементов (в узлах) являются решением задачи и заранее не известны. Коэффициенты аппроксимирующих функций обычно определяются из условия равенства значения соседних функций на границах между элементами (в узлах).

Прямое сравнение трех методов довольно затруднительно в силу большой вариативности каждого из них в различных реализациях: МКО и МКР дают дискретные решения, тогда как МКЭ — непрерывное; МКО и МКР обычно проще в программной реализации, чем МКЭ, но возможны исключения.

В CFD-методах используется два основных вида дифференциальных уравнений: уравнения Навье — Стокса и уравнения Навье — Стокса, осредненные по Рейнольдсу.

Уравнения Навье — Стокса описывают движение текучей среды. Эти уравнения выводятся из применения второго закона Ньютона к движению жидкости с учетом ее вязкости в зависимости от скорости потока и давления в среде.

Уравнения описывают скорость потока текучей среды. Решение уравнений Навье — Стокса называется полем потока, которое является описанием скорости жидкости в конкретной точке в пространстве и времени. Как только найдено решение для поля потока, другие параметры среды могут быть выведены из него.

Уравнения Навье — Стокса в общем виде выглядят следующим образом:

$$\rho\left(\frac{\partial v}{\partial t}+v\nabla v\right)=-\nabla p+\nabla\mathbb{T}+f,$$

где ρ — плотность жидкости; v — скорость потока; ∇ — оператор набла; p — давление; $\mathbb{T}$ — тензор напряжений; f — силы, действующие на каждую ячейку объема жидкости.

Уравнения Навье — Стокса являются нелинейными уравнениями в частных производных практически в любой реальной ситуации, и их решение возможно только с использованием численных методов.

Численное решение уравнений для турбулентного потока чрезвычайно сложное, и из-за значительно отличающихся масштабов процессов, происходящих в турбулентном потоке, стабильное решение требует настолько высокого разрешения сетки, что вычислительное время становится чрезмерно большим. Попытки расчета турбулентного потока с использованием ламинарного решателя сводятся к нестабильному во времени решению, сходимость которого находится под вопросом. Для решения этой проблемы используют осредненные по времени уравнения, такие как уравнения Навье — Стокса, осредненные по Рейнольдсу (RANS).

Уравнения Навье — Стокса, осредненные по Рейнольдсу (RANS-уравнения), — это осредненные по времени уравнения движения потока жидкости. Метод осреднения Рейнольдса заключается в замене случайно изменяющихся характеристик потока (скорости, давления, плотности) суммами осредненных и пульсационных составляющих. Эти уравнения используют в первую очередь для описания турбулентных потоков. Для стационарного течения несжимаемой ньютоновской жидкости уравнения Рейнольдса записываются в виде

$$\rho u_j'\frac{\partial u_i'}{\partial x_j}=\rho f_j'+\frac{\partial}{\partial x_j}\left[-p'\delta_{ij}+\mu\left(\frac{\partial u_i'}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j'}{\partial x_i}\right)-\rho\overline{\left(u_i'u_j'\right)''}\right].$$

Переменные, осредненные по времени, отмечены в этом уравнении одним штрихом, а пульсационные составляющие — двумя штрихами. Левая часть уравнения (нестационарный член) описывает изменение количества движения жидкого объема вследствие изменения во времени осредненной составляющей скорости. Это изменение компенсируется (см. правую часть уравнения) осредненными внешними силами $\rho f_j'$, осредненными силами давления $-p'\delta_{ij}$, вязкостными силами $\mu\left(\frac{\partial u_i'}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j'}{\partial x_i}\right)$. Кроме того, в правую часть входят кажущиеся напряжения (напряжения Рейнольдса, турбулентные напряжения) $\rho\left(u_i'u_j'\right)''$, учитывающие дополнительные потери и пере-

распределение энергии в турбулентном потоке (по сравнению с ламинарным потоком).

В результате решения приведенных уравнений в каждой узловой точке с помощью численных методов для каждой из этих точек будут рассчитаны все необходимые параметры среды или твердого тела: температура и ее градиент, динамическое и статическое давление, скорость потока текучей среды, плотность среды, объемный и массовый расход текучей среды и т. д.

1.15.3. ВОЗМОЖНОСТИ МОДУЛЯ CFD

Расчет теплового режима — это в первую очередь исследовательская, а не конструкторская задача. Разрабатываемая в основном для конструкторских целей 3D-модель устройства имеет высокую степень сходства с геометрией реального устройства и зачастую не подходит для моделирования CFD-системами без предварительной подготовки в силу избыточной сложности.

Проведение правильной подготовки модели к расчету особенно критично для электронных модулей, имеющих большое количество элементов на печатной плате, или блоков, имеющих сложную конструкцию корпуса. Дело в том, что микросхемы и другие электронные компоненты, а также элементы конструкции блоков имеют довольно сложную и разнообразную форму (ножки микросхем, корпус сложной формы, крепежные элементы) и сложную внутреннюю структуру (кристалл, внутренние проводники и т. д.). Большое количество таких элементов на плате и в блоке значительно усложняет генерацию сетки решателя и ухудшает сходимость расчетов.

Правильная подготовка 3D-модели к исследованию заключается в упрощении конструктивных элементов через идеализацию ее компонентов. Так, модели корпусов блоков следует упростить, убрав элементы, не влияющие на тепловой режим блока (крепежные, декоративные элементы). Идеализацию компонентов ячеек ЭА, которые, как правило, имеют сложную форму и внутреннюю структуру, следует выполнять с помощью имеющихся в CFD-модуле идеализированных компонентов с существенно более простой конструкцией, но при этом способных моделировать свойства определенной группы электронных компонентов с достаточной степенью точности.

Тесты к лекции 1.15

1. ***В рассматриваемой CFD-системе используется следующий метод дискретизации:***

а) метод конечных разностей (МКР);

б) метод конечных объемов (МКО);

в) метод конечных элементов (МКЭ).

2. ***Для решения задач в CFD-системах применяются:***
а) уравнения Навье — Стокса;
б) уравнения Навье — Стокса, осредненные по Рейнольдсу;
в) критерии подобия (Нуссельта, Грасгофа, Прандтля).
3. ***Идеализация моделей для решения тепловых задач в CFD-системах:***
а) необходима, как и в прочих системах инженерного анализа;
б) самостоятельно выполняется в CFD-системах;
в) для анализа тепловых режимов не требуется.

1.16. МЕТОДИКА CFD-АНАЛИЗА МОДЕЛИ

Цель лекции — изучение процедуры создания CFD-анализа модели, включающей в себя настройку систем единиц, типа задачи и используемых физических моделей, текучих сред, начальных условий, материалов, расчетного домена, граничных условий, источников тепловыделения, целей расчета, сетки и вычислительных параметров.

1.16.1. ПОДГОТОВКА 3D-МОДЕЛИ

В общем случае решение любой задачи вычислительной гидро- и газодинамики включает в себя несколько последовательных этапов:

– подготовку 3D-модели;
– создание проекта расчета;
– проведение вычислений;
– анализ результатов (с визуализацией).

В данном разделе описана последовательная методика проведения анализа тепловых режимов для модулей I и II уровня изделий приборостроения (ячеек и блоков). Она охватывает весь набор действий, необходимых для проведения теплового расчета с помощью ПО CFD-анализа, начиная с подготовки 3D-модели устройства к расчету и заканчивая анализом результатов расчета с использованием инструментов визуализации.

Начальный этап анализа заключается в подготовке (идеализации) или создании 3D-модели устройства с учетом требований ПО тепловых расчетов в целях оптимизации конструкции. Цель подготовки — сократить время проведения анализа с одновременной поддержкой целостности модели и обеспечением достоверности полученных результатов. На этом этапе конструктору следует внимательно изучить модель и ответить на ряд вопросов.

1. Является ли областью интереса вся модель или лишь ее часть?

Важно понять, какую часть модели конструктор собирается анализировать. Если областью интереса является, например, только часть блока, нет смысла подготавливать к расчету остальную часть изделия, если в отношении теплообмена она не связана с интересующей конструктора частью и не оказывает влияния на результаты анализа. Более того, если общая 3D-модель имеет высокую сложность и большое количество элементов, есть смысл выделить интересующую часть модели в отдельный файл и работать только с ним, заменив, если это требуется, остальную часть изделия идеализированными нагрузками/ограничениями.

2. Имеет ли модель объекты со сложной геометрией?

Если модель имеет большое количество деталей со сложной геометрией, следует упростить их: удалить фаски, скругления (если их наличие не представляет особой важности). Во многих случаях имеет также смысл удалить монтажные отверстия в корпусе, переходные отверстия в печатной плате, физическое представление резьбы на элементах. Упрощенная модель значительно облегчает генерацию сетки решателя и экономит вычислительные ресурсы. Для особо сложных моделей подобная подготовка — это обязательное условие возможности проведения расчета в принципе.

3. Имеются ли элементы со сложной внутренней структурой?

Если модель содержит в себе компоненты со сложной внутренней структурой (например, 3D-модель микросхемы, состоящей, в частности, из основания, кристалла, выводов, проволочных соединений и пр.) и при этом ПО теплового анализа имеет функционал моделирования этого типа компонентов с использованием простейшей геометрии, следует заменить компонент на его упрощенную модель.

4. Есть ли элементы сборки, заведомо не влияющие на тепловой режим устройства?

Если модель содержит детали, которые важны для конструкции реального устройства, но не имеют значения для решения задачи теплового анализа (крепежные детали, таблички, гравировка, пломбы, клипсы и др.), такие детали следует удалить. Это также упростит генерацию сетки решателя и снизит вычислительную сложность расчета.

После выполнения всех этих действий и сохранения преобразованной модели можно переходить к созданию проекта теплового расчета.

1.16.2. СОЗДАНИЕ ПРОЕКТА РАСЧЕТА

Самый простой и удобный способ создать новый проект — воспользоваться мастером проекта.

Далее рассмотрена последовательность действий по созданию проекта с помощью мастера проектов, в ходе реализации которой необходимо выполнить следующие действия.

1. Задать имя проекта и выбрать конфигурацию сборки, для которой будет выполнен расчет (рис. 1.137).

2. Определить систему единиц измерения (рис. 1.138) и при необходимости изменить единицы измерения.

3. Определить тип задачи и выбрать физические модели для расчета (рис. 1.139).

Задачи бывают внутренние и внешние. Задача может считаться внутренней, когда имеется ограниченная и замкнутая область расчета. В случае электронных блоков такой областью является корпус.

Задача является внешней, когда у модели нет четко ограниченной области пространства и она целиком помещена в поток среды. Границы расчетной области в этом случае расположены на некотором расстоянии от моде-

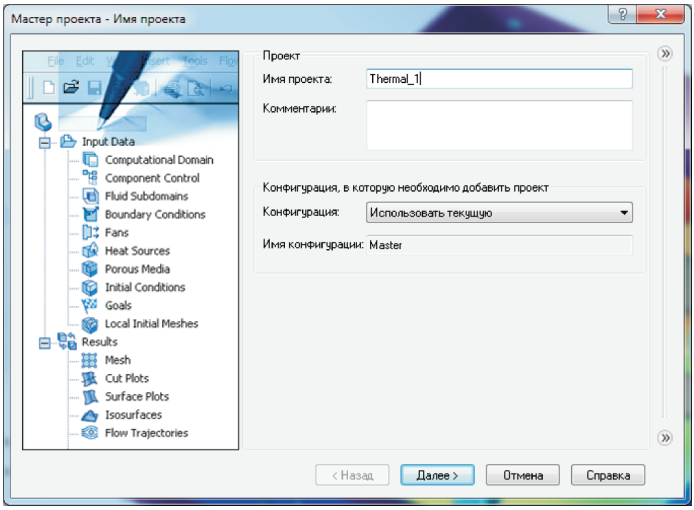


Рис. 1.137. Назначение имени проекта

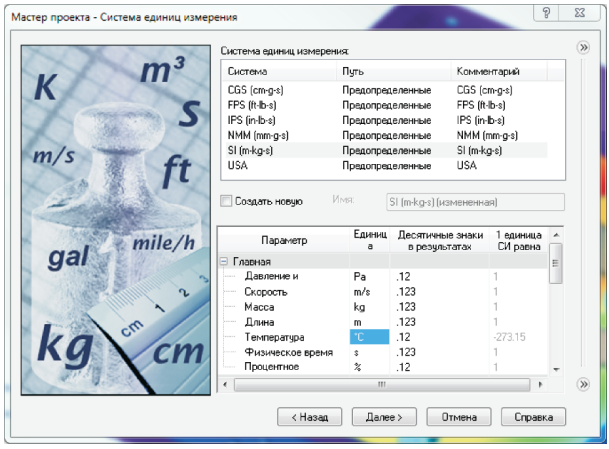


Рис. 1.138. Выбор системы единиц измерения

ли. Если в задаче учитываются внутреннее и внешнее течения одновременно (например, обтекание здания потоком воздуха и течения внутри него), то в системе FloEFD эту задачу необходимо рассматривать как внешнюю.

Если модель обеспечивает замкнутую область пространства либо можно внести незначительные изменения, чтобы замкнуть область, предпочтительнее воспользоваться внутренним типом задачи. Она вычислительно проще и дает более качественные результаты.

Перечисленные далее физические модели выбирают с учетом решаемой задачи. Следует включить опцию:

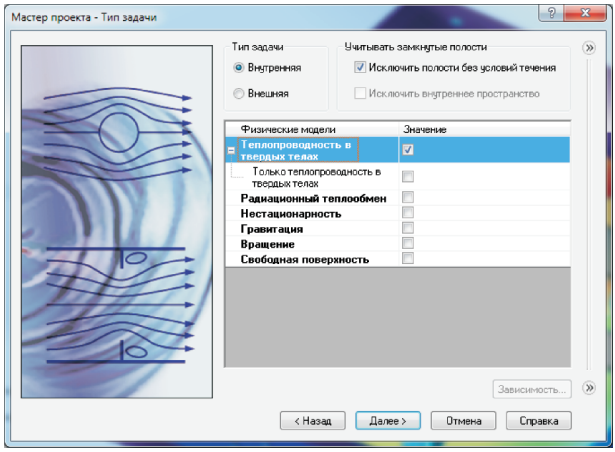


Рис. 1.139. Выбор типа задачи и физических моделей

– «Теплопроводность в твердых телах», если в задаче необходимо учитывать теплопередачу в твердых телах, контактирующих с текучей средой (т. е. решается задача сопряженного теплообмена);

– «Радиационный обмен», если в задаче сопряженного теплообмена необходимо учитывать теплообмен излучением;

– «Нестационарность», если задача является нестационарной. При решении такой задачи требуется задать интервал физического времени задачи. Для этого следует задать параметры «Общее время задачи» и «Временной шаг выдачи результатов». Последняя опция позволяет воспроизвести динамику протекающих процессов, но требует проведения множества расчетов (по одному расчету на каждую временну́ю метку);

– «Гравитация», если в задаче необходимо учитывать гравитационные эффекты. Следует задать X, Y и Z компоненты вектора гравитационного ускорения в глобальной системе координат. Выбор этой опции также необходим, если требуется учитывать конвективные потоки охлаждающей среды;

– «Вращение», если модель содержит вращающиеся элементы (например, крыльчатку вентилятора охлаждения).

4. Назначить текучую среду по умолчанию (рис 1.140).

В окне программы назначается текучая среда по умолчанию. Как правило, это воздух. При этом, если необходимо моделировать теплопередачу в условиях пониженного давления или вакуума, есть возможность учитывать теплопередачу только в твердых телах, выключив учет теплопередачи в среде, выбрав в предыдущем окне «Тип задачи» (см. рис. 1.139) параметр «Только теплопроводность в твердых телах».

5. Выбрать материал твердого тела по умолчанию (рис. 1.141).

Выбранный материал будет применен ко всем объектам модели, если им вручную не был присвоен другой. Имеет смысл выбирать тот материал,

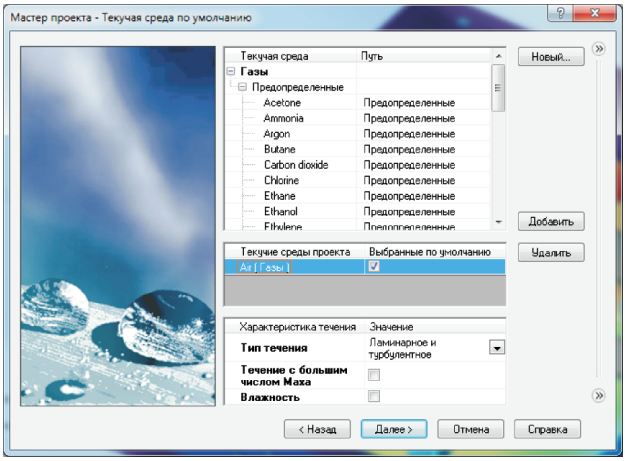


Рис. 1.140. Выбор текучей среды по умолчанию

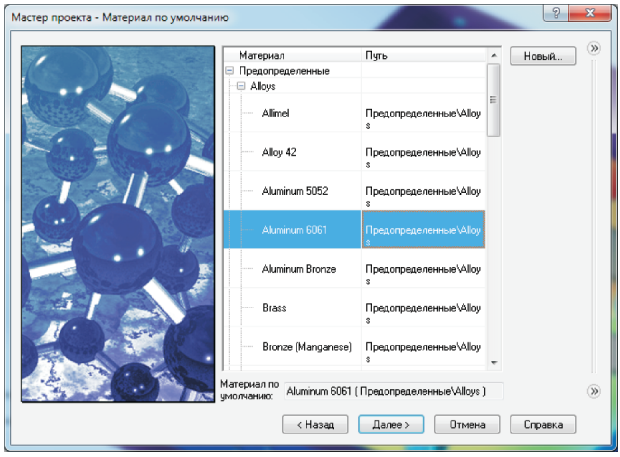


Рис. 1.141. Выбор материала твердого тела по умолчанию

из которого сделано большинство объектов модели. Впоследствии всем объектам, которые имеют отличный от выбранного в данном пункте материал, следует назначить их собственные с помощью инструмента «Материалы».

6. Задать условия на стенках по умолчанию (рис. 1.142).

На данном этапе указываются базовые условия на внешних стенках модели, есть возможность задать шероховатость поверхности. Если задача является внутренней, можно задать тепловое условие на внешней стенке и таким образом учитывать внешние теплопотери корпуса устройства.

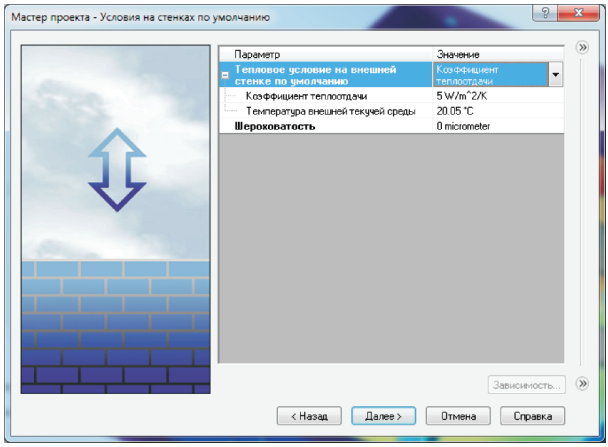


Рис. 1.142. Выбор условий на стенках по умолчанию

7. Задать общие начальные условия (рис. 1.143).

В окне «Начальные условия» задаются начальные условия среды, в которой находится моделируемое устройство.

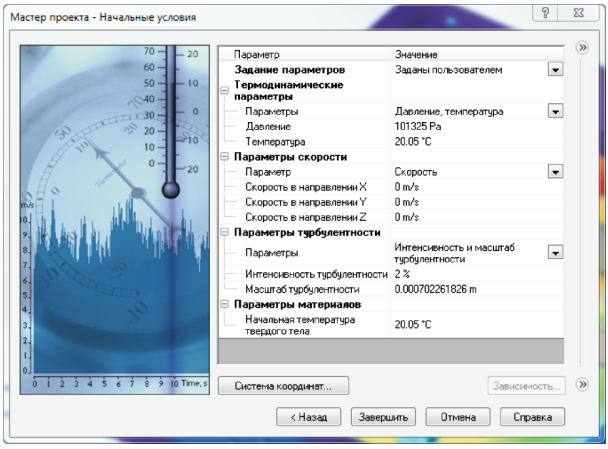


Рис. 1.143. Назначение общих начальных условий

Остальные параметры расчета определяются после завершения создания проекта.

В первую очередь, если задача является внутренней и в модели имеются вентиляционные отверстия, которые не были закрыты на этапе подготовки 3D-модели, необходимо «закрыть» их с помощью инструмента «Создание заглушек». Это позволит замкнуть внутренний объем модели и соблюсти требование внутреннего типа задач к ограниченности области расчета.

8. Определить условия в боковом меню, показанном на рис. 1.144.

Последовательно задаются параметры для каждого пункта:

– «Расчетная область». Проверяется правильность определения расчетной области. При необходимости она корректируется;

– «Подобласти течения». Если проект содержит подобласти с текучей средой, отличной от базовой (например, система водяного охлаждения процессора), необходимо в этом пункте указать параметры данной подобласти;

– «Материалы». Всем элементам модели, материал которых отличается от базового, назначается соответствующий им материал из библиотеки;

– «Условия». Один из важнейших разделов проекта. Здесь определяются все граничные и внутренние условия, характеризующие работу проектируемого устройства (рис. 1.145).

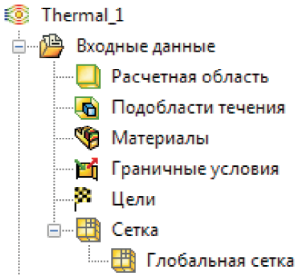


Рис. 1.144. Боковое меню с деревом проекта

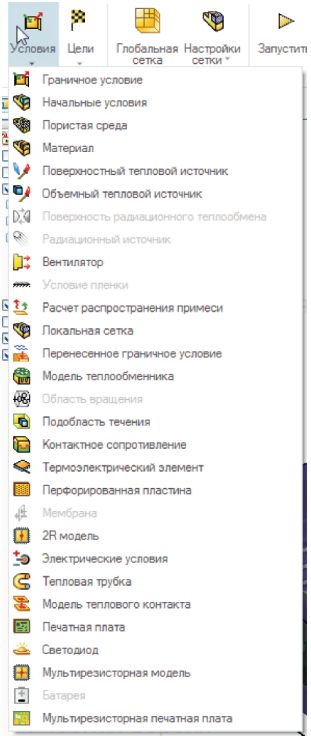


Рис. 1.145. Список доступных условий

Система FloEFD кроме набора основных граничных условий имеет большой список специальных условий для моделирования конкретных типов элементов. Рассмотрим основные из них.

«Граничные условия». Эти условия назначаются на границах расчетной области в задачах внутреннего типа и описывают параметры взаимодействия с внешней средой. Например, граничное условие «Давление окружающей среды» назначается созданным ранее заглушкам вентиляционных отверстий, тем самым показывая модулю расчета, что области на самом деле являются выходными отверстиями. При этом контур по-прежнему остается замкнутым. Можно также указывать области с постоянным давлением или постоянной скоростью потока на входе или выходе.

«Объемный/поверхностный тепловой источник». Эти условия назначаются всем источникам нагрева в модели. В зависимости от того, является ли объект источником нагрева или к нему приложено внешнее тепловое воздействие, выбирается объемный или поверхностный вариант соответственно.

«Поверхность радиационного теплообмена». Инструмент позволяет задать излучающие поверхности в случае использования физической модели радиационного обмена.

«Вентилятор». При использовании упрощенной модели вентилятора с использованием графика аэродинамических характеристик данный инструмент дает возможность задать плоскости входа и/или выхода потока и задать параметры этого потока.

«Термоэлектрический элемент». Здесь назначаются граничные условия для элементов Пельтье. Выбирается модель элемента из библиотеки моделей и задается значение протекающего через него тока.

«2R-модель». Если на этапе подготовки 3D-модели элементы со сложной внутренней структурой, такие как микросхемы, были заменены их упрощенным представлением, данный инструмент позволяет смоделировать их тепловые параметры и применить их к упрощенной 3D-модели элемента, а также задать мощность тепловыделения компонента.

«Электрические условия». Инструмент позволяет применять условия протекания электрического тока через проводящие материалы, тем самым моделируя Джоулев нагрев проводника при протекании тока.

«Тепловая трубка». Инструмент позволяет назначить упрощенной модели тепловой трубки физические параметры реальной трубки без необходимости моделировать ее внутреннюю структуру и фазовые переходы теплоносителя.

«Печатная плата». Инструмент позволяет использовать упрощенную модель печатной платы без прорисовки проводников и переходных отверстий, при этом сохраняется общая теплопроводность конкретной платы и учитывается анизотропная теплопроводность тела.

9. Определить цели расчета.

Поскольку задачи моделирования гидро- и газодинамики решаются не аналитическими, а численными методами, решателю нужно задать критерии сходимости расчета, чтобы остановить перебор параметров при достижении удовлетворительного результата. Для этого нужно задать цели расчета (рис. 1.146, 1.147).

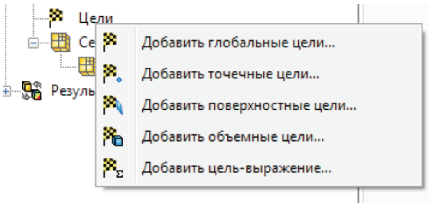


Рис. 1.146. Список доступных целей расчета

Цели могут быть глобальными и характеризовать параметры системы в целом, а могут быть локальными, отслеживающими только определенный набор элементов модели.

Среди отслеживаемых параметров могут быть разные физические характеристики среды, включая давление, температуру твердого тела или текучей среды, скорость воздушного потока, массовый и объемный расход среды и др.

10. Настроить сетку решателя.

Заключительным этапом настройки параметров является настройка сетки решателя (рис. 1.148).

В целом она сводится к заданию двух параметров: размера базовой сетки (с помощью ползунка) и включение функции улучшения разрешения

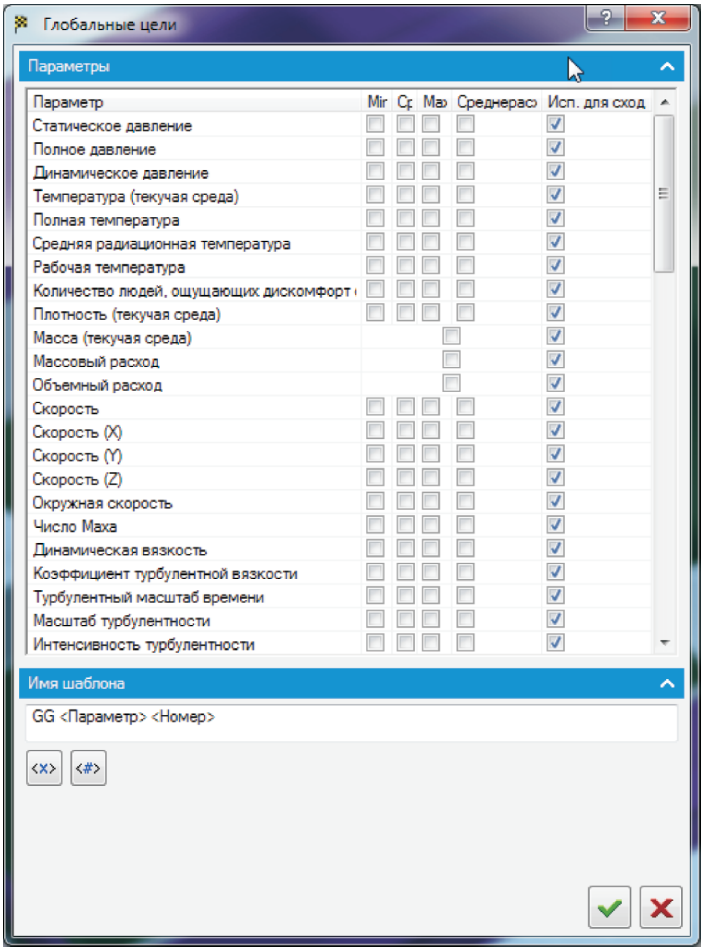


Рис. 1.147. Окно параметров при определении цели

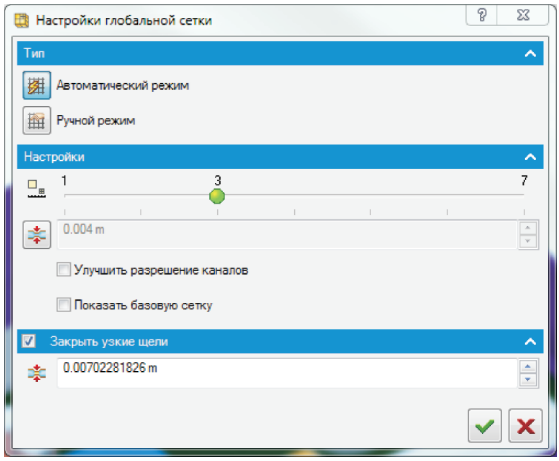


Рис. 1.148. Настройка параметров сетки решателя

каналов. Особенность процесса настройки заключается в том, что от пользователя не требуется глубоких знаний по созданию сетки конечного элемента, которыми обладает специалист-расчетчик, и это позволяет конструктору сгенерировать качественную сетку.

Ручной режим настроек особенно полезен и является отличительной особенностью системы FloEFD. Он позволяет при наличии базовой сетки довольно малого разрешения динамически увеличивать ее разрешение в местах с малыми элементами и там, где требуется высокая точность расчетов. Таким образом значительно снижается количество ячеек сетки, но при этом сохраняется высокая точность расчета в важных местах.

После назначения всех параметров можно приступать к запуску расчета.

1.16.3. ПРОВЕДЕНИЕ ВЫЧИСЛЕНИЙ

На этом этапе осуществляется запуск процесса решения. В ходе его выполнения будет сгенерирована сетка, применены заданные граничные условия и проведен расчет до достижения заданных целей.

Окно запуска расчета показано на рис. 1.149. В нем можно назначить, на какой вычислительной машине будет проводиться расчет (на локальной или удаленной). Вариант расчета на удаленной машине может быть целесообразным при наличии высокопроизводительного сервера, обслуживающего сразу несколько пользователей. В этом случае требования к производительности компьютера клиента снижаются.

При использовании локальной вычислительной машины есть возможность определить количество используемых ядер. Это позволит продолжить работу на компьютере во время проведения вычислений.

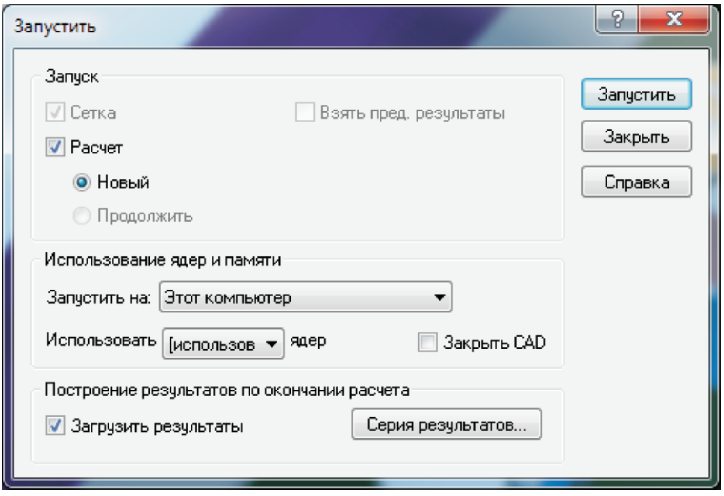


Рис. 1.149. Окно запуска расчета

Доступна также генерация сетки решателя без запуска расчета. В этом случае пользователь получает возможность отобразить сгенерированную сетку решателя и при необходимости изменить ее параметры и сгенерировать заново.

Процесс итеративного расчета до достижения критериев сходимости показан на рис. 1.150.

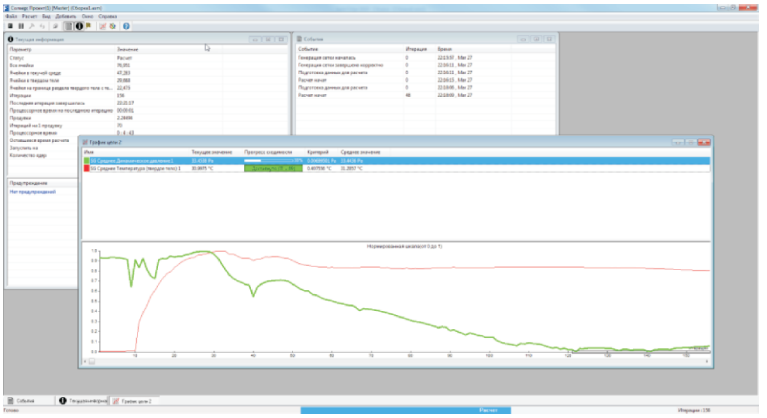


Рис. 1.150. Процесс итеративного расчета

Следует отметить, что графики на данном рисунке соответствуют исключительно значениям расчетных параметров на последовательных итерациях расчета и не являются графиками нестационарного анализа с выходом изделия на установившийся режим. Их назначение — проиллюстрировать характер обеспечения сходимости, и доверять в общем случае можно лишь значениям на последней итерации расчета, где эта сходимость достигнута. Расчет можно приостановить либо полностью остановить с сохранением возможности его продолжения.

Тесты к лекции 1.16

1. ***Задача может считаться внутренней:***
а) когда поток среды ограничен замкнутой областью;
б) когда имеется ограниченная и замкнутая область расчета;
в) когда границами расчетной области является параллелепипед.
2. ***Граничное условие описывает:***
а) параметры взаимодействия с внешней средой;
б) механические и тепловые взаимосвязи между деталями сборки;
в) переход ламинарного потока среды в турбулентный.

3. ***Цели расчета могут быть*** (выберите один или больше правильных ответов):

а) глобальными;

б) локальными;

в) глобальными и локальными.

4. ***Точность сетки конечных элементов в CFD-системе можно настраивать:***

а) нет, это невозможно;

б) да, это выполняет конструктор;

в) да, это выполняет сама CFD-система автоматически.

5. ***Сетку конечных элементов можно сгенерировать без запуска расчета:***

а) да, можно;

б) да, можно для простых задач;

в) после генерации сетки расчет запускается автоматически.

1.17. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Цель лекции — изучение средств анализа результатов моделирования — твердых тел и текучих сред — с применением картин в сечении и на поверхности, графиков, траекторий потока в статике и динамике.

После завершения расчета и загрузки результатов можно приступать к их анализу.

Система FloEFD имеет большое количество инструментов визуализации результатов расчета, которые в свою очередь обладают большим количеством сценариев применения. Каждый инструмент имеет возможность отображения всех основных физических параметров.

В общем случае можно выделить два сценария анализа результатов: анализ твердого тела и анализ текучей среды. Для каждого из них есть хорошо зарекомендовавшие себя средства визуализации, хотя можно применять их и для других целей.

Для анализа твердого тела используют картины на поверхности и поверхностные/точечные/объемные параметры.

1. Картины на поверхности. Этот инструмент позволяет визуализировать распределение параметра на выбранных гранях или поверхностях модели. Он очень подходит для отображения нагрева компонентов и в целом тепловых полей сборок на печатных платах (рис. 1.151).

2. Поверхностные/точечные/объемные параметры. Эти средства позволяют наглядно представлять численные параметры интересующих областей

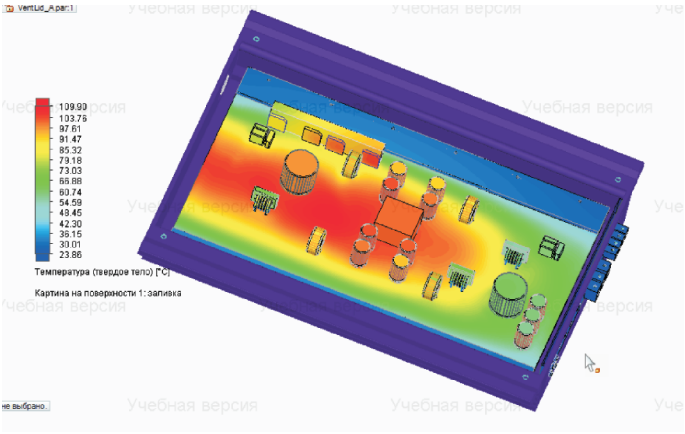


Рис. 1.151. Картина на поверхности

или компонентов. С их помощью можно оценить объем прокачиваемого вентилятором воздуха или максимальную температуру нагрева компонента (рис. 1.152).

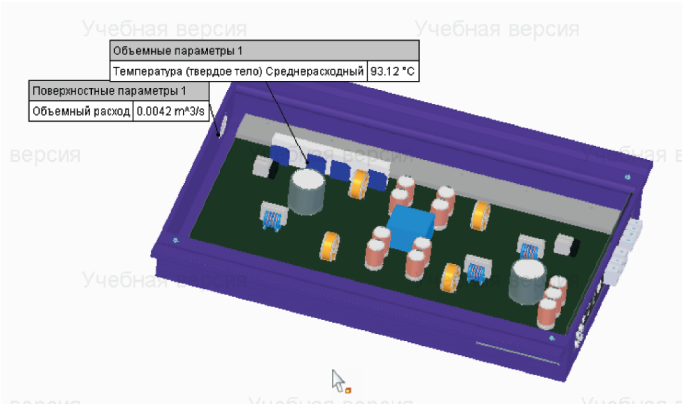


Рис. 1.152. Поверхностные и объемные параметры

Для анализа текучей среды используют следующие средства.

1. Изоповерхности. При просмотре результатов можно визуализировать изоповерхности (рис. 1.153), в пределах которых значение параметра постоянно. Изоповерхность полностью определяется значением параметра. Данный вид визуализации удобно использовать в режиме предпросмотра, в котором можно в реальном времени двигать ползунок для изменения значения параметра и смотреть, как меняется изоповерхность. Таким образом можно очень быстро найти самые горячие области текучей среды.

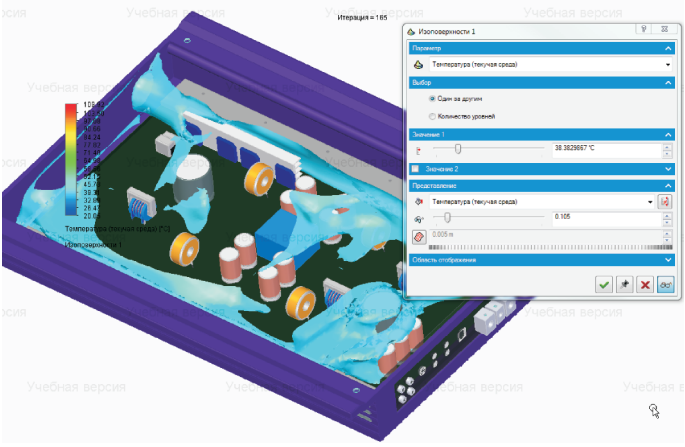


Рис. 1.153. Изоповерхность

2. Траектории потока. В этом случае визуализация осуществляется с помощью линий тока. Линия тока представляет собой кривую, в каждой точке которой вектор скорости потока направлен по касательной к ней. Инструмент удобен для оценки движения потоков текучей среды, позволяет судить о правильности расположения кулеров. С его помощью можно также визуализировать движение конвективных потоков. Инструмент имеет функцию анимации движения стрелок, наглядно отображающей скорость потока в разных местах устройства (рис. 1.154).

3. Картины в сечении. Этот инструмент позволяет визуализировать распределение параметра в сечении (рис. 1.155). Он очень удобен для анализа параметров текучей среды в непосредственной близости от твердых тел.

Таким образом, представленные средства и инструменты позволяют провести тепловой расчет для модулей I и II уровня ЭА (ячейки и блоки) и помогают конструктору подготовить 3D-модель к анализу, создать

Рис. 1.154. Траектории потока

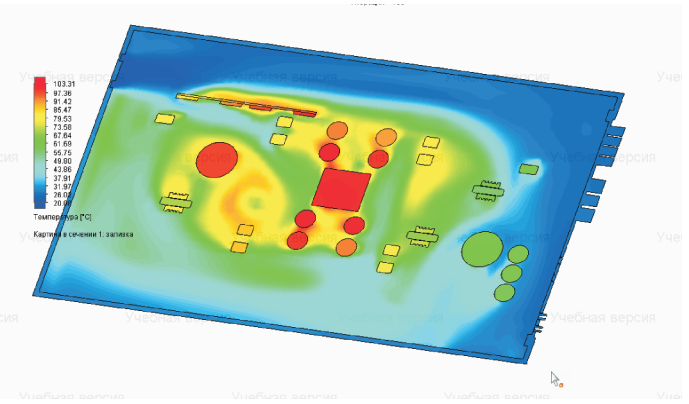


Рис. 1.155. Картина в сечении

и настроить проект расчета, провести расчет на локальной или удаленной вычислительной машине и проанализировать результаты с применением инструментов визуализации.

Тесты к лекции 1.17

1. ***Для визуализации результатов анализа твердого тела используют*** (выберите один или больше правильных ответов):

а) картины на поверхности;

б) изоповерхности;

в) поверхностные/точечные/объемные параметры.

2. ***Для визуализации результатов анализа текучей среды используют*** (выберите один или больше правильных ответов):

а) траектории потока;

б) картины в сечении;

в) поверхностные/точечные/объемные параметры.

1.18. ВВЕДЕНИЕ В СОВРЕМЕННУЮ КОНЦЕПЦИЮ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА

Цель лекции — изучение положений концепции автоматизированной подготовки производства с использованием цифровых двойников различного уровня проработки; подходов к моделированию производственных процессов с применением методов аналитического и дискретного имитационного моделирования.

1.18.1. ПОНЯТИЕ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА

Одним из важнейших этапов в ходе выполнения проектирования изделия является технологическая подготовка производства, которая представляет собой совокупность взаимосвязанных процессов, обеспечивающих технологическую готовность предприятия к выпуску продукции необходимого качества при установленных сроках, объеме производства и затратах.

Под технологической готовностью понимается наличие полного комплекта технологической документации и средств технологического оснащения, необходимых для производства новых изделий.

Подготовка производства представляет собой комплекс взаимосвязанных мероприятий, обеспечивающих создание новых и совершенствование выпускаемых видов продукции, внедрение передовой технологии, эффективных методов организации труда, производства и управления.

В подготовку производства входят следующие мероприятия.

1. Проведение исследований, связанных с подготовкой производства.
2. Проектирование новой и совершенствование выпускаемой продукции.
3. Технологическая подготовка производства.

В настоящее время, независимо от отраслевой принадлежности, возникает необходимость решать такие основополагающие проблемы и задачи, как ускорение вывода продукции на рынок, обеспечение поддержки изделия на всех этапах его жизненного цикла, сокращение затрат на проектирование, производство и испытания, возможность эффективного использования предыдущих наработок в новых изделиях. Решение указанных задач предусматривает управление и обмен данными по конструкции изделий, их составу и структуре, технологическому процессу производства, оборудованию и оснащению, а также результатам инженерных анализов и т. д. между разными средами разработки, инженерных расчетов, производства, контроля и испытаний, подготовки конструкторской, технологической и прочей документации, управления действующим производством,

требованиями к изделию, взаимоотношениями с поставщиками и заказчиками. Чтобы выстроить цепочку управления данными, современные предприятия проходят стадию цифровой трансформации, основным результатом которой должно стать внедрение так называемых цифровых двойников (digital twins), в терминологии концепции Industry 4.0 представляющих собой цифровые, т. е. полностью виртуальные представления конструкций изделий в совокупности с моделями. Это представление может опционально дополняться информацией о дальнейших этапах жизненного цикла изделия (например, данными по его эксплуатации, техническому обслуживанию, ремонту и утилизации).

В общем случае цифровой двойник — это виртуальный аналог реального объекта или процесса. Он представляет собой цифровую программную модель, состоящую из связанных цифровых аналогов физических объектов с возможностью отображения динамических изменений в процессе их взаимодействия. Особенностью цифрового двойника является возможность отражения состояния реального объекта при помощи датчиков и сенсоров. При изменениях материального объекта-оригинала изменяется и состояние цифровой имитационной модели.

Классифицируют три типа цифровых двойников:

– для изделий,

– для процессов,

– для систем.

Цифровой двойник **изделия** представляет собой виртуальную модель реального объекта, является виртуальным макетом. Он предназначен для анализа поведения продукта в различных условиях и поиска потенциальных проблем. Данная модель состоит, как правило, из детализированного трехмерного объекта, которому присвоены характеристики материалов, соответствующие реальным. В результате создания двойника изделия предприятие может точнее определить количество затрачиваемых материальных и трудовых ресурсов.

Цифровой двойник **процесса** имитирует производственные процессы. По аналогии с изделием двойник процесса позволяет проанализировать и оптимизировать технологические операции до их воплощения в реальной жизни. Модель включает в себя трехмерные объекты оборудования, рабочих мест, оснастки и производимых изделий. Она может содержать также различные сценарии для случаев выхода оборудования из строя, уменьшения рабочей силы и других изменений в производстве. Таким образом, использование двойника процесса дает возможность определять и отслеживать эффективность производства, избегая простоев оборудования.

Цифровой двойник **системы** аккумулирует в себе информацию обо всех операционных процессах, происходящих внутри предприятия, а также полную информацию о ресурсах, персонале. Указанная модель включает в себя большой объем данных, позволяет рассчитывать и оптимизировать все бизнес-процессы и наиболее пригодна для описания сложных технических систем.

Применение концепции цифровых двойников, в частности, позволяет:

– отказаться от создания множества физических прототипов на стадиях НИОКР путем выполнения большинства дорогостоящих испытаний на виртуальном макете и с помощью оптимизации конструкции по результатам этих испытаний;

– сократить срок разработки и одновременно повысить качество готового изделия за счет устранения ошибок и рассогласований при выдаче и контроле исполнения технического задания (ТЗ), передаче данных, утверждении и внесении изменений в документацию между подразделениями предприятия и поставщиками;

– оценить показатели производственного процесса до непосредственного запуска нового изделия в производство, проверить ряд сценариев построения технологического процесса, компоновки производственных участков, назначения оборудования, оснащения и производственного персонала, выполнить нормирование отдельных операций, выбрав и реализовав наиболее эффективный вариант построения компоновки участка производства;

– быстрее реагировать на замечания и рекламации, поступающие от потребителей, внося соответствующие изменения в конструкцию и технологию изделия.

Цифровизация, проводимая в рамках поддержки жизненного цикла изделия электронной техники (PLM — Product Lifecycle Management), охватывает, в частности, такие важные этапы, как подготовка производства, его планирование и непосредственно сам процесс производства изделия. При этом современная концепция организации эффективных производств Industry 4.0 предусматривает виртуальное представление в виде цифровой модели не только самого изделия, но и всего его окружения, в том числе объектов, задействованных в технологическом процессе, начиная с оборудования, оснастки, склада, материально-логистических потоков, обслуживающего персонала и вплоть до всего производственного участка в целом.

Следует отметить, что практика современного производства зачастую демонстрирует выборочность и интуитивность мероприятий по проектированию, организации и модернизации производственных процессов. Эта деятельность происходит в условиях ограниченной цифровизации, которая часто реализуется лишь на этапе создания конструкторской модели изделия, что препятствует обеспечению высокой конкурентоспособности предприятий или во всяком случае не позволяет в полной мере достичь ее.

Использование системного подхода к организации и планированию производства, осуществление цифровизации в полном объеме, включая производственную компоненту, и выделение на это соответствующих ресурсов до начала внедрения физических изменений позволяют избежать дорогостоящих корректировочных действий в процессе производства и таким образом сократить сроки изготовления изделия, снизить затраты и ускорить получение прибыли.

Еще десятилетие назад была распространена точка зрения, что для решения задач цифровизации достаточно создать цифровую модель изделия — объекта проектирования/производства. Такой подход позволял эффективно решать задачи конструкторского проектирования (CAD), инженерного анализа (CAE) и частично задачи подготовки производства (CAM), в основном машиностроительного, ориентированного на операции литья, штамповки, обработки резанием и пр. Связь с производством при таком подходе реализуется в виде однонаправленного процесса, позволяющего лишь оценить, насколько данное изделие подходит для встраивания в уже сложившуюся производственную структуру. Возможности гибкой переналадки, адаптации, вариативности производства здесь существенно ограничены.

В качестве объекта проектирования будем рассматривать сборочное производство электронных модулей первого уровня на печатных платах. Специфика производства модулей и блоков изделий приборостроения предусматривает большое количество сборочных операций с созданием неразъемных соединений пайкой, сваркой, склеиванием и т. д., многономенклатурный мелко- и среднесерийный характер производства, быструю переналадку на выпуск новых изделий, широкий набор автоматизированного сборочного оборудования, объединенного в технологические линии и гибкие производственные участки, определенную долю ручных операций сборки, контроля и ремонта. Чтобы учесть эту специфику, необходимо помимо цифровой модели изделия обладать и цифровой моделью производства с учетом всех его технико-экономических аспектов: оборудования, оснащения, персонала, комплектующих, технологических процессов и маршрутов, материально-логистических потоков в пределах участка/склада, показателей производительности, точности, безотказности, минимизации времени переналадки, вынужденных простоев оборудования, оптимизации технологических маршрутов, количества обслуживающего персонала и т. д.

Схематично описанный подход к объединению моделей изделия, технологических процессов и производства в рамках единой комплексной структуры представлен на рис. 1.156.

Программное обеспечение для цифрового планирования и ИТ-инфраструктура, предоставляемые «Цифровым производством», образуют основной блок в системе организации эффективного цифрового сотрудничества между процессами проектирования и планирования производства. Предоставление специалистам в области планирования и подготовки производства доступа к цифровым данным об изделиях непосредственно в среде планирования позволяет им упростить и сделать более тщательной проверку данных на соответствие требованиям производства. Используя трехмерные цифровые модели, планировщики могут разрабатывать свои требования и предлагаемые модификации — особенно в части проектирования с учетом технологичности, — на гораздо более ранней стадии и на более надежной основе, чем раньше.

В такой высокотехнологичной отрасли с изначально высоким уровнем цифровизации, какой является производство изделий приборостроения,

Рис. 1.156. Взаимодействие цифровых моделей изделия, технологического процесса и производства в рамках единой комплексной цифровой структуры

перечисленные преимущества цифровых двойников проявляются наиболее ярко, а их внедрение обещает существенную экономию ресурсов и средств предприятия.

Рассмотрим внедрение цифровых двойников в технологический процесс и производство. Существует два распространенных типовых сценария: подготовка действующего производства для запуска нового изделия и создание нового производственного участка под типовое изделие. Первый из указанных сценариев рассмотрен далее в 1.19 «Подготовка запуска нового изделия в производство» и 1.20 «Обеспечение прослеживаемости в процессе производства», второй — в 1.22 «Комплексная методика синтеза производственных систем».

1.18.2. ПОДХОДЫ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Как правило, при описании сложных технических объектов аналитические модели либо отсутствуют полностью, либо лишь частично могут отразить сложные взаимосвязи объектов производства, а также определить отклик производственной структуры на возмущающие воздействия. Изучение реально работающего производства также сталкивается с неизбежными проблемами, связанными прежде всего с тем, что параметры процесса для стороннего наблюдателя в большинстве случаев не являются формализованными и четко прослеживаемыми, что затрудняет понимание наблюдаемых производственных процессов. Кроме того, на действующем производстве

невозможно проводить эксперименты с целью выявления отклика на возмущающие воздействия. Немаловажными являются также экономические и организационные сложности такого варианта проведения экспериментов.

Решение указанной проблемы возможно при внедрении методов и средств имитационного моделирования сложных технических объектов. При условии обеспечения адекватности модели реальному производственному процессу она в состоянии выступить заменой в образовательных целях реально действующему производству. Цифровая модель позволит не только комплексно изучить протекающие на производстве процессы, но и четко формализовать их входные и выходные параметры, а также поставить ряд экспериментов вида «что, если», подавая на вход модели различные возмущающие воздействия. Все это в комплексе даст завершенное представление об изучаемом предмете.

В рамках курса рассматривается сборочное производство электронных модулей на печатных платах как одно из наиболее распространенных и готовых к цифровизации производств электроники.

Задача формулируется следующим образом: требуется создать цифровую модель участка сборки электронных модулей на печатных платах по смешанной технологии (с применением поверхностного монтажа и монтажа в отверстия), отражающую совокупность разных объектов (оборудования, оснащения, склада, комплектующих, незавершенного производства и производства готовых изделий, персонала), а также временны́е и логистические взаимосвязи между ними. Модель должна адекватно описывать подготовку производства, технологический процесс сборки и быть способной к выдаче ключевых временны́х параметров сборочного производства: штучного/калькуляционного времени выполнения каждой операции и общей производительности сборки, понимаемой как количество изделий, изготавливаемых в единицу времени.

В общем случае моделирование — это замещение реального физического объекта его условным образом, т. е. моделью, для изучения свойств объекта-оригинала. Одна из целей процесса моделирования — описать и спрогнозировать поведение объекта при изменяющихся параметрах. Принципиальным при моделировании любых технологических объектов является упрощенное отражение в модели их важнейших для данного исследования свойств; модель воспроизводит объект в определенном ограниченном диапазоне условий и требований; различные модели могут описывать различные аспекты объекта.

Для решения задач моделирования объектов принципиально возможно применение методов аналитического и имитационного моделирования. Первая группа относится к статическим методам, где результирующие параметры модели вычисляются по формулам с жестко детерминированным результатом. С помощью таких методов невозможно рассматривать сложные динамические процессы, подверженные внешним и внутренним возмущениям, а именно такие процессы имеют место в производстве электронной

техники, для которых характерны вариативность техпроцесса, частые переналадки при смене выпускаемых изделий, вынужденные простои из-за сбоев и отказов оборудования, влияние качества комплектующих и проявлений человеческого фактора в лице операторов и т. д. Большинство перечисленных факторов носит вероятностный характер и обладает изменчивостью во времени. Следовательно, построение модели, адекватной реальному производству, будет возможно с применением более гибких методов комплексного (имитационного) моделирования, которые позволяют создавать модель на основе последовательности событий, управлять ею во времени, вносить случайные флуктуации и накладывать ресурсные и прочие ограничения. Результаты имитационного моделирования, в отличие от результатов аналитического, являются продуктом статистической обработки данных, наблюдаемых и фиксируемых в процессе работы моделирующей программы. Имитационная модель как объект измерений в отличие от реальных систем является полнодоступной системой.

Специфика производства ЭА диктует необходимость отслеживать значения переменных в процессе моделирования не непрерывно, а дискретно — в момент наступления очередного события (взятие, установка компонента, фиксация платы, совмещение платы с трафаретом и т. д.). Руководствуясь этим соображением, для подобных процессов применяют методы дискретного имитационного моделирования.

В любом исследовании, связанном с применением имитационного моделирования, выделяют следующие этапы.

1. Разработка абстрактной модели.
2. Параметризация модели.
3. Реализация модели с использованием программной системы моделирования.
4. Анализ модели.
5. Проведение экспериментов на работающей модели.
6. Анализ результатов.

Построение дискретной имитационной модели сборочного производства электронных модулей на печатных платах, процесс моделирования и анализ полученных результатов последовательно рассмотрены в дальнейших лекциях и на практических занятиях в рамках курса.

Тесты к лекции 1.18

1. ***Цифровой двойник применительно к производству изделий приборостроения — это:***

а) цифровая модель изделия;

б) цифровая модель изделия и технологического процесса его изготовления;

в) цифровая модель изделия, технологического процесса и производства.

2. ***Принципиальные различия между аналитическими и имитационными методами моделирования заключаются в том, что:***

а) результат аналитического метода жестко детерминирован, имитационного — является продуктом статистической обработки;

б) аналитические методы в отличие от имитационных невозможно применить для моделирования производства.

3. ***К исследованию, связанному с применением имитационного моделирования, не относится этап:***

а) параметризации модели;

б) анализа модели;

в) вычисления результирующих параметров модели по формулам.

1.19. ПОДГОТОВКА ЗАПУСКА НОВОГО ИЗДЕЛИЯ В ПРОИЗВОДСТВО

Цель лекции — изучение принципов, методов и средств подготовки запуска нового изделия в производство на примере электронного модуля на печатных платах с проверкой корректности данных, оценкой технологичности, разработкой технологического оснащения и управляющих программ для сборочного оборудования.

Рассмотрим внедрение цифровых двойников в технологический процесс в рамках подготовки действующего производства под запуск нового изделия. Обобщенный алгоритм подготовки производства модулей I уровня на печатных платах представлен на рис. 1.157.

Подготовка производства в целом проходит под контролем системы управления жизненным циклом изделия Teamcenter (TC). В модуль Teamcenter Manufacturing конструктор закладывает конструкторский электронный состав изделия (КЭСИ) из CAD-системы (например, Solid Edge, NX), а технолог на основе этих данных создает технологический электронный состав изделия (ТЭСИ) и разрабатывает маршрутный и операционный техпроцессы сборки, выполняет технологические расчеты и подготавливает комплект технологической документации. Модуль на печатаной плате, как правило, входит в состав изделия более высокого уровня иерархии — блока, поэтому техпроцесс сборки на уровне блока также при необходимости выполняется в модуле Teamcenter Manufacturing.

Для непосредственной подготовки производства модуля на печатной плате применяют ПО Valor Process Preparation (VPP).

На первом этапе ПО VPP загружает из TC конструкторские данные по изделию, сравнивает информацию (например, по комплектующим) с данными из собственных библиотек, проверяет корректность данных, обогащает информацию об изделии своими данными из библиотеки компонентов Valor Parts Library (VPL) и создает виртуальный цифровой прототип (двойник) изделия. Обмен «интеллектуальными» данными проекта ведется в стандартном отраслевом формате ODB++, который позволяет импортировать характерную для техпроцесса сборки информацию практически из любой CAD-системы, включая схемные обозначения и наименования компонентов, количество и шаг выводов, координаты установки, высоту, угол поворота, номера контактов и наименования цепей. Загружаются также данные по реперным знакам и при наличии мультиплицирования групповой панели. Важно отметить, что при этом происходит объединение данных конструкторских чертежей и спецификации и одновременно устраняются возможные

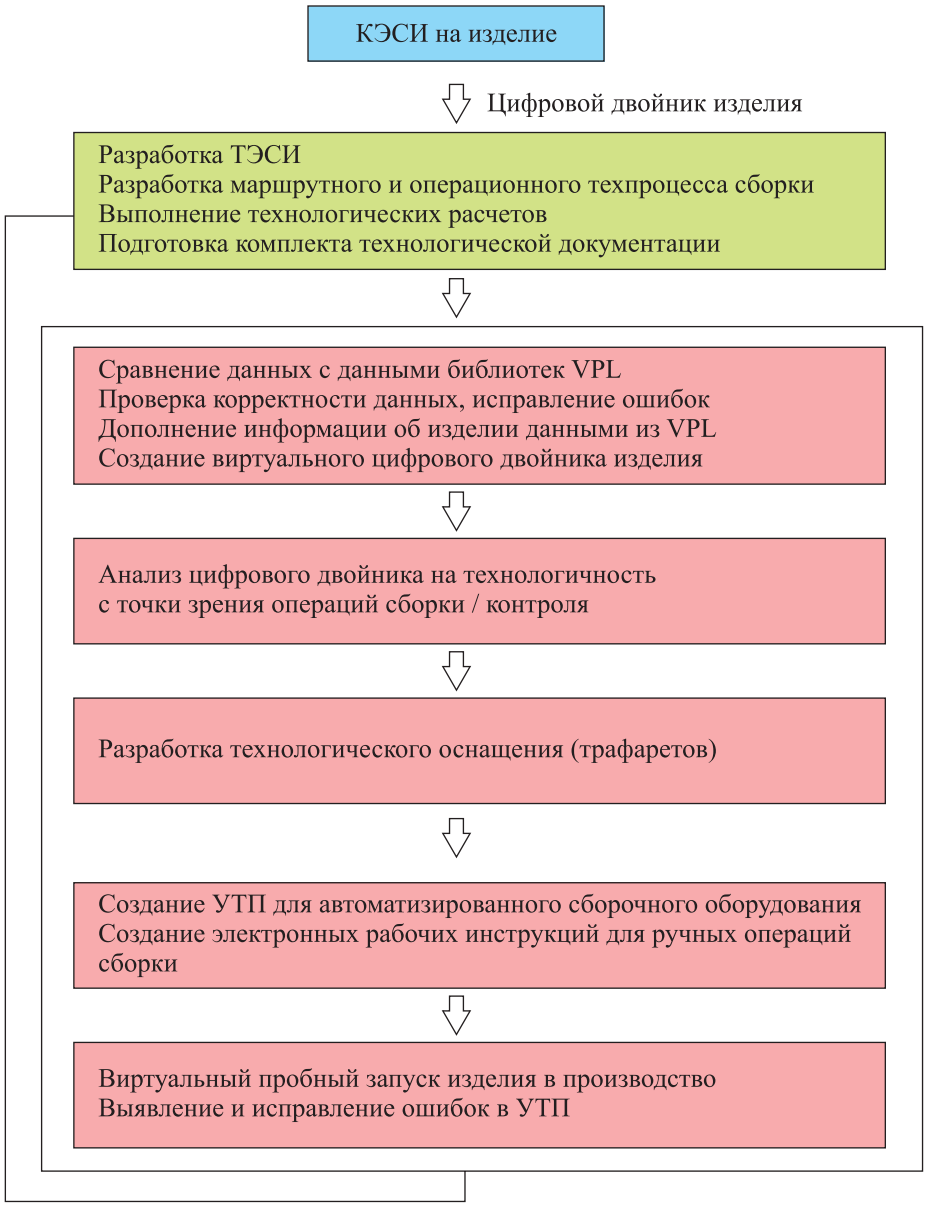
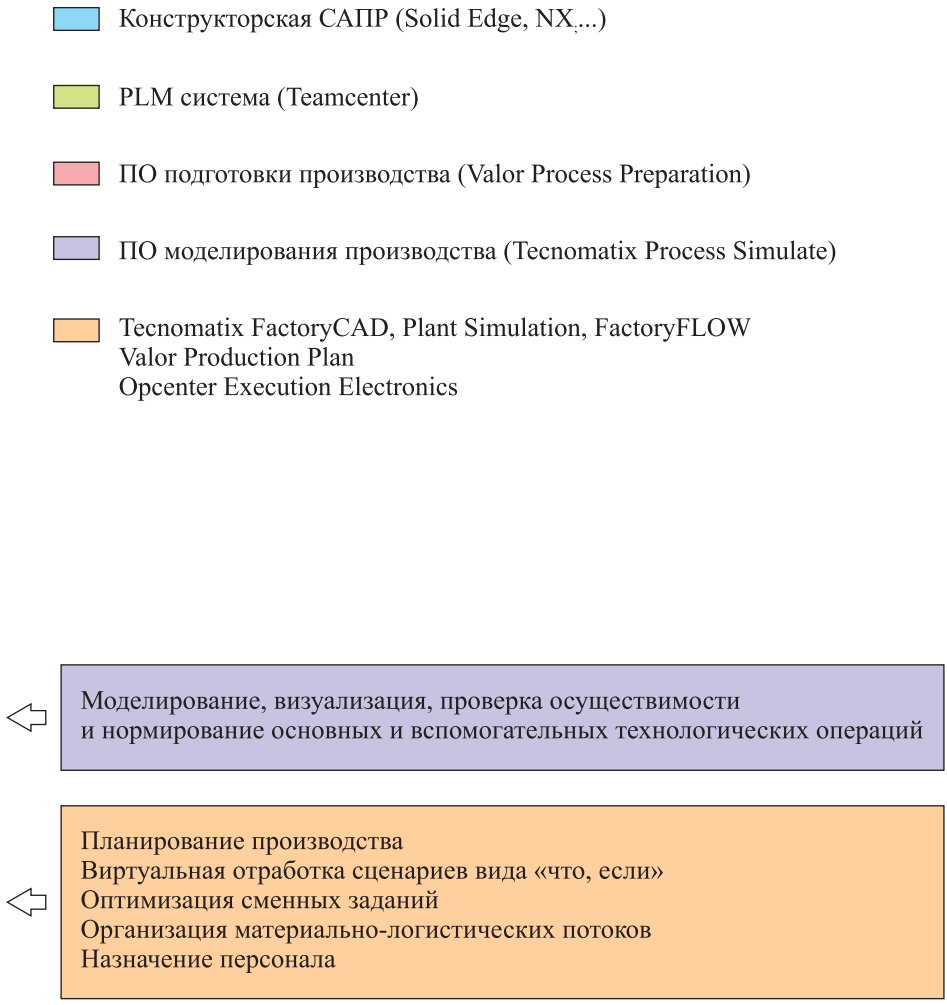


Рис. 1.157. Обобщенный алгоритм подготовки производства модулей на печатных



платах с использованием ПО компании Siemens Digital Industries Software

противоречия между данными по компонентам из КЭСИ и в системе управления ресурсами предприятия (ERP).

На этом этапе можно также отследить ошибки в назначении контактных площадок компонентам. Например, когда компонент, выполняющий одно назначение, в зависимости от своего исполнения у разных поставщиков требует разных контактных площадок (рис. 1.158), что может быть изначально не учтено в проекте.

На следующем этапе проводится анализ цифрового двойника изделия на технологичность с точки зрения операций сборки/контроля. С помощью предварительно созданных в ПО VPP правил проверяют, например, такие ключевые параметры модуля на печатной плате, как допустимые зазоры между компонентами, разрешенные/запрещенные зоны для монтажа компонентов, правильность задания, расположения и оформления реперных знаков, доступность мест установки компонентов для последующего ремонта и т. д. Здесь важно отметить, что анализ на технологичность проводится уже с учетом загруженных из библиотеки VPL реальных компонентов с точными значениями размеров корпусов, информация о которых не всегда доступна и актуальна на этапе конструкторского проектирования.

На этапе разработки технологического оснащения с помощью ПО VPP разрабатываются конструкции трафаретов для нанесения паяльной пасты. С помощью настраиваемых правил создается рисунок апертур, и результат конвертируется в формат OBB++ или Gerber 274X для отправки производителю трафаретов. Правила, относящиеся к конструкции апертур, предусматривают, например, скругления углов для качественного отделения паяльной пасты, уменьшение линейных размеров апертуры для предотвращения просачивания пасты под трафарет, определение минимально допустимого размера апертуры для типа используемой паяльной пасты, разбиение крупной апертуры на части перемычками для предотвращения вычерпывания пасты ракелем при нанесении и пр. В качестве примера на рис. 1.159 показано создание апертуры характерной формы, предотвращающей выдавливание излишков паяльной пасты под компонент с образованием шариков припоя при последующем оплавлении.

Далее технолог переходит к этапу создания управляющей технологической программы (УТП) для автоматизированного сборочного оборудования. Программное обеспечение VPP способно создавать такие программы не только для автоматов установки компонентов, но и для установок функционального контроля с летающими пробниками и адаптерами типа «ложе гвоздей», систем автоматической оптической инспекции нанесения паяльной пасты и готовых модулей, а также систем рентгеновского контроля. Управляющая технологическая программа автоматов установки компонентов предусматривает оптимизацию размещения питателей и последовательности захвата/установки компонентов, которая выполняется либо с привлечением ПО самих автоматов, либо внутренними алгоритмами ПО VPP. Здесь важно отметить, что в целях оптимизации используется полная кинематическая модель оборудования, включая приводы сборочных головок,

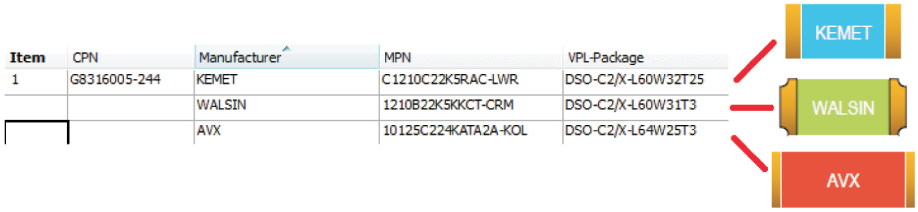


Рис. 1.158. Пример разного исполнения компонента одного назначения от разных поставщиков

конфигурацию питателей и их емкость, вакуумные захваты, камеры системы технического зрения и пр.

Созданная УТП с помощью встроенного транслятора кодируется для применения в конкретном сборочном автомате конкретного производителя. Так как все данные хранятся непосредственно в цифровом двойнике, трансляция УТП на оборудование другого производителя выполняется просто и не затрагивает исходные данные проекта.

Помимо УТП для автоматизированных операций можно создавать электронные рабочие инструкции — статические либо интерактивные — для операций ручной сборки, приближая тем самым реализацию концепции безбумажного производства.

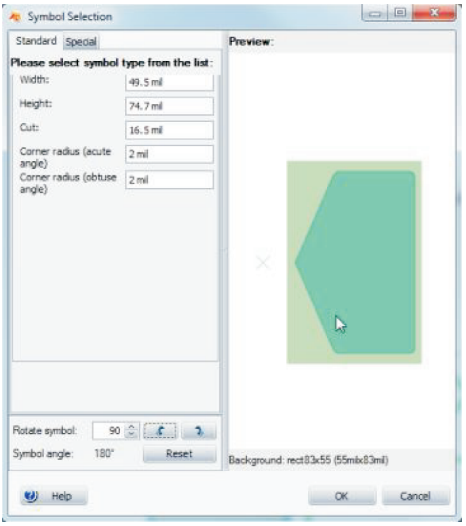
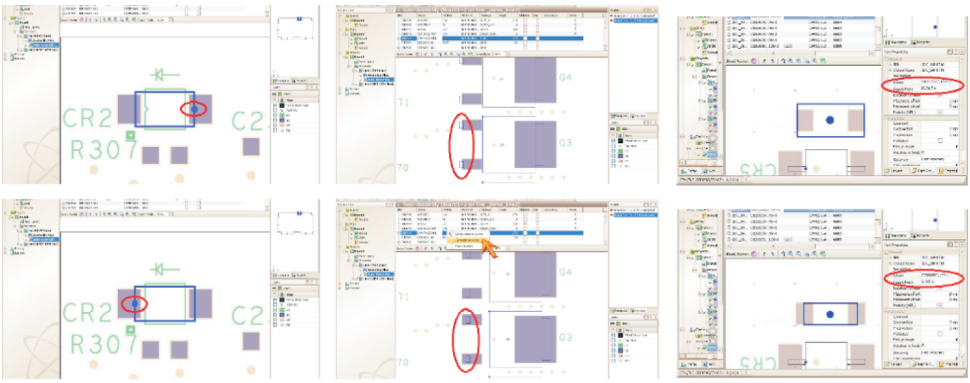


Рис. 1.159. Создание апертуры трафарета в форме исходной бейсбольной базы “Homebase” для предотвращения дефектов пайки

Полезная функция, наглядно демонстрирующая преимущества цифрового двойника изделия, носит название “Virtual sticky tape” — «Виртуальная клейкая лента». С ее помощью можно осуществить виртуальный пробный запуск изделия в производство на конкретном сборочном оборудовании, выявив возможные ошибки в составлении УТП. Программное обеспечение VPP моделирует процесс установки компонентов, и результат может быть проанализирован на предмет возможных ошибок, среди которых можно выделить типовые проблемы с отсутствием компонентов, неправильной полярностью, неверными координатами установки и несоответствием выбранных типоразмеров корпусов и контактных площадок (рис. 1.160).

Созданный и проверенный таким образом цифровой двойник загружается обратно в систему ТС и становится доступным на всех уровнях проектирования и управления производством. Данные из ТС могут поступать



а *б* *в*

Рис. 1.160. Примеры ошибок, выявляемых на этапе виртуального запуска изделия в производство с помощью инструмента «Виртуальная клейкая лента» ПО VPP: противоположная полярность компонента (*а*); смещение выводов компонента относительно контактных площадок вследствие неправильного задания координат центра (*б*); несоответствие типоразмера корпуса контактным площадкам (*в*)

дальше в систему ERP для стратегического планирования производства и ниже на уровень производственного участка — в систему MES (Manufacturing Execution System) для решения задач оперативного планирования и управления производством. При внесении изменений в конструкцию изделия или в технологический процесс его производства все внесенные изменения также отразятся в данных ТС.

Полученный таким образом цифровой двойник позволяет гибко управлять как конструкцией изделия, так и технологией его производства, отражать в технологическом процессе внесенные в конструкцию изделия изменения и выполнять различные виртуальные тесты производственной структуры без необходимости физического запуска изделия в производство, что в результате сокращает затраты предприятия на подготовку производства и ускоряет выход на рынок новых изделий.

Тесты к лекции 1.19

1. ***Для непосредственной подготовки производства модуля на печатной плате применяется:***

а) Teamcenter;
б) Valor Process Preparation;
в) Tecnomatix Plant Simulation.

2. ***Обмен интеллектуальными данными проекта проводится в формате:***

а) Gerber/Excellon;
б) IDF;
в) ODB++.

3. ***Программное обеспечение VPP способно создавать УТП для следующего оборудования*** (выберите один или больше правильных ответов):

а) для автоматов установки компонентов;

б) для установок функционального контроля с летающими пробниками и адаптерами типа «ложе гвоздей»;

в) для систем автоматической оптической инспекции нанесения паяльной пасты и готовых модулей.

4. ***Функция «Виртуальная клейкая лента» предназначена:***

а) для проверки правильности нанесения паяльной пасты на контактные площадки;

б) для виртуального пробного запуска изделия в производство на конкретном сборочном оборудовании;

в) для нанесения клея в целях удержания компонентов на печатной плате при ее перевороте.

5. ***Полученный цифровой двойник позволяет*** (выберите один или больше правильных ответов):

а) гибко управлять как конструкцией изделия, так и технологией его производства;

б) выполнять различные виртуальные тесты производственной структуры без необходимости физического запуска изделия в производство;

в) отслеживать путь изделия от производителя до заказчика.

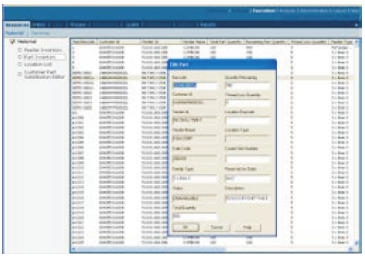
1.20. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОСЛЕЖИВАЕМОСТИ В ПРОЦЕССЕ ПРОИЗВОДСТВА

Цель лекции — изучение видов работ, методов и средств обеспечения прослеживаемости изделий в процессе производства ЭА в целях анализа производственных тенденций, брака и при работе с рекламациями.

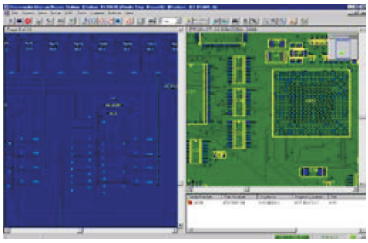
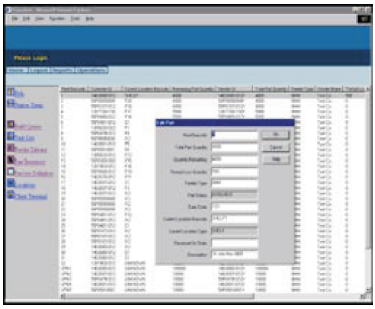
В процессе производства важной задачей является обеспечение **прослеживаемости**, т. е. ретроспективного отслеживания конкретных компонентов до уровня модулей на печатных платах и готовых изделий, включая техпроцессы производства, хранения, подготовки производства, упаковки, а также логистику и обмен данными с поставщиками. Такая задача ставится при анализе производственных тенденций, брака, при работе с рекламациями. Основные виды работ, выполняемые в рамках системы Tecnomatix в сочетании с другими средствами в целях обеспечения прослеживаемости при производстве изделий приборостроения, представлены в табл. 1.3.

Таблица 1.3

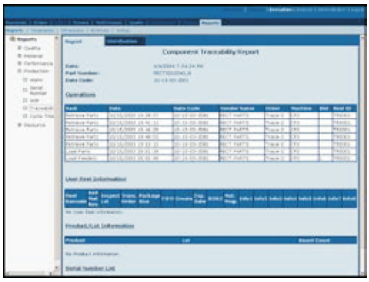
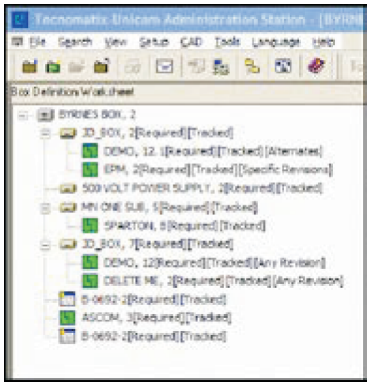
Работы, выполняемые в целях обеспечения прослеживаемости, при производстве изделий приборостроения

Вид работы	Рабочее окно модуля
Отслеживание материалов и комплектующих Отслеживание перемещения материалов и комплектующих в рамках техпроцесса в реальном времени, синхронизация с ERP/MES	
Отслеживание незавершенного производства Мониторинг технологических маршрутов, отметки даты и времени прохождения контрольных станций	

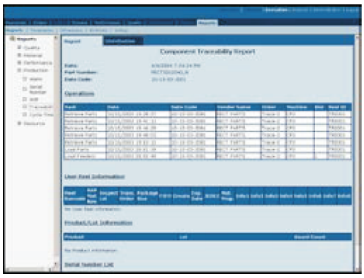
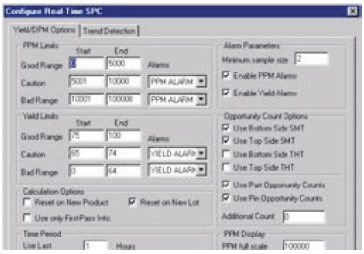
Продолжение табл. 1.3

Вид работы	Рабочее окно модуля
Отслеживание эффективности работы оборудования Отслеживание ошибок, работы питателей, установленных компонентов до уровня схемных обозначений	
Отслеживание дефектов и ремонтных операций Отслеживание дефектов на уровне платы с соответствующими маршрутами ремонтов, включая замену компонентов и действия оператора	
Советчик по ремонту Указание операторам места возникновения дефектов с указанием соответствия на электрических принципиальных схемах. Передача советов по наиболее вероятному маршруту ремонта	
Отслеживание бессвинцовых технологий Отслеживание содержащих свинец компонентов на складе и мониторинг их применимости для гарантии правильности монтажа	

Продолжение табл. 1.3

Вид работы	Рабочее окно модуля
Отчеты по прослеживаемости Составление Web-запросов по компонентам, сборкам и технологическим линиям. Архивация данных. Формулирование запросов с использованием тонких клиентов для удаленного администрирования, создание панелей индикаторов	
Управление качеством Отслеживание возникающих тенденций. Выдача предупреждений при выходе за допустимые пределы характеристик. Составление Парето и статистических отчетов (статистическое управление процессом — SPC). Анализ первопричин дефектов	
Отслеживание сборки в корпус Учет всех связей при создании готового изделия от перечня материалов до печатной платы и изделия в целом, включая ремонты и изменения	

Окончание табл. 1.3

Вид работы	Рабочее окно модуля
Проверка комплектующих Проверка наладок на станциях комплектации	
Выдача тревожных сообщений Конфигурируемая выдача тревожных сообщений на производстве при потере техпроцессом управляемости	

Каждая из задач, приведенных в таблице, решается одним из модулей системы Tecnomatix, часто в сочетании с сопутствующими модулями. Например, наладка автоматов установки компонентов для выполнения нового рабочего задания осуществляется с привлечением модулей отслеживания материалов и комплектующих, а также проверки комплектующих с последующим привлечением модуля Unicam FX для создания управляющих программ.

Тесты к лекции 1.20

1. ***В задачи отслеживания эффективности работы оборудования входит*** (выберите один или больше правильных ответов):

а) отслеживание работы питателей;

б) отслеживание установленных компонентов до уровня схемных обозначений;

в) отслеживание параметров электропитания оборудования.

2. ***В задачи отслеживания качества входит*** (выберите один или больше правильных ответов):

а) подготовка рекламаций по качеству комплектующих;

б) выдача предупреждений при выходе за допустимые пределы характеристик;

в) составление Парето- и SPC-отчетов.

3. ***Цель обеспечения прослеживаемости:***

а) отследить путь конкретной единицы комплектующих при движении от поставщика, далее по техпроцессу и в дальнейшем при эксплуатации изделия;

б) отследить путь конкретной единицы комплектующих только в рамках техпроцесса;

в) отследить путь изделия от производителя до заказчика.

1.21. ОПИСАНИЕ МОДУЛЕЙ ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА

Цель лекции — изучение модульного состава, назначения и круга решаемых задач программного комплекса автоматизированной подготовки производства Tecnomatix, предназначенного для создания цифрового двойника производства ЭА.

Рассмотрим задачу создания производства «с нуля», когда требуется создать цифровую модель производства под типовое изделие с выбором оборудования и компоновкой производственного участка.

Создание цифровой модели производства электронных средств — сложная, объемная задача, она содержит ряд взаимозависимых параметров. Предлагаемый подход предусматривает ее декомпозицию на последовательность частных подзадач, каждая из которых будет решаться с помощью существующего программного модуля. При этом каждый из производственных компонентов жизненного цикла находит свое отражение в единой информационно-управляющей производственной инфраструктуре, что обеспечивает информационную прозрачность, воспроизводимость, управляемость и надежность всей производственной системы в целом.

Для реализации подхода необходима единая среда автоматизированного проектирования, моделирования и подготовки производства, объединяющая модели изделия, техпроцесса и производства в едином информационном поле. При выборе конкретной САПР предпочтение следует отдавать системам комплексной поддержки жизненного цикла изделий с максимально бесшовным переходом от набора конструкторских моделей к имитационной модели производства. Анализ рынка САПР и PLM-систем показал, что в качестве такой среды может выступить система компании Siemens Digital Industries — среда Tecnomatix, работающая под управлением PLM-системы Teamcenter. Среда Tecnomatix представляет собой совокупность модулей, решающих задачи создания, компоновки, имитационного моделирования и оптимизации производственных участков и цехов, программирования промышленных роботов, трехмерной симуляции производственных процессов, включая работу персонала и т. д. Таким образом, линейка продуктов способна работать как автономно, так и совместно друг с другом для достижения поставленных целей по оптимизации процессов производства, принятию оптимальных решений в максимально сжатые сроки. Такой подход способствует повышению производительности и адаптивности.

Использование программного комплекса Tecnomatix для моделирования промышленного производства помогает получить ряд преимуществ, среди которых можно выделить:

– возможность цифрового моделирования производственных операций;
– создание прозрачного технологического процесса, обеспечивающего прогнозируемость результатов;
– сокращение времени подготовки производства;
– совмещение конструкторского и технологического проектирования;
– гибкое изменение параметров производства, устранение «узких мест».

Инструментарий Tecnomatix базируется на системе управления жизненным циклом изделия Teamcenter, которая объединяет в себе большое количество масштабируемых программных решений. Она позволяет создавать единую базу данных для полноценного взаимодействия всех входящих в нее программных средств. Эта база данных обеспечивает также удаленный доступ для совместной работы в распределенной среде, что помогает оперативно обращаться к информации, изменять, создавать и удалять ее с учетом разграничения прав доступа.

На всех этапах производства, начиная с проектирования и оканчивая выходом изделия с конвейера, система Tecnomatix обеспечивает выполнение условий согласования возможностей индустрии и замысла конструкторов. Таким образом, в итоге снижается время производства изделия, сокращаются сроки поставки продукции на рынок и значительно уменьшается себестоимость. Это повышает конкурентоспособность в условиях современного агрессивного рынка.

Система Tecnomatix включает в себя линейку из нескольких взаимосвязанных модулей:
– Process Designer;
– Process Simulate;
– Factory CAD;
– Plant Simulation;
– RobotExpert; Robcad;
– Factory Flow;
– Jack и Process Simulate Human;
– UniCam FX и др.

Каждый из этих модулей имеет свое предназначение и ряд возможностей, которые будут кратко рассмотрены в лекции применительно к сборочному производству.

Модуль **Process Designer** (рис. 1.161) представляет собой инструмент планирования сборочных процессов, задания последовательности сборки, создания модели производственного участка или линии сборки с учетом вариативности при сборке изделий различной номенклатуры. Возможности модуля:
– моделирование и проверка процессов;
– оценка норм времени и затрат;
– назначение состава технологических линий;
– балансировка линий;
– создание вариативных техпроцессов с управлением изменениями.

Модуль **Process Simulate** (рис. 1.162) предназначен для проверки процесса сборки и оценки достижимости и исключения возможных столкновений

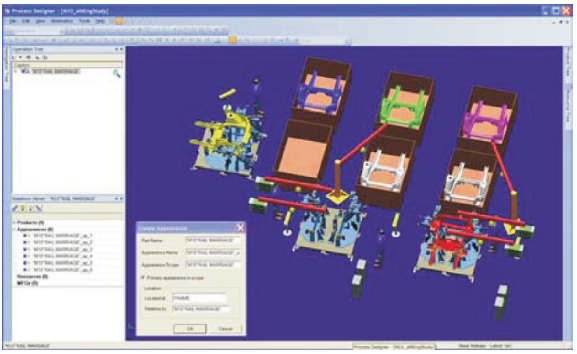


Рис. 1.161. Рабочий вид модуля Process Designer

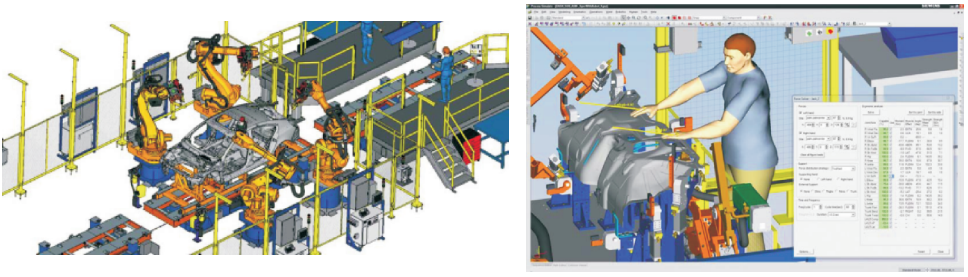


Рис. 1.162. Рабочий вид модуля Process Simulate

элементов. Он делает возможным моделирование процесса сборки с использованием инструментов, оборудования и оснастки. Имеются также средства для автоматического создания операционного технологического процесса и определения последовательности сборочных операций. Возможности модуля:

– кинематическое 3D-моделирование;
– обнаружение статических и динамических столкновений;
– построение 2D- и 3D-сечений;
– проведение 3D-измерений;
– определение последовательности операций;
– автоматическое построение и оптимизация траекторий;
– моделирование ресурсов (3D-геометрия и кинематика);
– симуляция производственных линий и постов;
– создание трехмерной интерактивной документации и электронных рабочих инструкций;
– отображение информации PMI.

Модуль **Factory CAD** (рис. 1.163) — система планирования компоновки производственных помещений, размещения оборудования, оснастки и инструментария, обеспечивающая необходимые средства для детального и интеллектуального моделирования предприятия. Возможности модуля:

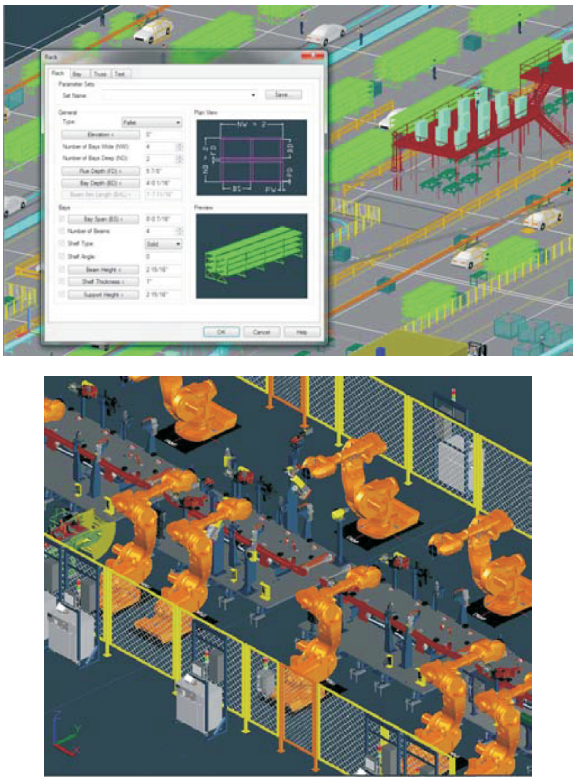
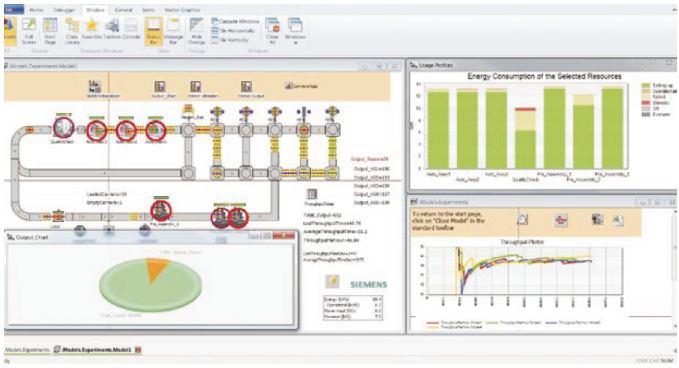


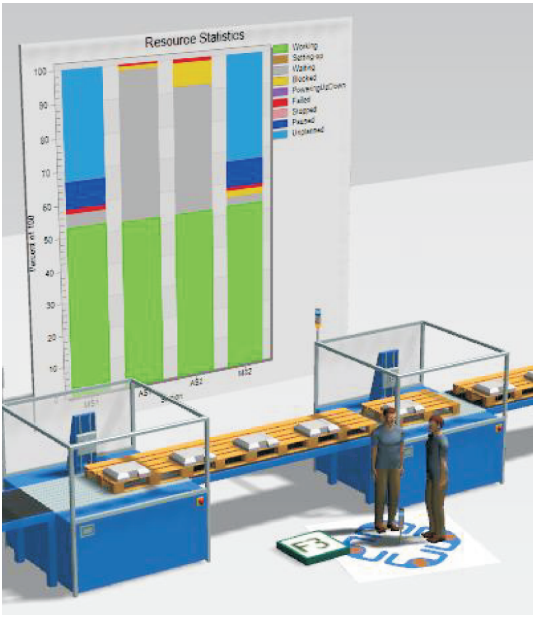
Рис. 1.163. Рабочий вид модуля Factory CAD

– создание собственных моделей оборудования;
– создание конвейерных роботизированных объектов;
– просмотр 3D-моделей вне среды 3D САПР;
– работа с библиотеками объектов;
– импорт моделей объектов из сторонних САПР;
– моделирование различных устройств манипулирования объектами.

Модуль **Plant Simulation** (рис. 1.164, *а*) — основной инструмент дискретного имитационного моделирования, который позволяет создавать цифровые модели производства для определения и оптимизации его характеристик. На созданных моделях можно проводить эксперименты вида «что, если» и вносить изменения в целях исправления ситуации. Такой подход позволяет принимать верные решения при планировании производства и определять значимые действующие факторы задолго до внедрения реальных систем. Модуль обладает набором аналитических инструментов (для анализа узких мест, сбора статистических данных и построения графиков, учитывающих коэффициент использования оборудования, время простоя, обслуживания и ремонта оборудования) для оценки различных сценариев производства. Такие графики и диаграммы могут интегрироваться непосредственно в 3D-среду для большей наглядности (рис. 1.164, *б*).



а



б

Рис. 1.164. Рабочий вид (*а*) и 3D-диаграмма использования ресурсов оборудования, интегрированная в трехмерную модель производства (*б*) модуля Plant Simulation

Модуль Plant Simulation позволяет проводить моделирование и оптимизацию материалопотоков, логистики и использования ресурсов на всех этапах планирования. Существует возможность как 2D-, так и 3D-представления моделей.

Модуль снабжен набором аналитических инструментов, направленных на определение и устранение «узких мест» в производстве. Например, он предоставляет возможности оценить целесообразность разделения оборудования для установки компонентов на быстрый чип-шутер и гибкий

многофункциональный автомат; использования печи пайки оплавления с двойным конвейером; интеграции системы автоматической оптической инспекции в технологическую линию либо использования ее в качестве отдельно стоящего оборудования.

Еще одной важной задачей является внесение изменений в структуру техпроцесса, производственного участка, материальных и людских ресурсов и пр., а также последующий анализ отклика производственной системы на эти изменения.

Модели комплекса могут формироваться из библиотеки стандартных элементов или с помощью специализированных объектов и инструментов. Каждый объект обладает рядом параметров и может объединяться с другими элементами в сложные структуры с помощью добавления подпрограмм (методов) событий на языке SimTalk, который представляет собой объектно-ориентированный язык программирования, встроенный в среду Plant Simulation и необходимый для описания методов взаимодействия объектов.

Макет цифрового производства из библиотеки примеров Plant Simulation представлен на рис. 1.165.

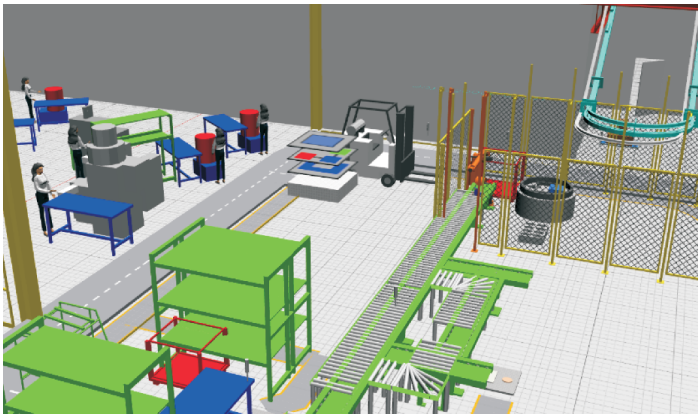


Рис. 1.165. Макет цифрового производства

Модули **RobotExpert и Robcad** (рис. 1.166) — ПО для проектирования, моделирования и оптимизации роботизированных процессов и рабочих ячеек, а также для программирования существующих роботов. В модулях присутствуют инструменты автоматизации для размещения роботов, выбора оборудования, разработки траектории движения и ее оптимизации, подготовки программы и обнаружения столкновений.

Возможности модулей:

– 3D-моделирование кинематики для инструментов и роботов;

– поддержка работы роботов большого количества поставщиков (ABB, Fanuc, Kuka и т. д.);

– динамическое 3D-моделирование роботов;

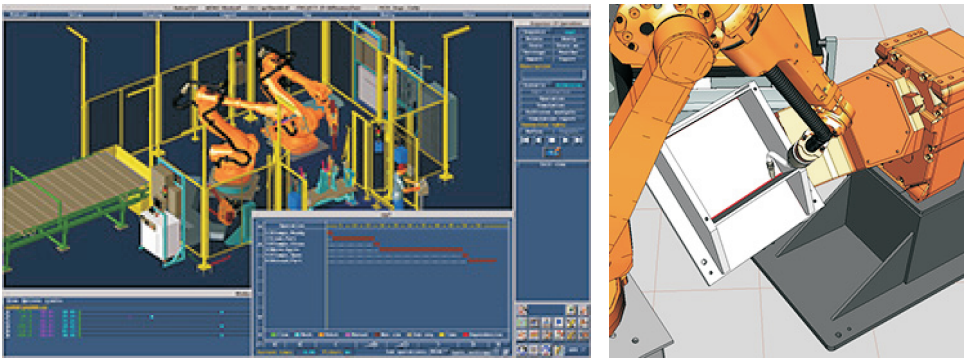


Рис. 1.166. Рабочий вид модулей RobotExpert и Robcad

– обнаружение пересечения траекторий;
– представление производственного процесса в виде диаграммы Ганта;
– программирование автономных промышленных роботов;
– точный расчет времени цикла с помощью реалистичного моделирования роботов;
– возможность загружать программы роботов с производственных площадок;
– трехмерное определение компоновки производственных ячеек;
– точное моделирование и синхронизация работы роботов и вспомогательного оборудования;
– работа с обширной библиотекой стандартных моделей роботов и контроллеров;
– наличие инструментов автоматизации для размещения роботов, выбора оборудования, разработки траектории движения и ее оптимизации, подготовки программы и обнаружения столкновений.

Модуль **FactoryFLOW** (рис. 1.167) — графическая система, которая позволяет технологам анализировать и оптимизировать компоновку заводских площадей исходя из распределения, частоты и стоимости материальных потоков. Она дает возможность оценить и оптимизировать расположение

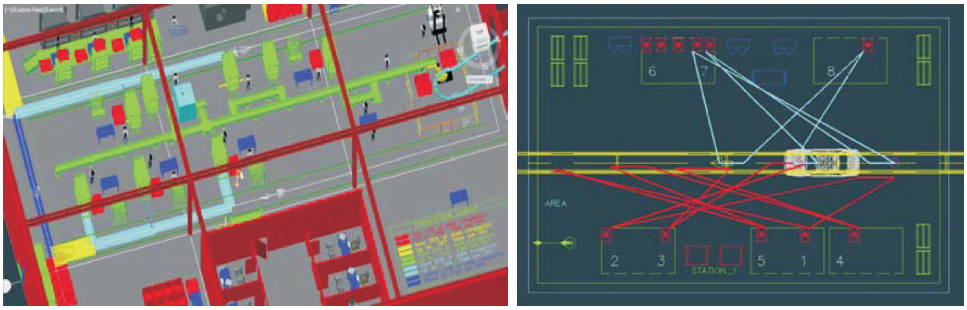


Рис. 1.167. Рабочий вид модуля FactoryFLOW

оборудования и складских помещений, уменьшить длину маршрутов, сэкономив время и увеличив производительность. Возможности модуля:

– оптимизация материальных потоков и выявление проблемных участков производства;

– определение требований к транспортному оборудованию;

– анализ и проверка путей перемещения операторов;

– построение маршрутов на основе требований к перемещению материалов;

– оптимизация используемой тары и способа складирования.

Модули **Jack** и **Process Simulate Human** (рис. 1.168) предназначены для моделирования ручного труда как одного из основных ресурсов производства. Они дают возможность проектировать антропометрически и биометрически точные модели человека, позволяющие анализировать рабочие условия, травмоопасность, комфорт, зону прямой видимости, затраты энергии и учитывать человеческий фактор при проектировании. С помощью этих модулей можно составлять калькуляцию норм времени на сборочных операциях.

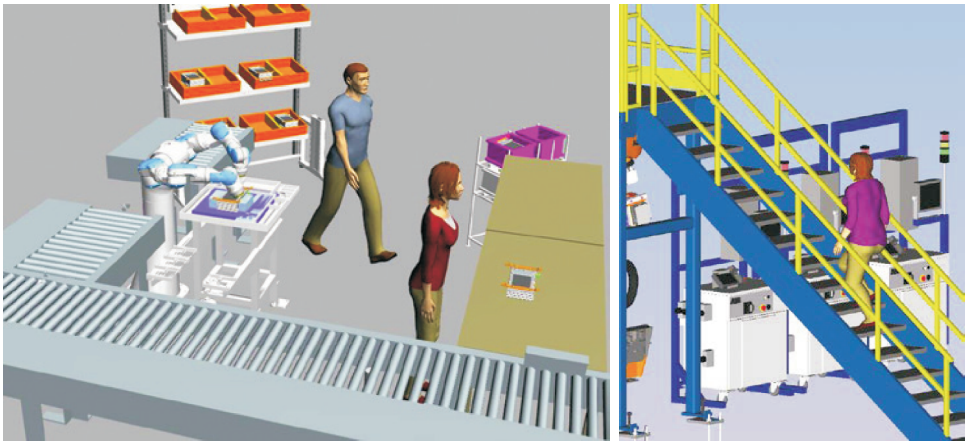


Рис. 1.168. Рабочий вид модулей Jack и Process Simulate Human

Среди основных возможностей модуля Jack можно выделить:

– проектирование масштабируемых, антропометрически и биометрически точных моделей человеческих фигур;

– предоставление комплексного набора средств эргономического анализа;

– управление различными вариантами рабочих сценариев;

– анализ угла и поля зрения;

– построение зон достижимости для быстрого анализа организации рабочего места.

Модуль Jack предоставляет несколько инструментов моделирования, среди которых следует выделить генератор сценария работы человека

TSB (Task Simulation Builder). Он позволяет использовать команды, которые управляют 3D-моделью человека в виртуальной рабочей обстановке (рис. 1.169), анимируют модель человека, а также разрабатывают определенные сценарии его рабочего поведения.

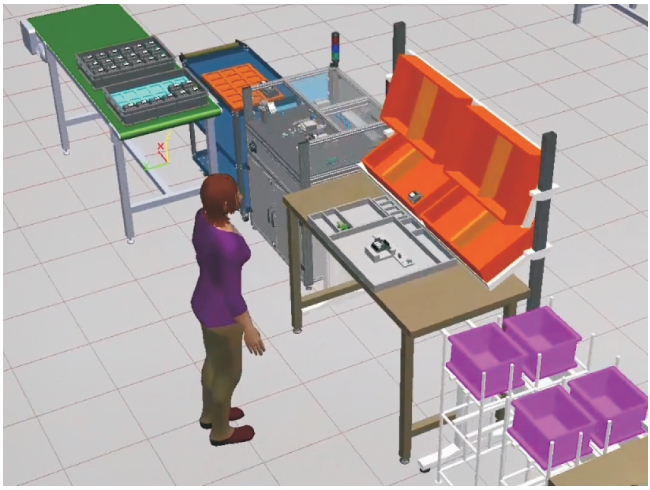


Рис. 1.169. Модели персонала и рабочих объектов в производственной среде

Генератор TSB дает возможность построить сценарий, подобрав способ выполнения задачи, определить место, где должны стоять манекены, чтобы взять деталь, способ ее захвата, кратчайший путь для переноса и т. д. Функционал симулятора позволяет один раз определить сценарий работы, а затем оценить альтернативы, просто меняя размещение элементов, — симулятор подстроит сценарий под изменившуюся обстановку.

Как только модели человека задана определенная последовательность задач, можно протестировать сценарии «что, если». В эти сценарии входят взаимодействие между собой различных человеческих фигур, перемещение объектов в окружающем пространстве, отслеживание их текущего веса. Позы и движения моделируемых субъектов пересчитываются автоматически, чтобы показать обновленную текущую сцену. Система также предоставляет отчеты по эргономичности и оценки времени на основе стандартных временны́х таблиц, нормирующих время выполнения операций.

Среди прочих инструментов, входящих в модуль Jack, можно выделить Human posturing techniques (позволяет быстро и точно рассчитать и смоделировать осанки у человеческих моделей), Smooth skin human modeling (использует деформируемую кожу для визуализации точных антропометрических свойств моделируемого человеческого тела) и Advanced hand modeling (позволяет вручную моделировать положение рук модели в пространстве, а также иные их характеристики, помогает просчитать эргономику и временны́е характеристики рабочей операции).

Для тонкой настройки интерфейса, различных рабочих сценариев, задания необходимых анализов используют модуль Customization capabilities.

Модуль **UniCam FX** (рис. 1.170) — ПО для подготовки производства сборок на печатных платах. Оно позволяет составлять управляющие программы сборочного оборудования, например устройств трафаретной печати, автоматов установки компонентов поверхностного монтажа, автоматической инспекции и т. д., а также генерировать технологическую документацию и инструкции по ручным операциям монтажа.

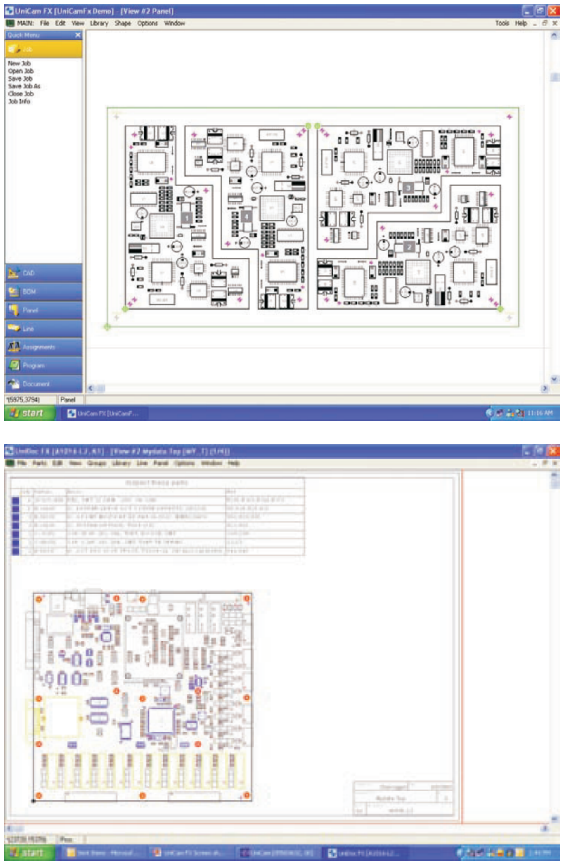


Рис. 1.170. Рабочий вид модуля UniCam FX

Test Expert — инструмент проверки конструкции изделия на технологичность с точки зрения операций контроля. Он обеспечивает обратную связь для проверки соблюдения правил, автоматическое создание программ и исходных данных для систем внутрисхемного и оптического контроля.

Тесты к лекции 1.21

1. ***Основное требование, предъявляемое среде автоматизированного проектирования, моделирования и подготовки производства:***

а) наличие развитых средств конструкторского и технологического проектирования;

б) обеспечение максимально бесшовного перехода от набора конструкторских моделей к имитационной модели производства;

в) обеспечение мультиплатформенной среды проектирования.

2. ***Модуль Plant Simulation выполняет функцию*** (выберите один или несколько правильных ответов):

а) создания цифровых моделей производств;

б) выполнения анализа узких мест на производстве;

в) автоматического построения и оптимизации траекторий движения элементов оборудования.

3. ***Модули Jack и Process Simulate Human выполняют функцию*** (выберите один или несколько правильных ответов):

а) цифрового моделирования ручного труда человека;

б) динамического 3D-моделирования роботов;

в) анализа рабочих условий, травмоопасности, комфорта, зоны прямой видимости, затрат энергии рабочего персонала.

4. ***Генератор сценария работы человека TSB позволяет*** (выберите один или несколько правильных ответов):

а) оптимизировать количество персонала на операции;

б) построить сценарий работы человека, подобрав способ выполнения задачи;

в) использовать команды, которые управляют 3D-моделью человека в виртуальной рабочей обстановке.

1.22. КОМПЛЕКСНАЯ МЕТОДИКА СИНТЕЗА ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ

Цель лекции — изучение комплексной методики синтеза систем производства ЭА с учетом взаимодействия программных модулей системы подготовки производства Tecnomatix, связи отдельных модулей и решаемых подзадач, используемого набора исходных данных об изделии и производстве.

Предполагаемая схема взаимодействия модулей, отражающая последовательность проектирования, моделирования и оптимизации сборочного производства электронных модулей, представлена на рис. 1.171.

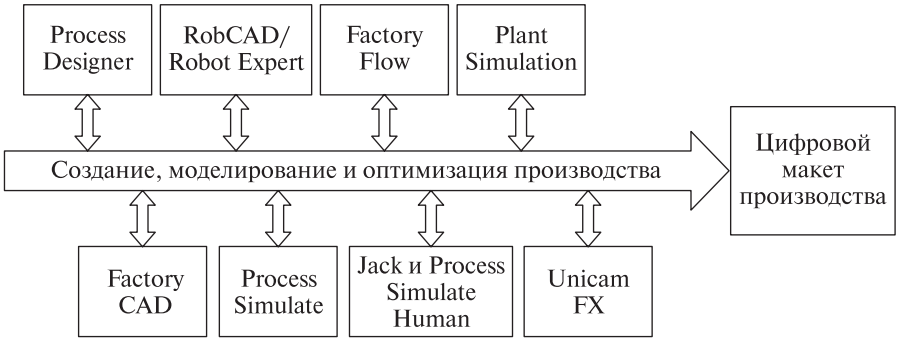


Рис. 1.171. Взаимодействие программных модулей ПО системы Tecnomatix:

Process Designer — модуль разработки техпроцесса; Robcad/RobotExpert — модули проектирования роботизированных операций; Factory Flow — модуль оптимизации компоновок производственных помещений; Plant Simulation — модуль дискретного имитационного моделирования производства; Factory CAD — модуль компоновки производственных помещений; Process Simulate — модуль проверки сборочных процессов; Jack и Process Simulate Human — модули моделирования ручных операций; UniCam FX — модуль подготовки управляющих программ для технологического оборудования сборки изделий электроники

Программное обеспечение системы Tecnomatix позволяет построить модель цифрового производства, выполнить моделирование его работы, выявить коллизии и узкие места, чтобы затем выполнить оптимизацию, в частности, в целях повышения производительности, сокращения такта выпуска, минимизации простоев оборудования и прочих непроизводительных потерь, уменьшения количества обслуживающего персонала, сокращения путей перемещения материалов и пр., а также визуализировать работу

производственного участка и выпустить необходимые отчеты по производству.

Обобщенный алгоритм создания, моделирования и оптимизации производства в системе Tecnomatix представлен на рис. 1.172.

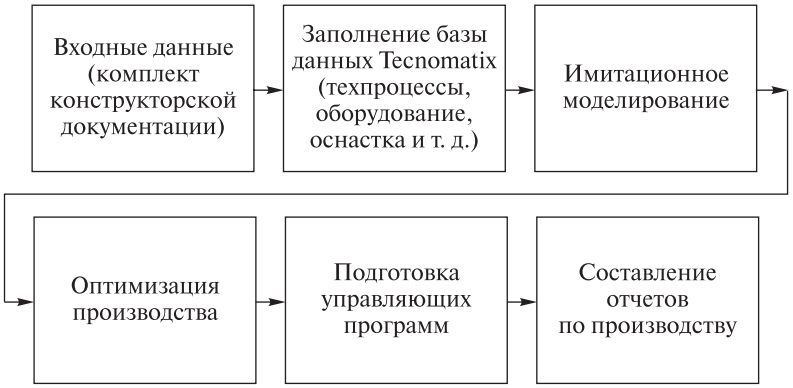


Рис. 1.172. Обобщенный алгоритм работы в системе Tecnomatix

Выделим набор задач, специфичных для сборочного производства ЭА (рис. 1.173). Рядом с соответствующими задачами на рисунке отмечены модули ПО системы Tecnomatix, отвечающие за их решение.

В качестве входных данных для ПО системы Tecnomatix необходимо наличие в электронном виде комплекта КД на изделие, в который входят (применительно к блоку ЭА):

– завершенный проект печатной платы в ECAD-системе с выполненной трассировкой, назначением и расстановкой компонентов, конструкторская 3D-модель изделия, перечень элементов, рабочий чертеж печатной платы, сборочный чертеж изделия, спецификации;

– данные по номенклатуре (если есть варианты исполнения) и программе выпуска изделия;

– данные по комплектующим (электронным компонентам), включая размеры, допуски, виды упаковки для автоматизированной сборки, рекомендуемые технологические материалы и режимы пайки и пр.

Информация об изделии хранится в базе данных PLM-системы Teamcenter. Далее необходимо для последующего моделирования цифрового производства наполнить базу данных Tecnomatix данными по организации производства, производственным нормативам, охране труда, моделям и по следующим шаблонам:

– типовых и групповых технологических процессов по данному классу изделий;

– типовых планировок производственных участков с подведенными коммуникациями;

– технологического оборудования для выполнения операций групповых техпроцессов с набором характеристик (массогабаритных, производитель-

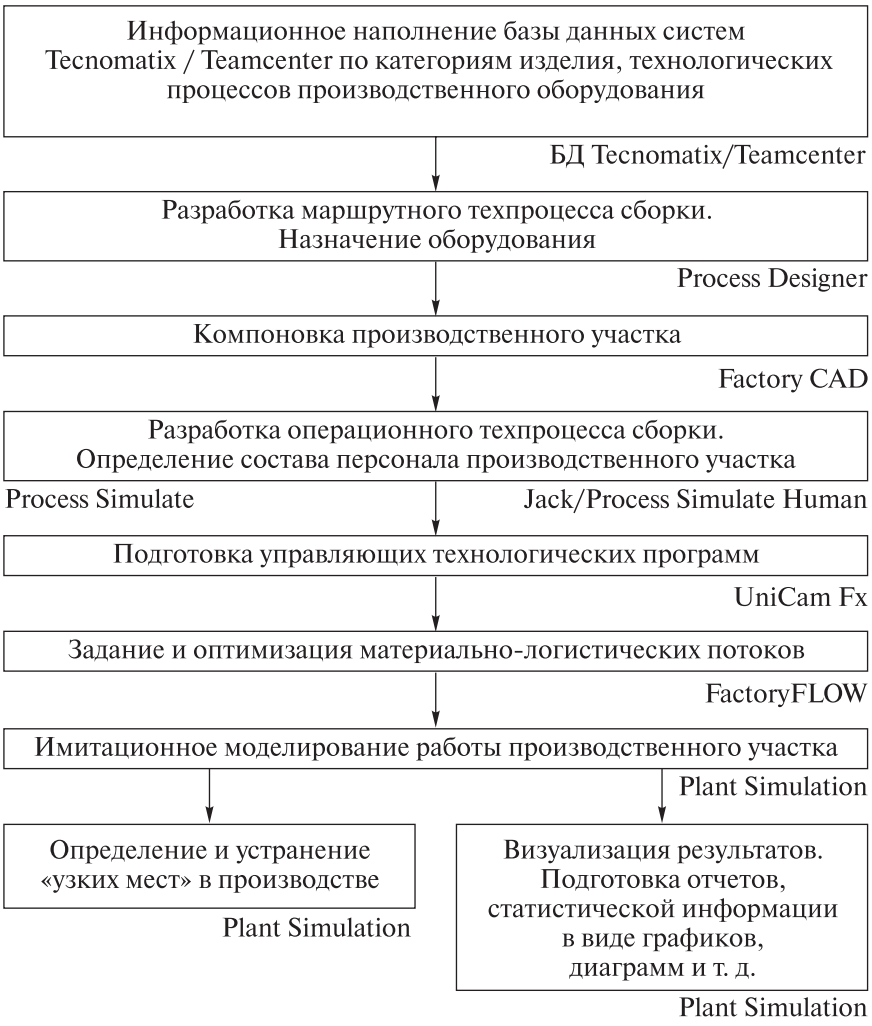


Рис. 1.173. Последовательность задач создания модели цифрового производства изделий приборостроения на базе ПО систем Tecnomatix/Teamcenter

ности, точности, надежности, времени переналадки) и элементов электрического/механического сопряжения для работы в составе автоматизированной технологической линии; среди рассматриваемых операций: трафаретная печать/дозирование, установка компонентов, пайка (волной, оплавлением, парофазная, селективная и пр.), автоматическая оптическая инспекция, отмывка, нанесение влагозащитных покрытий, визуальный контроль, рентгеновский контроль, функциональный контроль; вспомогательные операции: транспортировка, накопление/выдача, переворот плат и пр.;

– ручных и полуавтоматических операций: подготовки паяльной пасты, формовки выводов, дозирования, монтажа, упаковки;

– типового технологического оснащения, к которому относятся тележки питателей, питатели (ленточные, вибрационные, поддоны) и вакуумные насадки сборочных головок для автоматов установки компонентов, монтажные рамы и трафареты для нанесения пасты, паллеты для пайки волной и селективной пайки, адаптеры типа «ложе гвоздей» для установок функционального контроля и пр.;

– рабочих мест, ручного инструмента и приспособлений (для формовки, вязки жгутов, визуального контроля и пр.);

– технологической тары;

– технологических материалов в соответствующих упаковках: припоя и паяльной пасты (брусков, катушек, банок, шприцев, картриджей и пр.), флюса (шприцев, канистр и пр.), жидкостей для отмывки и пайки в паровой фазе (канистр), влагозащитных материалов и пр.

Дополнительно следует задать модели неавтоматизированных и автоматизированных складов комплектующих, готовых изделий, технологических материалов, оснастки, в том числе шкафов сухого хранения компонентов и плат и т. д.

Ограничим типовой набор задействованных операций набором, характерным для производства ЭА модулей I уровня на печатных платах:

– трафаретная печать/дозирование;

– установка компонентов;

– пайка (волной, оплавлением, парофазная, селективная и пр.);

– автоматическая оптическая инспекция;

– отмывка/сушка;

– нанесение влагозащитных покрытий;

– визуальный контроль;

– рентгеновский контроль;

– функциональный контроль;

– вспомогательные операции: транспортировка, накопление/выдача, переворот плат и пр.;

– ручные/полуавтоматические операции: подготовка паяльной пасты, формовка выводов, дозирование, монтаж, визуальный контроль, упаковка.

Имея указанный набор исходных данных и наполненную технологической информацией базу данных системы Tecnomatix, можно приступать непосредственно к моделированию производства, которое начинается с разработки маршрутного технологического процесса с помощью модулей Process Designer и FactoryCAD. Данный этап включает в себя построение схемы сборки, назначение операций и выделение среди них автоматизированных и ручных, назначение оборудования и выпуск маршрутных карт.

Далее разрабатывается и оптимизируется операционный технологический процесс сборки, при этом составляется технологическая линия, назначаются модели оборудования, осуществляются трехмерная компоновка производственного участка и сопряжение с коммуникациями, определяется необходимое количество персонала и организуются потоки материальных ресурсов.

С помощью модулей Process Simulate, Jack, Plant Simulation, FactoryFLOW и пр. визуализируются и оптимизируются участки, потоки материальных ресурсов и количество обслуживающего персонала, проводятся автоматизированная калькуляция времени выполнения операций, а также имитационное моделирование с использованием моделей операторов, позволяющее проводить балансировку и поиск узких мест в работе линий, оптимизировать операции переналадки оборудования. Далее обеспечивается вариативность техпроцесса для изделий различной номенклатуры (вариантов исполнения), окончательно составляются операционные карты, выполняется подготовка управляющих программ для автоматизированного сборочного оборудования (модуль Unicam FX).

Результат работы системы по приведенному алгоритму представляет собой макет (цифровой двойник) оптимизированного цифрового производства, который может быть описан с помощью сгенерированных отчетов, эскизов и схем сборки, а также маршрутных и операционных карт. Пример визуализации готовой производственной 3D-структуры представлен на рис. 1.174.

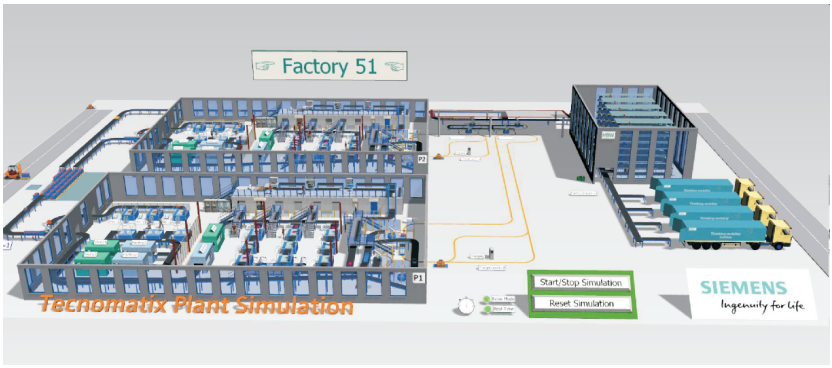


Рис. 1.174. Пример производственной 3D-структуры, сформированной в модуле Plant Simulation

Разработанный цифровой двойник производства может в дальнейшем использоваться для дискретного имитационного моделирования производственных процессов с анализом сценариев вида «что, если» в целях оценки требуемого количества оборудования и рабочего персонала, необходимости организации параллельных сборочных операций и т. д.

Тесты к лекции 1.22

1. ***Задачи, которые необходимо решить в рамках создания модели цифрового производства изделий приборостроения на базе систем Tecnomatix и Teamcenter*** (выберите один или больше правильных ответов):

а) компоновка производственного участка;

б) задание и оптимизация материально-логистических потоков;

в) разработка конструкции электронного модуля на печатной плате.

2. ***В качестве входных данных для системы Tecnomatix со стороны выпускаемого изделия необходимы*** (выберите один или больше правильных ответов):

а) цифровые модели технологического оборудования и оснащения;

б) комплект КД на изделие в электронном виде;

в) данные по номенклатуре и программе выпуска изделия.

3. ***Составляющие, которыми наполняется база данных PLM-системы Teamcenter*** (выберите один или больше правильных ответов):

а) модели рабочих мест, ручного инструмента и приспособлений;

б) данные по организации производства, производственным нормативам, охране труда;

в) типовые планировки производственных участков с подведенными коммуникациями.

4. ***Технологические операции, характерные для сборочного производства ЭА — модулей I уровня на печатных платах*** (выберите один или больше правильных ответов):

а) автоматическая оптическая инспекция;

б) функциональный контроль;

в) фрезерование печатной платы по контуру.

1.23. МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ И АНАЛИЗА ЦИФРОВОГО ПРОИЗВОДСТВА

Цель лекции — изучение входной информации, наполнения баз данных и алгоритма имитационного моделирования; анализ цифрового производства электронных модулей на печатных платах.

Для методики моделирования и анализа цифрового производства, входными данными являются:

– состав и параметры изделия, для которого будет создана модель цифрового производства, включая комплект КД на изделие в электронном виде;

– данные по комплектующим (электронным компонентам), включая виды упаковки для автоматизированной сборки;

– данные по номенклатуре (если есть варианты исполнения) и программе выпуска изделия;

– типовой техпроцесс производства/сборки.

На основе данных об изделии и типовом техпроцессе необходимо спроектировать индивидуальный технологический процесс его производства, для которого следует выбрать соответствующее технологическое оборудование и оснащение. По документации к данному оборудованию и изделию необходимо создать 3D-модели оборудования и оснащения, которые далее будут использоваться в цифровом производстве.

После того как все требуемые модели созданы, следует заполнить базу данных модуля Plant Simulation, а при моделировании персонала и ручных операций — и модуля Jack, куда необходимо включить:

– состав и параметры технологического оборудования и оснащения;

– параметры компоновок производственных участков с подведенными коммуникациями;

– данные по организации производства, производственным нормативам на выполнение операций.

При создании моделей оборудования следует импортировать геометрию, задать и смоделировать кинематику составных частей оборудования, добавить обработчики событий, реализованные на языке SimTalk. Помимо этого для каждого элемента оборудования необходимо задать временны́е параметры, параметры переналадки и настроить вероятность отказов. Далее следует перейти к созданию дискретной имитационной модели производства и для этого выполнить следующие действия:

– настроить источник подвижных объектов, при этом настроить его работу по сложному алгоритму, использовав дополнительные объекты;

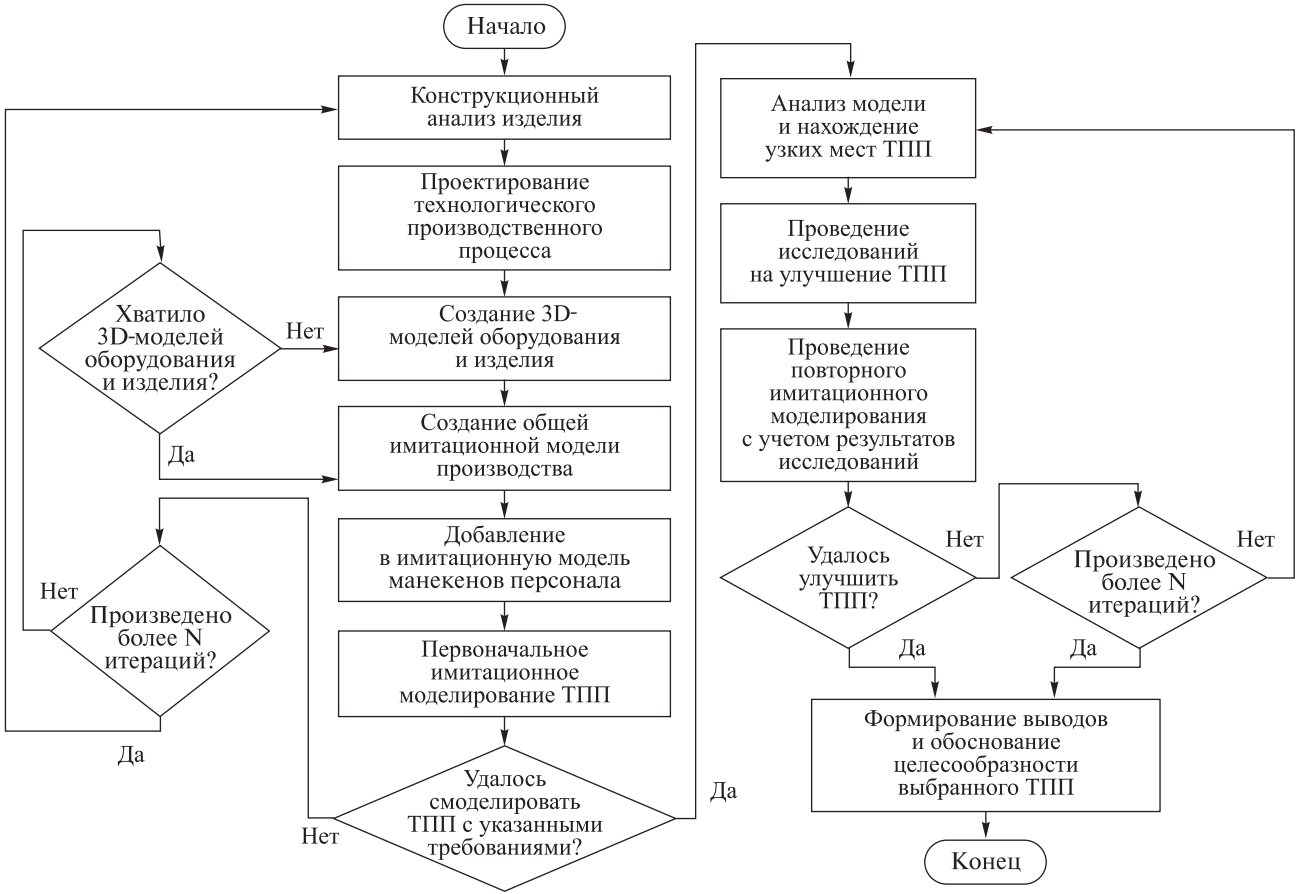


Рис. 1.175. Блок-схема методики создания, моделирования и анализа цифровой модели производства

– установить стандартные и созданные объекты из базы данных;
– настроить буферы для групповых операций;
– создать и настроить рабочий и обслуживающий персонал;
– создать связи между объектами;
– добавить элементы для слежения за состоянием модели.

Как только модель создана и проверена на соответствие спроектированному ТП, становятся возможными выполнение имитационного моделирования производства с использованием контроллера событий и анализ полученных данных. На основе результатов можно сделать вывод о том, насколько удовлетворяет данное производство установленным критериям принципиальной реализуемости, производительности, загрузки оборудования, отказоустойчивости, минимального участия рабочего персонала. Если один или несколько заданных критериев не удовлетворяются, в модель можно внести корректировки и провести повторное моделирование. Если спустя некоторое количество итераций желаемого результата добиться не удалось, имеет смысл заново пересмотреть состав изделия, технологический процесс, состав оборудования, оснащения, назначение персонала.

Как только цифровая модель производства будет удовлетворять всем предъявляемым требованиям, работу над моделью можно считать завершенной. Параметры и поведение имитационной модели могут в определенной степени отличаться от параметров и поведения в случае реального производства, поэтому при внедрении результатов в реальное производство следует экспериментально оценить погрешность данной цифровой модели.

Описанную методику можно представить в виде блок-схемы, показанной на рис. 1.175.

Методика позволяет комплексно описать процесс моделирования и анализа цифрового производства. Более того, она предусматривает возможность непредвиденных ситуаций при проектировании, вероятность ошибок при первоначальном анализе конструкции изделия, невозможность улучшения технологического процесса проектирования и предлагает решения.

Созданная с применением данной методики модель операции сборки изделий приборостроения приведена на рис. 1.176.

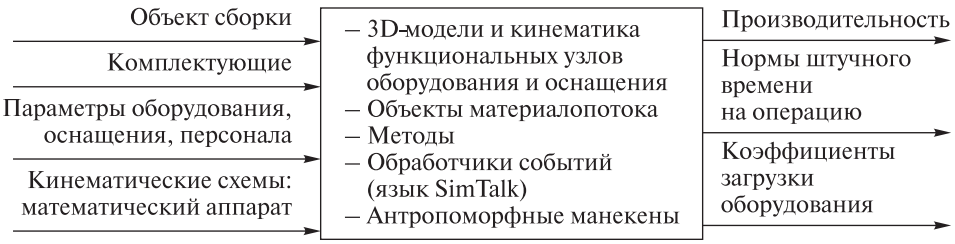


Рис. 1.176. Состав комплексной цифровой модели операции сборки изделий приборостроения

В зависимости от применимости модели к автоматизированной либо ручной операции сборки в ней будут присутствовать разное технологическое оборудование и оснащение, а в случае ручной операции — антропоморфные манекены рабочего и вспомогательного персонала.

Тесты к лекции 1.23

1. ***Входными данными при использовании методики моделирования и анализа цифрового производства являются*** (выберите один или больше правильных ответов):

а) данные по конструкции, номенклатуре и программе выпуска изделия;

б) индивидуальный технологический процесс производства/сборки изделия;

в) типовой технологический процесс производства/сборки изделия.

2. ***Для создания дискретной имитационной модели производства необходимо*** (выберите один или больше правильных ответов):

а) создать и настроить модели рабочего и обслуживающего персонала;

б) добавить элементы для слежения за состоянием модели;

в) построить графики зависимости наблюдаемых параметров от параметров модели.

3. ***Если один или несколько заданных критериев оценки производства не удовлетворяются, следует*** (выберите один или больше правильных ответов):

а) осуществить переход к другому изделию для запуска в производство;

б) внести корректировки в модель и провести повторное моделирование;

в) пересмотреть состав изделия, его технологический процесс, состав оборудования, оснащения, персонала.

1.24. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТИПОВОГО ИЗДЕЛИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА СБОРКИ

Цель лекции — изучение подходов к моделированию типового изделия приборостроения — электронного модуля на печатной плате, технологического процесса его автоматизированной сборки и временны́х параметров производственного цикла; составление технологической схемы сборки изделия.

В качестве типового изделия приборостроения для моделирования рассмотрим модуль системы управления температурой в помещении. Данный модуль на печатной плате содержит электронные компоненты, монтируемые как на поверхность, так и в отверстия.

Принципиальная электрическая схема устройства показана на рис. 1.177.

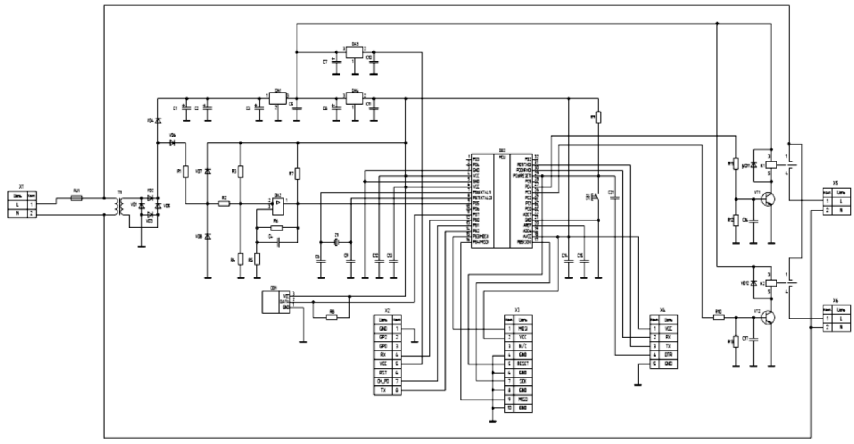


Рис. 1.177. Принципиальная электрическая схема модуля системы управления температурой в помещении

Топология печатной платы устройства, разработанная в программной среде Altium Designer, представлена на рис. 1.178.

Печатная плата является двусторонней и спроектирована для одностороннего монтажа. Устройство содержит 32 компонента поверхностного монтажа и 37 компонентов, монтируемых в отверстия. Эти данные далее будут задействованы в процессе имитационного моделирования.

Модуль реализован на печатной плате в соответствии со сборочным чертежом, фрагмент которого показан на рис. 1.179.

В результате проектирования получим 3D-модель модуля, представленную на рис. 1.180. Данная модель будет служить основой для извлечения данных по изделию в рамках автоматизированной подготовки производства, а также будет визуализироваться в процессе проведения имитационного моделирования.

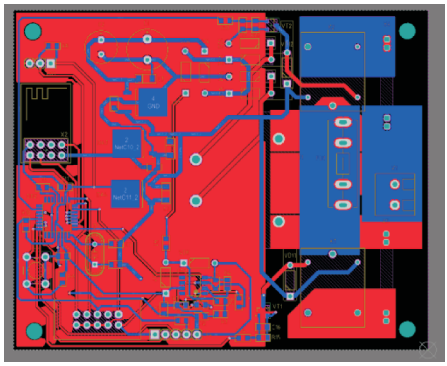


Рис. 1.178. Топология печатной платы модуля системы управления температурой в помещении

Разрабатываемый технологический процесс должен удовлетворять следующим критериям: он должен обеспечивать необходимый уровень качества ЭА, выпуск изделия с минимальными затратами и высокую производительность труда.

Технологический процесс изготовления изделий разделяют на технологический и производственные циклы.

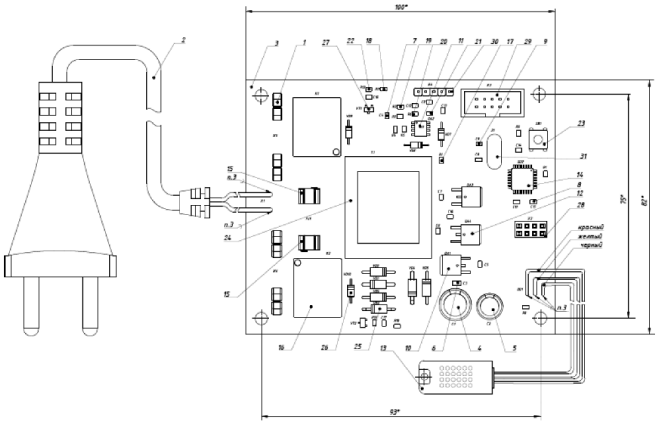


Рис. 1.179. Фрагмент сборочного чертежа модуля системы управления температурой в помещении

Технологический цикл складывается из длительности операций с учетом времени на загрузку и выгрузку и представляет собой суммарное время, которое необходимо для прохождения одной партии изделий от первой операции до последней.

К основным и наиболее объективным критериям целесообразности выбора наиболее подходящего для конкретных условий варианта процесса относятся его производительность и экономичность.

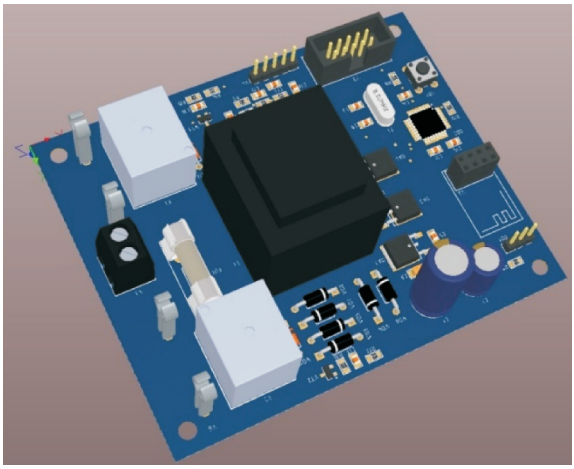


Рис. 1.180. Спроектированная 3D-модель модуля системы управления температурой в помещении

В общем случае производительность — это количество деталей, сборочных единиц или изделий, изготавливаемых или собираемых в единицу времени. Производительность тесно связана с трудоемкостью и себестоимостью посредством штучно-калькуляционного или штучного времени, которое определяется при техническом нормировании.

Для каждой операции устанавливается норма времени, которая состоит из подготовительно-заключительного и штучного времени.

Производственный цикл отражает фактическое время производства изделий в условиях реального производства. Оно включает в себя время технологического цикла и длительность вспомогательных операций, а именно транспортировки, временного складирования, контроля качества.

Длительность производственного цикла представляет собой время между запуском в производство и окончанием изготовления партии изделий, которое зависит от сочетания операций. Время производственного цикла рассчитывается по формуле

$$T_{\text{ц}} = NT_s = N\sum_{i=1}^{n} T_{\text{шт}i}, \tag{1.1}$$

где N — количество изделий в партии, шт.; T_s — время прохождения всех операций одним изделием, мин; $T_{\text{шт}i}$ — штучное время i-й операции, мин.

Под производительностью труда понимают количество продукции, выпускаемое за единицу времени, и рассчитывают по формуле

$$Q = \frac{1}{T}, \tag{1.2}$$

где T — норма штучного времени, мин.

Для ручных операций $T_{шт}$ определяется по формуле

$$T_{шт} = t_{оп} + t_{обс}, \tag{1.3}$$

где $t_{оп}$ — время на выполнение операции, мин; $t_{обс}$ — время, затрачиваемое на обслуживание рабочего места, мин.

Время, затрачиваемое на операцию, $t_{оп}$ (оперативное время) складывается из основного и вспомогательного времени и определяется по формуле

$$t_{оп} = t_{в} + t_{о}, \tag{1.4}$$

где $t_{в}$ — время на установку и снятие обрабатываемой детали, пуск и остановку оборудования, перемещение инструмента, измерение детали и на другие приемы, повторяющиеся при обработке каждой детали, мин. Здесь же учитывается время, связанное с технологическим переходом. Оно включает в себя время на установку инструмента, удаление отходов, подвод инструмента к детали и отвод, включение и выключение рабочего хода и самого оборудования, изменение режима работы оборудования, смену инструмента; $t_{о}$ — основное время на сборку изделия, мин.

Основное время — время, на протяжении которого происходит обработка детали. Оно может быть автоматическим (если обработка детали и подача инструмента осуществляются оборудованием), автоматизированным (если обработка детали обеспечивается оборудованием, а подача инструмента ручная) или ручным.

Время, затрачиваемое на обслуживание, рассчитывается по формуле

$$t_{обс} = t_{орг} + t_{тех} + t_{пер}, \tag{1.5}$$

где $t_{орг}$ — время на организационную подготовку рабочего места (на обеспечение необходимыми деталями, комплектующими, материалами), мин; $t_{тех}$ — время на техническую подготовку рабочего места (на настройку аппаратуры, ее включение и выключение), мин; $t_{пер}$ — время на выделяемые перерывы, мин.

Подготовительно-заключительным называется время, необходимое для изучения чертежа детали, операционной карты, получения и сдачи инструментов, требующихся для выполнения данной операции, наладки станка, сохраняющейся при обработке всей партии деталей. Оно относится ко всей партии деталей и не зависит от количества деталей в партии.

Для автоматизированных операций, выполняемых оборудованием с ЧПУ управлением, время каждой операции рассчитывается по формуле, аналогичной следующей формуле:

$$T_{ц} = t_{р.х} + t_{х.х}, \tag{1.6}$$

где $t_{р.х}$ — время, затрачиваемое на рабочий ход, основные переходы, мин; $t_{х.х}$ — время, затрачиваемое на холостой ход, вспомогательные перехо-

ды, мин. Отличие заключается в том, что рабочий ход представляет собой основное время, а холостой ход — вспомогательное.

Для серийного производства рассчитывается также штучное калькуляционное время, учитывающее продолжительность переналадки и подготовки оборудования для новой партии изделий:

$$T_{\text{шт. кальк}} = T_{\text{шт}} + \frac{T_{\text{п.з}}}{N}, \tag{1.7}$$

где $T_{\text{п.з}}$ — подготовительно-заключительный интервал, мин; N — количество изделий в партии, шт.

Определение времени может проводиться следующими методами:

– путем выбора из данных о типовых технологических процессах для аналогичных операций;

– посредством хронометража в реальном режиме;

– расчетным путем с использованием формул.

При расчете времени применяют два основных подхода.

1. Продолжительность составляющих оперативного времени определяют по формулам и таблицам, приводимым в различных справочниках по нормированию работ. Время на техническое и организационное обслуживание рабочего места и время на перерывы исчисляется в процентах от оперативного времени. Источником данных служат справочные материалы, представленные производителем оборудования, либо результаты хронометража производственных циклов с усредненными статистическими значениями. Как правило, такой способ позволяет получить оценочное время для выполнения операций, которое может значительно отличаться от истинного времени.

2. На действующем производстве в реальном режиме выполняется хронометраж, который заключается в замере времени переходов и операций с применением хронометрического устройства (секундомера); замер времени проводится на действующей сборочной линии. Данный подход позволяет определить точное время, затрачиваемое на одно изделие, однако при смене изделия предыдущие измерения и расчеты станут неактуальными.

Обоим перечисленным методам присущи существенные недостатки, связанные со значительными затратами времени и средств на их применение и с погрешностями полученных результатов. Имитационное моделирование на основе цифрового двойника сборочного производства призвано избавить процесс нормирования технологических операций от указанных недостатков и предоставить основу достоверной количественной оценки показателей производительности автоматизированных линий, ручных операций, участков и цехов.

Для производства типового изделия — модуля системы управления температурой в помещении — разработан технологический процесс сборки, включающий в себя следующие технологические операции:

– нанесение паяльной пасты;

– установку компонентов поверхностного монтажа;
– пайку оплавлением припоя;
– ручной монтаж компонентов, монтируемых в отверстия;
– контроль;
– отмывку;
– сушку.

Схема сборки модуля представлена на рис. 1.181.

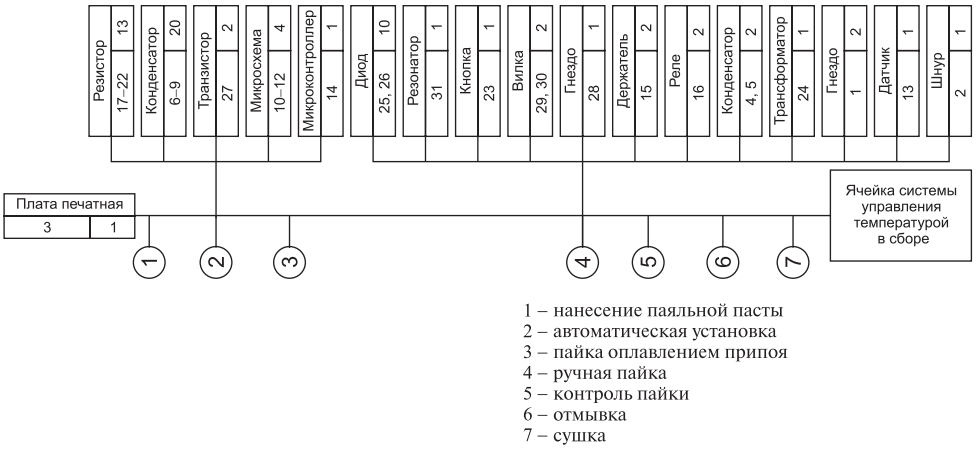


Рис. 1.181. Схема сборки модуля системы управления температурой в помещении

Далее для каждой из перечисленных и указанных в схеме сборки операций будут назначаться модели технологического оборудования и оснащения.

Тесты к лекции 1.24

1. ***Критерий, которому должен удовлетворять разрабатываемый технологический процесс*** (выберите один или больше правильных ответов):

а) требуемый уровень качества;
б) минимизация затрат;
в) требуемый уровень производительности.

2. ***В состав производственного цикла входят операции*** (выберите один или больше правильных ответов):

а) основные;
б) вспомогательные;
в) инсталляция и ввод нового оборудования в эксплуатацию.

3. ***Подготовительно-заключительное время зависит от размера партии:***

а) да;
б) нет.

4. ***Отличие штучно-калькуляционного и штучного времени заключается в том, что:***

а) штучное время учитывает основное, а штучно-калькуляционное — вспомогательное время операции;

б) штучно-калькуляционное время дополнительно учитывает продолжительность переналадки и подготовки оборудования;

в) штучно-калькуляционное время дополнительно учитывает время на организацию рабочего места.

5. ***Среди методов определения штучно-калькуляционного времени оптимальным с точки зрения затрат времени и средств является:***

а) метод расчета по формулам;

б) метод хронометража на действующем производстве;

в) метод имитационного моделирования на цифровой модели.

1.25. МОДЕЛИРОВАНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ И ОСНАЩЕНИЯ

Цель лекции — изучение подходов к моделированию оборудования и оснащения для автоматизированной сборки электронных модулей на печатных платах на примере автомата установки компонентов Topaz X; составление блок-схемы имитационного моделирования на базе цифровой модели автомата.

Применение автоматизированного оборудования предоставляет возможность использовать для сборки ЭА технологическую линию, в которой все операции могут проходить с минимальным участием обслуживающего персонала. Пример такой линии в составе штабелера-загрузчика, шкафа сухого хранения, установки трафаретной печати, нескольких автоматов установки компонентов, печи пайки оплавлением, инспекционного конвейера, установки отмывки/сушки и автоматизированного склада показан на рис. 1.182.

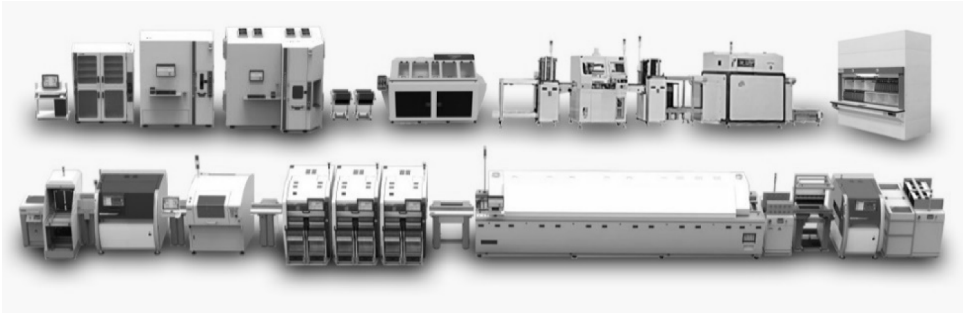
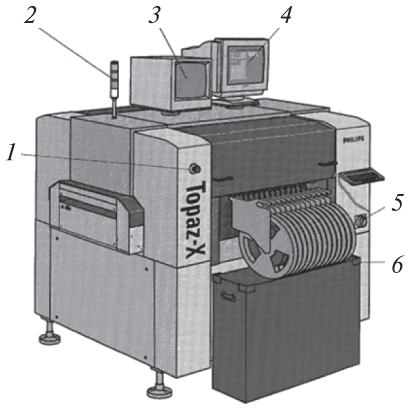


Рис. 1.182. Автоматизированная технологическая линия сборки электронных модулей на печатных платах

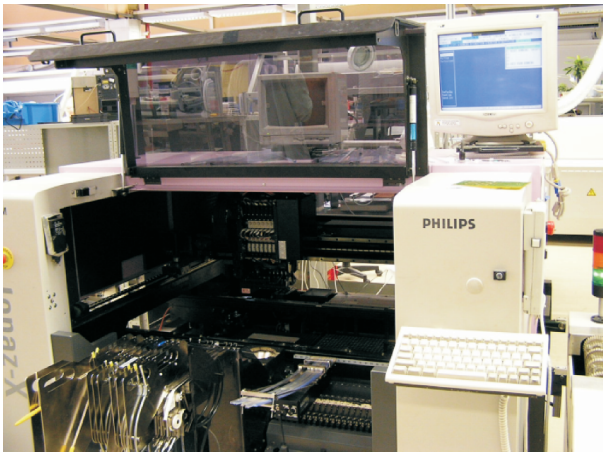
Состав данной технологической линии примем за основу при изучении процесса создания цифровой модели производства.

Рассмотрим примеры моделей сборочного оборудования для производства электронных модулей на печатных платах, 3D-моделирование отдельных узлов и оборудования в целом. Наиболее детально рассмотрим операцию установки компонентов поверхностного монтажа на печатную плату. Для ее реализации используем модель автоматизированного оборудования Topaz X компании Phillips EMT (рис. 1.183).

Установка компонентов с применением сборочного автомата начинается с загрузки печатной платы из автомата трафаретной печати на конвейер



а



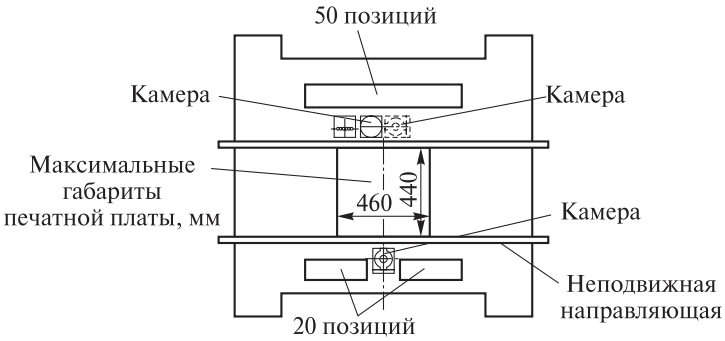
б

Рис. 1.183. Схема (*а*) и внешний вид (*б*) автомата установки компонентов Topaz X:

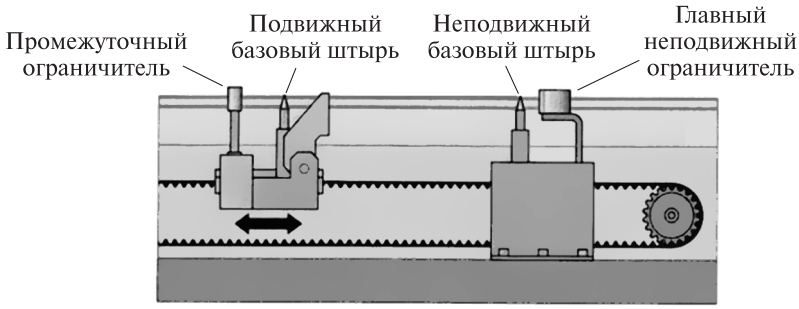
1 — кнопка аварийного останова; *2* — световой индикатор состояния; *3* — монитор системы технического зрения; *4* — монитор настройки параметров и управления автоматом; *5* — выключатель питания; *6* — панель управления

сборочного автомата с двумя направляющими: неподвижной (передней) и подвижной (задней). Расстояние между направляющими соответствует ширине печатной платы. Плата перемещается в зону сборки и закрепляется в устройстве фиксации по базовым отверстиям либо по торцам. Рабочая зона автомата, схема фиксации платы в нем и зафиксированная в зоне сборки плата показаны на рис. 1.184.

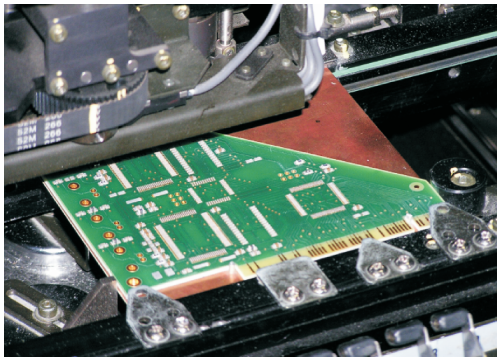
Компоненты подаются с помощью питателей из лент, кассет и матричных поддонов. В рассматриваемом примере смоделированы наиболее



а



б

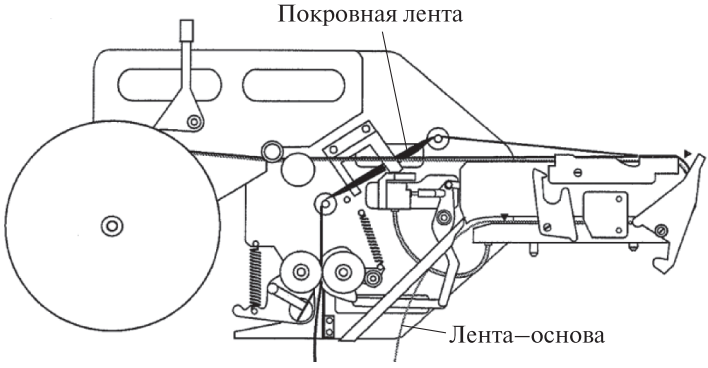


в

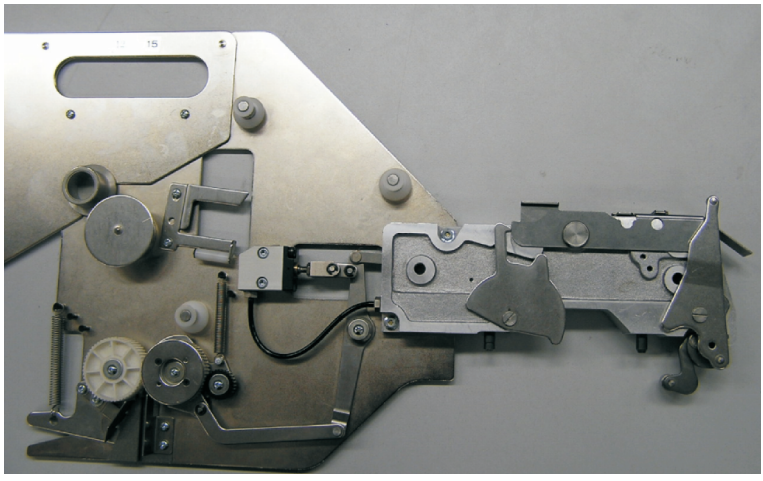
Рис. 1.184. Рабочая зона автомата Topaz X (*а*), схема фиксации платы в нем (*б*) и зафиксированная в зоне сборки плата (*в*)

универсальные ленточные питатели, в которых подача компонентов выполняется последовательно из катушки с лентой. Подача пневмоимпульса вызывает перемещение штока пневмоцилиндра, сдвиг ленты на один шаг, снятие покровной ленты с основы и открытие очередного кармана с компонентом для его последующего захвата сборочной головкой. Схема и внешний вид ленточного питателя представлены на рис. 1.185. Автомат Topaz X может работать максимум с 90 ленточными питателями, установленными на плиты в передней (20+20 поз.) и задней (50 поз.) части автомата (см. рис. 1.184, *а*).

Блок сборочных головок автомата Topaz X состоит из восьми отдельных установочных головок с вакуумными насадками для захвата компонентов (рис. 1.186). Блок в целом имеет три поступательные степени свободы перемещения по трем осям. Каждая установочная головка дополнительно может передвигаться по одной оси *Z* (вверх–вниз), а также выполнять поворот

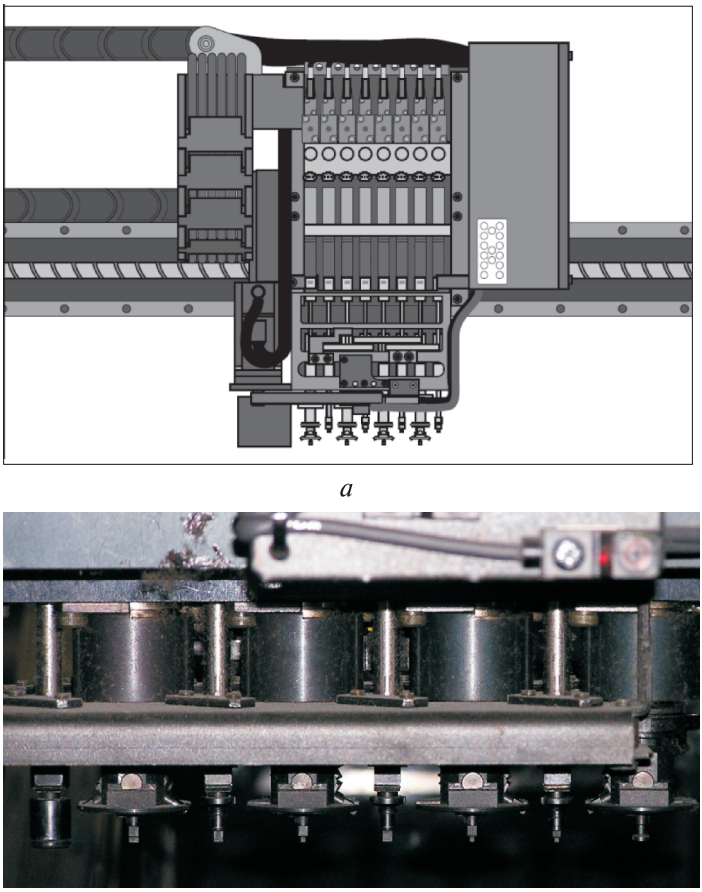


а



б

Рис. 1.185. Схема (*а*) и вид спереди (*б*) ленточного питателя (8 мм) для автомата Topaz X



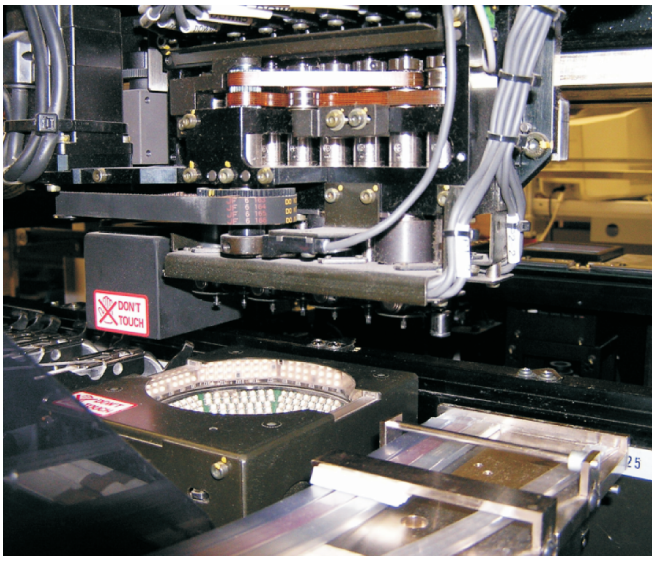
а

б

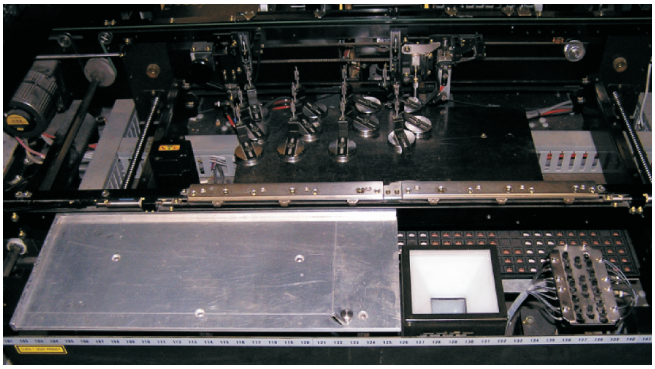
Рис. 1.186. Конструкция (*а*) и внешний вид (*б*) блока сборочных головок автомата Topaz X с вакуумными насадками

вокруг оси *Z*. Захват компонента из питателя производится путем перемещения блока головок к питателю: одна из головок находится над компонентом, который подлежит вакуумному захвату насадкой одной из головок из ленты в питателе. Если следующий компонент требуется захватить из этого же питателя, блок перемещается на расстояние, равное шагу между головками.

Как только компоненты будут захвачены блоком сборочных головок, автомат транспортирует захваченные компоненты к системе технического зрения, состоящей из двух камер: стационарного обзора и обзора «на лету» (без остановки над камерой) (рис. 1.187). Здесь определяются линейное и угловое смещения компонента в насадке и затем задается коррекция положения центра и угла поворота при последующей установке компонента на плату. Следует отметить, что перед началом сборки очередной платы подвижная камера технического зрения, установленная на блоке сборочных головок,



а



б

Рис. 1.187. Камеры технического зрения с обзором «на лету» (*а*) и стационарно (*б*) автомата Topaz X

считывает реперные знаки с печатной платы для последующей коррекции координат установки с учетом погрешностей изготовления и фиксации платы.

Когда все заданные в управляющей программе компоненты будут установлены, плата, зафиксированная в устройстве фиксации, разжимается и передвигается по конвейеру на выход автомата, откуда перемещается на вход печи пайки оплавлением.

После изучения принципа работы автомата Topaz X и его кинематики (степени свободы перемещения и вращения всех осей автомата представлены на рис. 1.188) можно переходить к созданию рабочей 3D-модели

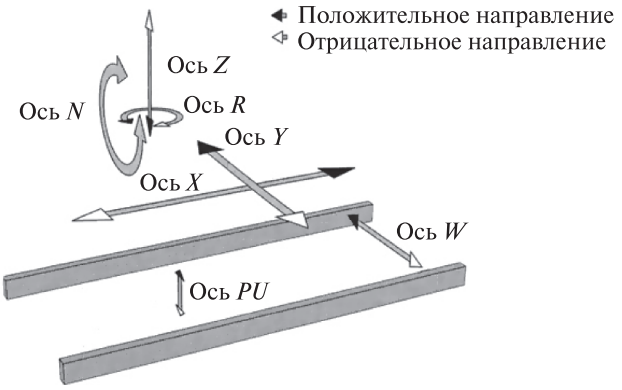


Рис. 1.188. Степени свободы перемещения и вращения осей автомата Topaz X

оборудования и декомпозиции его на отдельные подвижные узлы. Этому посвящены практические работы 29 и 30.

Для решения задачи создания цифрового двойника выполним декомпозицию производственных объектов на двух уровнях иерархии. Первый, верхний, уровень представляет собой разбиение технологического процесса сборки на отдельные операции с последующей классификацией этих операций как выполняемых полностью на автоматизированном оборудовании и вручную с возможным применением средств автоматизации. Далее для каждой классифицированной операции осуществляется декомпозиция на втором, нижнем, уровне, на отдельные технологические переходы. Она сопровождается декомпозицией технологического оборудования и оснащения на отдельные функциональные узлы, выполняющие переход или группу переходов (рис. 1.189).

Задача иерархического разбиения в рамках общей задачи создания цифрового двойника оборудования представляется особенно важной, так как от ее решения будут зависеть структура модели и ее гибкость. Ошибки при построении иерархии задач могут привести к избыточности и нарушению ассоциативности данных, получению громоздкой модели, сложной с точки зрения использования и интерпретации информации.

Остановимся подробнее на примере проведенной на втором уровне декомпозиции автомата установки компонентов Topaz X с выделением в качестве отдельных функциональных узлов блока сборочных головок, конвейерной системы транспортировки печатных плат и блока ленточных питателей компонентов из катушек. Степень детализации отдельных узлов зависит от требований к адекватности воспроизведения реальной кинематики движущихся механизмов автомата при моделировании процессов захвата компонента из питателя, проноса его над камерами системы технического зрения и установки в требуемую позицию на печатной плате.

Основным (рабочим) переходом является процесс установки компонента на соответствующее посадочное место на печатной плате. Вспомогательными

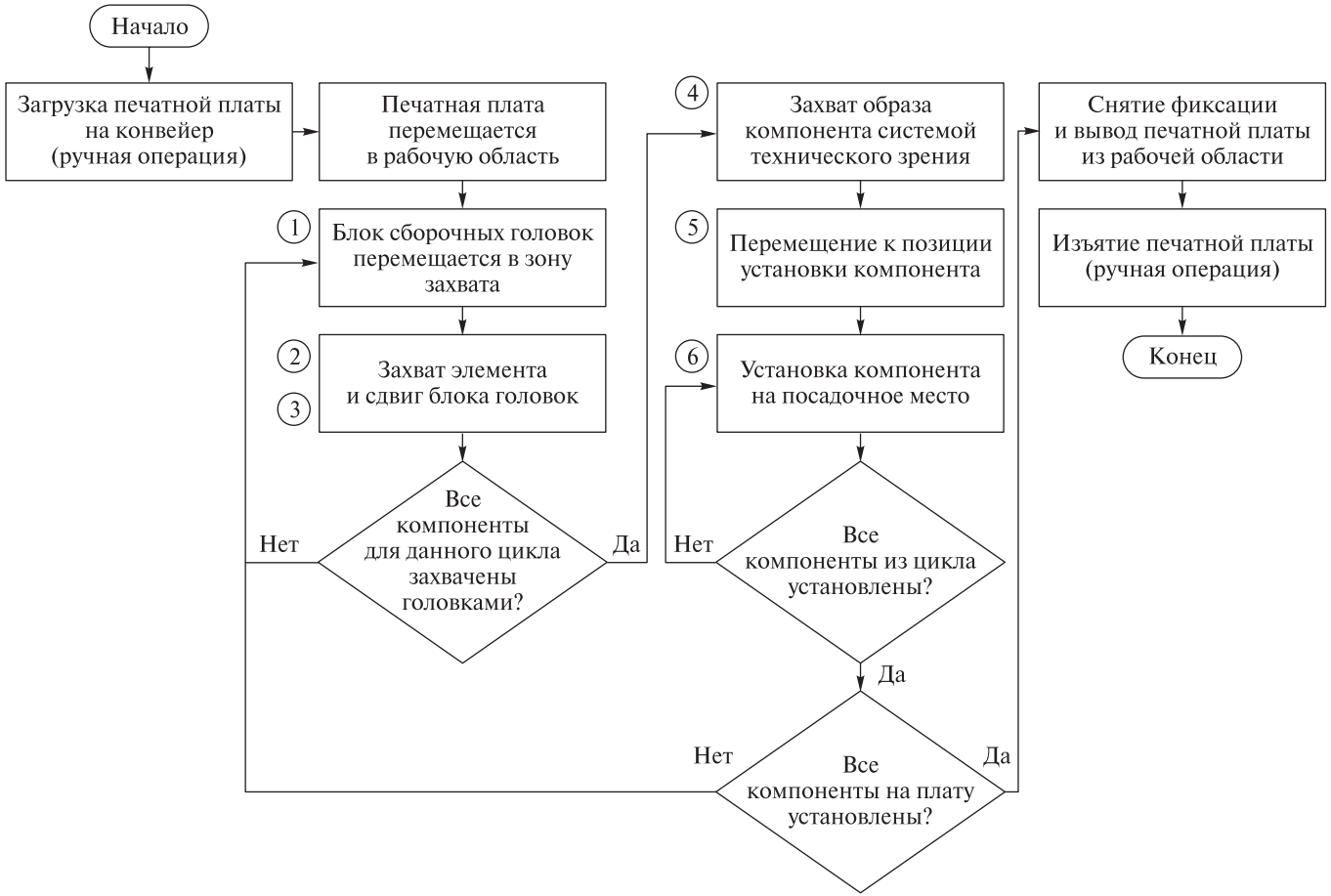


Рис. 1.189. Блок-схема последовательности выполнения переходов в составе технологической операции установки компонента

(холостыми) переходами представлены подача печатной платы по конвейеру к зоне сборки, перемещение блока сборочных головок к питателям, захват компонента, пролет головок над камерой системы технического зрения.

Переход 1. Блок сборочных головок перемещается в зону захвата питателями, положение сборочной головки фиксируется над необходимым питателем.

Переход 2. Насадка сборочной головки опускается вниз, захватывает компонент, поднимается вверх.

Переход 3. Блок сборочных головок сдвигается таким образом, что следующая головка оказывается над своим питателем и останавливается.

Переходы 2 и 3 повторяются до тех пор, пока насадки всех головок не будут заполнены компонентами.

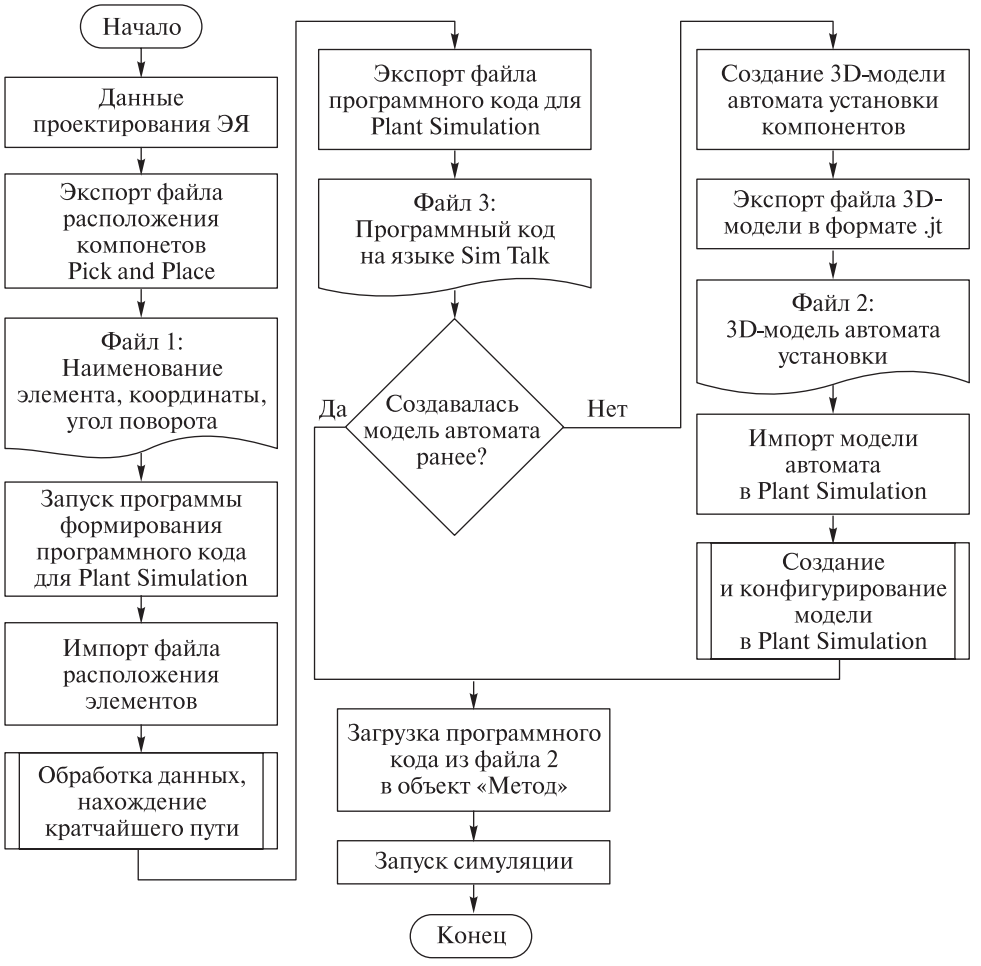


Рис. 1.190. Блок-схема имитационного моделирования на базе цифровой модели автомата установки компонентов (ЭЯ — электронная ячейка)

Переход 4. Блок сборочных головок отправляется в зону технического зрения, где проносит насадку над камерой обзора «на лету» либо останавливается над камерой стационарного обзора.

Переход 5. Блок сборочных головок направляется к печатной плате, останавливает насадку в позиции установки компонента.

Переход 6. Насадка опускается и устанавливает компонент на плату.

Как только все захваченные насадками компоненты будут установлены, блок головок направляется к питателям и переходы 1–6 повторяются, пока все компоненты по программе не будут установлены на плату.

Блок-схема имитационного моделирования на базе цифровой модели автомата установки компонентов изображена на рис. 1.190.

Подобный подход к декомпозиции технологического оборудования является универсальным и может быть распространен без изменений на остальные операции сборки электронных модулей на печатных платах: трафаретную печать, пайку оплавлением, селективную пайку и пайку волной припоя, автоматическую оптическую инспекцию и пр. Различие будет заключаться лишь в специфике работы функциональных узлов конкретного автомата и наборе переходов в составе операции.

Тесты к лекции 1.25

1. ***Печатная плата в зоне сборки автомата установки компонентов закрепляется*** (выберите один или больше правильных ответов):

а) на базовые штыри;

б) по торцам в направляющих конвейера;

в) вакуумным прижимом.

2. ***В автомате Topaz X для подачи основной номенклатуры компонентов из упаковок применяются питатели:***

а) из катушек с лентой;

б) из трубчатых кассет;

в) из матричных поддонов.

3. ***В автомате Topaz X используется способ захвата компонентов:***

а) вакуумный;

б) механический;

в) вакуумный и механический.

4. ***Основной (рабочий) переход операции установки компонента на печатную плату — это:***

а) захват компонента;

б) установка компонента на посадочное место;

в) коррекция положения по данным системы технического зрения.

5. ***Декомпозиция производственных объектов выполняется по схеме:***

а) модуль на печатной плате → компоненты;

б) оборудование → оснащение;

в) операции → переходы.

1.26. АВТОМАТИЗАЦИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ РУЧНЫХ СБОРОЧНЫХ ОПЕРАЦИЙ

Цель лекции — изучение подходов к автоматизации моделирования ручных сборочных операций с использованием технологического оснащения для автоматизации рабочего места монтажника электронных компонентов на примере установщика ТЕРМОПРО SMP-330.

Зачастую при рассмотрении вопросов автоматизации операций сборки остается за рамками та часть технологического процесса, которая относится к использованию рабочих мест, приспособлений и оснащения на операциях, выполняемых вручную, таких как входной контроль комплектующих, межоперационная транспортировка изделий, монтаж компонентов, визуальный и функциональный контроль, ремонт, упаковка, наладка технологического оснащения сборочных автоматов и т. д. Некоторые из таких рабочих мест в составе производственного участка сборки электронных модулей I уровня представлены на рис. 1.191.

Ручные операции также должны быть интегрированы в комплексную модель цифрового производства. Модель ручной вспомогательной либо сборочной операции должна давать возможность:

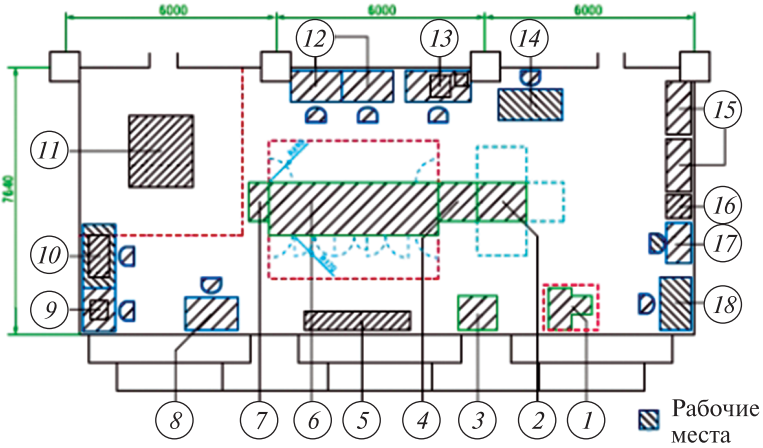


Рис. 1.191. Рабочие места в составе компоновки производственного участка сборки электронных модулей I уровня:

1–7, *11*, *14–16* — рабочие места автоматизированных операций сборки; *8*, *9* — визуальная инспекция; *10* — ремонтная станция; *12*, *13* — установка и пайка компонентов; *17* — подготовка паяльной пасты; *18* — восстановление шариковых выводов BGA-компонентов

– рассчитывать разные виды производственного времени;

– определять производительность операции;

– определять оптимальное количество персонала на операции;

– проводить модернизацию операции по критериям принципиальной выполнимости/производительности/точности;

– устранять узкие места производственного процесса по производительности.

Для выполнения данных требований следует симулировать реальную производственную деятельность человека, включая манипуляции руками и пальцами, перемещения и захват объектов, передвижения человека между рабочими местами с учетом эргономики рабочих мест и физических свойств объектов манипулирования. Следовательно, необходимо использовать при моделировании САПР, позволяющую осуществлять описанную симуляцию. Для цифрового моделирования ручных операций предназначены модули Tecnomatix Jack и Process Simulate Human. С их помощью можно выполнить моделирование действий человека на антропоморфных цифровых манекенах (под символическими псевдонимами Джек и Джил) и провести, в частности, анализ рабочих условий, эргономики, травмоопасности, комфорта, зон прямой видимости, затрат энергии и пределов нагрузки.

Моделирование ручных операций сборки на примере операции ручной установки поверхностно монтируемых компонентов на рабочем месте монтажника рассмотрено далее в практических работах 31 и 32. В качестве оборудования рабочего места там представлен модульный установщик ТЕРМОПРО SMP-330 компании НТФ «Техно-Альянс-Электроникс» (рис. 1.192).

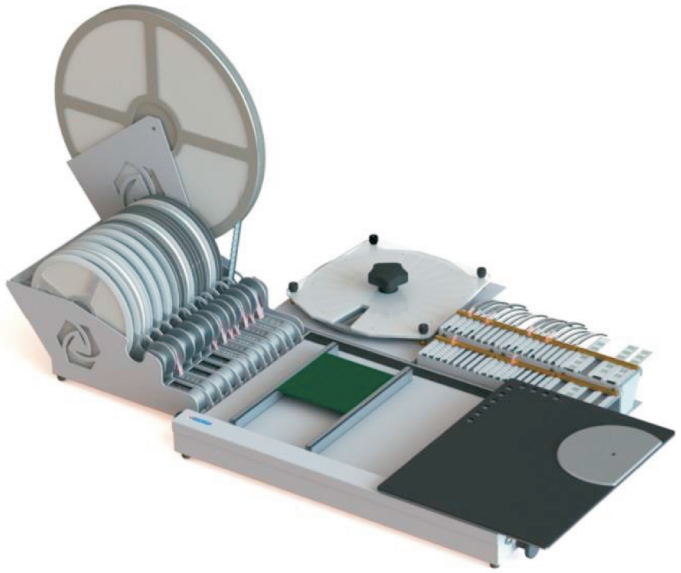


Рис. 1.192. Установщик компонентов поверхностного монтажа ТЕРМОПРО SMP-330

Установщик обеспечивает проведение ручных операций по нанесению паяльной пасты или адгезива методом дозирования и установки компонентов поверхностного монтажа путем переноса из питателей с помощью вакуумного пинцета. Он может быть сконфигурирован под задачи мелкосерийного производства печатных узлов или для монтажа единичных прототипов путем подбора и быстрой замены питателей для хранения компонентов. Установщик может быть оснащен различными типами питателей для подачи компонентов из лент различной ширины или из россыпи.

Тесты к лекции 1.26

1. ***Операция, однозначно относящаяся к ручным операциям сборки электронных модулей на печатных платах:***

а) монтаж компонентов;

б) наладка технологического оснащения сборочных автоматов;

в) функциональный контроль.

2. ***Модель ручной вспомогательной сборочной операции должна позволять*** (выберите один или больше правильных ответов):

а) определять оптимальное количество персонала на операции;

б) устранять узкие места в производственном процессе по производительности;

в) определять оптимальное количество единиц технологического оборудования на операции.

3. ***Для цифрового моделирования ручных операций предназначены модули системы Tecnomatix:***

а) Jack и Process Simulate Human;

б) Process Simulate;

в) Robcad.

1.27. НАПОЛНЕНИЕ БАЗЫ ДАННЫХ ОБЪЕКТОВ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Цель лекции — изучение принципов и методов наполнения базы данных объектов имитационного моделирования; рассмотрение подвижных объектов; объектов материалопотока; создание пользовательского производственного объекта на их основе.

1.27.1. СОСТАВ ОБЪЕКТОВ

Среда моделирования Plant Simulation предоставляет набор базовых объектов, которые позволяют напрямую использовать их в имитационной модели. Поскольку невозможно предсказать все вероятные варианты, имеющиеся базовые модели можно изменять любым образом для удовлетворения конкретных потребностей. Эти объекты называются объектами приложения. Основные объекты, которые предоставляет среда Plant Simulation, можно классифицировать с помощью простых критериев. Система отображает встроенные объекты в библиотеке классов в иерархическом представлении в папках и подпапках. Можно добавлять, удалять и переименовывать папки, если это необходимо. Данное представление показано на рис. 1.193.

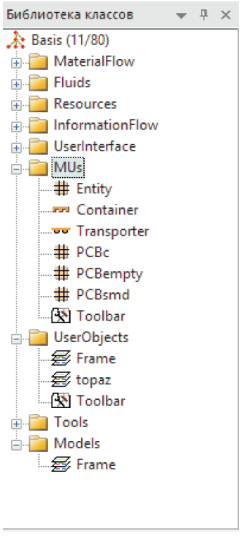


Рис. 1.193. Библиотека классов

По умолчанию в библиотеке классов несколько папок, которые содержат подвижные объекты (MUs), ресурсы (Resources) и объекты материалопотока (Material Flow). Подвижные объекты будут перемещаться по производству и преобразовываться в его процессе. Ресурсы включают в себя объекты, предназначенные в первую очередь для обеспечения технологического процесса любыми ресурсами, например человеческим трудом. Объекты материалов потока содержат объекты, которые будут производить какие-либо действия над подвижными объектами.

1.27.2. ПОДВИЖНЫЕ ОБЪЕКТЫ

Базовый подвижный объект (MU), имеющийся в любом проекте среды Plant Simulation, представляет собой небольшой объект белого цвета, позволяющий использовать его для визуализации движения объекта в рамках производственного цикла (рис. 1.194).

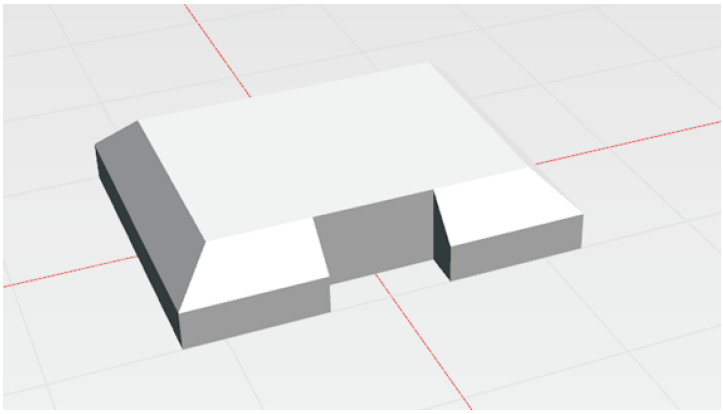


Рис. 1.194. Базовый подвижный объект (MU)

Такой объект используется при моделировании любого производственного процесса, когда не требуется подробного исследования структуры изготавливаемого/собираемого изделия, однако в нашем случае необходимо наблюдать конкретный претерпевающий изменения объект сборки — электронный модуль I уровня. В связи с этим в проект следует добавить пользовательский подвижный объект PCB («Печатная плата»). В своем стандартном представлении он представляет собой печатную плату с отверстиями, без установленных компонентов, так как именно такая графика будет использоваться для этого объекта по умолчанию. Окно редактирования геометрических параметров печатной платы показано на рис. 1.195.

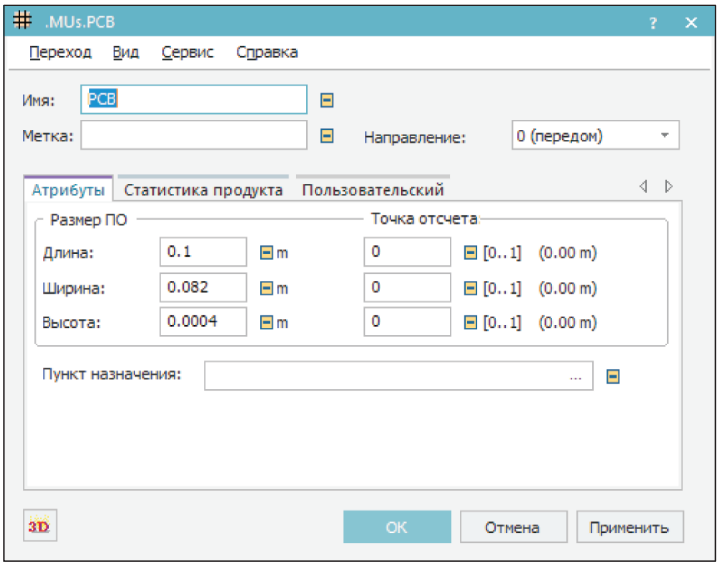


Рис. 1.195. Окно редактирования параметров объекта PCB («Печатная плата»)

На данном этапе крайне необходимо задать правильные размеры объекта, так как импортированная геометрия будет растягиваться до размеров, указанных в параметрах. Базовая геометрия объекта показана на рис. 1.196.

При продвижении по техпроцессу сборки внешний вид подвижного объекта будет меняться, а именно: на печатную плату сначала будут добавлены компоненты поверхностного монтажа (SMD), а затем — компоненты, монтируемые в отверстия (THT), поэтому для данного объекта необходимо добавить геометрию, содержащую компоненты. Эти данные загружаются в объект в его параметрах на вкладке «Графика» (см. рис. 1.197).

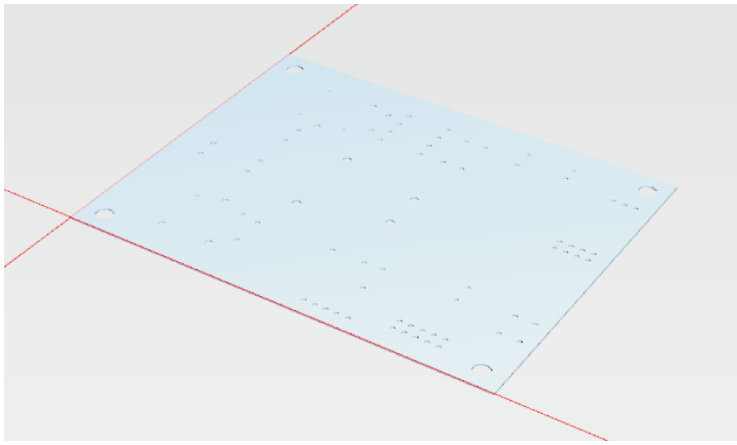


Рис. 1.196. Базовая геометрия объекта PCB («Печатная плата»)

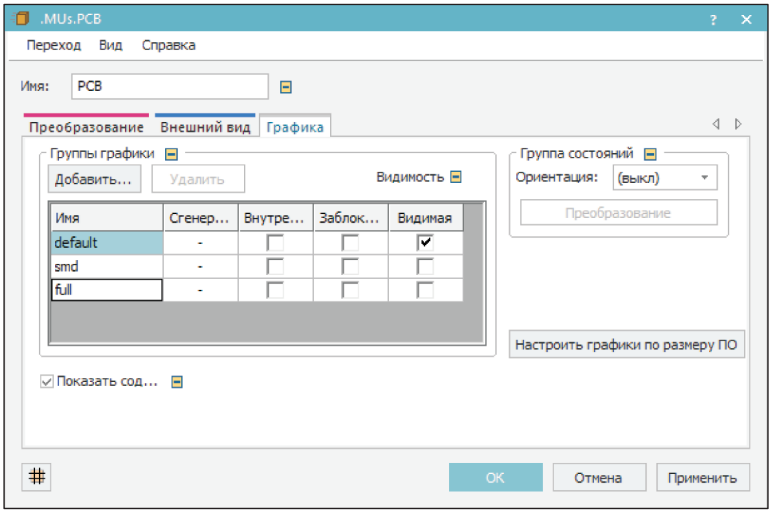


Рис. 1.197. Окно настроек геометрии объекта

Для объекта PCB помимо базовой геометрии default следует импортировать модели smd и full. Они представляют собой модели платы с установленными поверхностно монтируемыми компонентами и со всеми установленными компонентами и показаны на рис. 1.198 и 1.199 соответственно.

На производстве изготавливается широкая номенклатура различающихся между собой модулей на печатных платах, поэтому необходимо иметь несколько пользовательских подвижных объектов и одновременно использовать их в рамках одного технологического процесса. Для задания уникальности каждого из них следует указать их параметры в свойствах объекта.

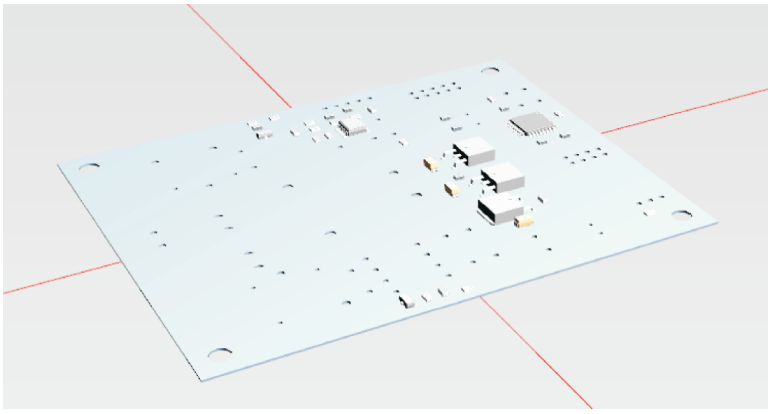


Рис. 1.198. Геометрия объекта PCB («Печатная плата») с установленными SMD-компонентами

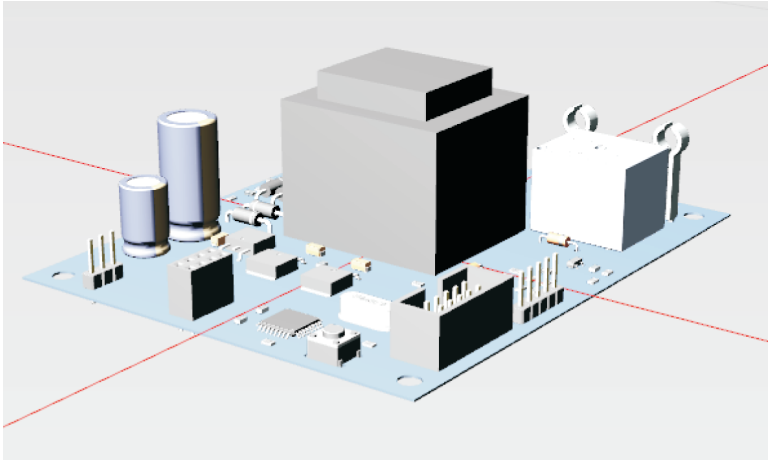


Рис. 1.199. Геометрия объекта PCB («Печатная плата») со всеми установленными компонентами

Эти свойства задаются в пользовательских атрибутах. Окно редактирования атрибутов показано на рис. 1.200.

Для данного подвижного объекта добавляются атрибуты SMDs и THTs, обозначающие количество компонентов поверхностного монтажа (37) и компонентов, монтируемых в отверстия (32).

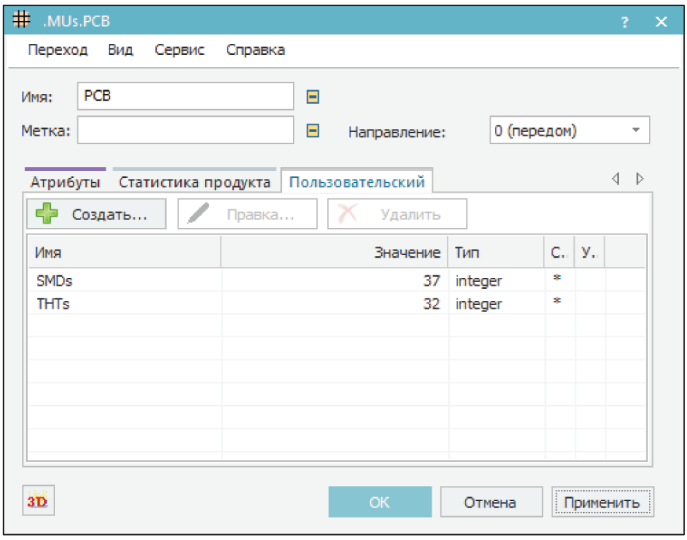


Рис. 1.200. Окно редактирования атрибутов

От значений данных атрибутов в технологическом процессе будут зависеть его параметры, а именно: время ручной установки и пайки и штучное время в целом.

1.27.3. ОБЪЕКТЫ МАТЕРИАЛОПОТОКА

В среде Plant Simulation имеется готовый набор необходимых объектов (рис. 1.201), среди которых:

– источник (Source);
– отвод (Drain);
– соединитель (Connector);
– одиночный автомат (SingleProc);
– параллельный автомат (ParallelProc);
– сборщик (Assembly);
– разборщик (DismantleStation);
– буфер (Buffer);
– сортировщик (Sorter);
– конвейерная линия (Line).

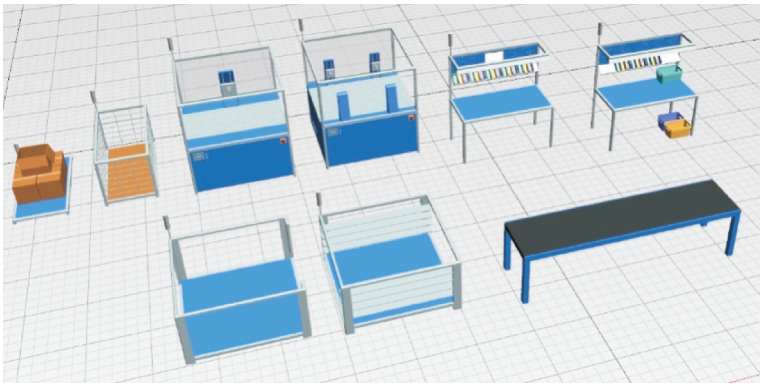


Рис. 1.201. Основные объекты материалопотока среды Plant Simulation

Каждый такой объект выполняет уникальную функцию и имеет соответствующий набор параметров.

Источник является поставщиком подвижных объектов, т. е. элементов для сборки и переработки, и без него весь технологический процесс не имеет смысла. Для него можно задать режим поставки объектов, их количество и временны́е интервалы. Режимы предусматривают возможность поставки одного подвижного объекта или нескольких по заданному алгоритму, например последовательно в цикле или случайно. Окно настройки параметров источника показано на рис. 1.202.

После прохождения производственного цикла подвижный объект попадает в отвод, который собирает, хранит и позволяет отобразить всю инфор-

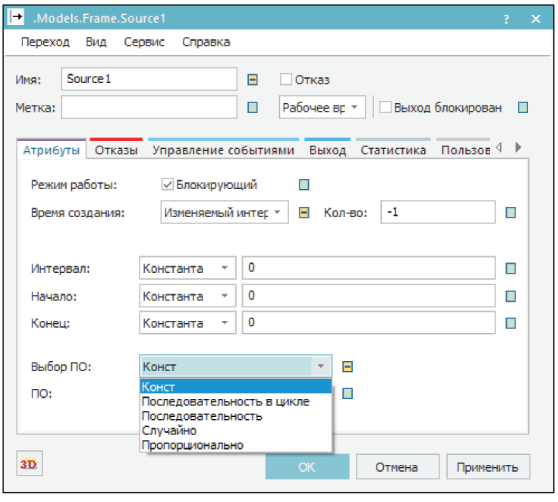


Рис. 1.202. Окно настройки параметров источника

мацию о подвижном объекте, его пути и времени выполнения технологических операций, которым объект был подвергнут на своем пути.

Соединитель необходим для связи всех объектов между собой. Без связей объекты не смогут обмениваться подвижным объектом, и, как следствие, технологический процесс не будет завершен. Если устанавливать объекты близко друг к другу, связи будут создаваться автоматически, и использование соединителей станет необязательным.

Таким образом, можно без использования соединителей объединять объекты конвейерной линией. Каждая конвейерная линия содержит набор сегментов, каждый из которых имеет по две якорные точки. Чтобы их увидеть и иметь возможность отредактировать, необходимо включить отображение сегментов в контекстном меню.

Выделенная линия с открытым контекстным меню показана на рис. 1.203.

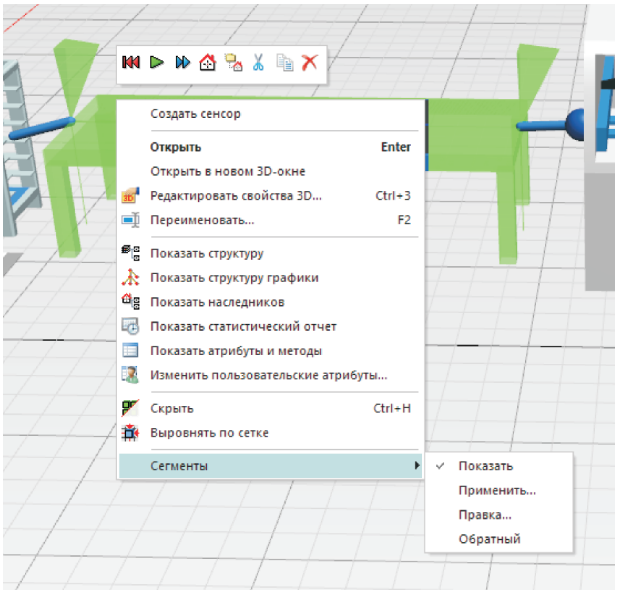


Рис. 1.203. Контекстное меню конвейерной линии

Объекты «Одиночный автомат», «Параллельный автомат», «Сборщик» и «Разборщик» позволяют производить разные действия с модулем на печатной плате. В общем случае эти объекты представляют собой «черный ящик», получающий модуль на входе и выдающий его на выходе. Они имеют набор параметров, позволяющих имитировать технологическое оборудование. Окна настройки этих параметров показаны на рис. 1.204 и 1.205.

Основные параметры этих объектов:

– время операции;

– время переналадки;

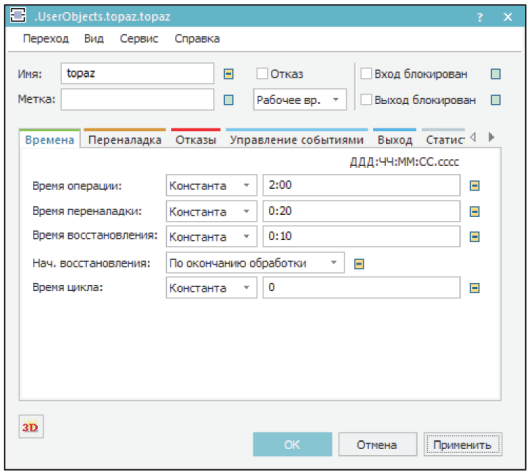


Рис. 1.204. Окно настройки временны́х параметров объекта

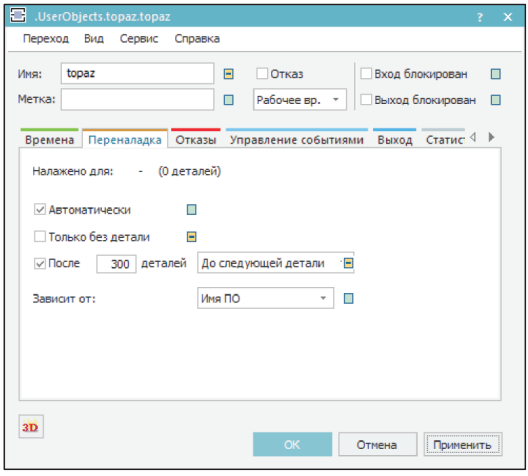


Рис. 1.205. Окно настройки переналадки объекта

– время восстановления;
– время цикла;
– количество деталей перед переналадкой.

1.27.4. ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКИЕ ОБЪЕКТЫ

Для создания собственной базы данных объектов среды Plant Simulation необходимо сформировать собственные (пользовательские) объекты. Это можно сделать в любой части дерева проекта, однако специально для таких целей предусмотрена папка UserObjects, содержащая все созданные

пользователем объекты. После формирования объекта ему необходимо задать имя и открыть его внутреннюю структуру двойным щелчком кнопкой мыши на нем. Первоначально он не имеет никаких параметров и атрибутов, за исключением стандартной 3D-графики и ее настроек. Эта графика показана на рис. 1.206.

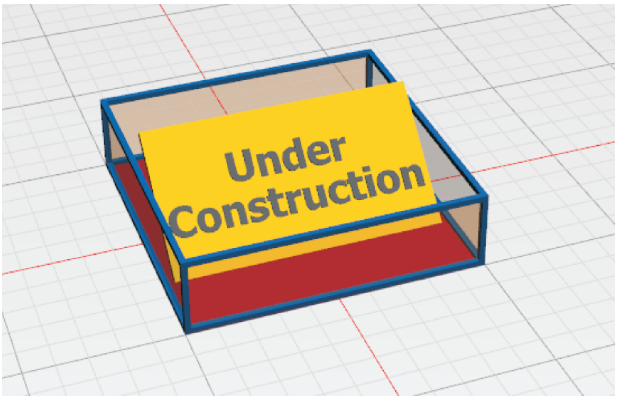


Рис. 1.206. Стандартная графика пользовательского объекта

Поскольку функционала стандартного одиночного автомата SingleProc при проектировании заданного технологического процесса достаточно, можно использовать его в качестве основы. Для этого необходимо удалить существующую 3D-графику и добавить одиночный автомат. Для того чтобы внутренний автомат имел связь с внешней моделью, следует добавить интерфейсы и соединить их с ним с помощью соединителей. После настройки созданный объект сможет выполнять функцию этого автомата, при этом все параметры, настроенные для этого внутреннего объекта, будут сохраняться применительно к пользовательскому объекту.

Далее объекту необходимо изменить геометрию. Это можно сделать как средствами среды Plant Simulation с помощью геометрических примитивов, так и посредством импорта из других САПР, позволяющих создавать 3D-модели. Среда Plant Simulation поддерживает большое количество форматов, но предпочтительными являются форматы JT и 3ds.

Для взаимодействия модели с пользователем в среде Plant Simulation предусмотрено также несколько объектов:

– комментарий;
– дисплей;
– график;
– отчет;
– кнопки и пр.

Дисплей позволяет отображать значение любой переменной, хранящейся в модели. При этом он является обычным объектом с 3D-геометрией,

поэтому его можно перемещать по модели, менять угол наклона и размер. Таким образом, дисплей можно поместить в любое желаемое место, например на 3D-модель экрана установки. Такие дисплеи показаны на рис. 1.207.

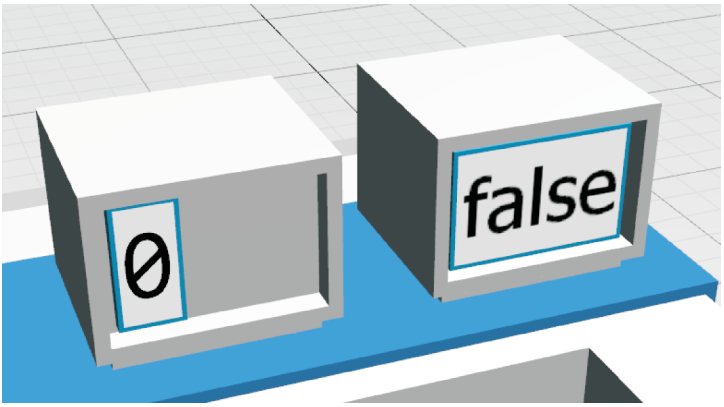


Рис. 1.207. Дисплеи, размещенные в мониторах автомата установки компонентов

Каждый стандартный объект содержит индикатор состояния. Такой индикатор можно добавить и к любому пользовательскому объекту (рис. 1.208).

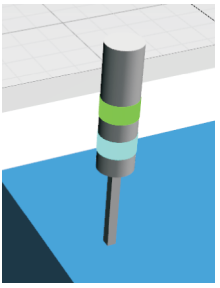


Рис. 1.208. Индикатор состояния

Таким образом, пользовательский объект на данном этапе будет включать в себя импортированную геометрию, функциональное наполнение одиночного автомата, дисплеи, отображающие атрибуты объекта, и индикатор состояния. Такой объект вместе с источником, отводом и конвейерными линиями показан на рис. 1.209.

Данный объект обладает следующим набором параметров:

– время операции;

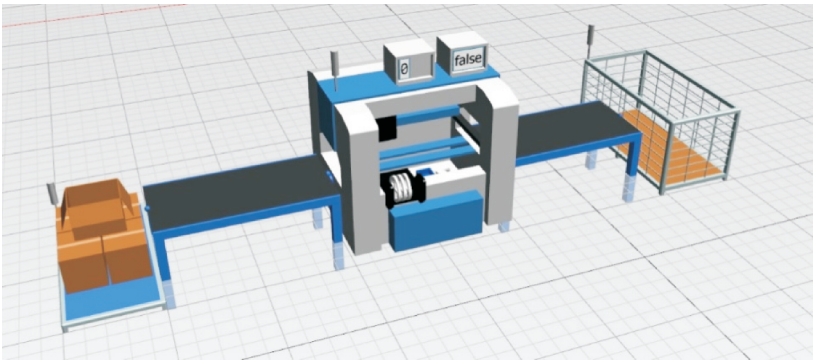


Рис. 1.209. Пользовательский объект «Автомат установки компонентов»

– время переналадки;
– количество операций до следующей переналадки.

Для создания имитационной модели установки пайки оплавлением можно использовать параллельный автомат, поскольку такая установка может одновременно содержать в себе несколько модулей, двигающихся по конвейерной линии внутри (рис. 1.210).

Установка имеет следующие настройки:
– время операции;
– время переналадки.

Помимо основной технологической операции над объектом и переналадки для модели в соответствующей вкладке можно настроить отказы: добавить несколько записей различных событий отказов (рис. 1.211), каждый

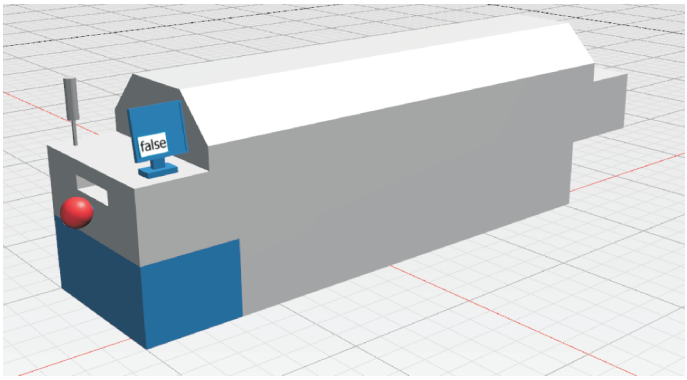


Рис. 1.210. Модель установки пайки оплавлением

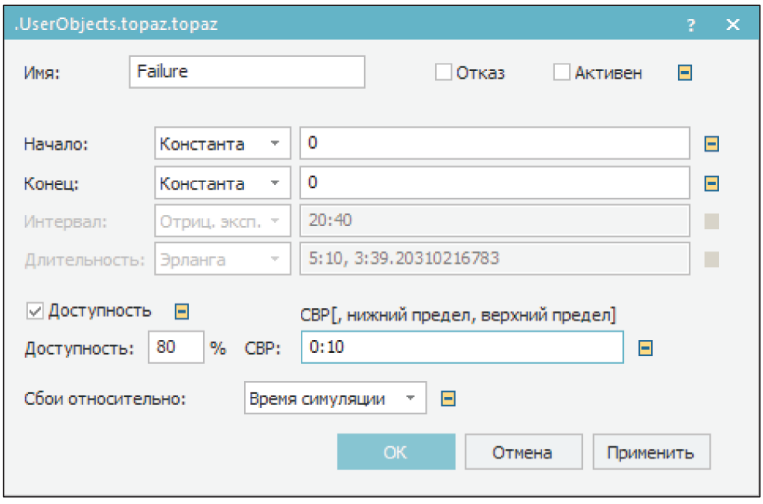


Рис. 1.211. Окно добавления отказа

из которых характеризуется определенным набором параметров. Эти наборы могут соответствовать разным типам отказов (например, застреванию компонента в головке или отсутствию печатной платы), которые могут происходить в разное время и иметь разные пути устранения. При добавлении отказа ему следует задать имя, доступность автомата в процентах, привязку времени сбоев и среднее время восстановления, как показано на рис. 1.211.

Для созданного ранее объекта Topaz настроен один отказ, имеющий следующие параметры:

– имя;
– доступность;
– среднее время восстановления.

Тесты к лекции 1.27

1. ***В папке MUs среды Plant Simulation располагаются:***

а) подвижные объекты;

б) ресурсы;

в) объекты материалопотока.

2. ***При продвижении по техпроцессу сборки внешний вид подвижного объекта:***

а) остается неизменным;

б) изменяется;

в) изменяется при импорте соответствующей геометрии.

3. ***Чтобы впоследствии можно было оценить время выполнения технологических операций подвижному объекту — модулю на печатной плате — следует назначить следующие атрибуты:***

а) размеры платы;

б) количество монтажных отверстий;

в) количество компонентов.

4. ***Объекты материалопотока в среде Plant Simulation установлены близко друг к другу, поэтому связи будут:***

а) создаваться с помощью соединителя;

б) создаваться автоматически;

в) объекты будут объединяться в единое целое без необходимости создания связей.

5. ***Дисплей в среде Plant Simulation позволяет отображать:***

а) значение любой переменной, хранящейся в модели;

б) значение любой целочисленной/вещественной переменной, хранящейся в модели;

в) значение любой булевой переменной, хранящейся в модели.

1.28. СОЗДАНИЕ АНИМАЦИИ И ГРУППОВЫЕ ОПЕРАЦИИ

Цель лекции — изучение принципов анимации производственных объектов применительно к производству модулей на печатных платах; расчет времени технологических операций, буферизация и настройка групповых операций сборки.

1.28.1. АНИМАЦИЯ ОБЪЕКТОВ

После создания пользовательских объектов и импортирования необходимой геометрии можно приступать к анимации объектов. Для этого необходимо открыть объект в новом окне редактирования графики. Если в модель была импортирована сборка, она будет находиться в ней как единое целое, и выбирать отдельные компоненты сборки будет нельзя. По этой причине данную модель необходимо декомпозировать. В некоторых случаях это понадобится сделать несколько раз. После выполнения данной операции появится возможность выбора каждого узла оборудования отдельно.

Каждый узел, для которого нужно будет добавить анимацию, необходимо сначала преобразовать в анимируемый объект. После этого у него появится набор параметров, позволяющих имитировать кинематику этого узла. Окно редактирования параметров анимируемых объектов показано на рис. 1.212.

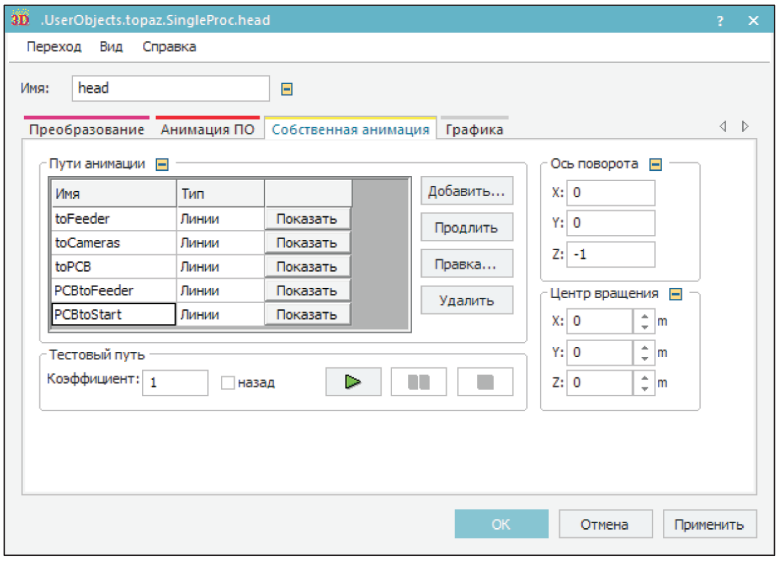


Рис. 1.212. Окно редактирования параметров анимируемых объектов

Во вкладке «Собственная анимация» для каждой детали имеется набор путей анимации, представляющих собой набор якорных точек, по которым будет двигаться объект. После добавления нового пути его необходимо изменить.

Окно редактирования пути анимации показано на рис. 1.213.

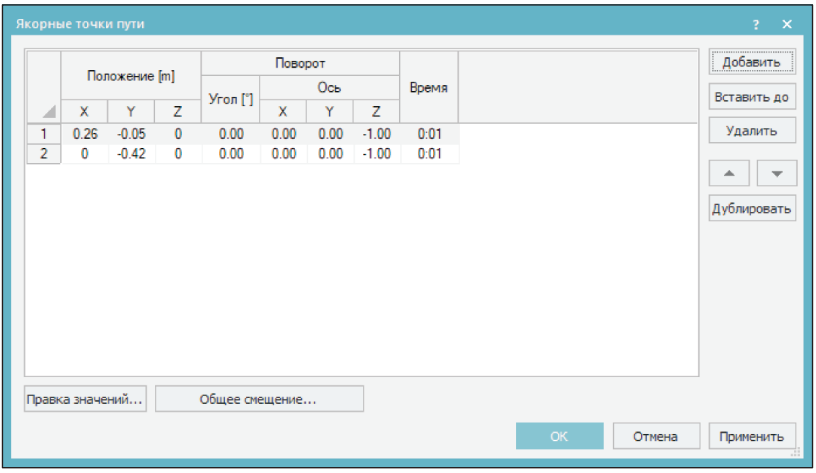


Рис. 1.213. Окно редактирования пути анимации

Каждая якорная точка представляет собой набор координат. Можно задать положение в пространстве, угол поворота, а также время, за которое произойдет перемещение от предыдущего положения объекта к новому. Каждый путь может содержать большое количество точек, имитируя таким образом сложную кинематику движения.

После создания набора путей анимации их можно применить. Для этого следует создать метод, который позволит в правильном порядке проиграть все анимации. Метод, как и все остальные объекты среды Plant Simulation, необходимо установить в модель. Ему можно присвоить уникальное имя, чтобы в дальнейшем было проще его найти. По двойному щелчку левой кнопки мыши на объекте открывается окно редактирования метода, в котором проводится его наполнение. Метод описывается на объектно-ориентированном языке программирования SimTalk второй версии, разработанном специально для среды Plant Simulation. Для того чтобы спроектированный метод сработал, его необходимо привязать к какому-либо событию. Таким событием может быть вход подвижного объекта в автомат, выход, переналадка, отказ и т. д. Таким образом, метод будет являться обработчиком советующего события.

Для объектов «Автомат установки компонентов» и «Печь пайки оплавлением» разработаны методы, которые последовательно проигрывают их анимации, имитируя кинематику движения соответствующих деталей. В конце

программы реализации этих методов есть команда на отгрузку подвижного объекта, из-за чего время, указанное в свойствах автомата, будет игнорироваться, и подвижный объект покинет автомат после того, как завершится анимация движения, прописанная в соответствующем методе.

Для объекта в виде автомата установки компонентов время операции будет определяться по формуле

$$T_{оп} = T_{вх} + (T_{б} + T_{з} + T_{к} + T_{пп} + T_{у})N + T_{вых}, \quad (1.8)$$

где $T_{вх}$ — время входа модуля в автомат; $T_{б}$ — время движения головки до блока питателей; $T_{з}$ — время захвата компонента; $T_{к}$ — время движения головки до камер; $T_{пп}$ — время движения головки до печатной платы; $T_{у}$ — время установки компонента; N — количество устанавливаемых компонентов; $T_{вых}$ — время выхода модуля из установки.

Для объекта в виде установки трафаретной печати время операции определяется по формуле

$$T_{оп} = T_{вх} + T_{от} + T_{ор} + T_{пр} + T_{вр} + T_{вт} + T_{вых}, \quad (1.9)$$

где $T_{вх}$ — время входа печатной платы в установку; $T_{от}$ — время опускания рамы с трафаретом; $T_{ор}$ — время опускания ракеля; $T_{пр}$ — время прохода ракеля по трафарету; $T_{вр}$ — время поднятия ракеля; $T_{вт}$ — время поднятия рамы с трафаретом; $T_{вых}$ — время выхода печатной платы из установки.

Метод настроен таким образом, что после прохождения N печатных плат каждый раз будет добавляться временна́я задержка, имитирующая нанесение паяльной пасты на трафарет.

Аналогичным образом с помощью метода можно, например, заблокировать вход установки отмывки и сушки в том случае, если выходной буфер переполнен.

1.28.2. БУФЕР И ГРУППОВЫЕ ОПЕРАЦИИ

Стандартный буфер среды Plant Simulation не умеет хранить объекты до тех пор, пока он не заполнится, а базовые автоматы не умеют имитировать групповые операции, поэтому был создан объект, имитирующий данное поведение. Он состоит из блокирующего автомата, сортировщика, автомата, имитирующего групповую обработку, а также входного и выходного буферов (рис. 1.214).

Помимо основных автоматов были добавлены методы для их работы, индикаторы, показывающие состояние всех узлов модели, а также переменная, в которую можно записать то количество модулей, которое будет одновременно находиться в автомате.

В модели имеется счетчик, определяющий, сколько модулей было импортировано в групповую установку. С его помощью метод сортировщика

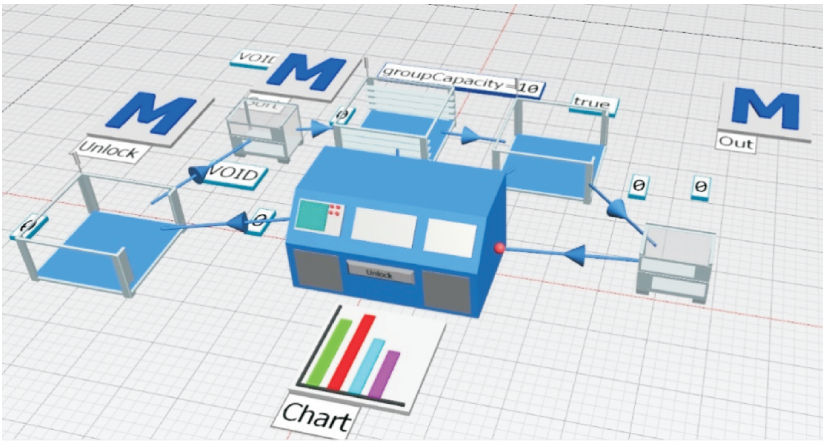


Рис. 1.214. Объект, реализующий групповые операции

Sort перемещает модуль в ту или иную установку. Если значение переменной groupCapacity равно 10, первые 9 модулей перемещаются в выходной буфер, у которого изначально заблокирован выход. Последний, десятый, модуль попадает непосредственно в саму установку отмывки и сушки и по завершении операции также попадет в буфер. При этом метод сортировщика заблокирует вход блокирующего автомата, не допустив таким образом попадания новых подвижных объектов в данную модель. После того как последний модуль окажется в буфере, метод Out разблокирует выход буфера, позволит всем объектам покинуть модель через выходной интерфейс, заблокирует его снова и откроет вход блокирующего автомата для поступления новых модулей.

Входной буфер предназначен для хранения модулей, которые впоследствии попадут в установку отмывки. Чтобы блокировать данный буфер в зависимости от наличия модулей в выходном буфере, который установлен непосредственно после данной установки, необходимо добавить в основную модель метод, который будет проверять количество модулей в нем. Для ведения непрерывной проверки можно добавить объект Generator, в котором настраиваются время и интервал его срабатывания, а также метод, который при этом будет вызван.

Помимо этого в модели предусмотрен метод Unlock, который в случае каких-либо неполадок позволит разблокировать модель. Его можно вызвать, нажав на кнопку Unlock.

Для того чтобы все вспомогательные элементы и автоматы не были видны на основной модели, в которой данный автомат будет использован, необходимо скрыть их геометрию. Для этого следует открыть настройки 3D-графики этих объектов и во вкладке «Графика» выбрать опцию «Исключить из “Показать содержимое” расположения» (рис. 1.215).

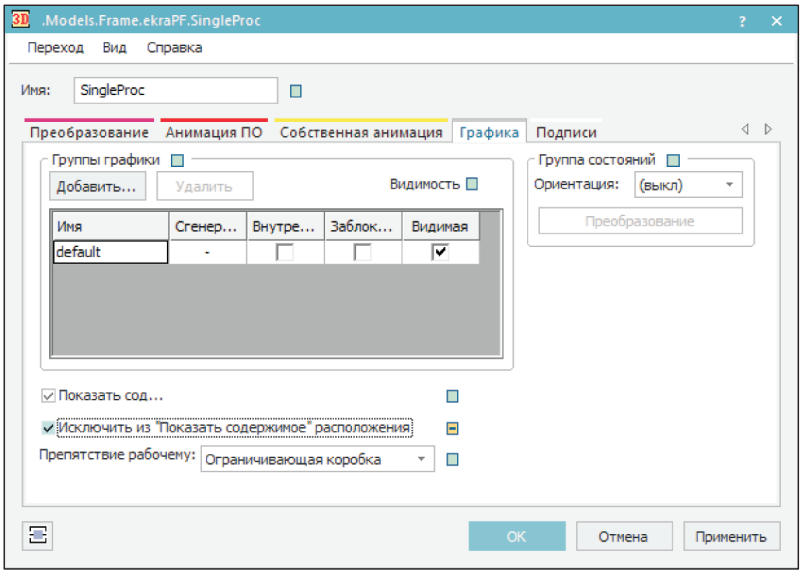


Рис. 1.215. Выбор опции для исключения графики

На этом этап моделирования технологического оборудования и оснащения в составе линии завершен. Далее, после добавления рабочего персонала, можно приступать к дискретному имитационному моделированию работы спроектированной технологической линии.

Тесты к лекции 1.28

1. ***Если в модель в среде Plant Simulation импортируется сборка, то при ее анимации она:***

а) будет двигаться как единое целое и потребует декомпозиции;

б) будет автоматически декомпозирована на отдельные узлы;

в) будет декомпозирована на отдельные узлы, которые будут автоматически преобразованы в анимируемые объекты.

2. ***Путь анимации может быть:***

а) линейным, состоящим из одного участка;

б) линейным, состоящим из нескольких участков;

в) произвольным.

3. ***Чтобы спроектированный метод сработал, необходимо:***

а) снабдить его осмысленным именем;

б) скомпилировать его код отдельно от остальных модулей;

в) привязать его к событию.

4. ***При создании производственной линии в среде Plant Simulation объект «Буфер»:***

а) применяется для организации равномерного выхода готовых изделий из линии;

б) не находит применения в указанной задаче;

в) применяется для организации операций групповой обработки.

5. ***Вспомогательные объекты в среде Plant Simulation при отображении можно скрыть:***

а) да, с помощью метода “Unlock”;

б) да, с помощью опции «Исключить из «“Показать содержимое” расположения»;

в) нет, все созданные объекты всегда видны в модели.

1.29. НАСТРОЙКА ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Цель лекции — настройка параметров имитационного моделирования производственного участка с учетом рабочего персонала; создание объекта «Работник», определение мест его появления; настройка выполнения действий работником.

1.29.1. РАБОЧИЙ ПЕРСОНАЛ

На основе спроектированного технологического процесса сборки электронного модуля, созданных, декомпозированных и кинематически определенных 3D-моделей технологического оборудования, а также наполненной технологом базы данных оборудования формируется автоматизированная сборочная линия, состоящая из источника, набора технологического оборудования, конвейерных линий, отвода и включающая в себя обслуживающий и рабочий персонал.

Для создания персонала в модели предусмотрены объекты из категории Resources. Среди них есть Worker Pool (источник работников) и Broker (сам работник). Именно их необходимо добавить в модель.

Работника как объект необходимо добавить для его настройки, а также для объявления его в пространстве переменных проекта. Без этого работник не будет существовать как объект, и соответственно его нельзя будет использовать. Можно объявить несколько работников и использовать их для разных целей, например для осуществления рабочих и вспомогательных операций: переналадки, обслуживания, комплектации и т. д.

Источник является местом появления новых работников. Его можно установить вдали от оборудования, например за стеной, смоделировав таким образом приход сотрудников извне предприятия или цеха. При этом для каждого типа объекта необходимо создать свой источник.

Для того чтобы указать работнику место, где он должен находиться, используется объект — рабочее место (WorkPlace). Его необходимо установить вблизи технологического оборудования для привязки места к нему. Рабочее место, работник и источник показаны на рис. 1.216.

Если рабочее место не удалось привязать к какому-либо объекту, оно будет подсвечиваться красным цветом. Часть линии модели производства с правильно установленным и привязанным рабочим местом показана на рис. 1.217.

Действие, которое должен выполнить работник, задается во вкладке «Импорт услуг». В ней можно выбрать работника, который будет приходить для выполнения работы над электронным модулем, для переналадки, а также

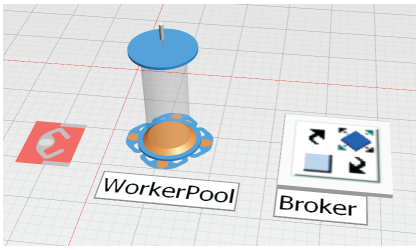


Рис. 1.216. Объекты персонала

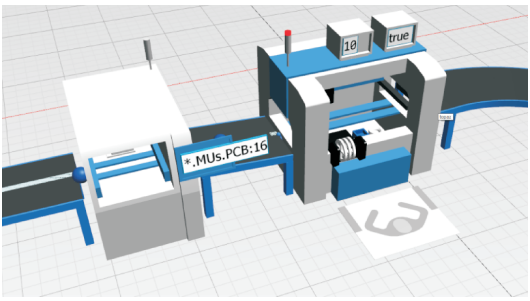


Рис. 1.217. Правильно привязанное рабочее место на участке линии

для устранения неисправностей. Помимо этого во вкладке «Выход» можно настроить выход подвижного объекта из данного автомата и его перенос в другой. В этой вкладке необходимо выбрать стратегию «Унести деталь», настроить рабочего, выполняющего перенос, и цель, куда данный объект необходимо перенести. Окно настроек показано на рис. 1.218.

В дальнейшем при исследовании сценариев вида «что, если» можно изменять количество обслуживающих линию работников, определяя необходимое и достаточное их количество в целях максимизации коэффициента использования оборудования в линии. Особое внимание при этом следует уделить персоналу, обслуживающему автоматы установки компонентов, так как на него приходится основная нагрузка.

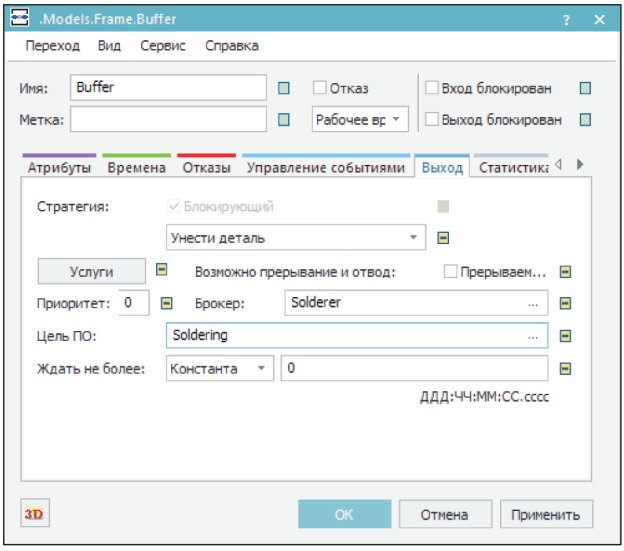


Рис. 1.218. Вкладка «Выход» в настройках автомата

1.29.2. ИСТОЧНИК

Стандартный источник среды Plant Simulation имеет в числе настроек следующие (рис. 1.219):

- «Режим работы»;
- «Интервал»;
- «Выбор ПО».

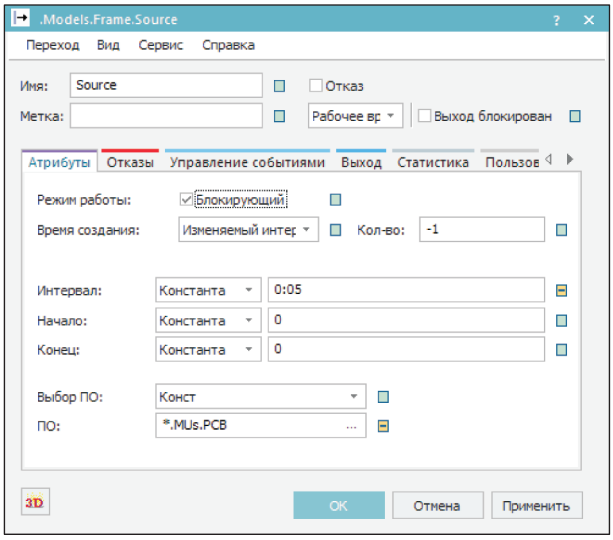


Рис. 1.219. Окно редактирования настроек источника

Эти настройки не позволяют задавать периодический выход подвижных объектов с задержкой, а также применять работника, имитируя таким образом работу штабелера для загрузки модулей на линию. Поэтому вплотную к источнику добавляют обычный одиночный автомат со следующим типовым набором настроек:

- время операции;
- время переналадки;
- переналадка после *N* подвижных объектов;
- импорт услуг для переналадки: Broker.

Таким образом будет сымитирован штабелер, который поставляет *N* модулей на линию каждую минуту, после чего потребуется работник для загрузки новых модулей (например, в кассете).

Тесты к лекции 1.29

1. ***Для моделирования персонала в среде Plant Simulation предусматриваются объекты из категории:***

а) MU;

б) Resources;

в) Material Flow;

2. ***Чтобы указать работнику место, где он должен находиться, используется объект:***

а) рабочее место (WorkPlace);

б) источник работников (Worker Pool);

в) сам работник (Broker).

3. ***Чтобы сымитировать работу штабелера для загрузки модулей на линию, необходимо применить настройку:***

а) работника;

б) одиночного автомата;

в) работника и одиночного автомата совместно.

1.30. ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СБОРОЧНОЙ ЛИНИИ

Цель лекции — создание полной имитационной модели технологической линии сборки электронных модулей на печатных платах; подготовка функционала запуска и управления моделированием.

После создания и настройки всех объектов их необходимо расставить в теле основной модели Frame, создать связи между ними и установить недостающие настройки. Пример модели, которая должна получиться в итоге, показан на рис. 1.220. Поскольку объекты из стандартной библиотеки имеют стандартные параметры, их также необходимо задать при создании модели. Помимо обычного значения в поля параметров можно вписать формулу (например, для рабочего места ручной пайки можно использовать параметры, взятые из атрибутов модуля).

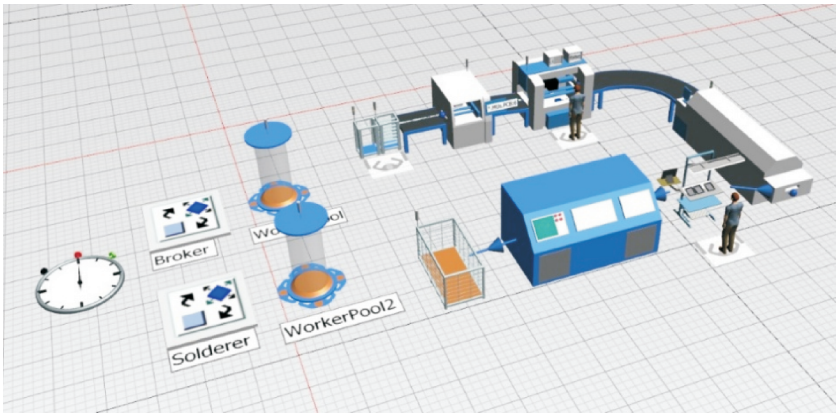


Рис. 1.220. Итоговая имитационная модель технологической сборочной линии

В некоторых случаях существует необходимость спланировать помещение производственного участка или цеха и расставить оборудование в ограниченном пространстве, обеспечив таким образом наилучшее расположение всех элементов ТПП. Для этих целей среда Plant Simulation предлагает набор готовых геометрических объектов, среди которых:

– стойка;
– стены цеха;
– коробка;

– заграждение;
– лестница;
– пластина.

Для каждого такого элемента можно задать его геометрические размеры, материал, цвет, а также параметры прозрачности, блеска и освещения. Лестница позволит предоставить работникам доступ к установкам в том случае, если они находятся, например, на другой высоте.

Вид модели с использованием стен участка и пластины оранжевого цвета для пола показан на рис. 1.221. При этом в стене сделан промежуток, имитирующий вход в помещение производственного участка, а все источники персонала расположены вне этого цеха. Так будет сымитирован приход персонала извне.

Для управления данной моделью во времени существует контроллер событий (Event Controller) (рис. 1.222), который устанавливается в тело модели и позволяет:

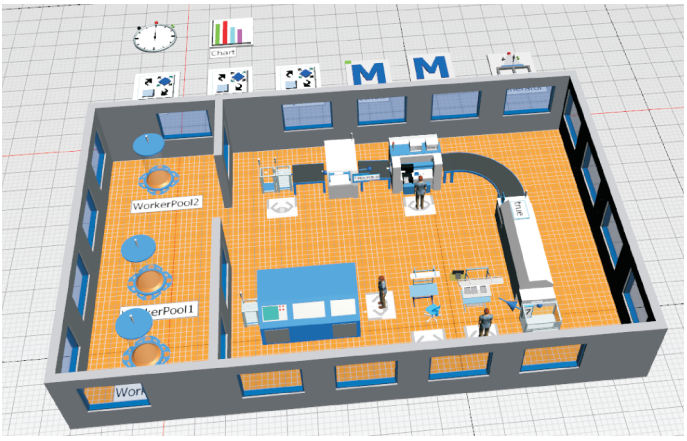


Рис. 1.221. Модель производственного участка с использованием стен и пола

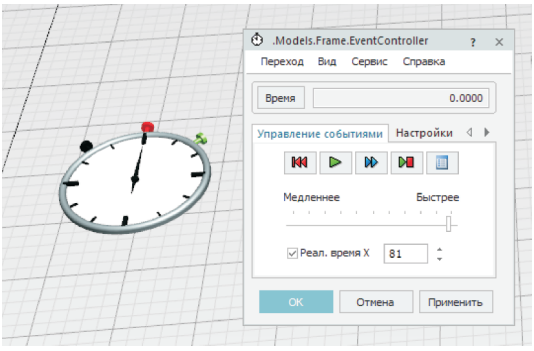


Рис. 1.222. Контроллер событий

– запускать процесс моделирования;
– приостанавливать процесс моделирования;
– сбрасывать время;
– регулировать скорость течения процесса.

Завершив наполнение базы данных, настроив модель автоматизированной технологической линии, модели персонала, построив модель производственного участка, подготовив функционал запуска и управления моделированием, можно приступать непосредственно к запуску дискретного имитационного моделирования на исполнение.

Тесты к лекции 1.30

1. ***Геометрические объекты цеховых стен и конструкций в среде Plant Simulation выполняют*** (выберите один или больше правильных ответов):

а) функцию визуализации обстановки;
б) функцию предоставления доступа к оборудованию для работников;
в) функцию подвижных объектов.

2. ***Для того чтобы управлять моделью во времени, необходим:***

а) контроллер событий (Event Controller);
б) подвижный объект (MU);
в) работник (Broker).

3. ***Приступать к запуску дискретного имитационного моделирования можно непосредственно после:***

а) декомпозиции производственных операций;
б) создания моделей персонала;
в) подготовки функционала запуска и управления моделированием.

2. МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

2.1. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ПРАКТИЧЕСКИХ РАБОТ

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 1. ГЕНЕРАТИВНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ: ТОПОЛОГИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Цель работы — выполнить топологическую оптимизацию деталей по массе с помощью методов генеративного проектирования с сохранением требуемого запаса прочности конструкции.

Задание 1

Выполните топологическую оптимизацию детали «Кронштейн».

1. Задайте следующие параметры модели детали:

– неизменяемые области вокруг крепежных отверстий: 5,0 мм;

– силу, действующую на внутреннюю поверхность одиночного отверстия: 100 Н;

– направление: влево;

– неизменяемая область: 10,0 мм;

Наложите ограничение «Зафиксировать» на нижнюю грань основания; неизменяемая область: 12,0 мм.

2. Задайте следующие параметры генеративного анализа:

– качество анализа: 10;

– процент уменьшения массы: 40;

– коэффициент запаса прочности: 1,5.

3. Выполните генеративный анализ, получите результаты в виде эпюры напряжений.

4. Проанализируйте результаты и дайте рекомендации по изменению конструкции детали.

Исходная модель приведена на рис. 2.1, результирующая — на рис. 2.2.

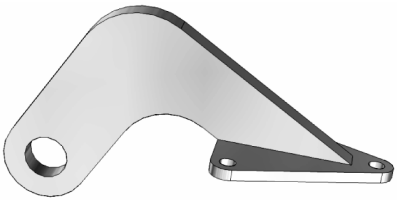


Рис. 2.1. Исходная модель

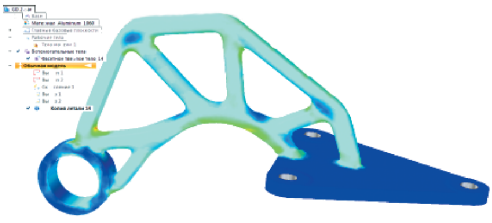


Рис. 2.2. Ожидаемый результат проектирования

Задание 2

Выполните топологическую оптимизацию листовой детали «Вилка».

1. Задайте следующие параметры модели детали:

– силу, действующую на внутреннюю поверхность отверстий под вал: 250 Н;

– направление: вверх;

– неизменяемая область: 5,0 мм.

Наложите ограничение «Зафиксировать» на верхнюю плоскую грань; неизменяемая область: 8,0 мм.

2. Задайте следующие параметры генеративного анализа:

– качество анализа: 5;

– процент уменьшения массы: 20;

– коэффициент запаса прочности: 1,2.

3. Выполните генеративный анализ, получите результаты в виде эпюры напряжений.

4. Проанализируйте результаты и дайте рекомендации по изменению конструкции детали.

Исходная модель приведена на рис. 2.3, результирующая — на рис. 2.4.

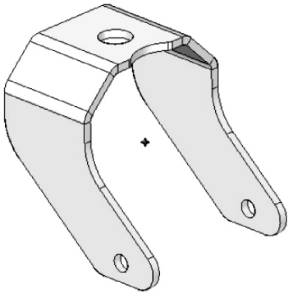


Рис. 2.3. Исходная модель

Рис. 2.4. Ожидаемый результат проектирования

Содержание отчета

1. Скриншоты финальных моделей и результирующие файлы моделей в электронном виде.

2. Исходные данные и результаты моделирования в печатном и электронном виде.

3. Выводы по работе.

4. Ответы на контрольные вопросы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое неизменяемые зоны?

2. Как учитывается требуемая прочность конструкции?

3. В чем различия между топологической и геометрической оптимизациями?

4. Каким образом можно визуализировать возникающие в модели напряжения?

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 2. ОБРАТНЫЙ ИНЖИНИРИНГ И ОБЪЕДИНЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ: ВОССТАНОВЛЕНИЕ АНАЛИТИЧЕСКОЙ ГЕОМЕТРИИ И МОДЕЛИРОВАНИЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФАСЕТНЫХ МОДЕЛЕЙ

Цель работы — применить обратный инжиниринг в целях восстановления аналитической геометрии деталей; отредактировать фасетные модели с использованием методов объединенного моделирования.

Задание 1

Выполните восстановление аналитической геометрии на примере головки детали «Болт».

1. Создайте (автоматически либо вручную) области в сетке для последующего выделения в качестве поверхностей (рис. 2.5).
2. Выделите аналитические поверхности (рис. 2.6).

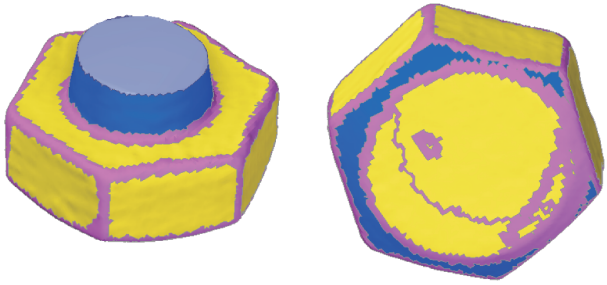


Рис. 2.5. Создание областей в сетке

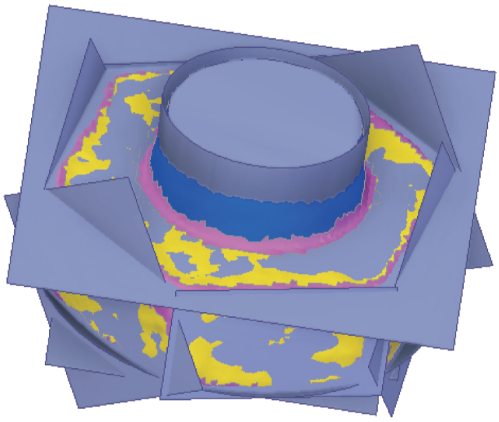


Рис. 2.6. Результат первичного выделения аналитических поверхностей

3. Обработайте поверхности с помощью команд продления, усечения, обрезки до пересечения поверхностей (рис. 2.7).

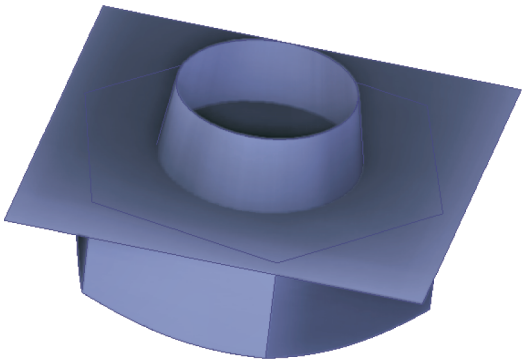


Рис. 2.7. Результат первичной обработки поверхностей

4. Выполните окончательную обработку поверхностей с созданием поверхностей по границам, получением замкнутого объема и сшиванием поверхностей в твердое тело (рис. 2.8).

5. Создайте результирующее твердое тело и постройте дополнительную геометрию (скругления, фаски) (рис. 2.9).

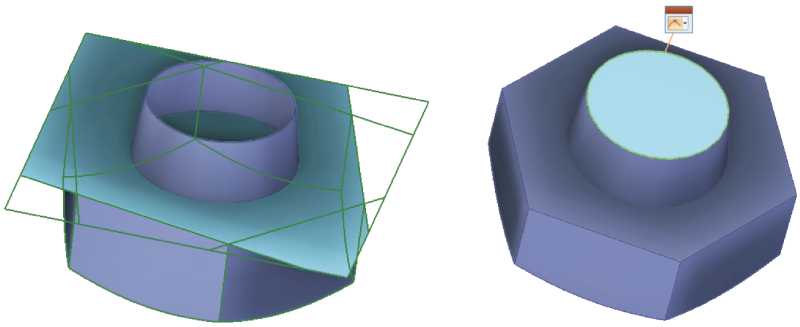


Рис. 2.8. Окончательная обработка поверхностей

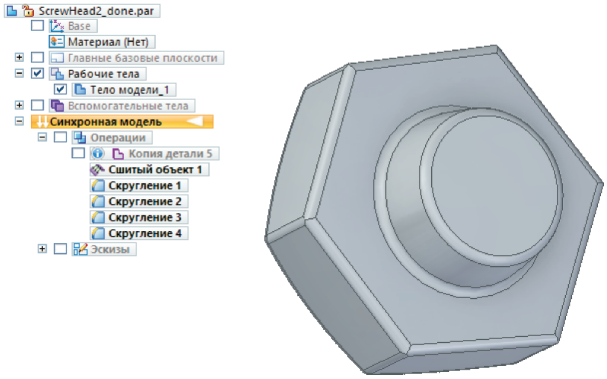


Рис. 2.9. Окончательный результат восстановления геометрии (твердое тело)

Задание 2

Восстановите аналитическую геометрию из фасетной модели «Емкость» (рис. 2.10). Процедура выполнения аналогична приведенной в задании 1.

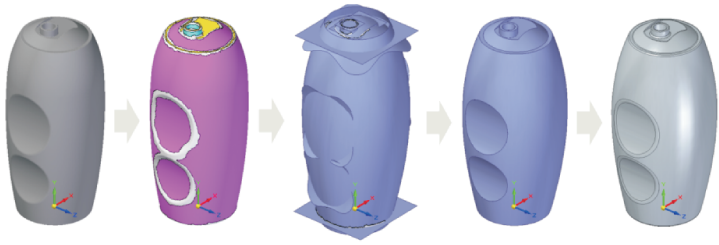


Рис. 2.10. Восстановление аналитической геометрии из фасетной модели «Емкость»

1. Создайте (автоматически либо вручную) области в сетке для последующего выделения в качестве поверхностей.
2. Выделите аналитические поверхности.
3. Обработайте поверхности с помощью команд продления, усечения, обрезки до пересечения поверхностей.
4. Выполните окончательную обработку поверхностей с созданием поверхностей по границам, получением замкнутого объема и сшиванием поверхностей в твердое тело.
5. Создайте результирующее твердое тело и постройте дополнительную геометрию (скругления, фаски).

Задание 3

Восстановите аналитическую геометрию из фасетной модели «Штамп» (рис. 2.11). Процедура выполнения аналогична приведенной в задании 1.

1. Создайте (автоматически либо вручную) области в сетке для последующего выделения в качестве поверхностей.

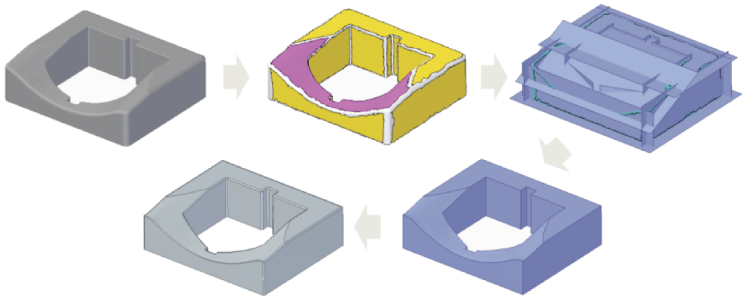


Рис. 2.11. Восстановление аналитической геометрии из фасетной модели «Штамп»

2. Выделите аналитические поверхности.

3. Обработайте поверхности с помощью команд продления, усечения, обрезки до пересечения поверхностей.

4. Выполните окончательную обработку поверхностей с созданием поверхностей по границам, получением замкнутого объема и сшиванием поверхностей в твердое тело.

5. Создайте результирующее твердое тело и постройте дополнительную геометрию (скругления, фаски).

Задание 4

Создайте модель упаковки детали, редактируя фасетную модель, применяя методы синхронной технологии и булевы операции (рис. 2.12).

1. Импортируйте STL геометрию детали.

2. Добавьте новую BREP геометрию будущей упаковки.

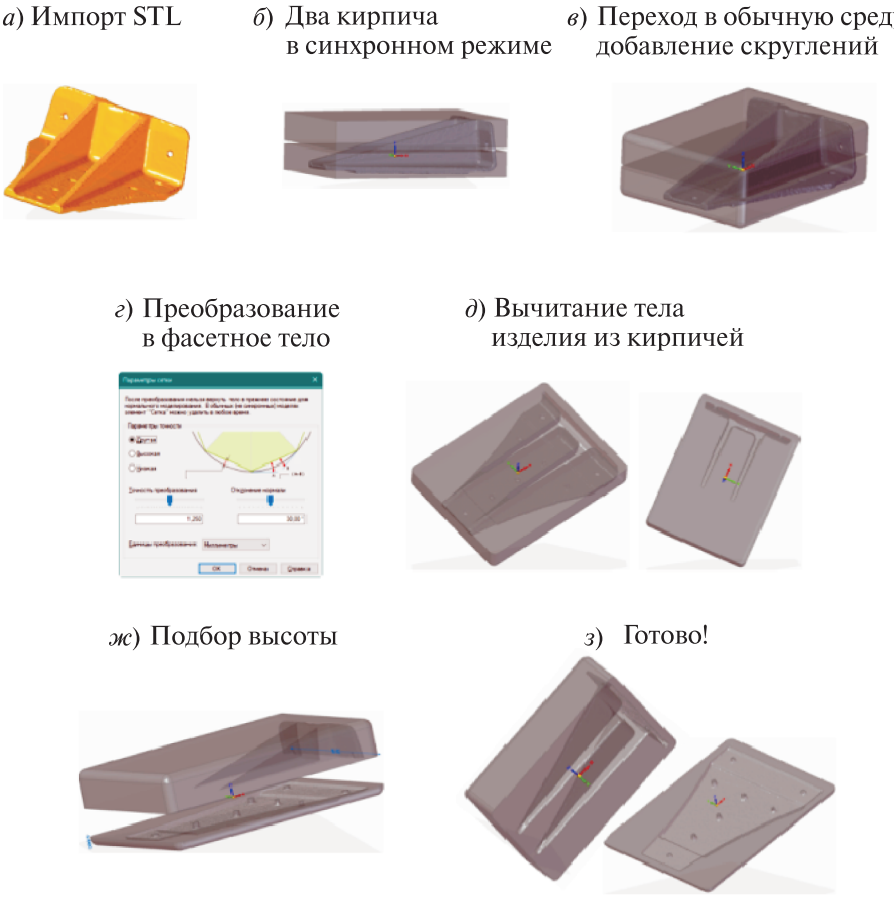


Рис. 2.12. Последовательность этапов проектирования упаковочных форм изделия, начиная с импорта STL

3. Преобразуйте BREP геометрию в фасетную модель.

4. Примените булевы операции для вычитания тела детали из заготовок упаковки.

5. Отредактируйте геометрию.

Содержание отчета

1. Скриншоты финальных моделей и результирующие файлы моделей в электронном виде.

2. Исходные данные и результаты моделирования в печатном и электронном виде.

3. Выводы по работе.

4. Ответы на контрольные вопросы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назовите основные этапы процедуры обратного инжиниринга.

2. Какие ограничения существуют при модификации фасетной модели традиционными методами?

3. Каков будет результат применения булевых операций, если тело–заготовка и/или тело–инструмент — фасетная модель?

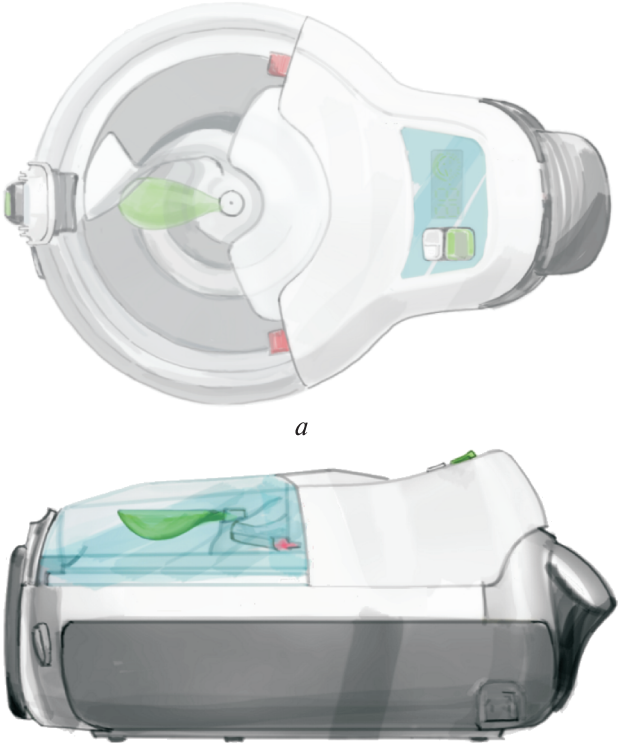
4. Какие геометрические условия должны выполняться для составляющих поверхностей, чтобы при сшивании получилось твердое тело?

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ СВОБОДНЫХ ФОРМ: СОЗДАНИЕ КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ ПО ДИЗАЙНЕРСКИМ ЭСКИЗАМ

Цель работы — изучить метод моделирования свободных форм и практику доработки полученных моделей на примере создания корпусных деталей изделий ЭА по дизайнерским эскизам в двух плоскостях.

Задание 1

Выполните моделирование деталей в составе сборки фритюрницы по указанию преподавателя на основе дизайнерского эскиза (рис. 2.13).



а

б

Рис. 2.13. Дизайнерский эскиз сборки фритюрницы:
вид сверху (*а*); общий вид (*б*)

1. Постройте исходные тела–примитивы.
2. Модифицируйте исходное тело с помощью инструментов редактирования геометрии свободных форм до соответствия эскизным проекциям.
3. Преобразуйте результирующее вспомогательное тело в рабочее.
4. Достройте геометрию рабочего тела традиционными методами твердотельного и поверхностного моделирования.

Задание 2

Выполните моделирование корпусных деталей портативной радиостанции на основе дизайнерских эскизов (рис. 2.14).

Рис. 2.14. Дизайнерские эскизы портативной радиостанции

1. Постройте исходные тела–примитивы.
2. Модифицируйте исходное тело с помощью инструментов редактирования геометрии свободных форм до соответствия эскизным проекциям.
3. Преобразуйте результирующее вспомогательное тело в рабочее.
4. Достройте геометрию рабочего тела традиционными методами твердотельного и поверхностного моделирования.

Задание 3

Выполните моделирование корпусных деталей пульта управления промышленным оборудованием на основе дизайнерских эскизов (рис. 2.15).

Рис. 2.15. Дизайнерские эскизы пульта управления промышленным оборудованием

1. Постройте исходные тела–примитивы.

2. Модифицируйте исходное тело с помощью инструментов редактирования геометрии свободных форм до соответствия эскизным проекциям.

3. Преобразуйте результирующее вспомогательное тело в рабочее.

4. Достройте геометрию рабочего тела традиционными методами твердотельного и поверхностного моделирования.

Содержание отчета

1. Скриншоты финальных моделей и результирующие файлы моделей в электронном виде.

2. Исходные данные и результаты моделирования в печатном и электронном виде.

3. Выводы по работе.

4. Ответы на контрольные вопросы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какая модель — BREP или фасетная — является результатом моделирования свободных форм?

2. Назовите преимущественные области применения технологии моделирования свободных форм.

3. Возможно ли модифицировать модель, полученную методом моделирования свободных форм, с помощью традиционных инструментов проектирования?

4. Как в технологии моделирования свободных форм осуществляется сглаживание форм?

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 4. БЕСЧЕРТЕЖНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПОДГОТОВКИ КОНСТРУКТОРСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ: СОЗДАНИЕ ВИДОВ МОДЕЛИ С PMI

Цель работы — изучить принципы подготовки КД по бесчертежной технологии с созданием видов, разрезов, сечений, простановкой размеров и обозначений в форме 3D-аннотаций (PMI) непосредственно на 3D-модели сборочной единицы.

Задание

Подготовьте виды ЭМСЕ «Каркас стойки» с простановкой позиционных и прочих обозначений, размеров в виде 3D-аннотаций (PMI):

– создайте вид спереди;
– добавьте 3D-аннотации: номера позиций и габаритные размеры;
– задайте наименование вида спереди;
– создайте вид справа;
– выполните местный разрез;
– добавьте 3D-аннотации: обозначения базы, допуски формы и расположения, шероховатости;
– задайте наименование вида справа;
– выполните циклический просмотр созданных видов.

Теоретическая часть

Для создания вида модели следует воспользоваться командой «Вид» во вкладке «Атрибуты» (группа команд «Виды модели», рис. 2.16), предварительно расположив вид в нужной ориентации.

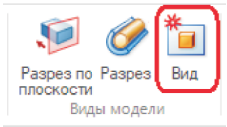


Рис. 2.16. Группа команд «Виды модели»

В режиме редактирования вида необходимо добавить 3D-аннотации: обозначения (номера позиций) и габаритные размеры, удобные для проставления в плоскости данного вида (рис. 2.17).

После закрытия среды правки вида можно задать имя вида. Созданные PMI отображаются в «Навигаторе сборки» в коллекции «Атрибуты» — «Виды модели» (рис. 2.18).

Аналогичным образом следует создать вид «Сбоку». Для удобства последующей простановки обозначений и размеров предварительно надо создать местный разрез (рис. 2.19).

Зафиксировав необходимую плоскость обозначений, доступную с участием разреза, надо проставить шероховатость для выбранной поверхности, выбрав ребро (рис. 2.20).

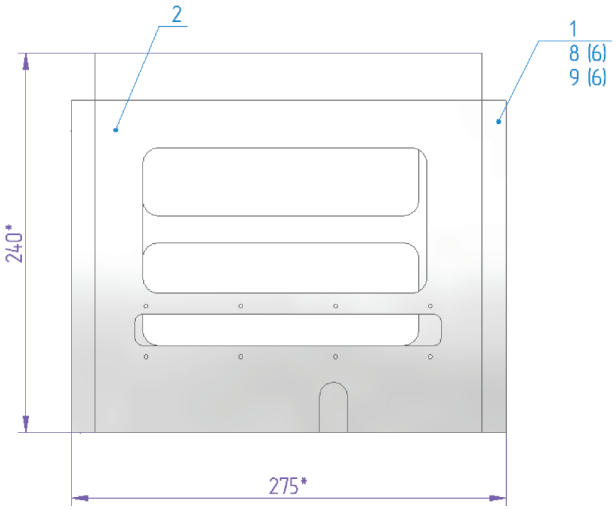


Рис. 2.17. Простановка размеров и обозначений на создаваемом виде ЭМСЕ

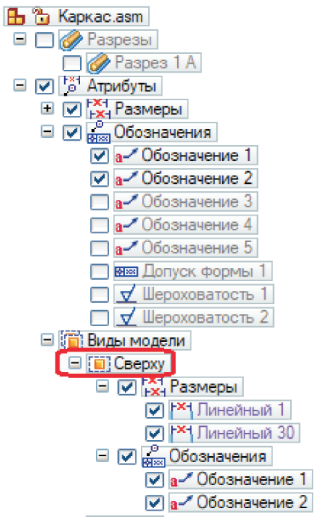
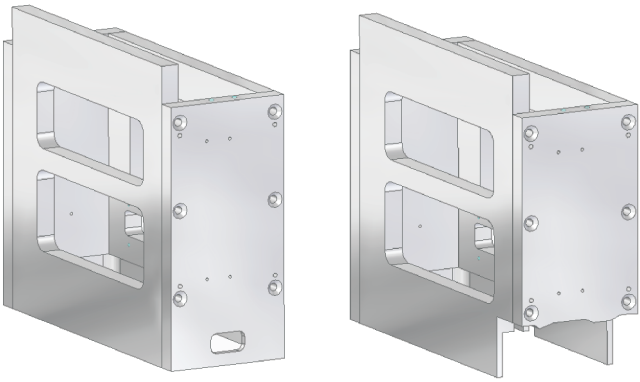


Рис. 2.18. Созданный вид модели «Сверху» в «Навигаторе сборки»



а *б*

Рис. 2.19. Создание местного 3D-разреза в плоскости редактируемого вида модели: модель без разреза (*а*); модель с выполненным разрезом (*б*)

Аналогичным образом, предварительно выбрав необходимые плоскости обозначений, следует проставить обозначения базы и допуска параллельности (рис. 2.21).

Далее следует закрыть среду редактирования вида модели. Обратите внимание на то, что каждый вид можно применить, выбрав команду контекстного меню «Применить вид», а каждый размер или обозначение можно

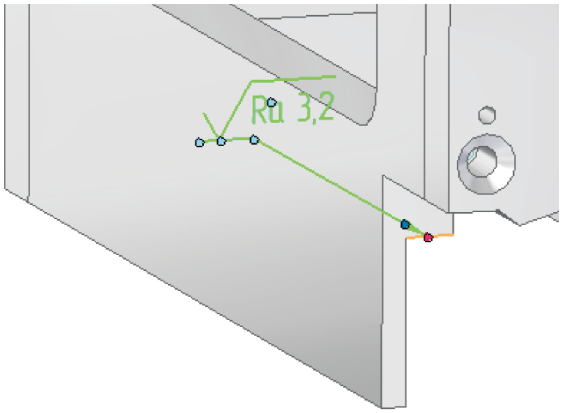


Рис. 2.20. Простановка шероховатости с участием местного разреза

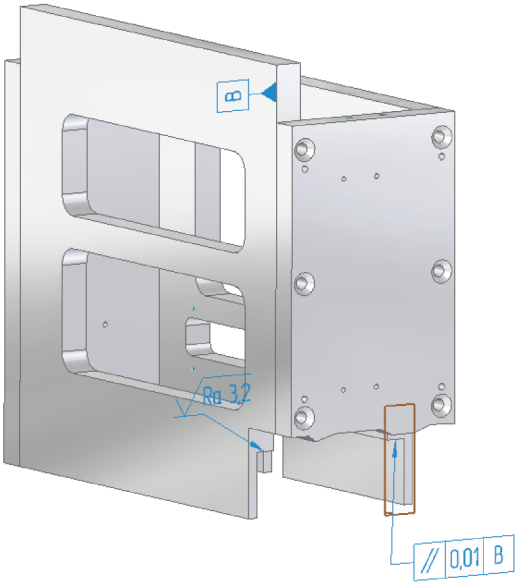
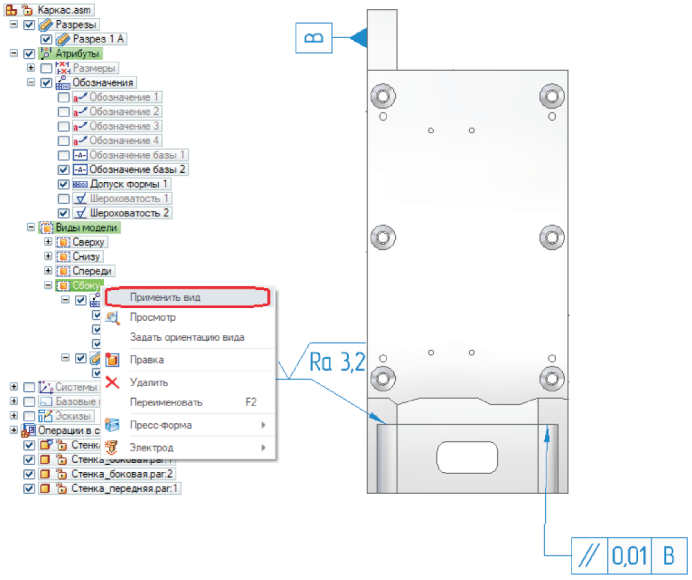


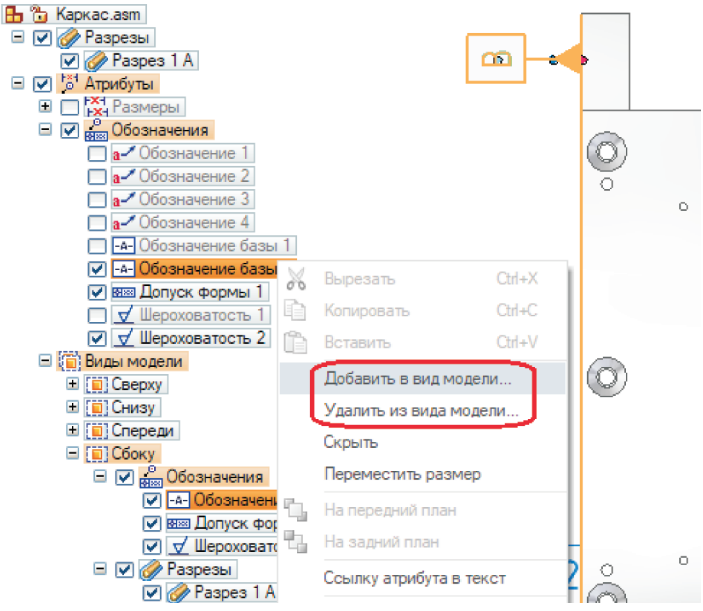
Рис. 2.21. Простановка базы и допуска параллельности

добавить в вид модели или удалить из него, воспользовавшись командами контекстного меню «Добавить в вид модели...» и «Удалить из вида модели...» соответственно (рис. 2.22). В появившемся далее окне следует отметить флажками виды для добавления/удаления.

Команда контекстного меню любого вида «Просмотр» позволяет циклически применять созданные виды модели с PMI (рис. 2.23).



а



б

Рис. 2.22. Команды применения вида (*а*) и добавления/удаления PMI в выбранные виды модели (*б*)

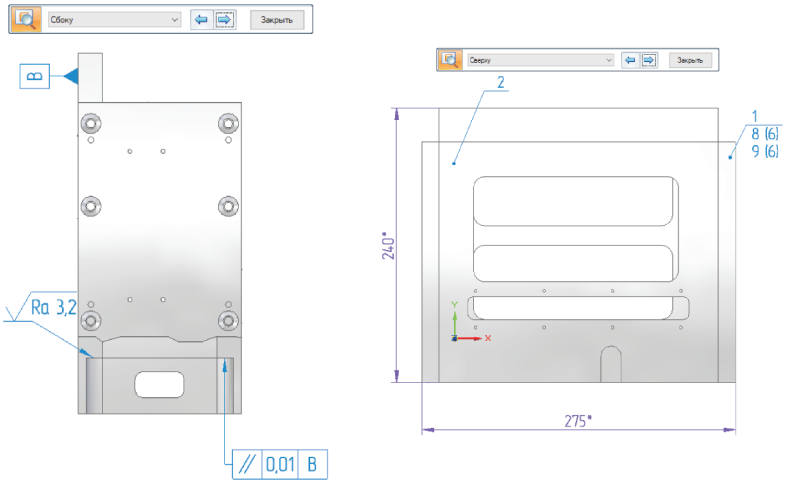


Рис. 2.23. Циклическое применение созданных видов с PMI с помощью команды «Просмотр»

Далее аналогичным образом можно проставлять любые другие размеры и обозначения, создавая бесчертежную КД с помощью ЭМСЕ.

Содержание отчета

1. Краткий конспект теоретической части.
2. Скриншоты финальных моделей и результирующие файлы моделей в электронном виде.
3. Исходные данные и результаты моделирования в печатном и электронном виде.
4. Выводы по работе.
5. Ответы на контрольные вопросы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие виды размеров и обозначений можно проставлять на видах PMI?
2. Назовите основные требования к расположению PMI на видах, продиктованные их читабельностью.
3. Можно ли извлечь размеры для PMI из конструкторской модели?
4. Как оформляются технические требования в виде PMI?

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 5. СОВМЕСТНАЯ РАБОТА В ECAD- И MCAD-МОДУЛЯХ. ЭЛЕКТРОПРОВОДКА: ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА КОНСТРУКТОРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ И МЕХАНИЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩИХ ИЗДЕЛИЯ

Цель работы — изучить принципы совместной работы в ECAD- и MCAD-модулях САПР на примере доработки конструкции электропроводки, требующей синхронной двунаправленной передачи данных между указанными модулями.

Задание

Обеспечьте совместную работы конструкторов электрической и механической частей изделия в САПР Solid Edge в процессе доработки электропроводки кабины бульдозера:

– выполните синхронное соединение ECAD- и MCAD-модулей — Wiring Design и Solid Edge;

– передайте данные о компонентах и проводных соединениях в MCAD-модуль;

– назначьте компоненты, терминалы и создайте соединения с помощью «Мастера электропроводки»;

– вручную сформируйте жгут из проложенных проводов;

– проложите жгут внутри предназначенных для этого клипс;

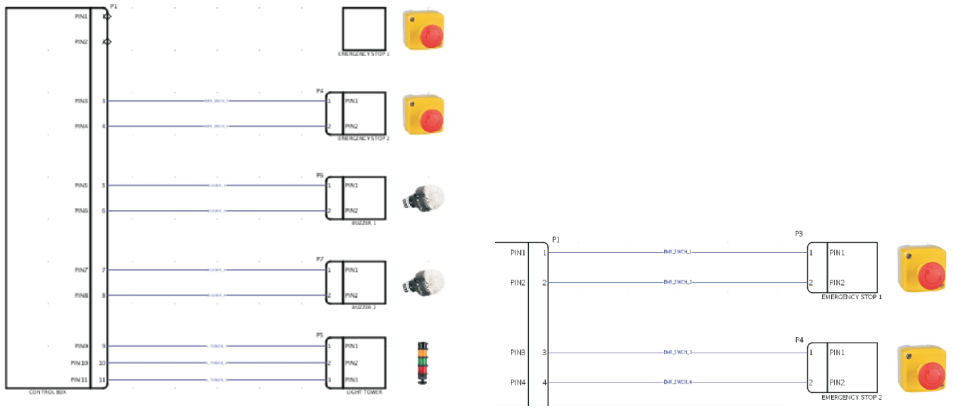
– передайте информацию о длинах сформированных проводов обратно в ECAD-модуль.

Теоретическая часть

Необходимо достроить электропроводку к первой кнопке аварийного останова (Emergency Stop 1); на рис. 2.24 показана электрическая схема до (*а*) и после (*б*) создания соответствующей цепи в ECAD-модуле Wiring Design.

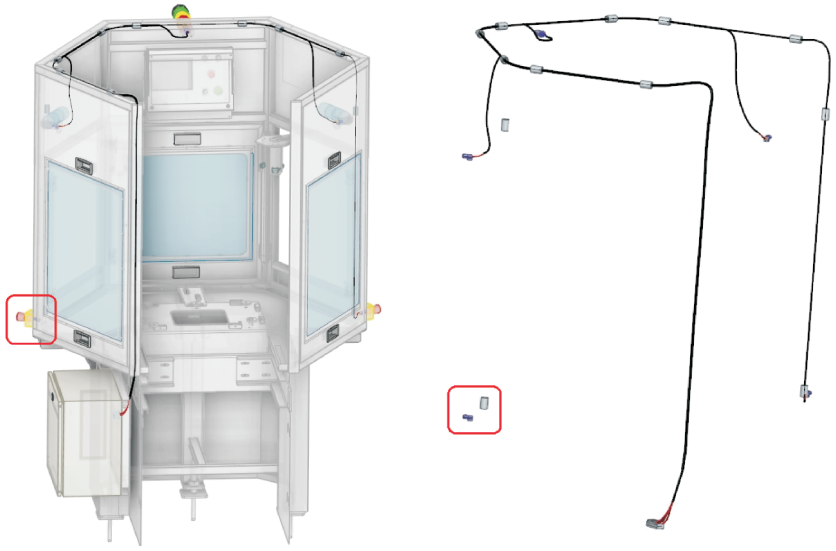
Кабина бульдозера вместе с исходной электропроводкой в конструкторской САПР Solid Edge показана на рис. 2.25, *а*, а на рис. 2.25, *б* — отдельно только исходная электропроводка; на рис. 2.25, *а* контуром обведена кнопка аварийного останова, а на рис. 2.25, *б* — подготовленный разъем и клипса для прокладки кабеля к ней.

Как и в примере, рассмотренном в курсе лекций в п. 1.7, следует выполнить синхронное соединение ECAD- и MCAD-модулей (режим “Connected mode”) и передачу данных о компонентах и проводных соединениях в Solid Edge.



а *б*

Рис. 2.24. Электрическая схема подключения кнопки аварийного останова в модуле Wiring Design: схема до создания цепи (*а*); фрагмент схемы после создания цепи (*б*)



а *б*

Рис. 2.25. Исходная электропроводка кабины бульдозера: вместе с деталями кабины (*а*); отдельно (*б*). Красным контуром обведены компоненты с отсутствующей электропроводкой

Электропроводка обновится, запустится «Мастер электропроводки» с автоматическим назначением компонентов, терминалов и созданием соединений (рис. 2.26).

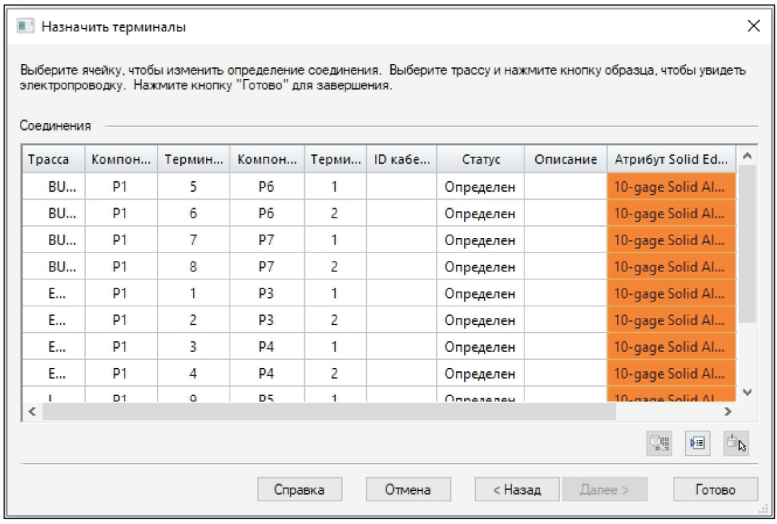


Рис. 2.26. Работа «Мастера электропроводки» после передачи данных из ECAD-модуля и обновления электропроводки

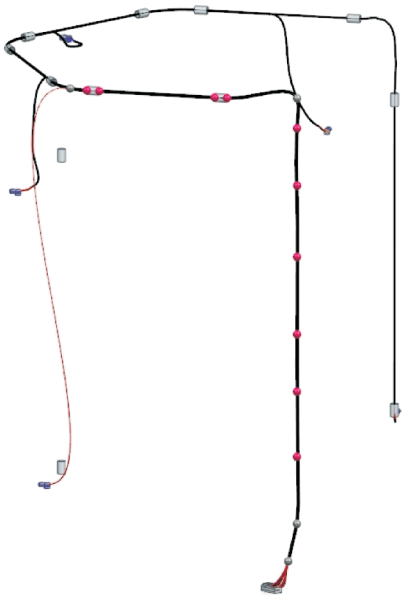
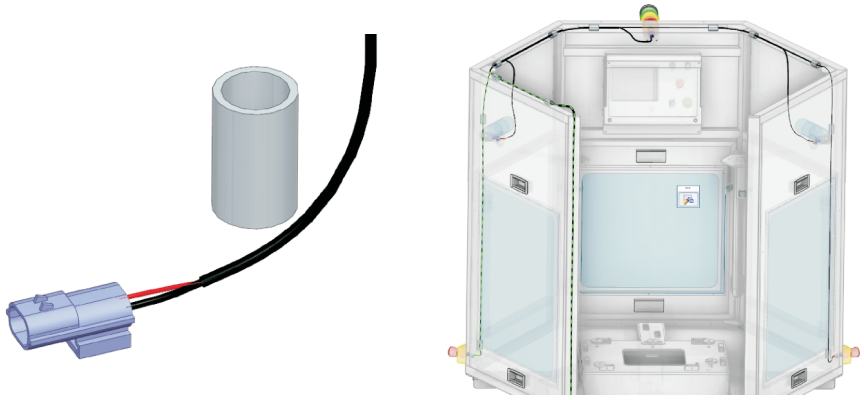


Рис. 2.27. Результат автоматического формирования электропроводки по данным, переданным из ECAD-модуля

Электропроводка, дополненная по результатам работы «Мастера электропроводки», показана на рис. 2.27.

Далее можно вручную сформировать жгут из проложенных проводов (рис. 2.28, *а*) и проложить его внутри специально заготовленных клипс. Окончательный результат дополнения электропроводки показан на рис. 2.28, *б*.

Как и в примере, рассмотренном в лекционном курсе в п. 1.7, здесь также можно передать обратно в ECAD-модуль Wiring Design данные о длине сформированных проводов, совершив синхронизированную загрузку данных в режиме соединения. Результат обратного импорта представлен на рис. 2.29.



а *б*

Рис. 2.28. Дополненная электропроводка кабины бульдозера: созданный жгут из проводов, ведущих к разъему кнопки аварийного останова, вместе с клипсой для прокладки жгута (*а*); общий вид сформированной электропроводки (*б*)

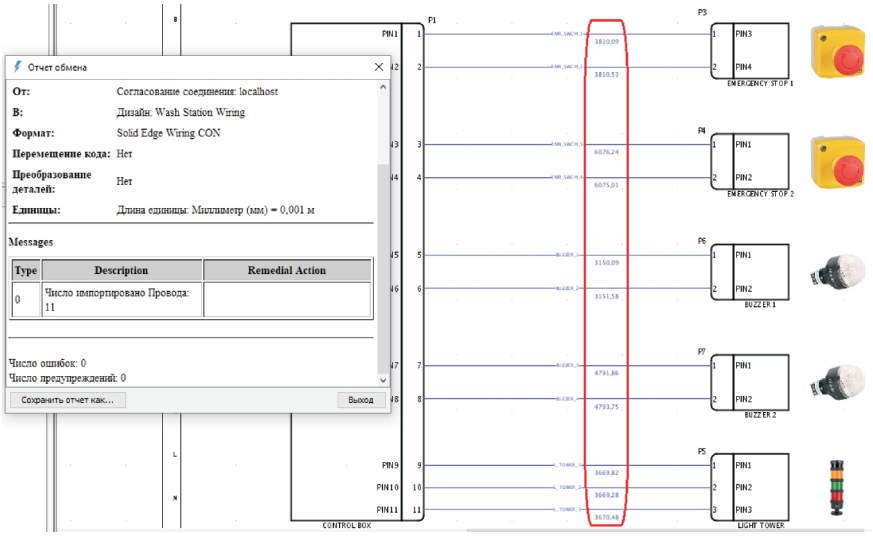


Рис. 2.29. Результат обратного импорта в ECAD-модуль данных о длине сформированных в MCAD-модуле проводов (выделены красным)

Содержание отчета

1. Краткий конспект теоретической части.
2. Скриншоты финальных моделей и результирующие файлы моделей в электронном виде.
3. Исходные данные и результаты моделирования в печатном и электронном виде.
4. Выводы по работе.
5. Ответы на контрольные вопросы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как выполнить синхронизацию модулей механического и электрического проектирования?
2. Какие данные можно передать из модуля электрического проектирования обратно в механический модуль?
3. Можно ли при прокладывании электропроводки по данным модуля электрического проектирования вручную назначать терминалы?
4. Что служит признаком успешной передачи данных между модулями?

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 6. СОВМЕСТНАЯ РАБОТА В ECAD- И MCAD-СИСТЕМАХ. ПЕЧАТНЫЕ ПЛАТЫ: ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА КОНСТРУКТОРОВ ЭЛЕКТРОННОЙ И МЕХАНИЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩИХ ИЗДЕЛИЯ

Цель работы — изучить принципы совместной работы в ECAD- и MCAD-системах в процессе параллельной работы конструкторов электронной и механической составляющих изделия над электронным модулем на печатной плате с обеспечением двунаправленной инкрементной передачи данных об изделии в формате IDX через общую папку.

Задание

Обеспечить процесс двунаправленного обмена данными с внесением изменений в конструкцию разрабатываемого модуля на печатной плате:

– создать в конструкторской (MCAD) системе исходную модель печатной платы. Размеры, компонентный состав и координаты расположения компонентов на плате задает преподаватель;

– расположить на плате компоненты, которые должны занимать строго определенное место;

– экспортировать печатную плату с компонентами в ECAD-систему;

– импортировать проект в ECAD-систему;

– разместить на печатной плате крупногабаритные компоненты;

– сформировать для конструктора механической части изделия предложение с указанием проверить данное компоновочное решение на предмет соответствия требуемым зазорам;

– экспортировать сформированное предложение в MCAD-систему;

– импортировать предложение в MCAD-систему;

– проверить зазоры и прочие компоновочные параметры изделия. Принять предложенные изменения. Отправить ответ в ECAD-систему;

– принять в ECAD-системе отклик от MCAD-системы на то, что предложенные изменения приняты.

Теоретическая часть

Исходный модуль создается в конструкторской (MCAD) САПР. Такой порядок создания зачастую обусловлен тем, что в конструкции модуля присутствуют компоненты, которые должны занимать строго определенное место из компоновочных соображений, — обычно это разъемы, элементы индикации и управления. В рассматриваемом примере это девять штыревых разъемов с предопределенным положением. Аналогичные соображения

относятся к крепежным отверстиям, расположение которых также часто зависит от особенностей конструкции механического модуля (рис. 2.30).

Далее необходимо экспортировать печатную плату с компонентами в ECAD-систему. С этой целью запускается ECAD Collaborator, и по нажатию кнопки “Get PCB data” («Получить данные печатной платы») данные из «Навигатора модуля» на печатной плате поступают в модуль совместной работы (рис. 2.31). Сделав пометку о том, что передается исходная топология модуля, следует нажать кнопку “Send” («Отправить»), и в папке обмена данными будет сформирован файл MCAD_Baseline_00.idx, который можно будет считать в ECAD-системе.

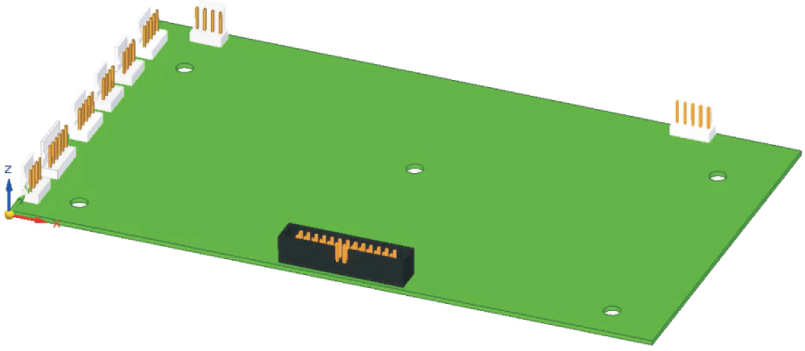


Рис. 2.30. Модуль на печатной плате, созданный в MCAD-системе, с крепежными отверстиями и разъемами в предопределенном положении

Осуществим импорт проекта в ECAD-систему, в качестве которой рассмотрим модуль PCB Design из портфолио Solid Edge. В данной системе запускается аналогичный модуль — MCAD Collaborator, где выполняются настройки той же папки совместных данных. После выполнения настройки в этой папке выбирается подготовленный ранее файл MCAD_Baseline_00.idx, и в навигаторе модуля появляются передаваемые данные о плате и компонентах. По нажатию кнопки “Apply” («Применить») данные из этого файла импортируются в ECAD-систему (рис. 2.32).

Файл MCAD_Baseline_00.idx перемещается в раздел «История», а топология в 3D прорисовывается в ECAD-системе (рис. 2.33).

Далее разместим на печатной плате два крупногабаритных конденсатора и сформируем предложение для конструктора механической части изделия с указанием проверить это компоновочное решение на предмет соответствия требуемым зазорам. Для этого снова запустим MCAD Collaborator, выберем в раскрывающемся списке “Proposal” («Предложение») и отметим, что в навигаторе модуля остались только те компоненты, которые добавились/

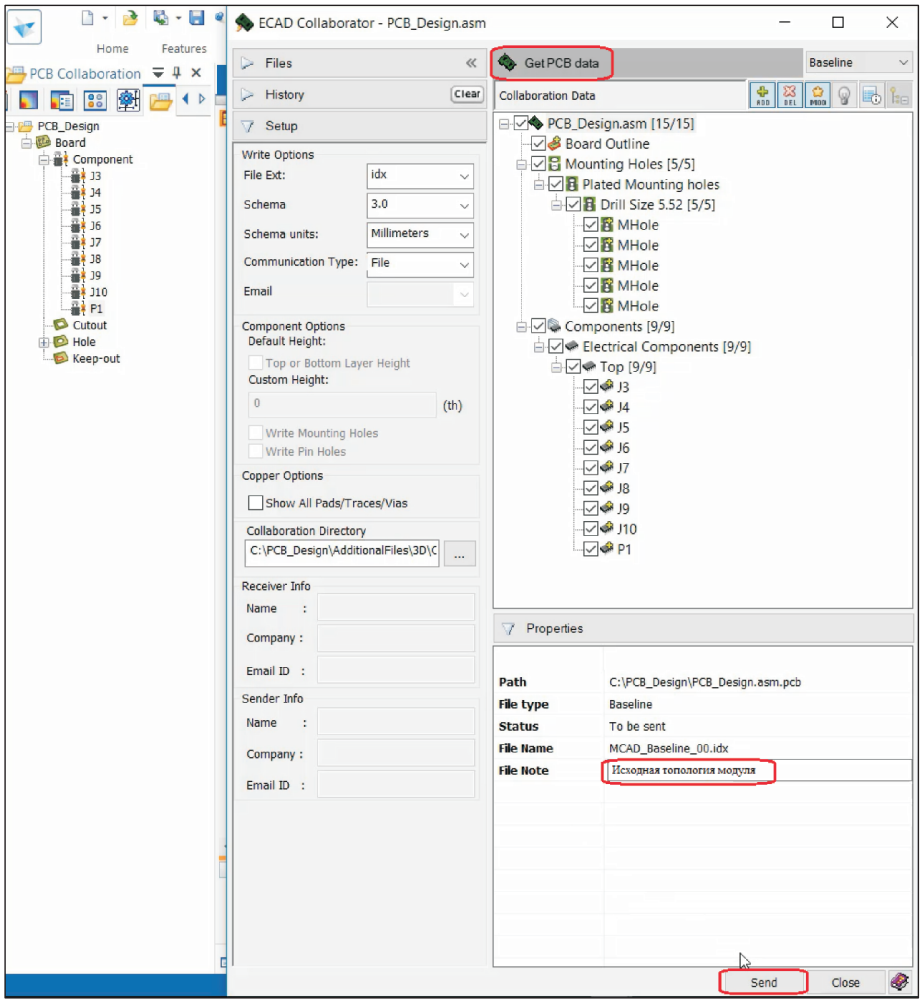


Рис. 2.31. Экспорт топологии модуля на печатной плате из MCAD-системы

изменились с предыдущей версии данных: два новых конденсатора C38 и C39 (рис. 2.34).

Следует обратить внимание на то, что после отправки строка внизу окна меняется на «Предложение отправлено. Ожидание ответа», а отправленный файл имеет наименование proposal_00.idx в соответствии с содержимым строки “File Name” («Имя файла») (рис. 2.35).

Перейдем в MCAD-систему и откроем ECAD Collaborator. В разделе «Файлы» находится подготовленный ECAD-системой файл предложения proposal_00.idx; после его выбора предлагаемые изменения (два новых конденсатора) отобразятся в навигаторе модуля. После нажатия кнопки “Apply”

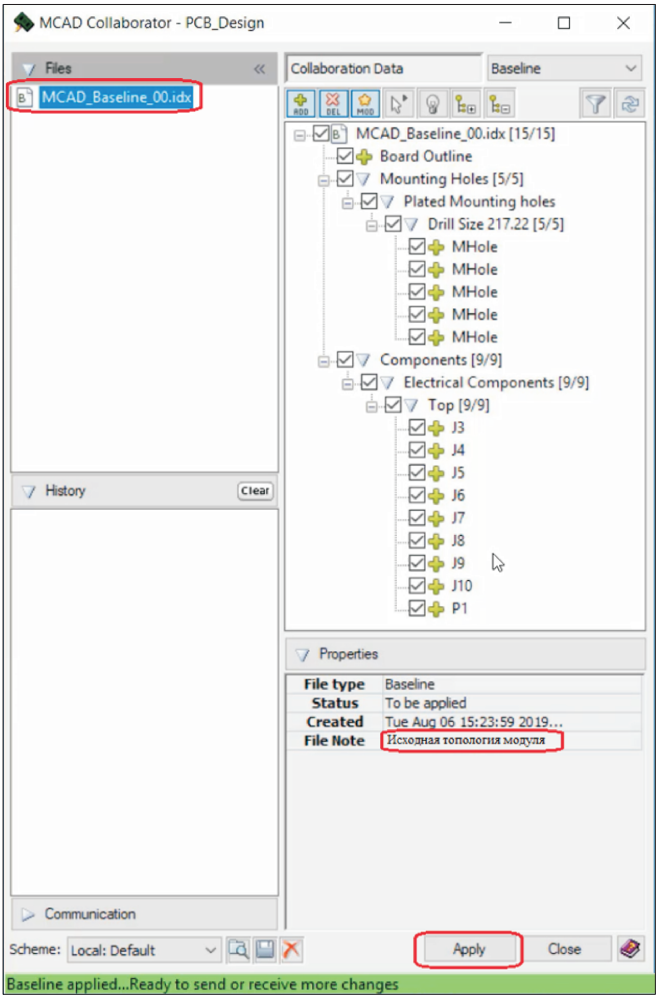


Рис. 2.32. Импорт топологии модуля на печатной плате в ECAD-систему

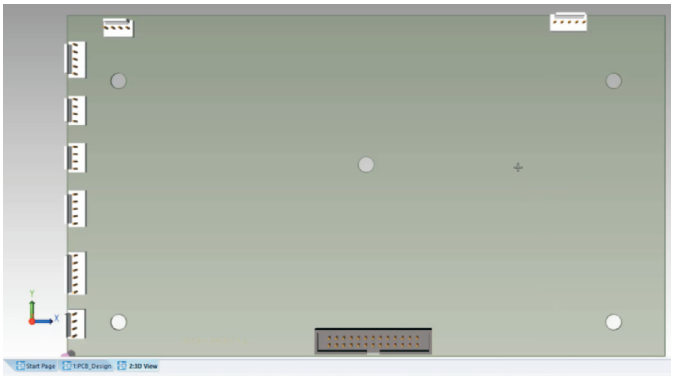


Рис. 2.33. Импортированная топология в окне ECAD-системы Solid Edge PCB Design

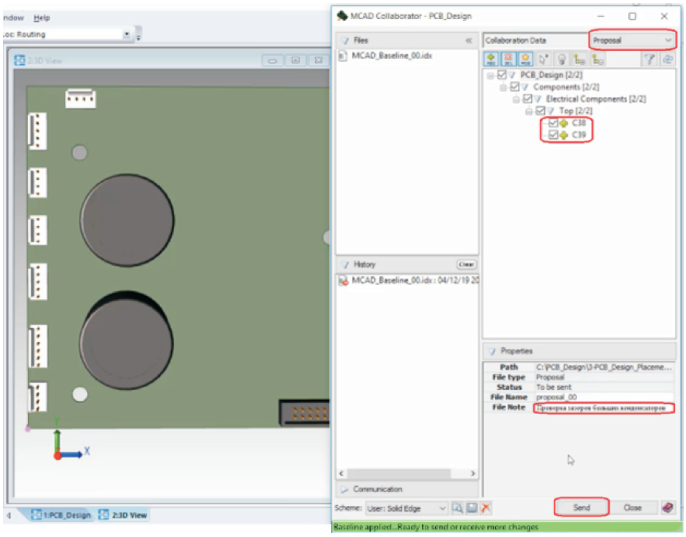


Рис. 2.34. Формирование и отправка в MCAD-систему предложения с изменениями топологии модуля на печатной плате

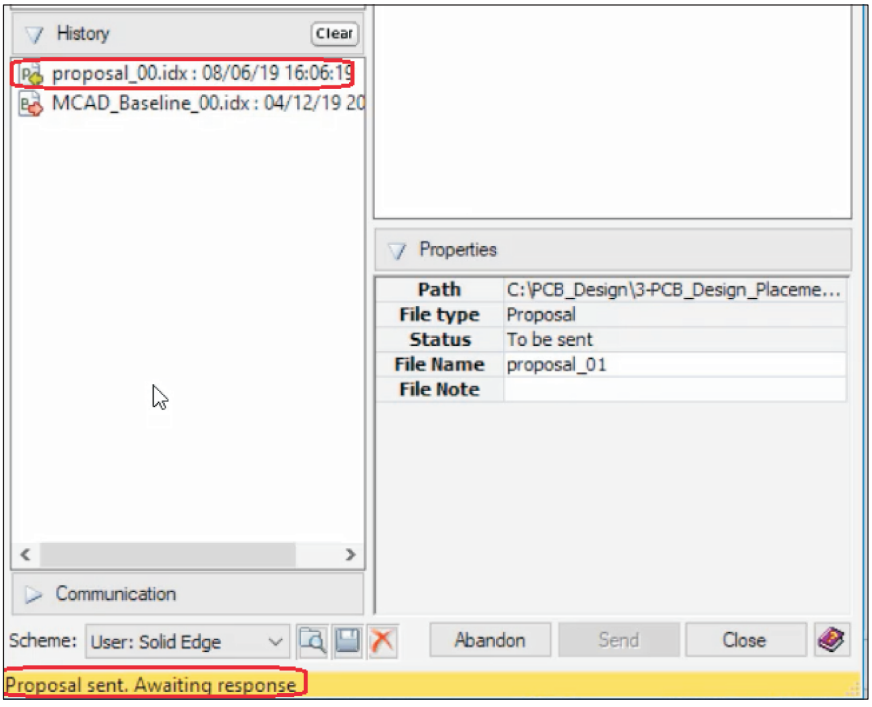


Рис. 2.35. Вид окна MCAD Collaborator после отправки предложения с изменениями в MCAD-систему

(«Применить») данные из указанного файла импортируются в MCAD-систему (рис. 2.36).

После импорта изменений ECAD Collaborator переходит в режим готовности к отправке ответа: файл proposal_00.idx перемещается в раздел «История», строка внизу окна меняется на «Изменения приняты. Готов к отправке ответа», и формируется файл ответа MCAD_Response_00.idx. По нажатию

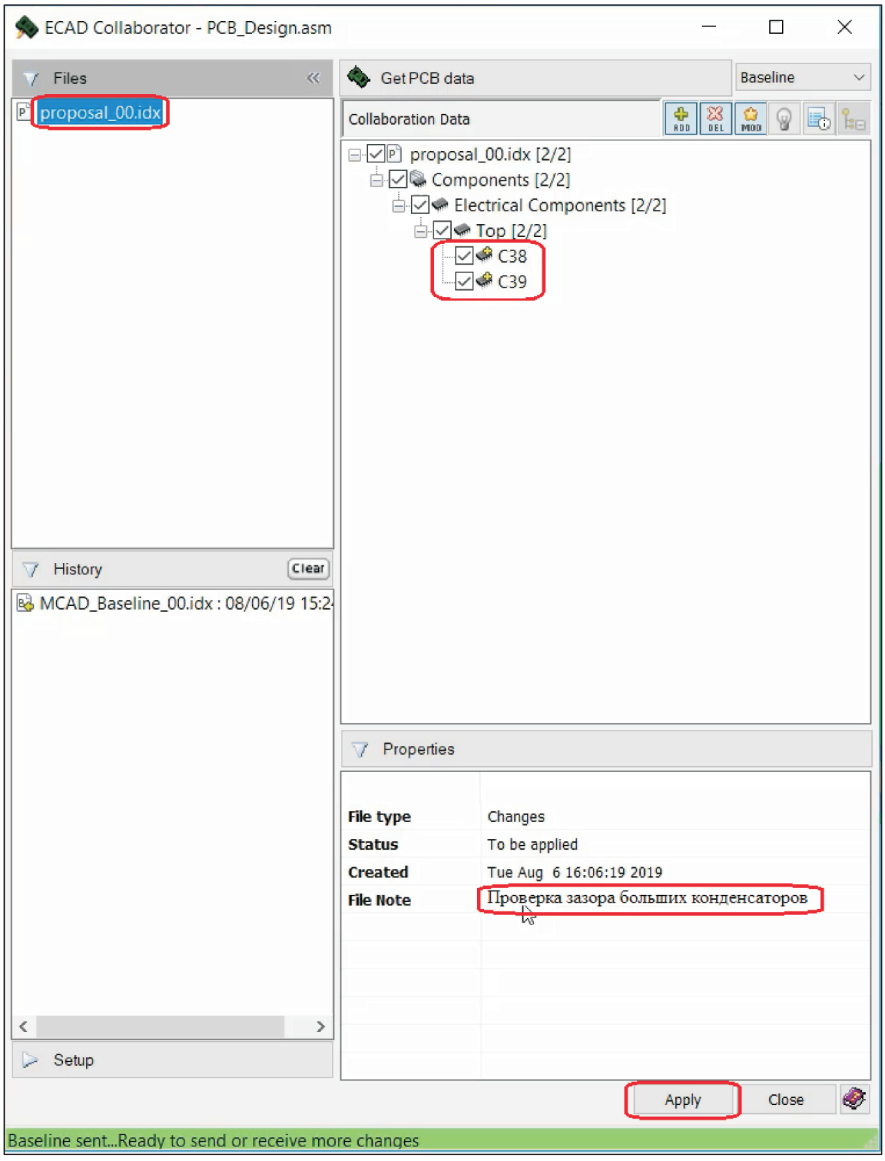


Рис. 2.36. Импорт измененной в ECAD-системе топологии модуля на печатной плате в MCAD-систему

кнопки “Send” («Отправить») ответ будет отправлен в папку обмена данными для последующего импорта в ECAD-систему (рис. 2.37).

Конденсаторы размещены на печатной плате (рис. 2.38), и после этого можно приступить к проверке зазоров и прочих компоновочных параметров модуля.

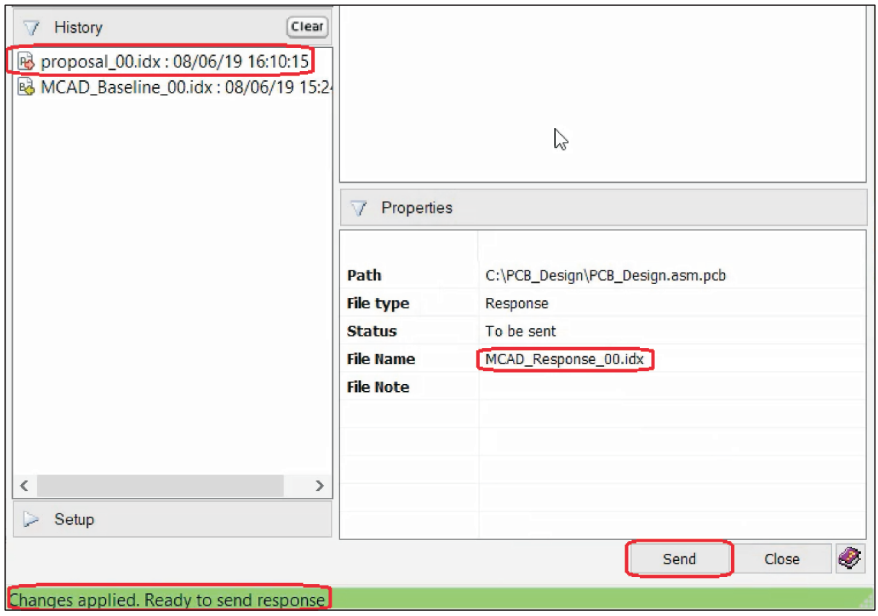


Рис. 2.37. Вид окна ECAD Collaborator после принятия предложения из ECAD-системы

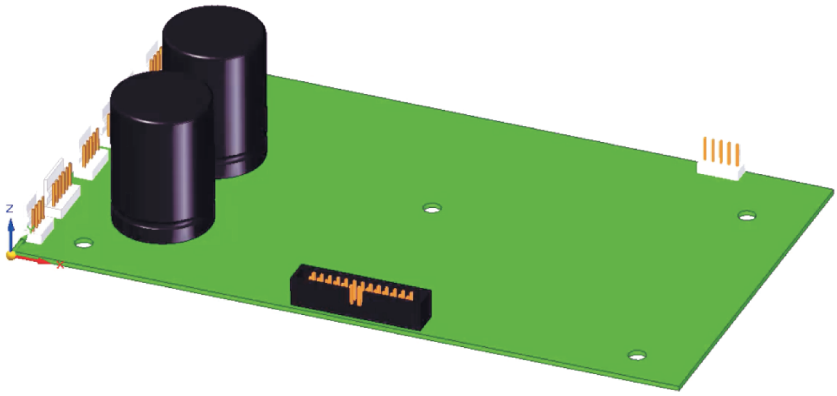


Рис. 2.38. Конденсаторы, добавленные на печатную плату в результате принятия предложения из ECAD-системы

В завершение работы следует в ECAD-системе принять отклик от MCAD-системы о том, что предложенные изменения приняты. Для этого в окне MCAD Collaborator необходимо выбрать файл ответа MCAD_Response_00.idx, подготовленный в MCAD-системе, и нажать кнопку “Apply” («Применить») (рис. 2.39). Ответ будет принят, файл MCAD_Response_00.idx перейдет в раздел «История», а строка сообщений просигнализирует о том, что транзакция завершена и модуль готов к отправке или принятию новых изменений (рис. 2.40).

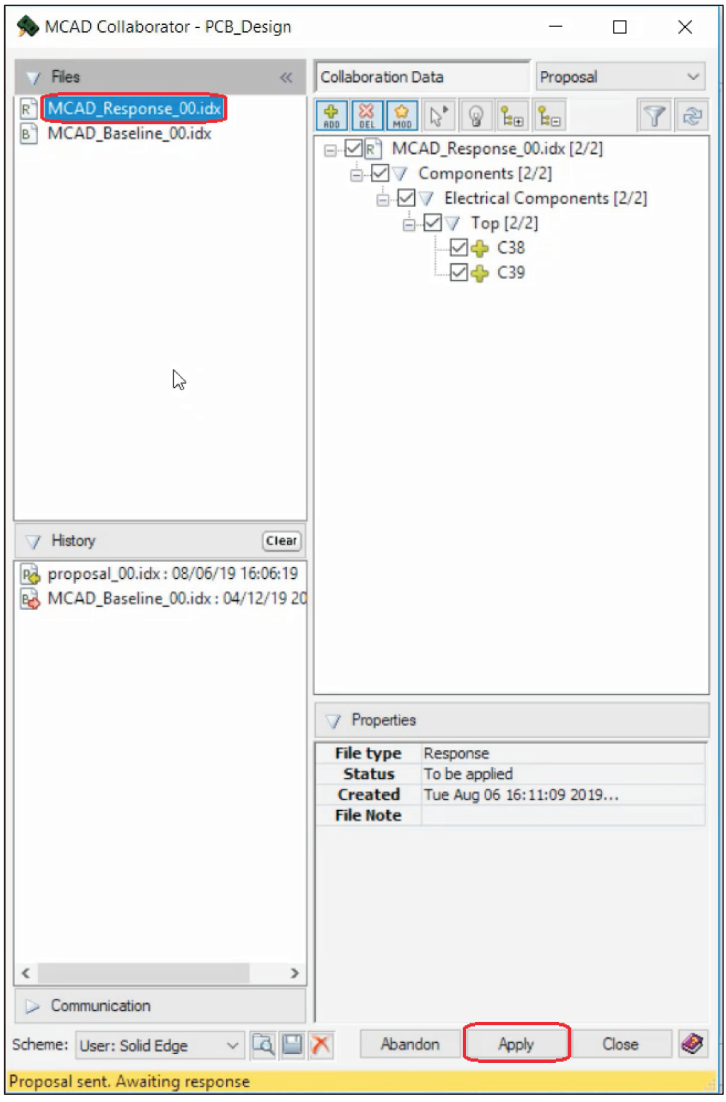


Рис. 2.39. Принятие ответа от MCAD-системы в ECAD-системе

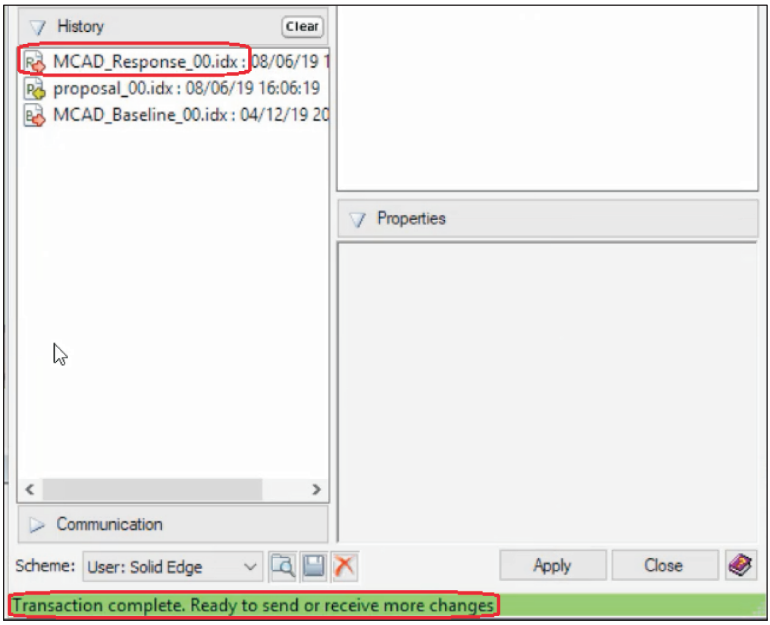


Рис. 2.40. Результат завершения транзакции по внесению изменений в топологию модуля на печатной плате

Приведенная последовательность действий универсальна для внесения любых изменений в конструкцию и топологию модулей на печатных платах в процессе совместной работы конструкторов электронной и механической составляющих изделия.

Содержание отчета

1. Краткий конспект теоретической части.
2. Скриншоты финальных моделей и результирующие файлы моделей в электронном виде.
3. Исходные данные и результаты моделирования в печатном и электронном виде.
4. Выводы по работе.
5. Ответы на контрольные вопросы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как создать папку совместного хранения данных для обмена?
2. Можно ли отказаться от принятия переданных из другого модуля изменений?
3. Как передаются данные с помощью формата idx: полностью или частично, только данные с выполненными изменениями?
4. Опишите традиционную последовательность обмена данными при параллельной работе конструкторов электронной и механической частей изделия.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 7. УПРАВЛЕНИЕ ПРОЕКТНЫМИ ДАННЫМИ: ЗАДАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ХРАНИЛИЩА ДОКУМЕНТОВ И ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ АТРИБУТОВ

Цель работы — научиться задавать путь к хранилищу документов, его параметры и дополнительные атрибуты документов для последующей индексации в процессе управления проектными данными.

Задание 1

Задать параметры хранилища данных проекта:
– расположение текстового файла FastSearchScope.txt;
– добавить путь к хранилищу в файл FastSearchScope.txt;
– дополнительные параметры управления документами во вкладке «Хранилище» (рис. 2.41).

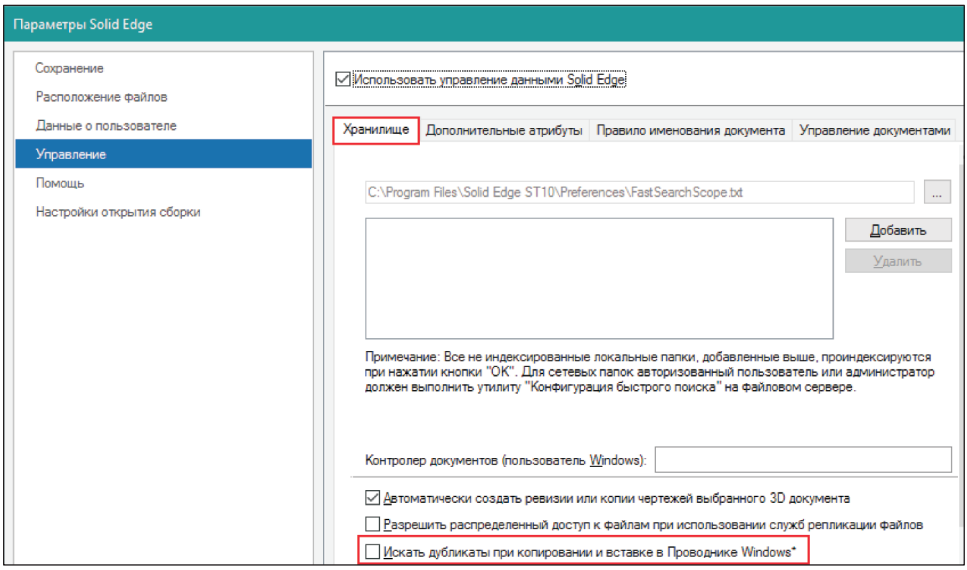


Рис. 2.41. Параметры хранилища данных проекта

Задание 2

Задать дополнительные атрибуты документов проекта для последующей индексации:
– расположение файла Propseed.txt;

– дополнительные атрибуты, по которым будут осуществляться индексация и поиск, в файле Propseed.txt и в шаблонах пользователя (при необходимости) во вкладке «Дополнительные атрибуты» (рис. 2.42).

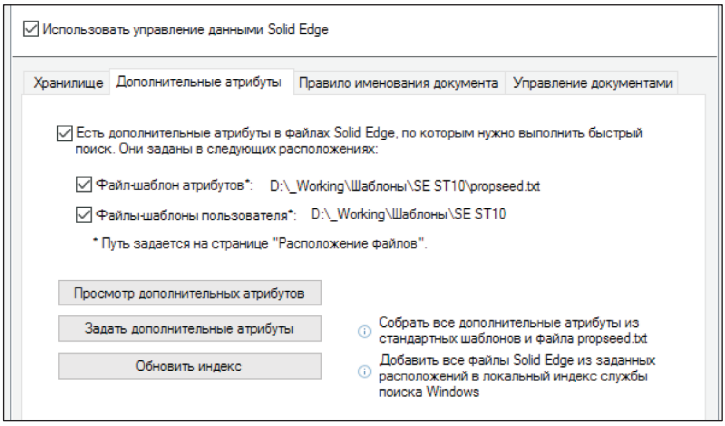


Рис. 2.42. Дополнительные атрибуты

Далее выполнить следующие действия:

– отобразить список дополнительных атрибутов;

– проконтролировать корректность добавления дополнительных атрибутов;

– обновить индекс Windows.

Содержание отчета

1. Скриншоты финальных моделей и результирующие файлы моделей в электронном виде.
2. Исходные данные и результаты моделирования в печатном и электронном виде.
3. Выводы по работе.
4. Ответы на контрольные вопросы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Где может располагаться папка хранилища?
2. Где записан путь к папке хранилища?
3. Каковы источники получения дополнительных атрибутов?
4. Как добавить дополнительные атрибуты и обновить индекс Windows?

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 8. УПРАВЛЕНИЕ ПРОЕКТНЫМИ ДАННЫМИ: ЗАДАНИЕ ПРАВИЛ ИМЕНОВАНИЯ ДОКУМЕНТА И ПРАВИЛ УПРАВЛЕНИЯ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ДОКУМЕНТОВ

Цель работы — научиться задавать правила автоматического присвоения имен и номеров ревизий документов, а также определять состав используемых статусов и упорядочивать расположение документов в процессе управления проектными данными.

Задание 1

Задать правила именования документов и назначения номеров ревизий:

– во вкладке «Правило именования документа» (рис. 2.43) включить опцию «Автоматически назначить имена...»;

– задать и проверить формулу именования документа в диалоговом окне сохранения документа (рис. 2.44);

– задать схему нумерации ревизий;

– убедиться, что номер документа и ревизия формируют имя файла;

– убедиться, что проверка на существование файла с такими же данными происходит автоматически;

– убедиться, что формула имени документа отображается в «Навигаторе сборки»;

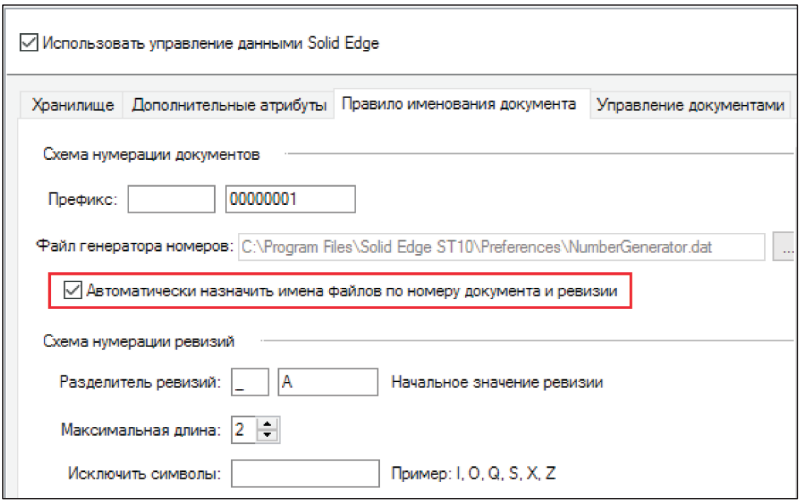


Рис. 2.43. Вкладка «Правило именования документов»

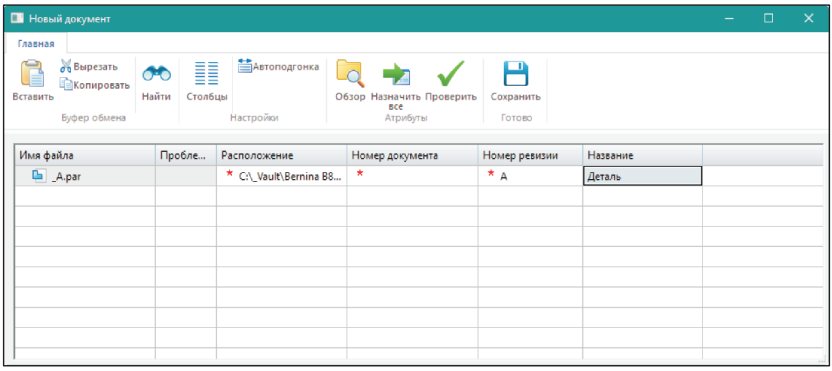


Рис. 2.44. Диалоговое окно сохранения документа под новым именем

– расположить файл генератора номеров numbergenerator.dat в сетевой папке с правом на запись для всех пользователей.

Задание 2

Задать состав используемых статусов и правила управления жизненным циклом документов:

– включить необходимые для использования статусы документов во вкладке «Управление документами» (рис. 2.45);

– задать пути расположения для предварительно утвержденных (рабочих), утвержденных и устаревших документов (задание статуса «Устаревший» требует явного действия со стороны контролера документов);

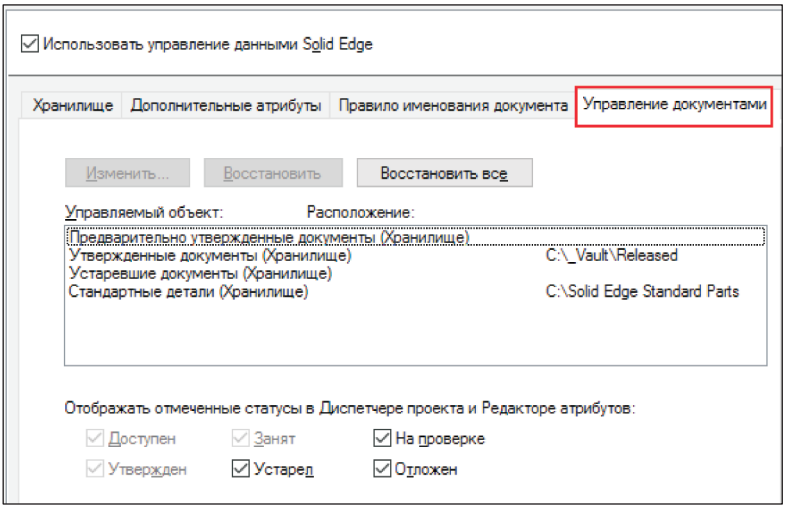


Рис. 2.45. Вкладка «Управление документами»

– задать расположение стандартных деталей (позволяет исключить стандартные детали из операций клонирования/создания новых ревизий в «Диспетчере проекта»).

Содержание отчета

1. Скриншоты финальных моделей и результирующие файлы моделей в электронном виде.
2. Исходные данные и результаты моделирования в печатном и электронном виде.
3. Выводы по работе.
4. Ответы на контрольные вопросы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как изменить формат именования документа?
2. Если отключить автоматическое именование документов, изменятся ли наименования ранее сформированных по правилам документов?
3. Какие статусы документов следует отметить для последующего использования?
4. Какие статусы присваиваются стандартным изделиям?

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 9. УПРАВЛЕНИЕ ПРОЕКТНЫМИ ДАННЫМИ: ОРГАНИЗАЦИЯ И ВЫПОЛНЕНИЕ ПОИСКА

Цель работы — освоить задание поисковых данных и выполнение поиска в «Проводнике» Windows и средствами конструкторской САПР в процессе управления проектными данными.

Задание

Организовать поиск документов по атрибутам в «Проводнике» Windows и средствами САПР, выполнив следующие действия:

– найти в «Проводнике» Windows все документы с вхождением заданной части строки в значения проиндексированных атрибутов;

– найти в САПР все документы с вхождением заданных частей строк в значения соответствующих проиндексированных атрибутов (составной критерий поиска);

– выполнить предпросмотр одного из найденных документов;

– вызвать редактор атрибутов и отредактировать значения выбранных атрибутов одного из найденных документов;

– найти документы, связанные с найденным;

– открыть найденный документ для редактирования в САПР.

Теоретическая часть

Традиционно в строку поиска вводится поисковая строка в виде значения проиндексированного атрибута или части такого значения с использованием маски. Например, на рис. 2.46 показан результат поиска вхождения в атрибут «Название» слова “clamp”.

В среде САПР поиск выполняется встроенными средствами. При задании области поиска важно обращать внимание на цвет папки в окне: зеленый

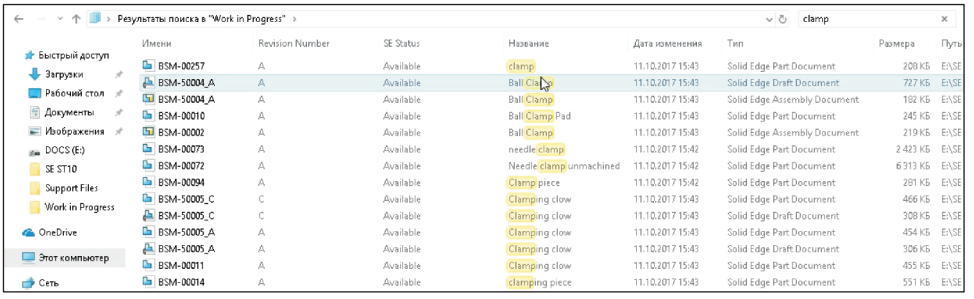


Рис. 2.46. Результат поиска вхождения в атрибут «Название» слова “clamp”

цвет сигнализирует о том, что область осуществления поиска находится внутри хранилища и проиндексирована, красный — о том, что путь осуществления поиска располагается за пределами хранилища, местоположение не проиндексировано и поиск будет выполняться медленно (рис. 2.47).

Критерий поиска может быть составным и включать различные атрибуты. Результат поиска по критерию вхождения в атрибут «Название» слова “clamp” приведен на рис. 2.48. В окне результатов поиска можно вызвать

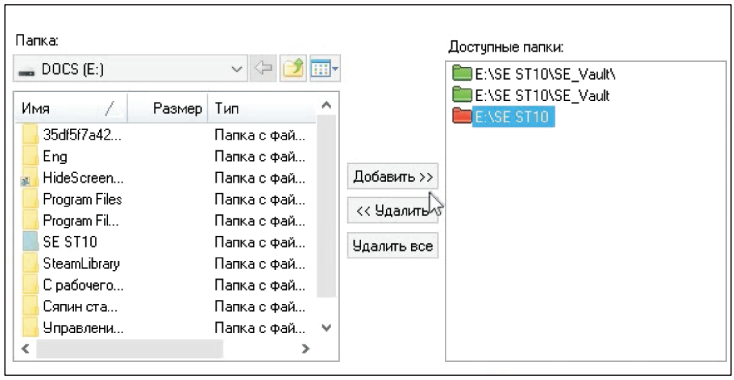


Рис. 2.47. Включение путей в область поиска:

зеленый — путь располагается в пределах хранилища; красный — путь находится за пределами хранилища

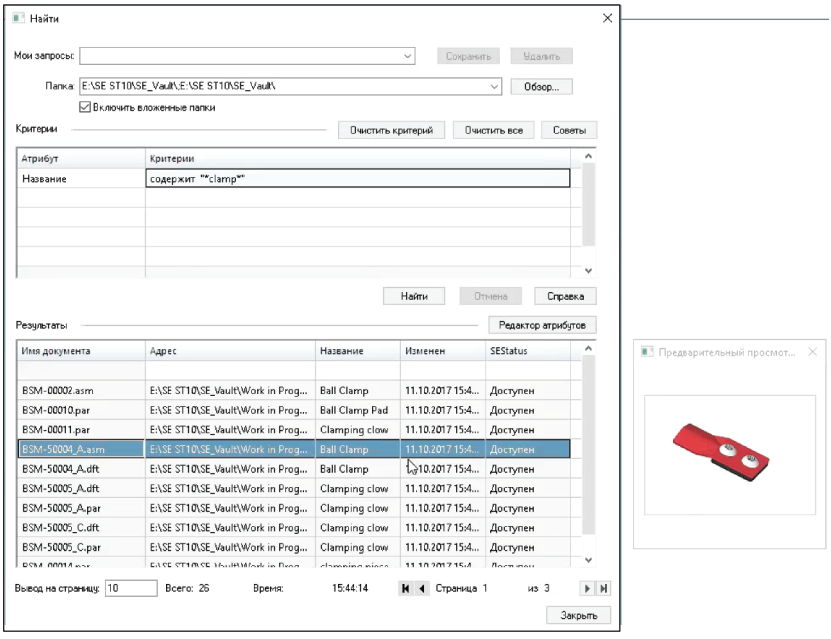


Рис. 2.48. Результат поиска с предпросмотром выбранного документа

редактор атрибутов и отредактировать значения атрибутов найденных документов. Также доступен предпросмотр выбранного документа, его можно открыть для редактирования в САПР, в «Диспетчере проекта», просмотреть его атрибуты, найти связанные документы (см. рис. 2.48).

Содержание отчета

1. Краткий конспект теоретической части.
2. Исходные данные в печатном и электронном виде.
3. Скриншоты результатов поиска.
4. Выводы по работе.
5. Ответы на контрольные вопросы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как выполнить поиск документов по шаблону средствами «Проводника» Windows?
2. Можно ли средствами SE одновременно задавать несколько масок атрибутов для поиска?
3. Что нужно сделать, чтобы открыть в SE найденный поиском документ?
4. Как выполнить предварительный просмотр найденного документа?

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 10. УПРАВЛЕНИЕ ПРОЕКТНЫМИ ДАННЫМИ: РАБОТА С РЕВИЗИЯМИ

Цель работы — освоить работу над созданием ревизий, сохранением документов под новыми именами, поиском связанных документов, заменой документов на новые ревизии, блокировкой документа от внесения изменений в процессе управления проектными данными.

Задание 1

Создать новую неутвержденную ревизию документа:
– выполнить команду «Ревизии»;
– нажать кнопку «Создать»;
– проверить корректность параметров назначения имени документа и номера ревизии;
– найти связанные документы, включить для них опцию создания ревизий;
– нажать кнопку «Сохранить»;
– вернуть обратно утвержденную ревизию.

Теоретическая часть

Рассмотрим непосредственно процесс управления проектными данными. Инструментарий управления данными размещен на одноименной вкладке (рис. 2.49).

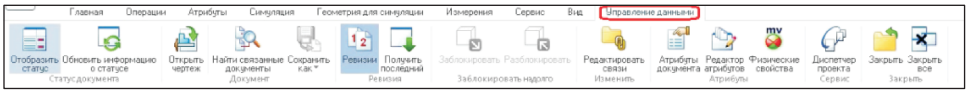


Рис. 2.49. Содержимое вкладки «Управление данными»

Действие по созданию новой ревизии документа выполняется с помощью команды «Ревизии». Если включено автоматическое присвоение наименований документам, система сама сформирует новое имя ревизии в соответствии с заданным правилом (рис. 2.50). При нажатии кнопки «Создать» появится окно с автоматически назначенными наименованием и номером создаваемой ревизии документа. Корректность назначения можно проверить, нажав соответствующую кнопку. Если у документа есть связанные документы (например, чертежи), будет автоматически предложено также создать их ревизию (рис. 2.51). После нажатия кнопки «Сохранить» ревизия будет создана и появится в «Навигаторе сборки». Если рядом с наименованием ревизии стоит красная галочка (значки статуса документа отображаются

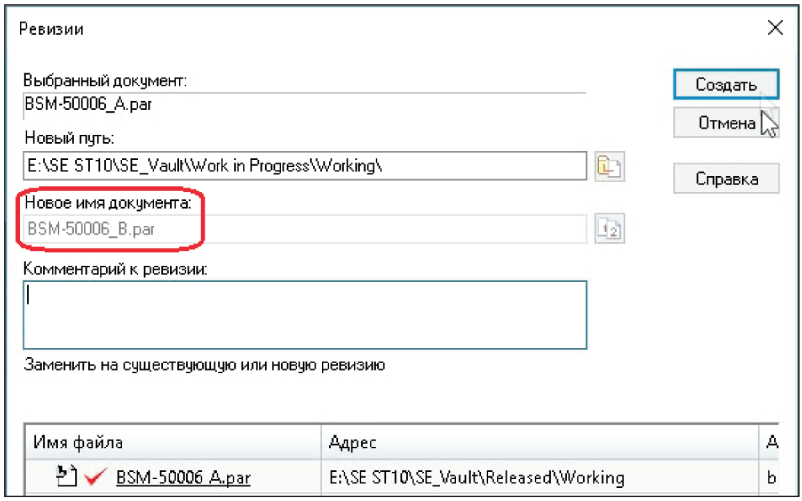


Рис. 2.50. Окно создания новой ревизии B документа

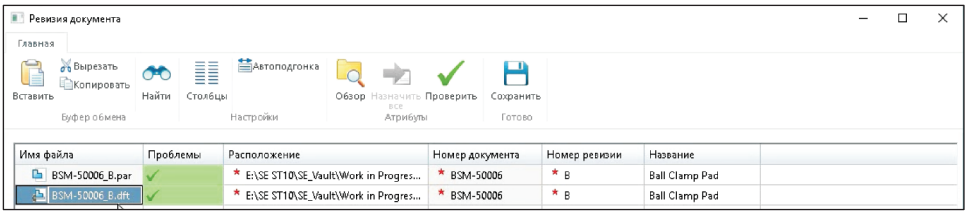


Рис. 2.51. Окно «Ревизия документа»

слева от его наименования в «Навигаторе сборки» и окнах), это означает, что данная ревизия утверждена. В нашем примере мы создали неутвержденную ревизию B ранее уже утвержденного документа A. Активная в данный момент ревизия подчеркнута в окне «Ревизии». Чтобы вернуть утвержденную ревизию обратно, следует в окне «Ревизии» в контекстном меню утвержденной ревизии выполнить команду «Заменить» (рис. 2.52). Воспользовавшись этим же контекстным меню, можно посмотреть образец документа и найти связанные документы.

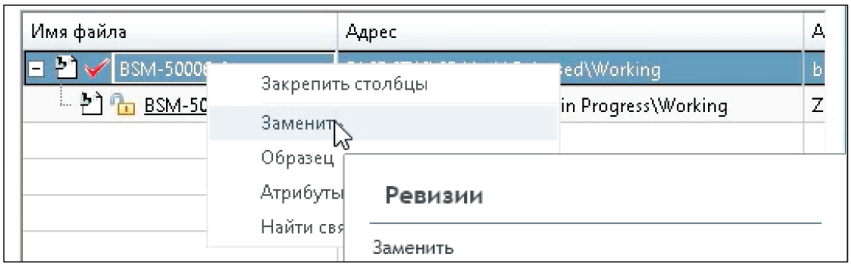


Рис. 2.52. Возврат утвержденной ревизии A документа

Задание 2

Сохранить документ под новым именем:
– выполнить команду «Сохранить как...»;
– нажать кнопку «Назначить все»;
– нажать кнопку «Проверить»;
– проверить корректность назначения номера документа, номера ревизии и имени файла.

Теоретическая часть

Для выполнения задачи необходимо воспользоваться командой «Сохранить как...» — появится окно «Новый документ» для назначения имени файла, номера документа и номера ревизии. Изначально эти параметры не назначены (рис. 2.53).

При нажатии кнопки «Назначить все» данные параметры формируются автоматически в соответствии со схемой именования и текущим номером генератора (рис. 2.54). Нажатие кнопки «Проверить» позволяет проверить целостность (уникальность и непротиворечивость) имени документа. Новый номер документа отображается в «Навигаторе сборки».

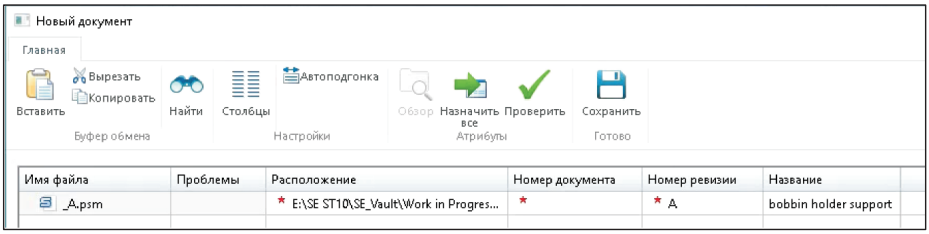


Рис. 2.53. Окно «Новый документ»

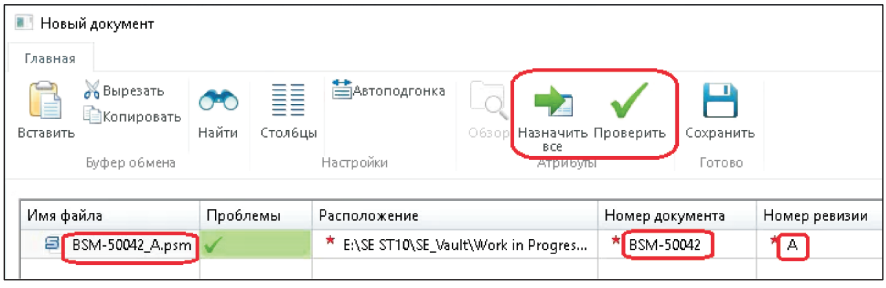


Рис. 2.54. Окно «Новый документ» с автоматически назначенными параметрами и выполненной проверкой

Задание 3

Проверить наличие ревизий у документа и заменить выбранные документы на новые ревизии:

– выполнить команду «Получить последний»;
– включить опцию «Только утвержденные»;
– включить опцию «Показать в дереве»;
– заменить все текущие ревизии выбранных документов на новые.

Теоретическая часть

Команда «Получить последний» позволяет найти все документы сборки, для которых существуют новые ревизии, при этом документы, для которых таких ревизий не найдено, становятся полупрозрачными (фантомными, их показ можно полностью отключить в меню команды) (рис. 2.55).

С помощью опции «Только утвержденные» можно отдельно выделить документы, для которых есть новые утвержденные ревизии.

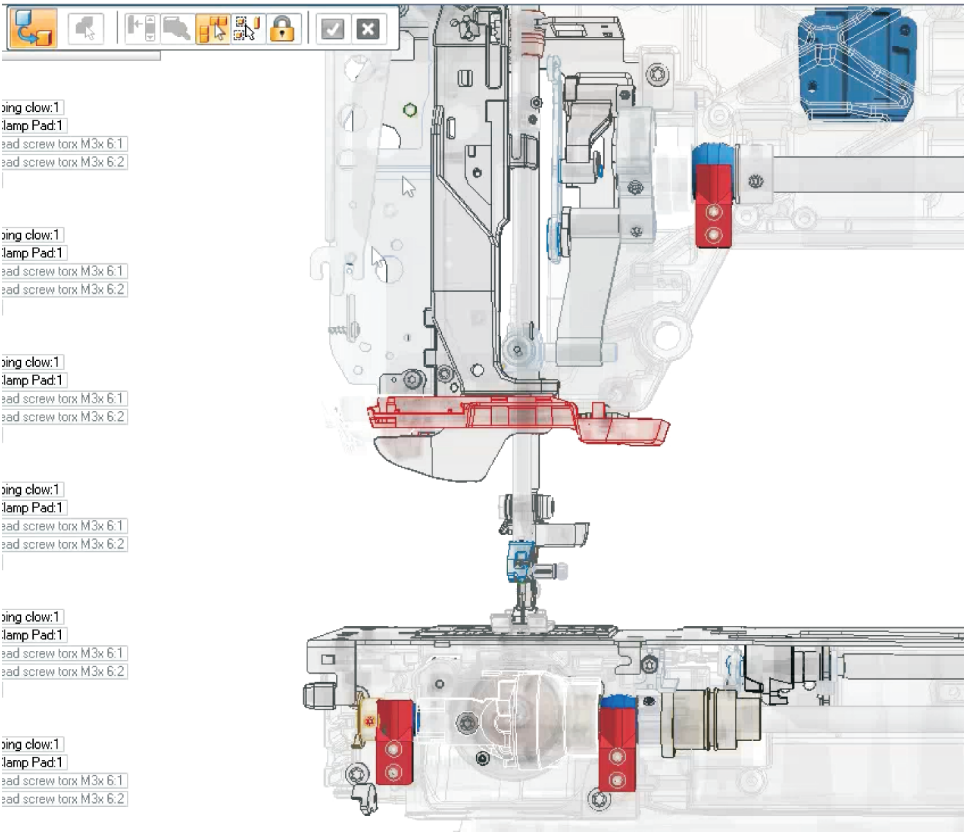


Рис. 2.55. Выделение документов с существующими новыми ревизиями с помощью команды «Получить последний»

В «Навигаторе сборки» эти документы обозначены значком . Опция «Показать в дереве» выделяет выбранные детали также и в «Навигаторе сборки». Далее при нажатии кнопки подтверждения все текущие ревизии выбранных деталей будут заменены на новые (утвержденные).

Задание 4

Найти документы, связанные с данным документом:
– выбрать документ;
– выполнить команду «Найти связанные документы»;
– просмотреть список найденных связанных документов;
– открыть один из связанных документов (например, чертеж).

Теоретическая часть

Для того чтобы найти документы, связанные с данным документом, необходимо выбрать его в «Навигаторе сборки» или графическом окне и воспользоваться командой «Найти связанные документы». Например, на рис. 2.56 показан результат со связанным документом — чертежом.

Открыть чертеж можно с помощью контекстного меню в этом же окне либо воспользоваться для этого отдельной командой «Открыть чертеж», предварительно выбрав документ-источник. Если открываемая ревизия чертежа утверждена, будет выдано предупреждение (рис. 2.57). Для редак-

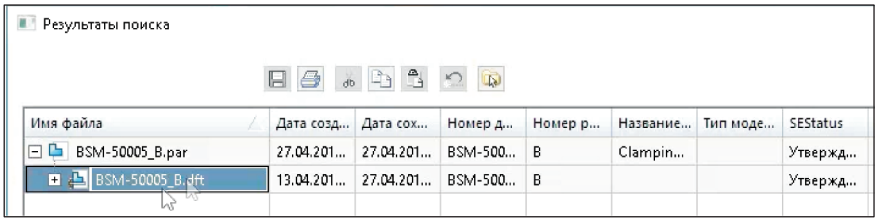


Рис. 2.56. Найденный связанный документ — чертеж

Рис. 2.57. Сообщение об ограничениях на редактирование утвержденного чертежа

тирования такого чертежа следует сохранить его под другим именем, создать ревизию либо запросить доступ для записи.

Задание 5

Заменить все документы в сборке на их новые ревизии:
– отобразить признак наличия у выбранного документа новой ревизии;
– выполнить команду «Ревизии»;
– выполнить команду «Заменить»;
– выполнить замену всех экземпляров документа;
– просмотреть результаты замены.

Теоретическая часть

Информация о наличии у детали новой ревизии появляется при наведении курсора мыши на деталь в «Навигаторе сборки» (рис. 2.58).

Далее в контекстном меню новой ревизии в окне «Ревизии» следует выполнить команду «Заменить» (рис. 2.59), и ревизия детали будет заменена на новую.

Если в сборке присутствует несколько экземпляров заменяемых деталей, будет выдано окно с запросом на дальнейшие действия с экземплярами (рис. 2.60): заменить только выбранный экземпляр, все экземпляры на текущем уровне сборки либо во всей сборке.

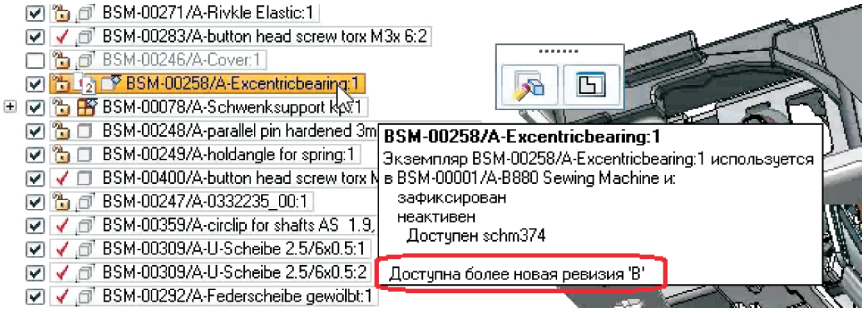


Рис. 2.58. Информация о наличии новой ревизии детали

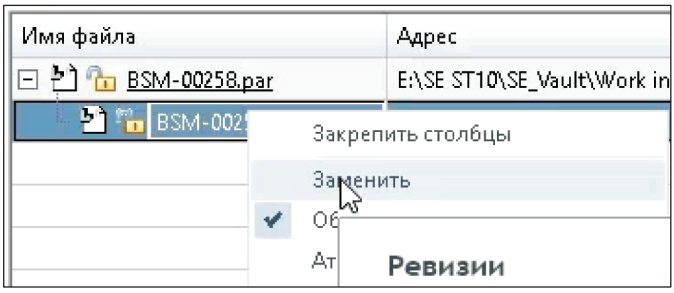


Рис. 2.59. Замена ревизии детали на новую

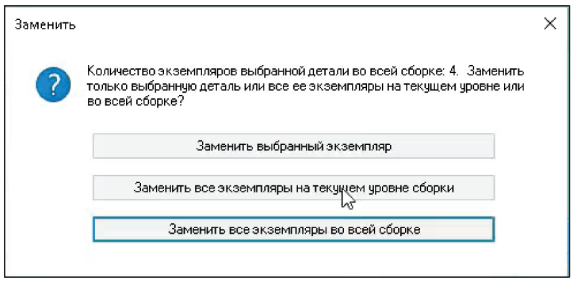


Рис. 2.60. Окно запроса в ситуации, когда в сборке присутствует несколько экземпляров заменяемой детали

Задание 6

Заблокировать документ от внесения изменений:

– выполнить команду «Заблокировать» для выбранного документа;

– проследить за изменением отображения документа в «Навигаторе сборки» и присвоением статуса «Занят».

Теоретическая часть

Команда «Заблокировать» защищает выбранный документ от внесения изменений другими пользователями, он выделяется в «Навигаторе сборки» значком и цветом, и у него устанавливается статус «Занят» (рис. 2.61).

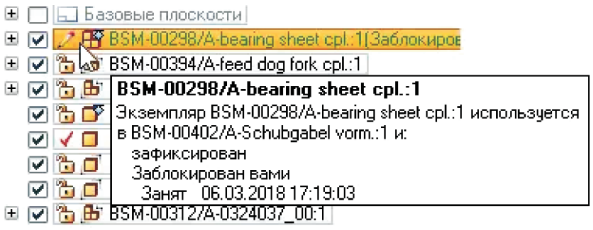


Рис. 2.61. Результат блокировки документа

Обратное действие выполняется с помощью команды «Разблокировать».

Содержание отчета

1. Краткий конспект теоретической части.
2. Исходные данные в печатном виде.
3. Скриншоты результатов работы и результирующие файлы моделей в электронном виде.
4. Выводы по работе.
5. Ответы на контрольные вопросы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как выполнить новую ревизию утвержденного документа?
2. Формируются ли ревизии связанных документов при создании новой ревизии документа?
3. Каким образом осуществляется назначение нового номера ревизии?
4. Как найти все документы сборки, для которых существуют новые ревизии?

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 11. УПРАВЛЕНИЕ ПРОЕКТНЫМИ ДАННЫМИ: ВЫПОЛНЕНИЕ ГРУППОВЫХ ОПЕРАЦИЙ НАД ДАННЫМИ ПРОЕКТА

Цель работы — освоить выполнение групповых операций нахождения дубликатов, контролируемого перемещения, переименования, замены, сохранения документов, создания их ревизий и присвоения им статусов в «Диспетчере проекта» в процессе управления проектными данными.

Задание

Выполнить групповые операции над документами в составе проекта:

– запустить «Диспетчер проекта»;

– найти дубликаты документов, просмотреть результаты, выполнить при необходимости замену документов;

– выполнить контролируемое перемещение набора документов в новое местоположение с сохранением связей с помощью команды «Переместить»;

– переименовать выбранные документы с помощью команды «Переименовать»;

– заменить выбранные документы с помощью команды «Заменить»;

– сохранить выбранные документы под новыми именами с помощью команды «Сохранить как»;

– создать ревизию выбранных документов с помощью команды «Ревизия»;

– назначить статус «Утвержден» для выбранных документов с помощью команды «Утвердить»;

– назначить статус «Устарел» для выбранных документов с помощью команды «Устарел»;

– просмотреть и проанализировать результаты работы.

Теоретическая часть

Для выполнения операций над атрибутами документа следует с помощью команды «Атрибуты документа» открыть соответствующее окно и запустить «Редактор атрибутов» с помощью одноименной команды. В окне «Редактор атрибутов» (рис. 2.62) можно комплексно просматривать и изменять значения атрибутов в столбцах, в которых внесение изменений разрешено (фон таких столбцов белый).

Групповые операции с документами проекта удобнее всего выполнять в специальном приложении «Диспетчер проекта». Его можно запустить двумя способами: выбрать в Проводнике Windows команду контекстного меню документа «Открыть в Диспетчере проекта» либо выполнить в САПР

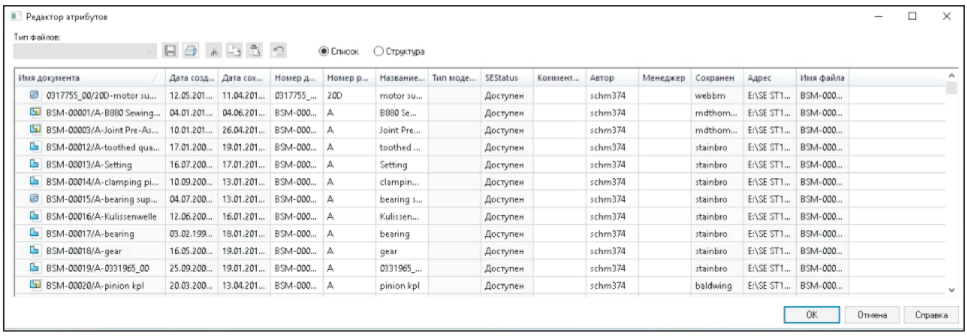


Рис. 2.62. Окно «Редактор атрибутов»

команду «Диспетчер проекта» в окне текущей открытой сборки. Окно Solid Edge при этом закрывается, а «Диспетчер проекта» открывается в отдельном окне (рис. 2.63).

В данном окне в табличном виде представлены компоненты сборки со своими значениями атрибутов. Файлы для отображения можно выбирать по маске и типу.

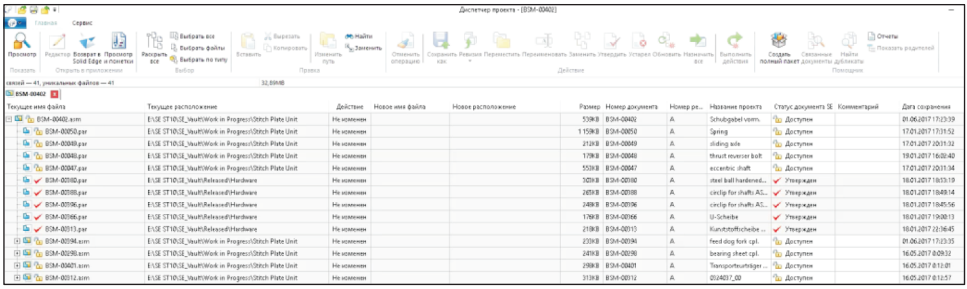


Рис. 2.63. Окно «Диспетчер проекта»

Окно «Диспетчер проекта» позволяет управлять расположением и статусами документов, собирать полный пакет проекта, осуществлять поиск связанных документов и дубликатов.

Для того чтобы найти дубликаты документов, необходимо выделить набор документов для поиска и выполнить команду «Найти дубликаты». Дубликат — это документ с идентичным именем файла и/или номером документа. В окне на рис. 2.64 для документа с именем BSM-00047.par найден дубликат. Можно оценить степень соответствия, сравнив документы в окне предварительного просмотра и по атрибутам, а также по совпадению геометрии в отдельном столбце окна по версии САПР, в которой создан документ, и по присоединенным чертежам. Если найденный дубликат на самом деле является оригиналом, можно заменить исходный документ на него, нажав кнопку «Заменить».

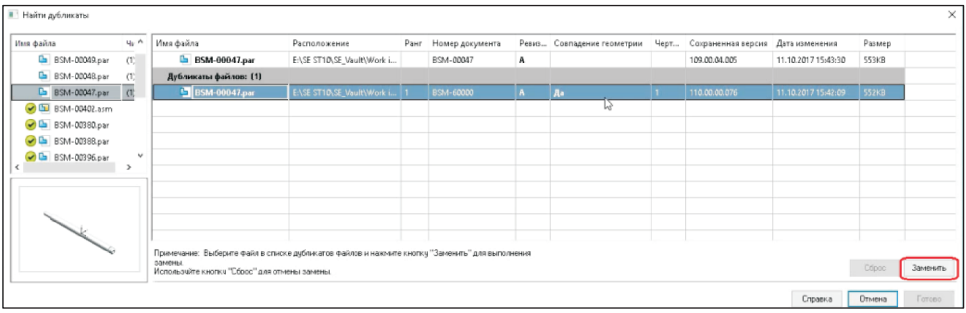


Рис. 2.64. Окно с результатами поиска дубликатов документов

Следует отметить, что в окне «Диспетчер проекта» любое действие сначала планируется, а непосредственно выполняется (возможно, совместно с другими накопленными запланированными действиями) с помощью специальной команды «Выполнить действия». Предварительный результат выполнения появляется в окне «Диспетчер проекта» (рис. 2.65). Кнопка «Отменить операцию» отменяет запланированные действия.

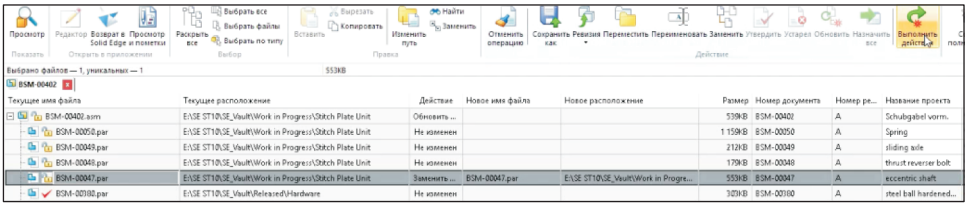
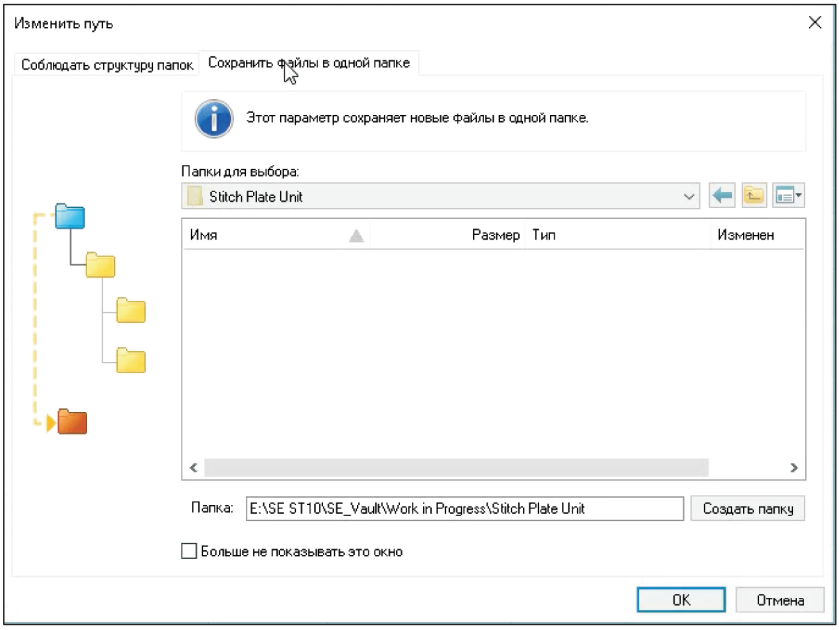


Рис. 2.65. Действие по замене документа

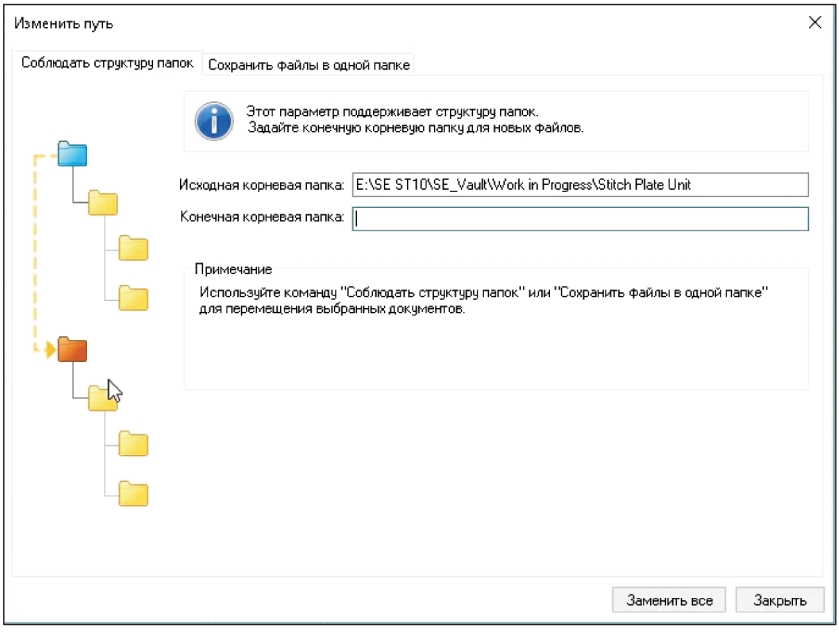
Для того чтобы выполнить контролируемое перемещение документа или набора документов в новое местоположение с сохранением связей, следует выбрать документы и воспользоваться командой «Переместить». Перемещать документы можно с сохранением структуры папок или с сохранением всех файлов в одной папке, вариант выбирается на соответствующих вкладках окна «Изменить путь» (рис. 2.66). После нажатия кнопки OK в данном окне будут запланированы действия, которые можно реализовать с помощью описанной ранее команды «Выполнить действия».

Сходным образом можно переименовывать (команда «Переименовать») и заменять документы (команда «Заменить»), сохранять их под новым именем (команда «Сохранить как») и создавать ревизии (команда «Ревизия»). При переименовании конструктор самостоятельно должен отслеживать корректность и непротиворечивость нового присваиваемого имени документа. Команда «Назначить все» присваивает документу номер и номер ревизии при сохранении его под новым именем.

С помощью «Диспетчера проекта» можно также утверждать документы (присваивать статус «Утвержден») и присваивать статус «Устарел». Это

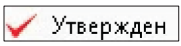


а



б

Рис. 2.66. Окно «Изменить путь»: с опцией сохранения всех файлов в одной папке (*а*); с опцией сохранения структуры папок (*б*)

выполняется соответственно с помощью команд «Утвердить» и «Устарел». После утверждения документ также контролируемо перемещается в назначенную папку утвержденных документов. Если такой папки физически не существует, будет выдан запрос на ее создание. Назначенные статусы 

и

отображаются в столбце «Статус документа SE» «Диспетчера проекта».

Содержание отчета

1. Краткий конспект теоретической части.
2. Исходные данные в печатном виде.
3. Скриншоты результатов работы и результирующие файлы моделей в электронном виде.
4. Выводы по работе.
5. Ответы на контрольные вопросы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Можно ли сохранить целостность связей при перемещении документов в Проводнике Windows?
2. Как осуществить контролируемое изменение пути расположения проекта?
3. Как найти и обработать дубликаты документов в составе проекта?
4. В чем удобство использования редактора атрибутов?

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 12. УПРАВЛЕНИЕ ПРОЕКТНЫМИ ДАННЫМИ: СОЗДАНИЕ ПОЛНОГО ПАКЕТА ПРОЕКТА

Цель работы — научиться собирать полный пакет данных проекта без потери их целостности для последующей передачи в другие подразделения предприятия, субподрядчикам, заказчику и пр.

Задание

Собрать полный пакет документов проекта с сохранением целостности и связей между документами:

– запустить «Диспетчер проекта»;

– выполнить команду «Создать полный пакет»;

– настроить соблюдение структуры папок, включение связанных чертежей и результатов моделирования;

– настроить сбор проекта в zip-архив;

– проконтролировать правильность открытия сборки верхнего уровня из собранного пакета.

Теоретическая часть

Часто возникает необходимость собрать все документы проекта из разных местоположений в одну папку либо zip-архив, например для передачи заказчику или подрядчику (рис. 2.67). Данное действие выполняется

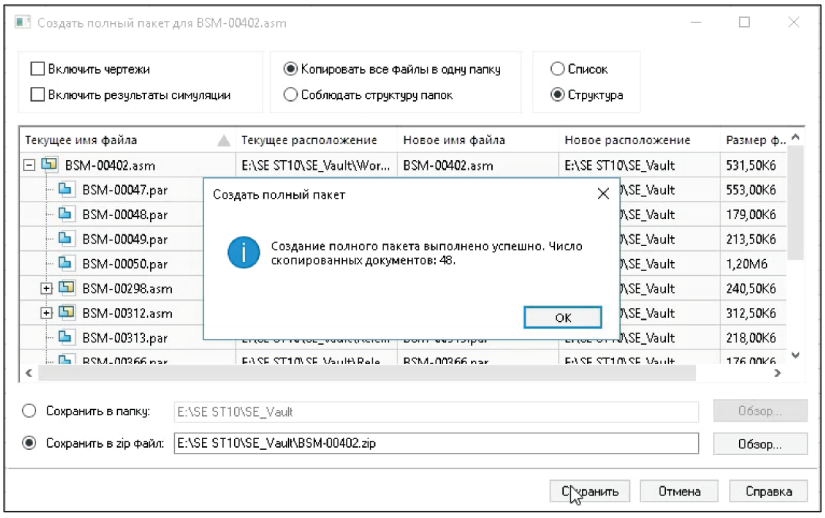


Рис. 2.67. Создание полного пакета документов проекта

с помощью команды «Создать полный пакет» в «Диспетчере проекта». Как и в случае изменения пути, можно скопировать все документы проекта в одну папку либо соблюсти структуру папок, включить связанные чертежи и результаты моделирования. Сбор пакета проводится с сохранением целостности данных без потери связей между составляющими проекта.

После нажатия кнопки «Сохранить» в случае успешного создания полного пакета появится окно с количеством сохраненных документов.

После завершения всех необходимых действий в «Диспетчере проекта» осуществляется обратный переход в режим редактирования сборки в САПР с помощью команды «Возврат в Solid Edge». Система предупреждает об отмене всех запланированных на данный момент и еще не выполненных действий. «Диспетчер проекта» закрывается, и работа в САПР может быть продолжена.

Содержание отчета

1. Краткий конспект теоретической части.
2. Исходные данные в печатном виде.
3. Собранный пакет проекта в виде zip-архива.
4. Выводы по работе.
5. Ответы на контрольные вопросы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В каких случаях необходим полный пакет документов проекта?
2. Можно ли включать в полный пакет дополнительные документы, не относящиеся к стандартным документам SE?
3. Как создать полный архив проекта?
4. Можно ли сохранить структуру папок проекта при создании полного пакета?

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 13. МОДЕЛИ ИДЕАЛИЗИРОВАННЫХ КОМПОНЕНТОВ: 2R-МОДЕЛИ

Цель работы — научиться применять идеализированные 2R-модели электронных компонентов при моделировании тепловых режимов ЭА.

Задание

Создать идеализированную 2R-модель электронного компонента — интегральной микросхемы (конкретную микросхему задает преподаватель):

– создать идеализированную модель интегральной микросхемы в виде параллелепипеда с размерами корпуса;

– выбрать источник «2R-модель»;

– выбрать верхнюю поверхность параллелепипеда, проследить за правильностью назначения компонента;

– выбрать необходимую 2R-модель из инженерной базы данных;

– назначить тепловую рассеиваемую мощность;

– назначить температуру корпуса в качестве отслеживаемой;

– назначить температуру корпуса в виде цели;

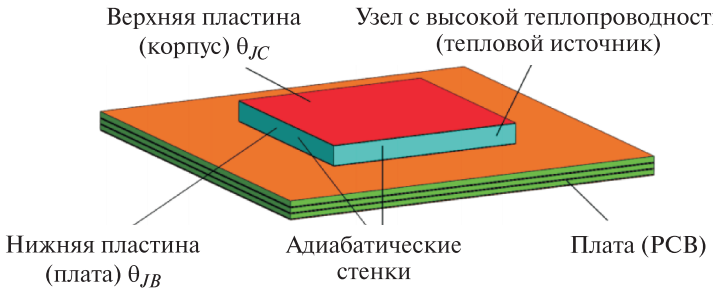
– выполнить анализ теплового режима изделия с участием созданной 2R-модели (модель изделия задает преподаватель).

Теоретическая часть

Одними из самых сложных по структуре компонентов в модулях ЭА являются микросхемы различных вариантов конструктивного исполнения. Для идеализации этих компонентов предусмотрено создание специальных упрощенных двухрезисторных моделей. При их использовании электронный модуль заменяется компактной моделью, которая геометрически представляет собой параллелепипед, установленный на печатную плату.

Упрощенный компонент, показанный на рис. 2.68, состоит из трех частей: теплового источника, платы и корпуса, которые соединяются посредством двух тепловых сопротивлений (θ_{JB} между источником и платой и θ_{JC} между источником и верхней поверхностью модуля). Настраивая значения этих сопротивлений, можно моделировать любой компонент. В инженерной базе системы предусмотрено большое количество 2R-моделей для большинства используемых электронных компонентов.

Для демонстрации возможности замены реалистичной модели электронного компонента на его упрощенное 2R-представление без потери качества моделирования нагрева проведем сравнительный анализ тепловых расчетов для двух случаев.



Представление 2R модели в FloEFD

Рис. 2.68. Структура 2R-модели

В качестве примера рассмотрим типовую микросхему в корпусе SOP-8 (рис. 2.69). Структура модели соответствует структуре реальной микросхемы в корпусе SOP-8, включая выводы микросхемы, внутренние соединительные проводники, кристалл и подложку. Для каждой части определен соответствующий ей материал.

Упрощенная модель представляет собой параллелепипед с габаритами, соответствующими габаритам микросхемы (рис. 2.70).

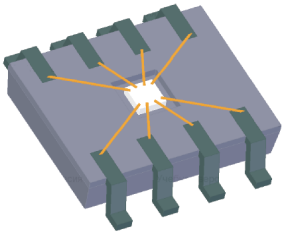
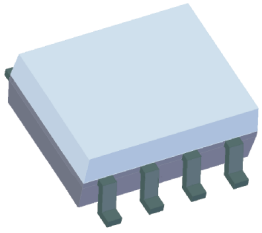


Рис. 2.69. Полная модель интегральной микросхемы в корпусе SOP-8



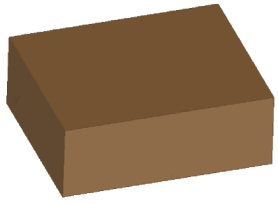


Рис. 2.70. Упрощенная модель микросхемы в корпусе SOP-8

Расположим обе модели на плате достаточно большого размера и разнесем исследуемые элементы на значительное расстояние, чтобы они не влияли друг на друга (рис 2.71).

Создадим новый проект с помощью окна «Мастер проекта». Включим модули теплопроводности в твердых телах. Это позволит учесть теплопередачу за счет кондуктивного теплообмена, что необходимо для применения 2R-моделей (рис. 2.72).

После создания проекта необходимо задать материалы всех элементов, включая элементы внутренней структуры микросхемы (рис. 2.73).

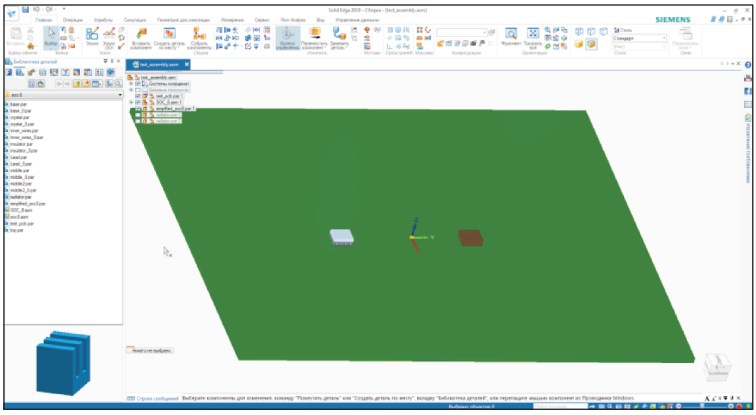


Рис. 2.71. Печатная плата с упрощенной и полной моделями микросхемы

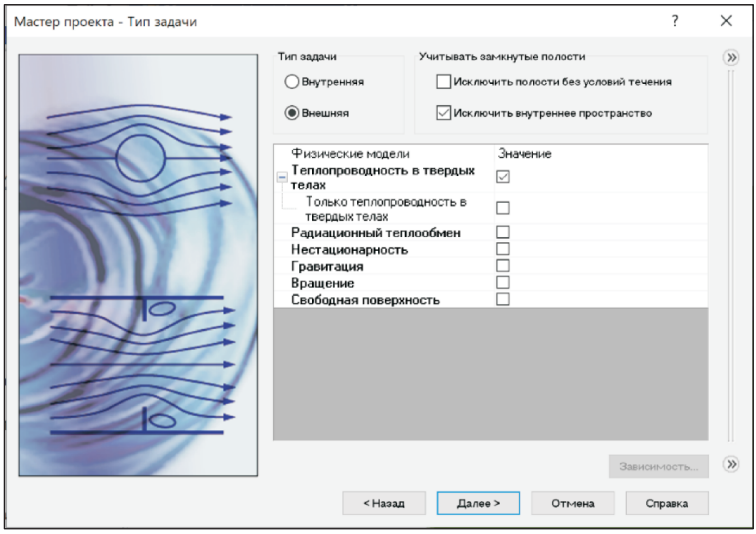


Рис. 2.72. Назначение типа задачи и физических моделей

Далее необходимо задать источники нагрева. Для реалистичной модели назначим кристалл объемным источником нагрева (рис. 2.74). Остальные элементы микросхемы будут являться лишь проводниками тепла.

Для упрощенной модели следует применить специальный источник «2R-модель». Именно он позволяет придавать элементу свойства реальной микросхемы. В открывшемся окне выбора (рис. 2.75) следует выбрать верхнюю поверхность параллелепипеда, задать тип компонента, а также назначить мощность тепловыделения. Необходимые тепловые сопротивления назначатся автоматически. В этом случае нет необходимости задавать какие-либо материалы.

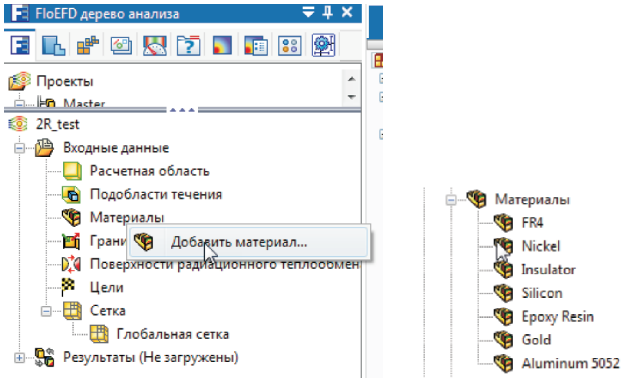


Рис. 2.73. Назначение материалов

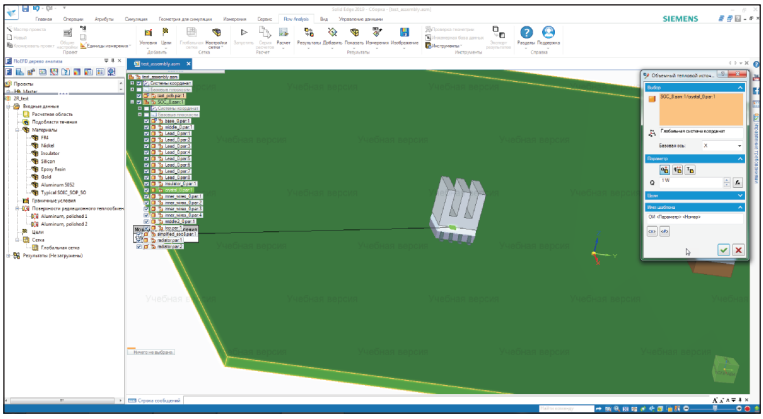


Рис. 2.74. Назначение теплового источника

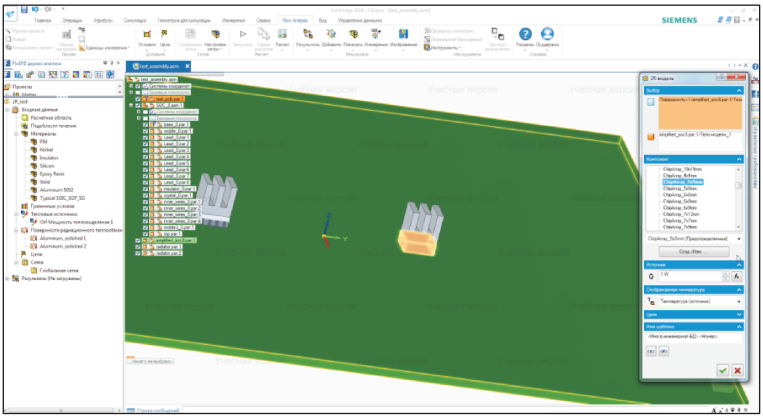


Рис. 2.75. Определение параметров 2R-модели

Тепловые сопротивления в данном проекте имеют значения, приведенные на рис. 2.76.

Выполним расчет (рис. 2.77) и сравним результаты (рис. 2.78).

Как видно из результатов расчета (см. рис. 2.78), температура нагрева радиатора и платы вокруг элемента в обоих случаях практически одинаковая,

Рис. 2.76. Свойства 2R-модели

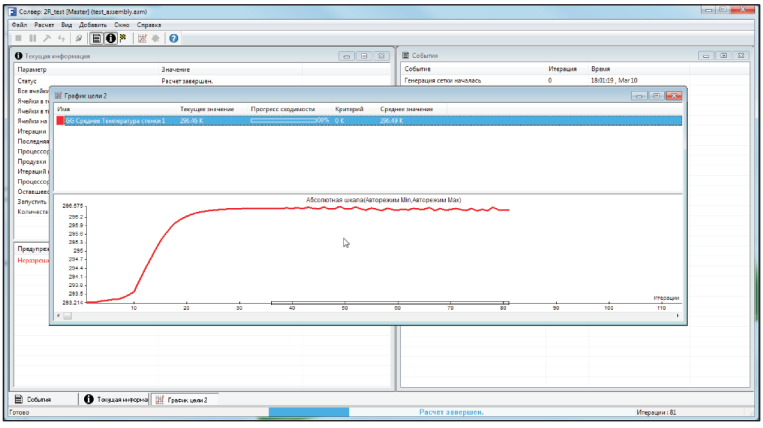


Рис. 2.77. Прогресс решения задачи

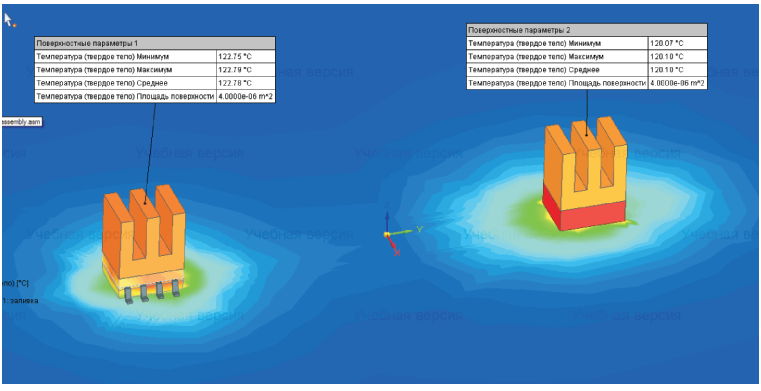


Рис. 2.78. Отображение результатов расчета

что говорит о достоверности результатов, получаемых с помощью 2R-модели, и возможности использования таких моделей для оптимизации расчетов.

Содержание отчета

1. Краткий конспект теоретической части.
2. Скриншоты финальных моделей и результирующие файлы моделей в электронном виде.
3. Исходные данные и результаты анализов в печатном и электронном виде.
4. Выводы по работе.
5. Ответы на контрольные вопросы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие преимущества дает применение 2R-моделей вместо моделей реальных компонентов?
2. Какие теплофизические характеристики необходимо задать при использовании 2R-моделей?
3. Где хранятся готовые 2R-модели?
4. Возможно ли создание пользовательской 2R-модели?

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 14. МОДЕЛИ ИДЕАЛИЗИРОВАННЫХ И РЕАЛЬНЫХ КОМПОНЕНТОВ: ПРИНУДИТЕЛЬНОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ С ПОМОЩЬЮ ВЕНТИЛЯТОРОВ

Цель работы — научиться применять идеализированные и создавать реальные модели вентиляторов при моделировании тепловых режимов ЭА.

Задание 1

Настроить и применить идеализированную модель вентилятора для осуществления принудительного охлаждения:

– определиться с типом вентилятора (входной, выходной, внутренний);

– выбрать поверхность для задания граничного условия вентилятора;

– выбрать вентилятор с требуемой кривой объемного расхода воздуха из инженерной базы данных;

– проконтролировать и при необходимости задать дополнительные граничные условия (температуру, давление);

– проконтролировать правильность назначения вентилятора в модели;

– выполнить анализ теплового режима изделия с участием созданной модели вентилятора (модель изделия задает преподаватель).

Задание 2

Настроить и применить реальную модель вентилятора для осуществления принудительного охлаждения:

– построить область вращения в модели реального вентилятора;

– задать в настройках проекта физическую модель «Вращение» с опцией «Усреднение»;

– назначить область вращения;

– задать направление и скорость вращения;

– при необходимости задать граничные условия — реальные неподвижные стенки с опцией «Статор»;

– назначить материал деталей вентилятора;

– проконтролировать правильность назначения вентилятора в модели;

– выполнить анализ теплового режима изделия с участием созданной модели вентилятора (модель изделия задает преподаватель).

Теоретическая часть

Охлаждение с помощью вентиляторов — это самый распространенный способ активного охлаждения устройства. Вентиляторы позволяют проектировать устройства с гораздо большим тепловыделением при меньших габаритах. Такие устройства не способны самостоятельно отводить тепло от

источников нагрева в достаточном объеме, поэтому правильный расчет работы вентиляторов критичен для обеспечения заданного теплового режима разрабатываемого устройства.

Задача расчета системы охлаждения с использованием вентиляторов сопряжена с некоторыми трудностями решения. Во-первых, моделирование воздушных потоков внутри вращающихся областей вентилятора с учетом геометрии лопастей характеризуется высокой вычислительной сложностью. Во-вторых, найти или спроектировать качественную 3D-модель вентилятора с детальной прорисовкой геометрии лопастей, соответствующей геометрии реального изделия, зачастую бывает крайне сложно или вовсе невозможно. В то же время в документации к большинству вентиляторов есть график кривой объемного/массового расхода воздуха. Это график зависимости перепада давления от расхода прокачиваемого вентилятором воздуха.

Современные CFD-системы позволяют моделировать работу вентилятора, основываясь на заданной кривой. Это избавляет от необходимости использования детальной 3D-модели вентилятора и дает возможность сократить вычислительное время расчета при сохранении точности результатов.

Для демонстрации эффективности такого подхода проведем два эксперимента. В первом эксперименте смоделируем обдув радиатора с помощью реалистичной модели вентилятора с лопастями. Во втором — воспользуемся созданием модели вентилятора с помощью кривой расхода и применим ее к упрощенной 3D-модели вентилятора без прорисованной геометрии лопастей.

Для проведения первого эксперимента в готовой сборке создадим проект теплового расчета (рис. 2.79), укажем тип задачи (в данном случае — внешняя),

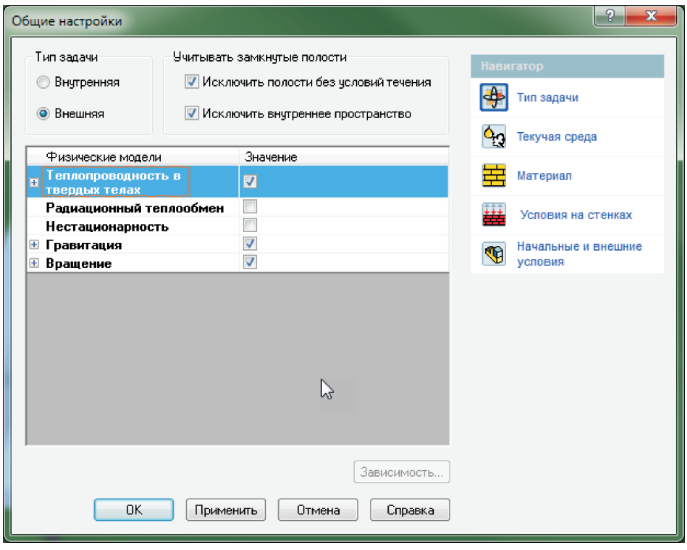


Рис. 2.79. Назначение типа задачи и выбор физических моделей

активируем физические модели теплопроводности в твердых телах для моделирования теплопередачи теплопроводностью, модель гравитации для учета конвективных потоков воздуха, а также модуль вращения, поскольку в данном эксперименте моделируется вращающееся тело (лопасти вентилятора).

Назначим теплопроводящую среду, в данном случае это воздух (рис. 2.80). Определим также материал «по умолчанию» и шероховатость поверхности (рис. 2.81).

После создания проекта необходимо задать источник нагрева. В данной экспериментальной модели назначим источником нагрева нижнюю

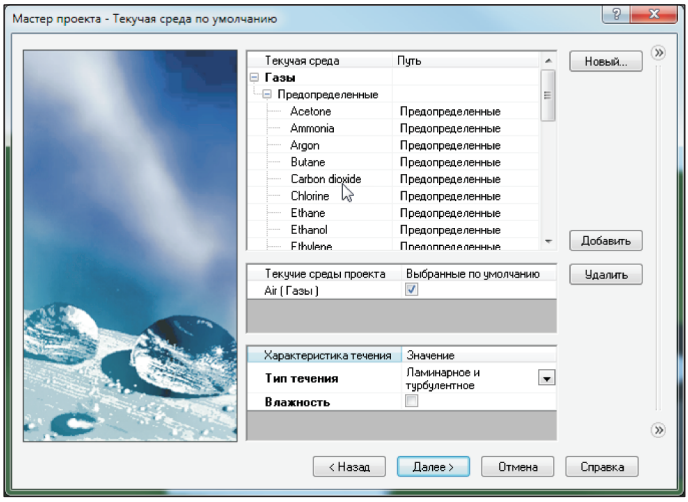


Рис. 2.80. Выбор текучей среды по умолчанию

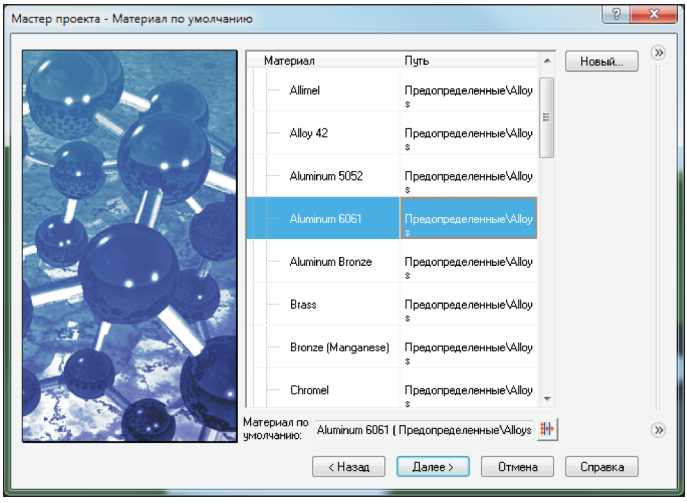


Рис. 2.81. Выбор материала твердого тела по умолчанию

грань радиатора с помощью элемента «Поверхностный тепловой источник» (рис. 2.82).

После того как был задан источник нагрева следует назначить область вращения с помощью специального элемента «Область вращения» (рис. 2.83). В качестве тела, к которому применяется данный элемент, необходимо назначить специально созданное осесимметричное тело вращения, которое целиком «покрывает» вращающиеся части вентилятора. Таким образом, объем вспомогательного тела будет характеризовать область, в пределах которой будет действовать модель вращения. Необходимо также задать направление и угловую скорость вращения (единицы измерения — об/мин или рад/с).

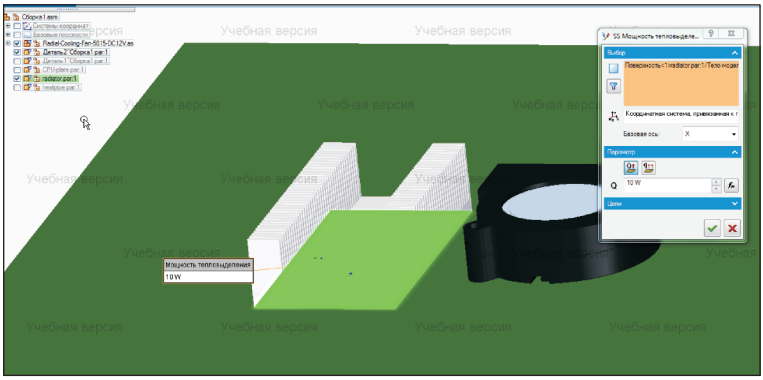


Рис. 2.82. Назначение поверхностного источника тепловыделения

Рис. 2.83. Назначение области вращения

Для контроля сходимости расчета и определения критериев его завершения зададим цели (рис. 2.84). Первой целью назначим среднюю температуру грани радиатора, второй целью — средний перепад давления на вентиляторе.

Запустим расчет (рис. 2.85) и дождемся его завершения (рис. 2.86).

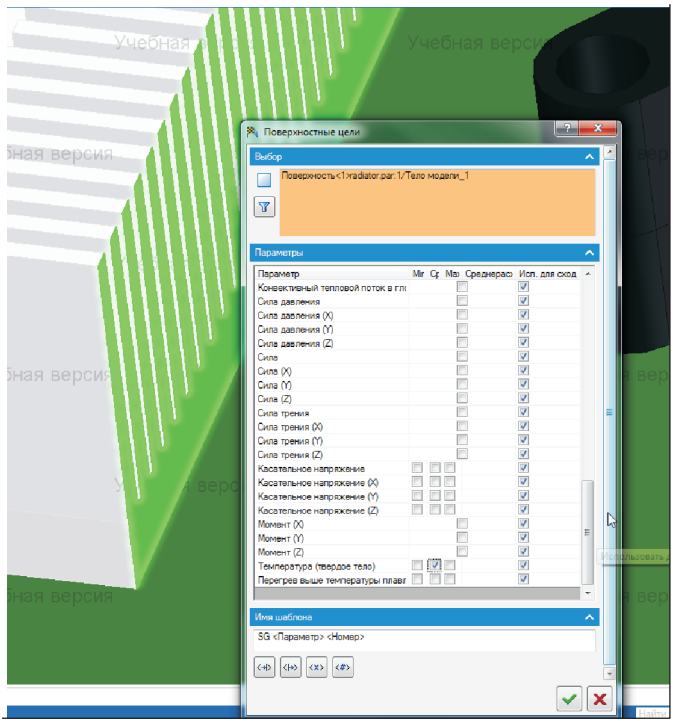


Рис. 2.84. Назначение целей расчета

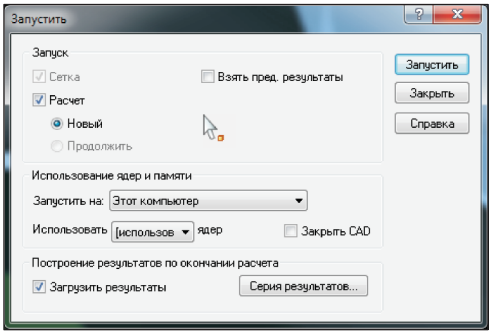


Рис. 2.85. Окно запуска расчета

Отобразим температуру нагрева всех элементов сборки с помощью инструмента «Картина на поверхности» (рис. 2.87).

Температура радиатора в точке контроля равна 34°C.

Проведем второй эксперимент. В данном эксперименте будет использоваться идеализированная модель вентилятора, поэтому детализированная 3D-модель не потребуется.

Проведем упрощение 3D-модели вентилятора (рис. 2.88).

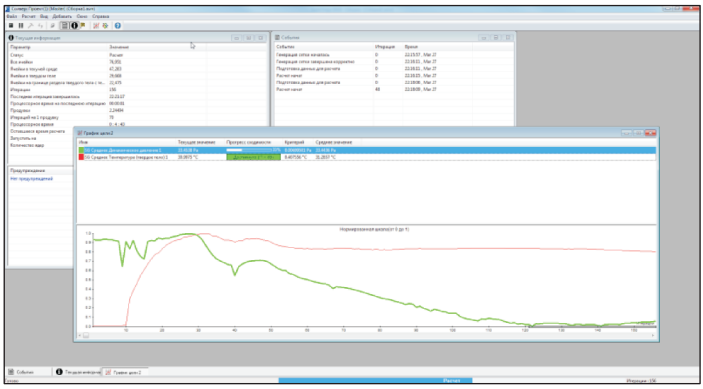


Рис. 2.86. Прогресс решения задачи

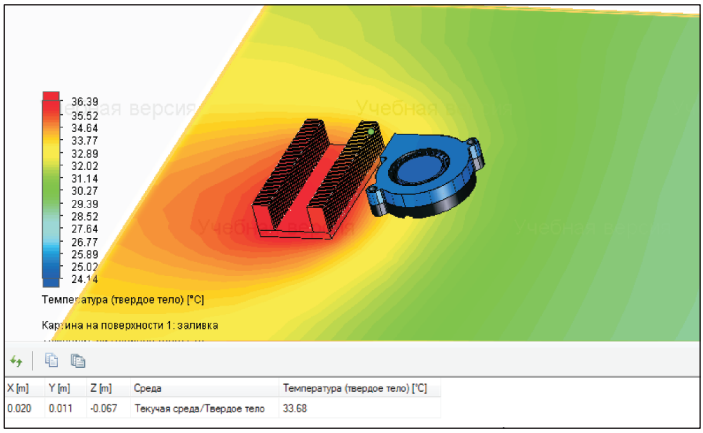
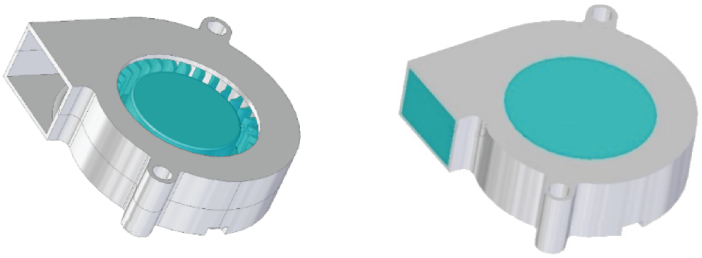


Рис. 2.87. Тепловая картина на поверхности



а *б*

Рис. 2.88. Сравнение полной (*а*) и упрощенной (*б*) моделей вентилятора

Упрощенная модель не содержит геометрию крыльчаток и не требовательна к общей точности геометрии, поскольку при ее использовании не будет моделироваться движение внутренних воздушных потоков вентилятора.

Создадим новый проект с помощью «Мастера проектов» (рис. 2.89). Активируем модели теплопроводности в твердых телах и гравитации. Модель вращения оставим неактивной, поскольку в данном эксперименте вместо моделирования вращения лопастей вентилятора будет использоваться специальный элемент «Вентилятор».

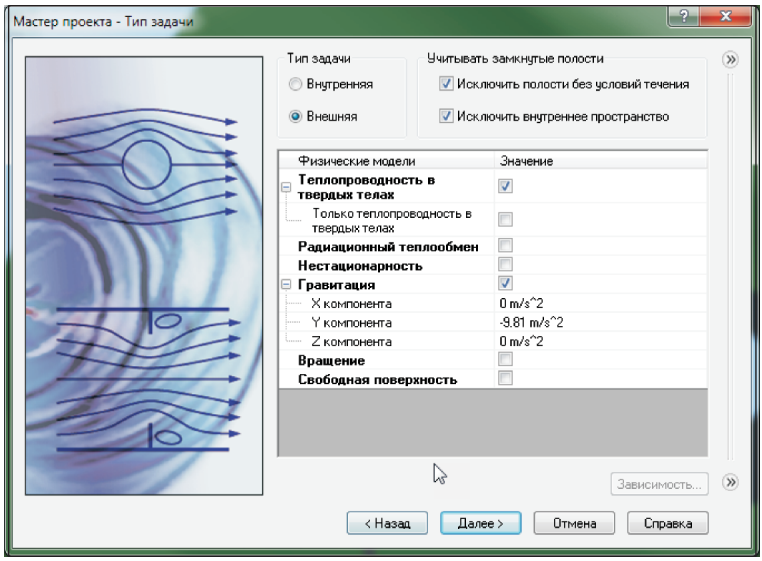


Рис. 2.89. Выбор типа задачи и физических моделей

Как и в предыдущем эксперименте, назначим воздух в качестве базовой среды и зададим материал по умолчанию.

Далее необходимо открыть инженерную базу данных (рис. 2.90) и в разделе «Вентиляторы» создать пользовательскую модель вентилятора по кривой объемного/массового расхода воздуха из документации на изделие либо воспользоваться готовой моделью.

После того как модель вентилятора определена и занесена в инженерную базу (рис. 2.91), необходимо применить к упрощенной 3D-модели вентилятора граничное условие «Вентилятор» (выбран тип «Внутренний вентилятор»), задать входные и выходные поверхности для воздушного потока и выбрать созданную ранее пользовательскую модель вентилятора (рис. 2.92). В инженерной базе имеется большое количество заранее определенных моделей.

Как и в предыдущем эксперименте, зададим источник нагрева с той же мощностью нагрева и определим цели расчета (см. рис. 2.82 и 2.84).

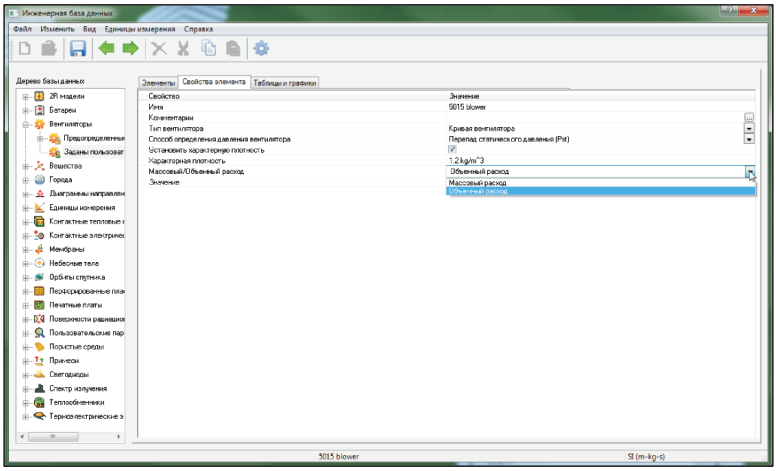


Рис. 2.90. Инженерная база данных: назначение характеристик модели

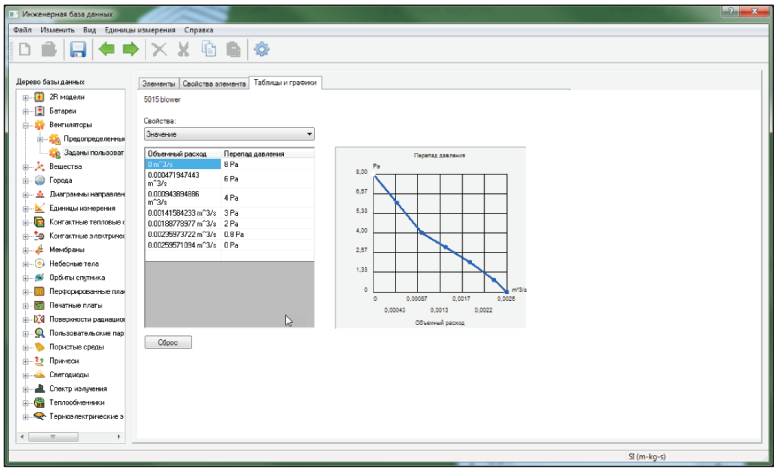


Рис. 2.91. Инженерная база данных: построение характеристики массового (объемного) расхода вентилятора по точкам

После проведения расчета выведем результаты моделирования с помощью инструмента «Картина на поверхности» (рис. 2.93).

Температура нагрева радиатора в контрольной точке составила почти 32°C, что повторяет результаты моделирования в первом эксперименте с моделированием вращения лопастей вентилятора.

Таким образом, граничное условие «Вентилятор» позволяет качественно моделировать работу вентилятора при отсутствии его точной трехмерной модели с меньшими затратами вычислительных ресурсов без потери точности расчета.

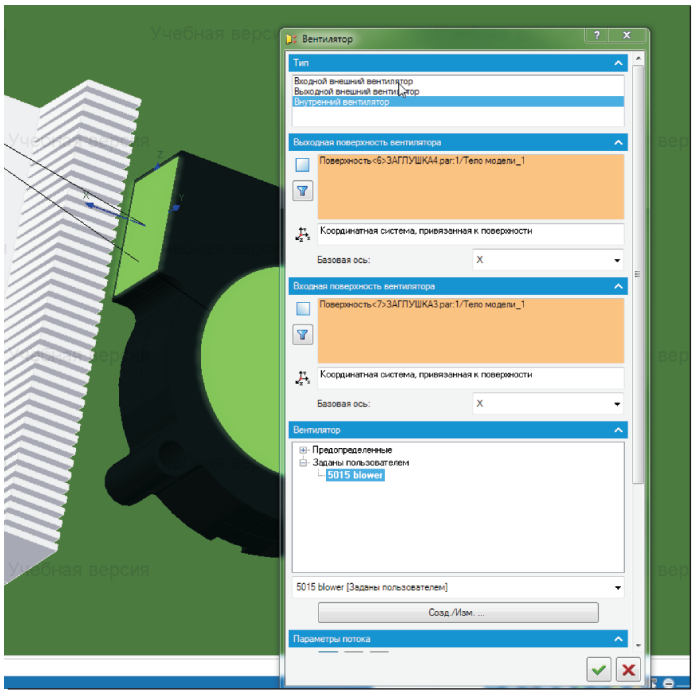


Рис. 2.92. Создание условия «Вентилятор» на упрощенной 3D-модели вентилятора

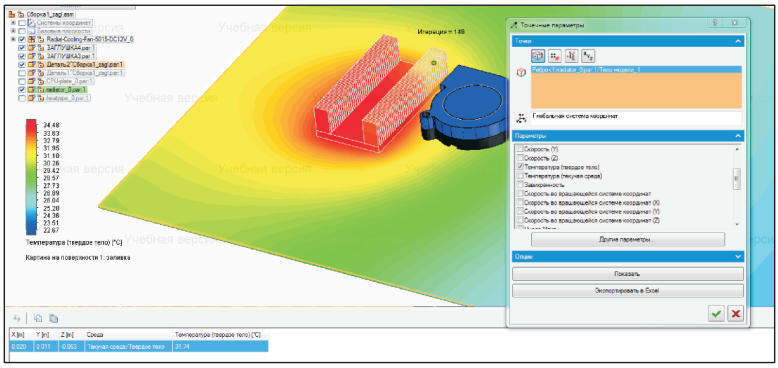


Рис. 2.93. Тепловая картина на поверхности

Содержание отчета

1. Краткий конспект теоретической части.
2. Скриншоты финальных моделей и результирующие файлы моделей в электронном виде.

3. Исходные данные и результаты анализов в печатном и электронном виде.

4. Выводы по работе.

5. Ответы на контрольные вопросы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Опишите характеристическую кривую вентилятора.

2. Как задать граничное условие «Вентилятор»?

3. Какие виды вентиляторов можно задать с точки зрения их расположения в модели?

4. Как создать пользовательскую модель вентилятора?

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 15. МОДЕЛИ ИДЕАЛИЗИРОВАННЫХ КОМПОНЕНТОВ: ТЕПЛОВЫЕ ТРУБКИ

Цель работы — научиться применять идеализированные модели тепловых трубок при моделировании тепловых режимов ЭА.

Задание

Создать идеализированную модель тепловой трубки:
– применить граничное условие «Тепловая трубка» к выбранной детали;
– назначить поверхность теплопоглощения;
– назначить поверхность теплоотвода;
– задать эффективное тепловое сопротивление;
– при необходимости задать тепловые сопротивления «окружающая среда — тепловая трубка» (задается бесконечное сопротивление), «тепловая трубка — поверхность теплопоглощения» и «тепловая трубка — поверхность теплоотвода» (задаются сопротивления теплопроводящих материалов: прокладок, термопастов и пр.);
– проконтролировать правильность назначения тепловой трубки в модели;
– выполнить анализ теплового режима изделия с участием созданной модели тепловой трубки (модель изделия задает преподаватель).

Теоретическая часть

Некоторое время назад тенденция к миниатюризации компьютерных устройств заставила производителей материнских плат отказаться от традиционных осевых вентиляторов в пользу радиальных и использовать тепловые трубки для передачи тепла от процессора, обычно расположенного в центре платы, до радиатора, находящегося сбоку. Одним из характерных примеров являются современные ноутбуки. В отличие от современных переносных устройств, имеющих пассивное охлаждение и малое тепловыделение, большинство ноутбуков приходится оснащать активным охлаждением для поддержания требуемого теплового режима.

Появилась необходимость рассчитывать теплопроводность тепловой трубки и учитывать фазовые переходы вещества внутри нее. Однако тепловая трубка имеет очень сложную внутреннюю структуру, а поведение теплоносителя внутри нее плохо поддается моделированию. Тем не менее трубки имеют вполне измеримое тепловое сопротивление, и этого оказывается достаточно для решения задачи расчета эффективности отвода тепла от источника нагрева. Для решения такой задачи предназначен источник «Тепловая трубка».

Рассмотрим пример теплового расчета с использованием тепловой трубки, вентилятора и радиатора (рис. 2.94).

Необходимо создать проект исследования с помощью окна «Мастер проекта» (рис. 2.95).

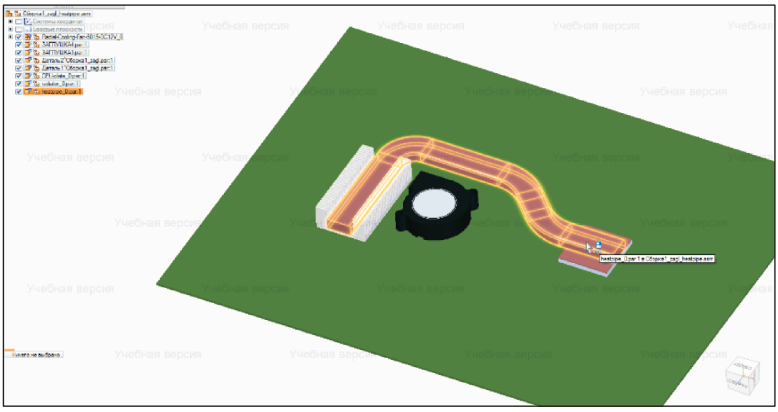


Рис. 2.94. Модель тепловой трубки

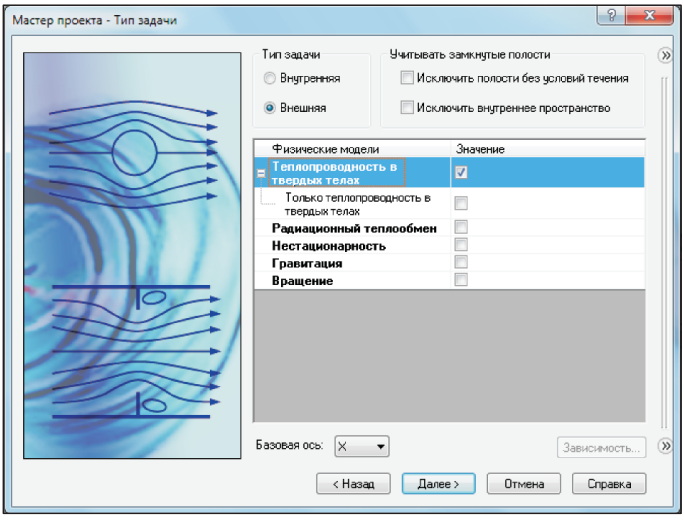


Рис. 2.95. Выбор типа задачи и физических моделей

В этом окне пошагово задают настройки проекта, среди которых тип задачи (внутренняя или внешняя), и выбирают необходимые физические модели (см. рис. 2.95). В случае моделирования вентилятора и тепловой трубки необходимо включить модель «Теплопроводность в твердых телах». Стоит отметить, что несмотря на наличие в модели вентилятора, нет необходимо-

сти включать модель вращения, поскольку используется упрощенная модель со специальным граничным условием «Вентилятор».

Далее создается тепловая трубка. Это также выполняется через специальный источник. Нужно лишь создать упрощенную 3D-модель с габаритами реальной трубки и применить к ней источник «Тепловая трубка» (рис. 2.96), указав поверхности теплопоглощения и теплоотвода, а также эффективное тепловое сопротивление, которое приводится в документации на изделие.

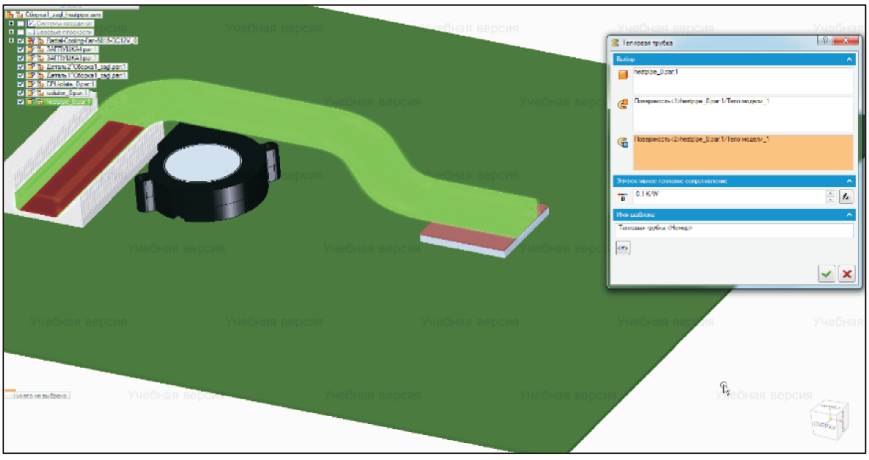


Рис. 2.96. Добавление граничного условия «Тепловая трубка»

Если между поверхностью теплопоглощения и процессором, а также между поверхностью теплоотвода и радиатором проложена теплопроводящая прокладка или нанесен слой термопасты, необходимо дополнительно задать тепловое сопротивление этого слоя с помощью источника «Тепловое сопротивление», выбрав необходимый готовый элемент из инженерной базы данных, задав материал и его толщину либо введя значение сопротивления непосредственно в числовом виде. Тепловое сопротивление между внешними поверхностями тепловой трубки и окружающей средой задается равным бесконечности (в инженерной базе данных выбирается сопротивление “Infinite”).

Таким образом, система освобождает пользователя от необходимости моделировать внутреннюю пористую структуру тепловой трубки, а также фазовые переходы теплоносителя внутри нее, что существенно ускоряет процесс расчета.

На следующем этапе необходимо создать источник нагрева. В данном случае это 2R-модель процессора (рис. 2.97).

Далее следует провести расчет по заданным параметрам. Результаты представлены на рис. 2.98 и 2.99.

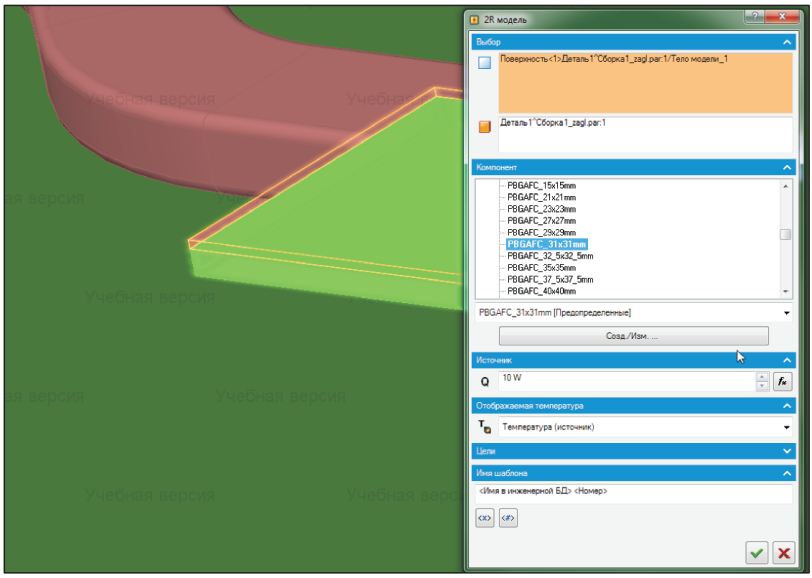


Рис. 2.97. Добавление источника нагрева — 2R-модели процессора

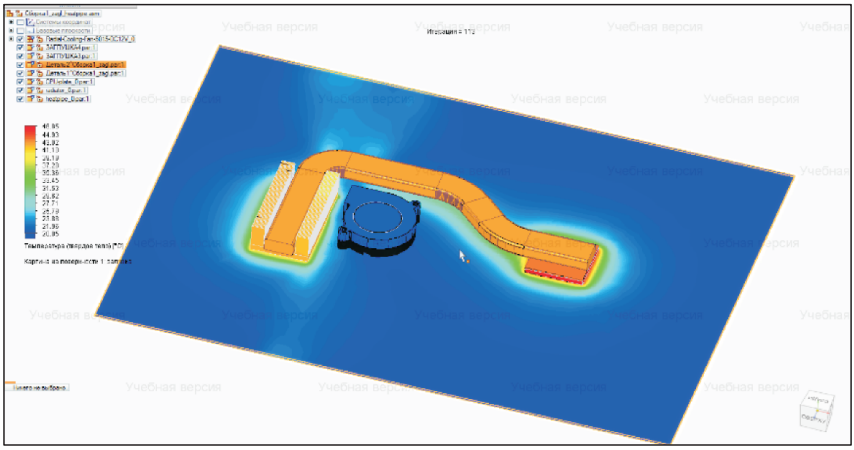


Рис. 2.98. Отображение температуры нагрева платы с помощью картины на поверхности (вид сверху)

Полученные результаты позволяют судить об эффективности системы охлаждения с учетом заданных значений физических и геометрических параметров всех ее составляющих.

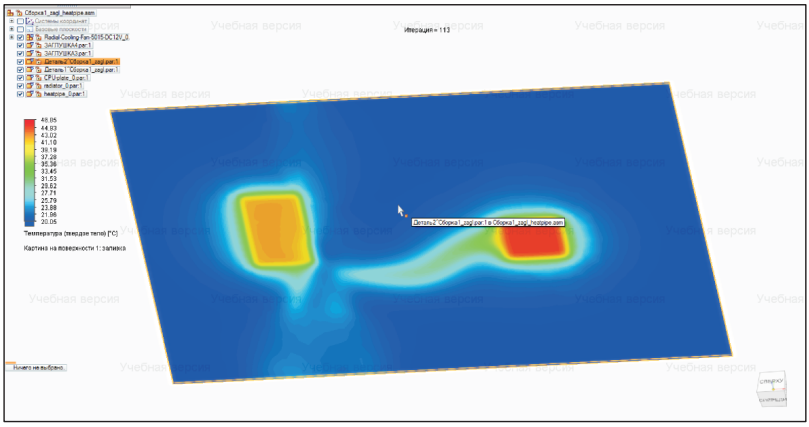


Рис. 2.99. Отображение температуры нагрева платы с помощью картины на поверхности (вид снизу)

Содержание отчета

1. Краткий конспект теоретической части.
2. Скриншоты финальных моделей и результирующие файлы моделей в электронном виде.
3. Исходные данные и результаты анализов в печатном и электронном виде.
4. Выводы по работе.
5. Ответы на контрольные вопросы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какую физическую модель следует включить в настройках для моделирования тепловых трубок?
2. Какие теплофизические характеристики необходимо задать при использовании тепловых трубок?
3. Необходимо ли моделировать внутреннюю структуру тепловых трубок?
4. Какие поверхности необходимо назначать при использовании тепловых трубок?

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 16. МОДЕЛИ ИДЕАЛИЗИРОВАННЫХ КОМПОНЕНТОВ: ЭЛЕМЕНТЫ ПЕЛЬТЬЕ

Цель работы — научиться применять идеализированные модели элементов Пельтье при моделировании тепловых режимов ЭА.

Задание

Создать идеализированную модель элемента Пельтье:
– назначить источник «Термоэлектрический элемент»;
– выбрать компонент;
– задать его горячую поверхность;
– задать силу тока;
– выбрать необходимый термоэлектрический элемент из инженерной базы данных;
– проконтролировать правильность назначения термоэлектрического элемента в модели;
– выполнить анализ теплового режима изделия с участием созданной модели термоэлектрического элемента (модель изделия задает преподаватель).

Теоретическая часть

Программное обеспечение FloEFD позволяет моделировать системы охлаждения на основе термоэлектрических элементов (элементов Пельтье).

Добавим в исследованную в практической работе № 15 модель тепловой трубки термоэлектрический элемент вместо источника тепловыделения. Для этого нужно создать упрощенную 3D-модель такого элемента и применить к нему источник «Термоэлектрический элемент» (рис. 2.100). Для

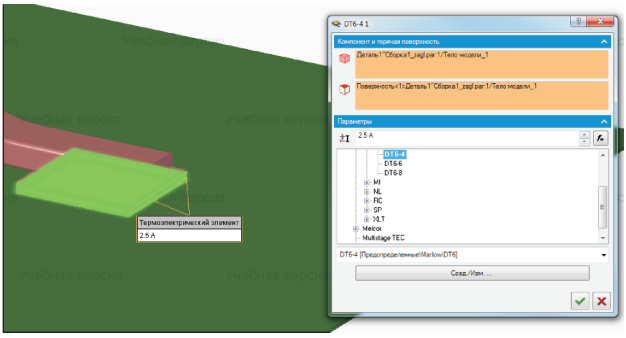


Рис. 2.100. Назначение источника «Термоэлектрический элемент»

данного источника необходимо задать компонент, его горячую поверхность, силу тока и далее выбрать необходимый термоэлектрический элемент из инженерной базы данных.

Оставив остальные параметры в заданном ранее анализе тепловой трубки без изменений, запустим расчет и сравним результаты (рис. 2.101).

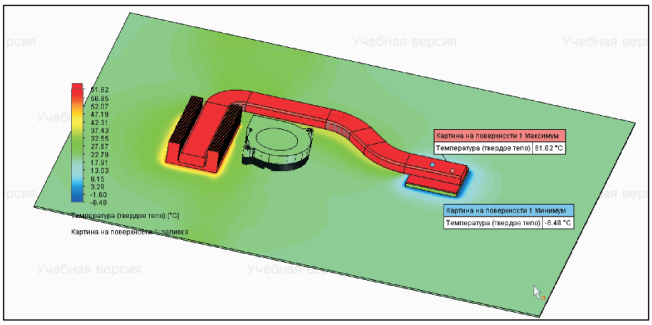


Рис. 2.101. Отображение температуры нагрева с помощью тепловой карты

Как можно видеть, модель элемента Пельтье создает градиент температур между своей верхней и нижней поверхностями и тем самым моделирует поведение реального устройства.

Содержание отчета

1. Краткий конспект теоретической части.
2. Скриншоты финальных моделей и результирующие файлы моделей в электронном виде.
3. Исходные данные и результаты анализов в печатном и электронном виде.
4. Выводы по работе.
5. Ответы на контрольные вопросы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Опишите идеализированную конструкцию модели элемента Пельтье.
2. Каким образом модель элемента Пельтье моделирует поведение реального устройства?
3. Назовите преимущественные области применения элементов Пельтье.
4. Где располагается база данных элементов Пельтье?

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 17. МОДЕЛИ ИДЕАЛИЗИРОВАННЫХ КОМПОНЕНТОВ: ПЕЧАТНЫЕ ПЛАТЫ

Цель работы — научиться применять идеализированные модели многослойных печатных плат при моделировании тепловых режимов ЭА.

Задание

Создать идеализированную модель печатной платы:

– создать источник — печатную плату (количество слоев и геометрические параметры задает преподаватель);

– назначить теплофизические параметры материалов диэлектрика и проводящего рисунка;

– задать таблицу толщин слоев и процента заполнения слоев металлизации проводящим рисунком;

– проконтролировать вычисленные эффективные коэффициенты теплопроводности в плоскости платы и по нормали к плате;

– проконтролировать правильность назначения печатной платы в модели;

– выполнить анализ теплового режима изделия с участием созданной модели печатной платы (модель изделия задает преподаватель).

Теоретическая часть

Печатная плата — основа практически любого электронного устройства. Помимо основных функций, таких как крепление электронных компонентов и их электрическое соединение, у нее есть еще одна, менее заметная, но не менее значимая роль — отвод тепла от компонентов. Однако печатная плата имеет неоднородную, зачастую сложную структуру, особенно если она является многослойной. Внутренние проводящие слои могут иметь различную конфигурацию, различную «плотность» рисунка. Часто вводятся сплошные внутренние слои, предназначенные для экранирования проводников либо для улучшения теплоотвода. Все эти факторы довольно сильно влияют на теплопроводность платы в целом и затрудняют расчет коэффициента теплопроводности.

Вместе с тем моделировать тепловые процессы внутри полноценной 3D-модели платы со всеми внутренними проводниками и переходными отверстиями весьма затруднительно. Сгенерированная сетка решателя получится очень сложной и неоднородной, что серьезно повлияет на вычислительную сложность расчетов, при этом польза от полученных результатов для решения задачи анализа нагрева электронного модуля в целом будет невелика.

Для решения этой задачи существует специальный источник — печатная плата. Этот элемент позволяет моделировать теплопроводность печатной платы, имея лишь информацию о количестве, толщине слоев и проценте заполнения площади слоя проводящим рисунком.

Проведем сравнительное исследование метода прямого моделирования точной модели четырехслойной печатной платы (рис. 2.102) и ее упрощенного варианта со специальным источником.

Создадим новый проект исследования с помощью «Мастера проекта» (рис. 2.103).

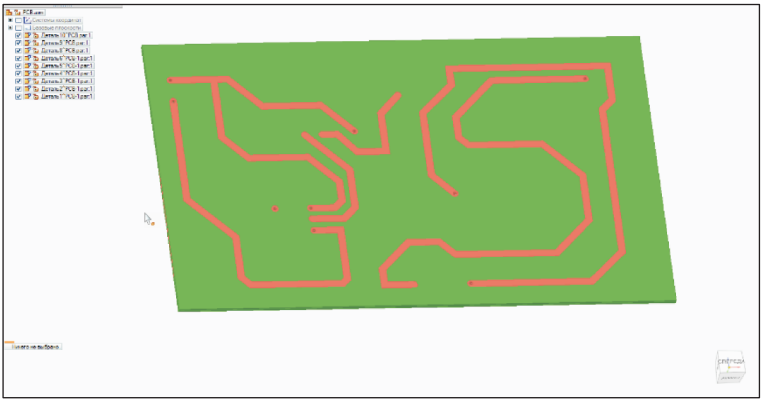


Рис. 2.102. Полная модель условной печатной платы

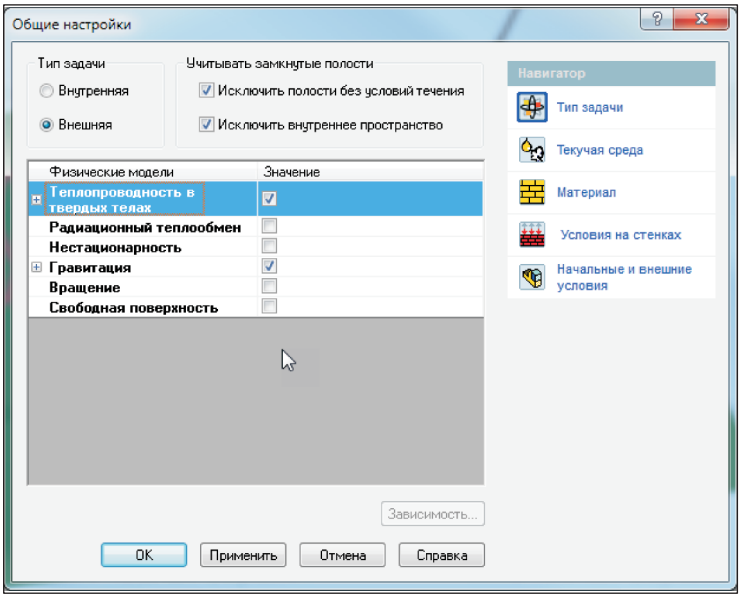


Рис. 2.103. Выбор типа задачи и физических моделей

Включим в проект модель теплопроводности в твердых телах и модель гравитации для моделирования конвективных процессов (рис. 2.104). Основным материалом назначим «Медь». Остальные настройки оставим по умолчанию.

После завершения создания проекта скорректируем размер расчетной области (рис. 2.105).

С помощью пункта «Добавить материал» в дереве расчета зададим материалы разным частям платы. Для основания платы назначим материал FR4, соответствующий стеклотекстолиту СФ-1-35 ГОСТ 10316–78 (рис. 2.106), для проводников — медь.

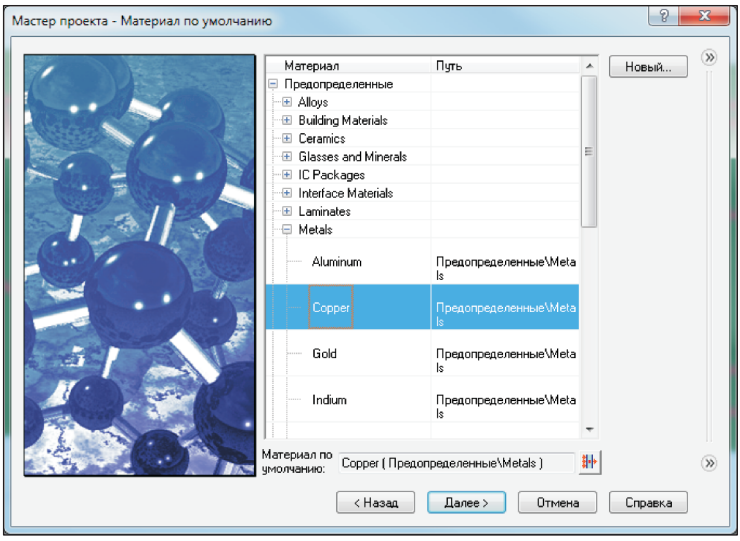


Рис. 2.104. Выбор материала твердого тела

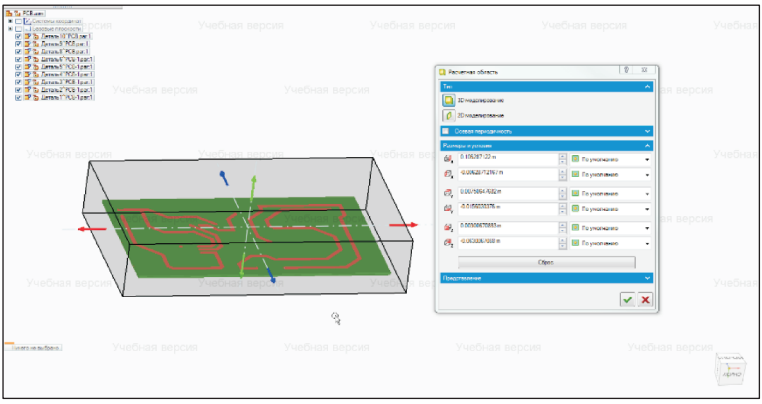


Рис. 2.105. Настройка размера расчетной области

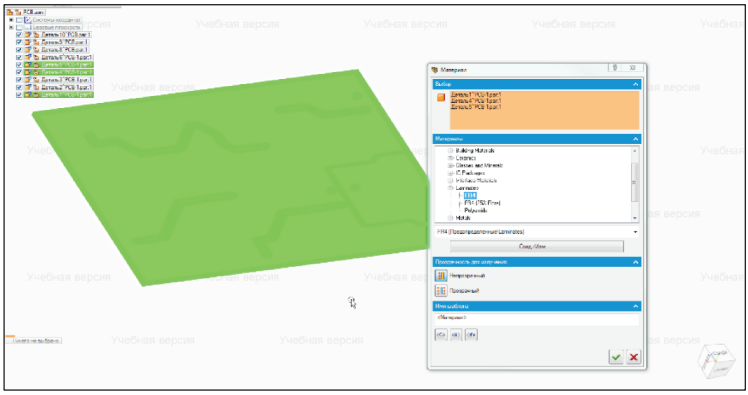


Рис. 2.106. Назначение материала, эквивалентного стеклотекстолиту

Назначим нижней поверхности платы условие поверхностного источника нагрева (рис. 2.107).

Зададим целью расчета среднюю температуру верхней поверхности платы (рис. 2.108).

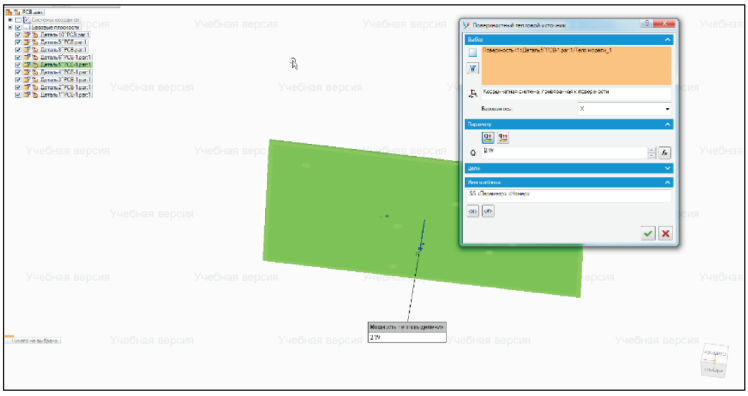


Рис. 2.107. Назначение условия поверхностного источника нагрева

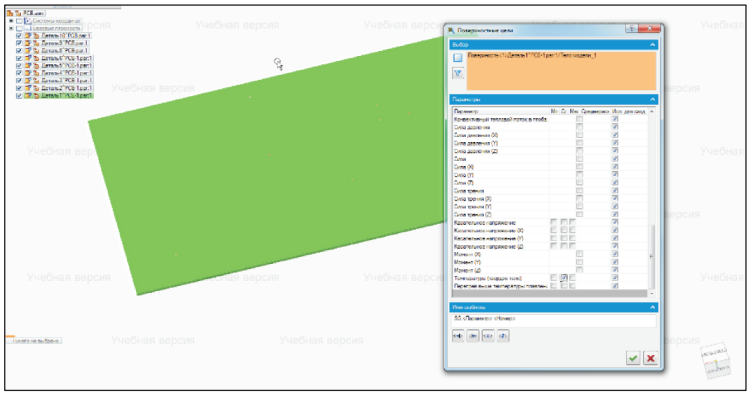


Рис. 2.108. Назначение цели расчета

Запустим и выполним расчет (рис. 2.109).

С помощью картин на поверхности отобразим температуру нагрева платы (рис. 2.110).

Средняя температура нагрева платы составила примерно 48°С.

Для проведения второго эксперимента создадим простое тело с габаритами и толщиной платы. Далее создадим проект расчета с теми же параметрами, что и в предыдущем эксперименте (рис. 2.111).

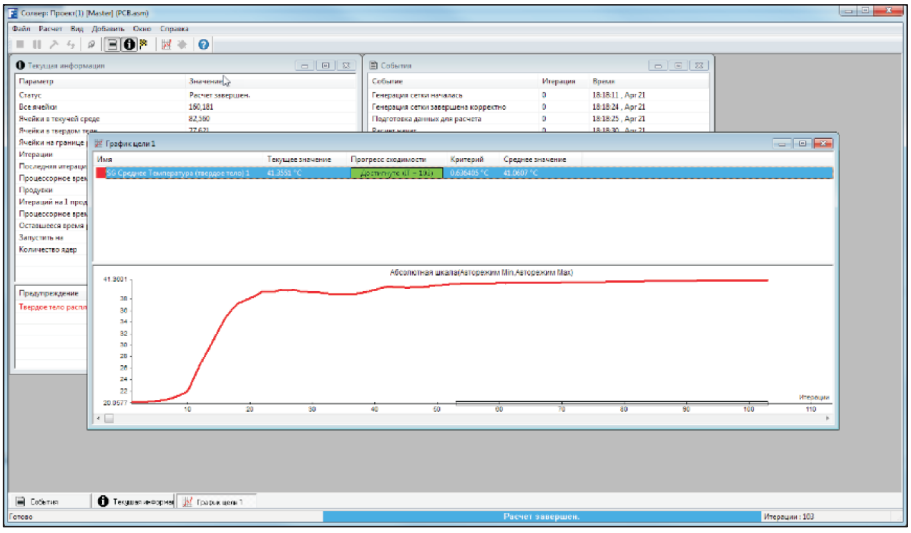


Рис. 2.109. Прогресс решения

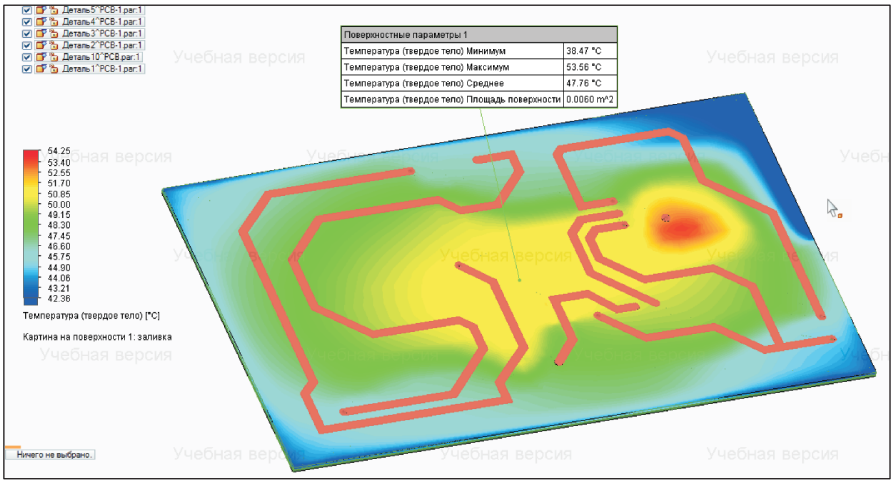


Рис. 2.110. Отображение температуры нагрева с помощью картины на поверхности

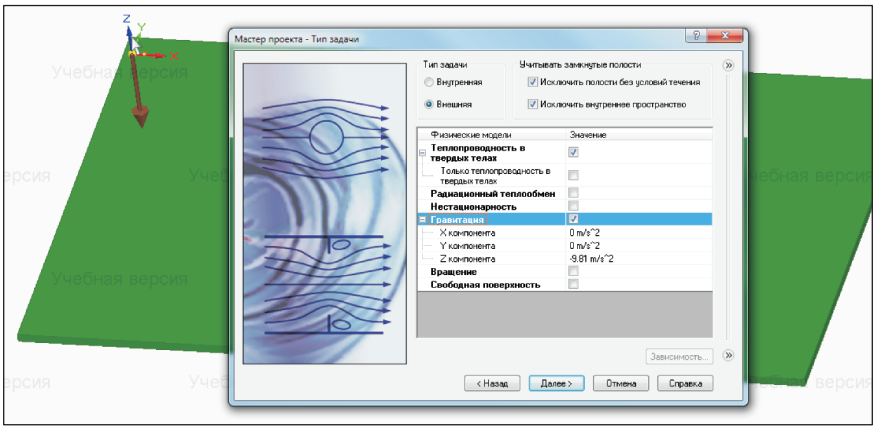


Рис. 2.111. Выбор типа задачи и физических моделей

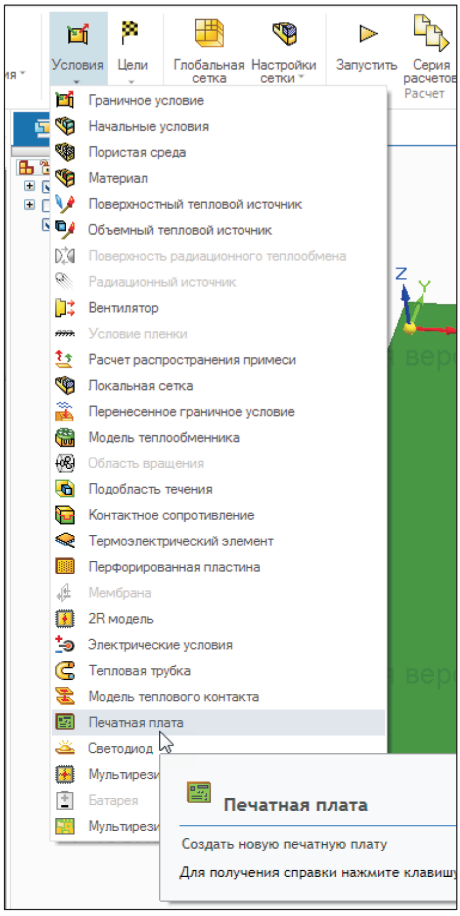


Рис. 2.112. Выбор источника «Печатная плата»

После создания проекта необходимо так же, как в предыдущем случае, скорректировать размер области расчета и после этого создать источник «Печатная плата» (рис. 2.112).

В инженерной базе данных необходимо создать пользовательский элемент «Печатная плата» и с помощью таблицы задать параметры и количество слоев платы. При создании нужно указать параметры моделируемой платы (рис. 2.113), определить количество слоев, их толщину и процент заполнения проводящим рисунком (рис. 2.114).

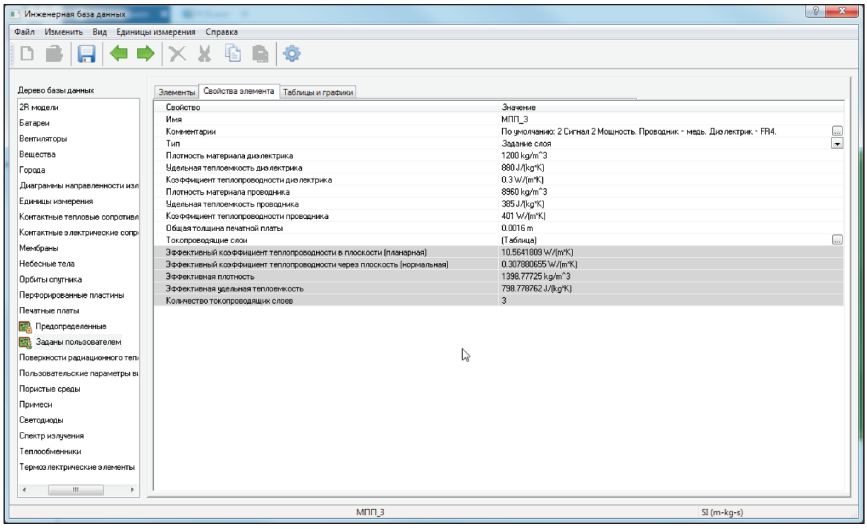


Рис. 2.113. Назначение свойств печатной платы в инженерной базе данных

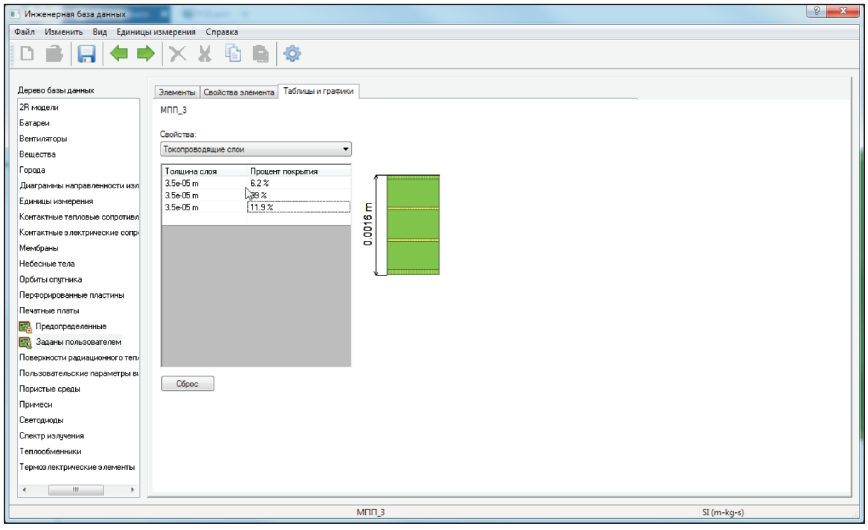


Рис. 2.114. Назначение количества и толщины слоев металлизации печатной платы в инженерной базе данных

После создания пользовательского элемента базы данных появится возможность его выбора в окне назначения источника. Применим данный элемент к созданной ранее модели (рис. 2.115). Получившаяся идеализированная модель имеет анизотропные свойства теплопроводности, моделируя повышенную теплопроводность в слоях металлизации.

Осталось лишь назначить источником нагрева нижнюю поверхность платы (рис. 2.116) и запустить расчет.

Отображение результатов расчета представлено на рис. 2.117.

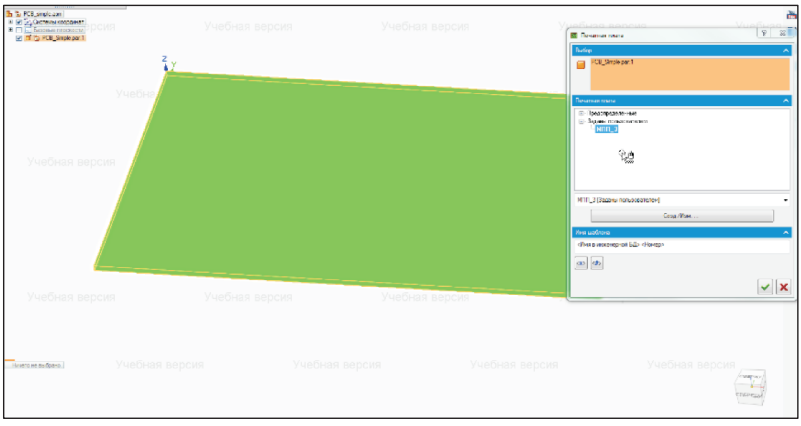


Рис. 2.115. Применение источника «Печатная плата» к упрощенной 3D-модели печатной платы

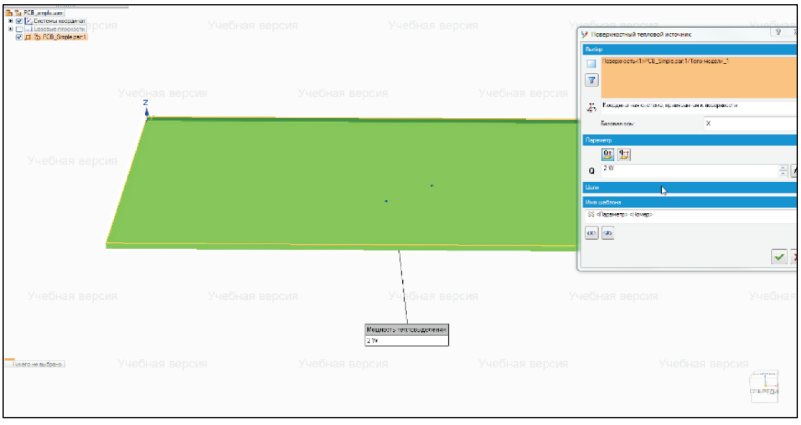


Рис. 2.116. Назначение поверхностного источника нагрева

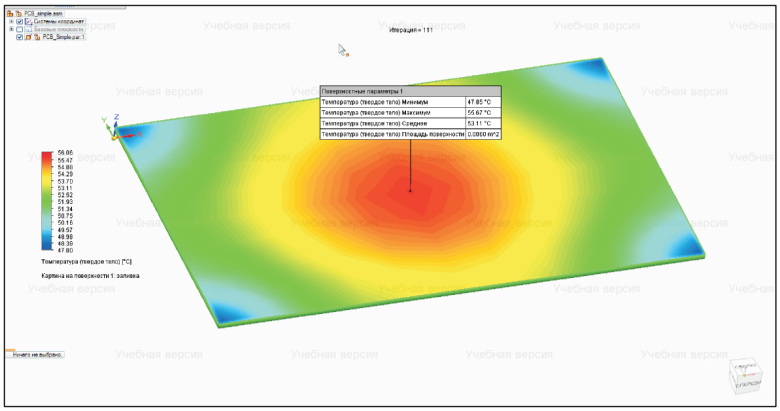


Рис. 2.117. Отображение температуры нагрева платы с помощью картины на поверхности

Средняя температура поверхности составила примерно 53°C, что близко к значению 48°C, полученному в первом эксперименте. При этом расчет во втором случае требует гораздо меньше вычислительных ресурсов.

Содержание отчета

1. Краткий конспект теоретической части.
2. Скриншоты финальных моделей и результирующие файлы моделей в электронном виде.
3. Исходные данные и результаты анализов в печатном и электронном виде.
4. Выводы по работе.
5. Ответы на контрольные вопросы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем заключаются отличия моделирования реальной печатной платы от моделирования идеализированной?
2. Как при моделировании учитывается проводящий рисунок?
3. Почему в самостоятельно вычисляемых САПР параметрах платы присутствуют два коэффициента теплопроводности?
4. Как задается количество слоев платы?

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 18. МОДЕЛЬ ДЖОУЛЕВА НАГРЕВА

Цель работы — научиться применять идеализированные модели проводящего рисунка печатной платы с учетом Джоулева нагрева при моделировании тепловых режимов ЭА.

Задание

Создать идеализированную модель проводящего рисунка печатной платы с учетом Джоулева нагрева:

– построить модель печатной платы с проводящим рисунком;

– задать материал проводящего рисунка;

– задать поверхности входа и выхода тока;

– назначить для поверхностей значение проходящего через них электрического тока;

– проконтролировать правильность назначения токов в модели;

– выполнить анализ теплового режима изделия с участием созданной модели печатной платы (модель изделия задает преподаватель).

Теоретическая часть

Сильноточные цепи так же, как электронные компоненты с большим тепловыделением, зачастую способны вносить значительный вклад в общее тепловыделение устройства, и хотя проводники сами по себе гораздо менее требовательны к температурному режиму работы, однако своим нагревом они способны вывести из строя находящиеся поблизости компоненты. Это особенно актуально для портативных устройств с плотной компоновкой. Для того чтобы учитывать нагрев компонентов при наличии таких проводников, в системе FloEFD имеется набор команд «Электрические характеристики». Рассмотрим работу данного набора на примере использованной ранее полной модели печатной платы.

Создадим проект анализа с моделями теплопроводности и гравитации (рис. 2.118).

Назначим материал FR4, соответствующий стеклотекстолиту СФ-1-35 ГОСТ 10316–78, в качестве материала по умолчанию (рис. 2.119).

С помощью инструмента назначения материалов присвоим всем проводящим слоям и металлизации отверстий материал «Медь» (рис. 2.120). Для удобства выбора отображение диэлектрика было временно выключено.

Далее с помощью команды «Источник электрической энергии» зададим поверхности входа и выхода тока и назначим для них значение проходящего через них электрического тока (рис. 2.121). Поскольку ранее был определен

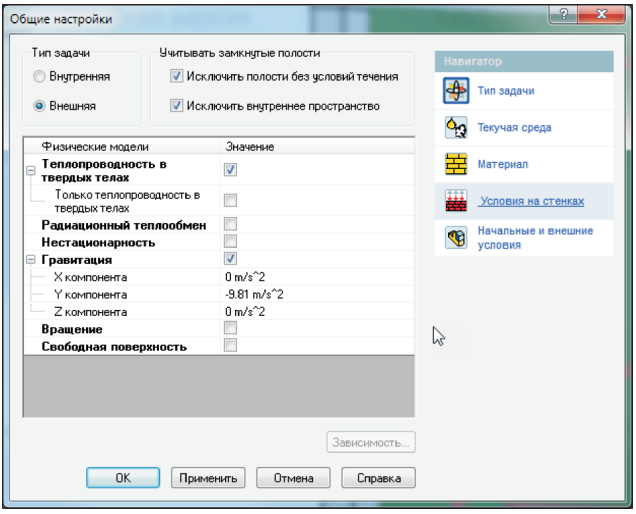


Рис. 2.118. Выбор типа задачи и физических моделей

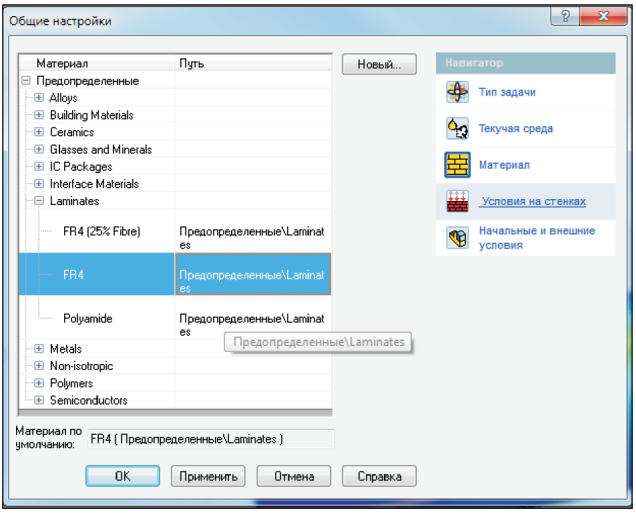


Рис. 2.119. Выбор материала твердого тела по умолчанию

материал проводника, в котором имеется информация о значении его электрического сопротивления, а значит, и о тепловых потерях при прохождении через него тока, становится возможным расчет нагрева проводника с учетом его геометрии.

Отобразим полученную картину нагрева платы и проводника с помощью картины на поверхности (рис. 2.122).

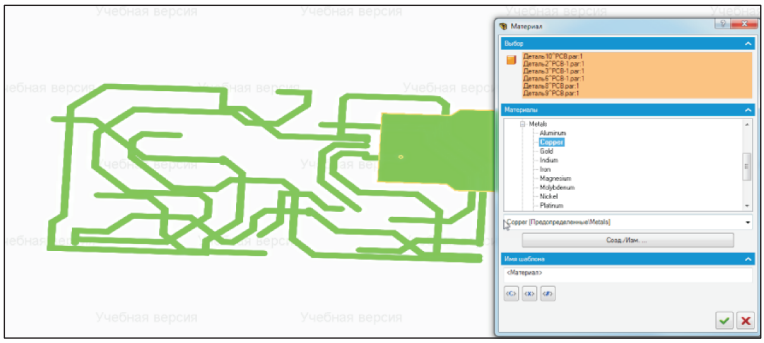
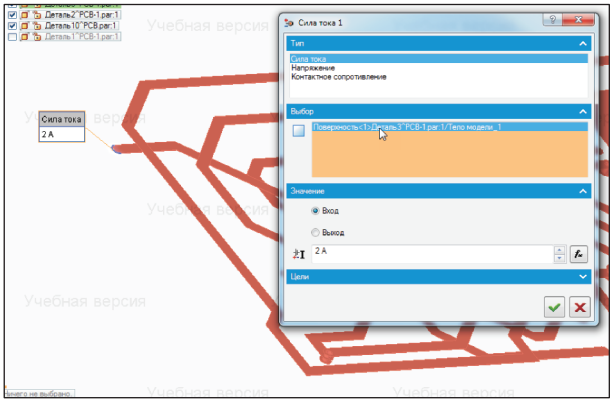
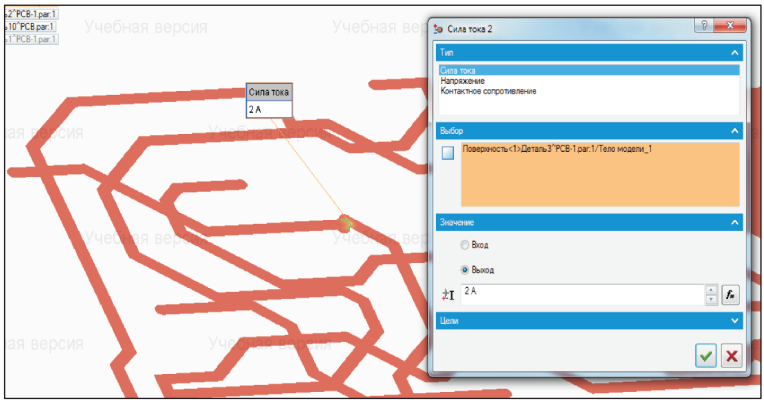


Рис. 2.120. Назначение материала «Медь» проводящим дорожкам



а



б

Рис. 2.121. Задание параметров с помощью команды «Источник электрической энергии». Назначение поверхности входа (*а*) и выхода тока (*б*)

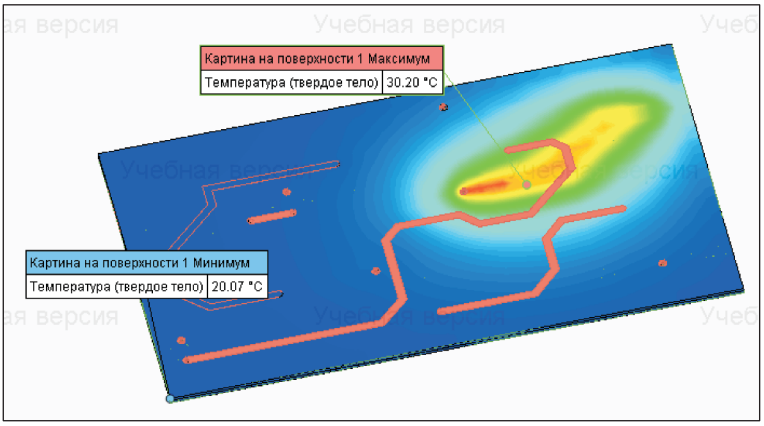


Рис. 2.122. Отображение температуры нагрева с помощью тепловой карты

Таким образом, данный функционал позволяет учитывать протекающий через проводники электрический ток при расчете теплового режима всей ячейки или блока.

Содержание отчета

1. Краткий конспект теоретической части.
2. Скриншоты финальных моделей и результирующие файлы моделей в электронном виде.
3. Исходные данные и результаты анализов в печатном и электронном виде.
4. Выводы по работе.
5. Ответы на контрольные вопросы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. С какой целью необходимо учитывать Джоулев нагрев проводников?
2. Как задаются поверхности входа и выхода тока?
3. Как вычисляются тепловые потери при протекании тока через материал проводников?
4. Как визуализировать результаты моделирования Джоулева нагрева?

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 19. МОДЕЛЬ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА

Цель работы — научиться моделировать тепловые режимы ЭА при естественной конвекции.

Задание

Создать модель электронного блока при естественном конвективном теплообмене:

– назначить условия с помощью «Мастера проекта», задав внутреннюю задачу и включив модели теплопроводности в твердых телах и гравитации;

– задать граничные условия на перфорированных отверстиях с помощью заглушек либо граничного условия «Перфорированная пластина»;

– задать материалы и прочие параметры проекта;

– проконтролировать правильность задания естественной конвекции в модели;

– выполнить анализ теплового режима изделия при естественной конвекции (модель изделия задает преподаватель).

Теоретическая часть

Учет роли конвективного теплообмена имеет большое значение при проектировании устройств, особенно если блок содержит более одного электронного модуля на печатной плате. Важно правильно расположить платы внутри корпуса для того, чтобы избежать перегрева одного модуля из-за воздействия другого, или в том случае, если один модуль своим расположением препятствует качественному охлаждению другого. Для устройств с пассивным охлаждением, где отвод тепла через охлаждающую среду осуществляется исключительно конвективными потоками, изменение ориентации плат в пространстве может иметь большое значение.

Рассмотрим пример расчета теплового режима блока с двумя модулями при разных положениях блока в пространстве (рис. 2.123).

С помощью «Мастера проекта» создадим новый проект анализа с моделями теплопроводности и гравитации. Важно отметить, что в параметрах модели гравитации можно задать проекции ускорения свободного падения на каждую ось координат. Изменение этих параметров равноценно повороту всей модели относительно поверхности Земли. Зададим внутренний тип задачи (рис. 2.124).

Выберем в качестве материала по умолчанию «Алюминий 6061» (рис. 2.125).

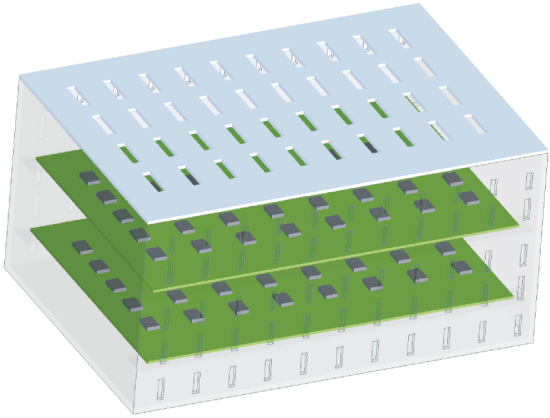


Рис. 2.123. Модель блока с двумя модулями

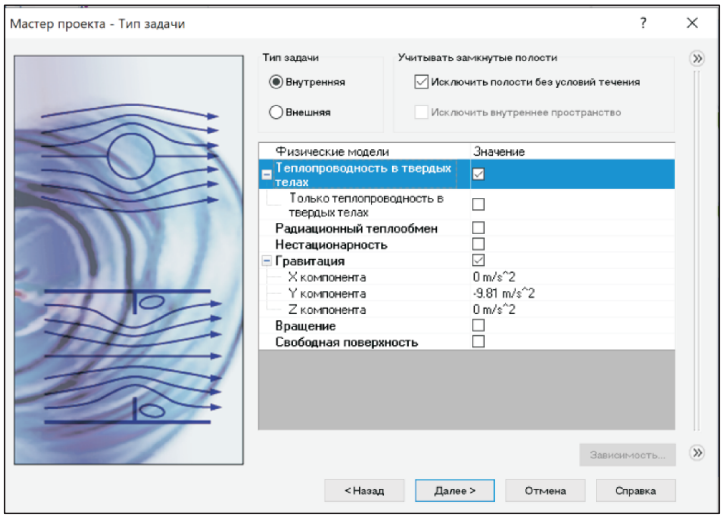


Рис. 2.124. Выбор типа задачи и физических моделей

Далее, поскольку был указан внутренний тип задачи, нужно создать замкнутое пространство внутри корпуса. Для этого с помощью инструмента «Создание заглушек» создадим заглушки для вентиляционных отверстий в корпусе (рис. 2.126). Альтернативой этому способу, особенно при многочисленном и регулярном расположении отверстий для охлаждения, служит использование граничного условия «Перфорированная пластина», для которого можно задать форму, размеры и шаг расположения отверстий; САПР самостоятельно вычислит коэффициент живого сечения, представляющий собой отношение площади отверстий к суммарной площади пластины.

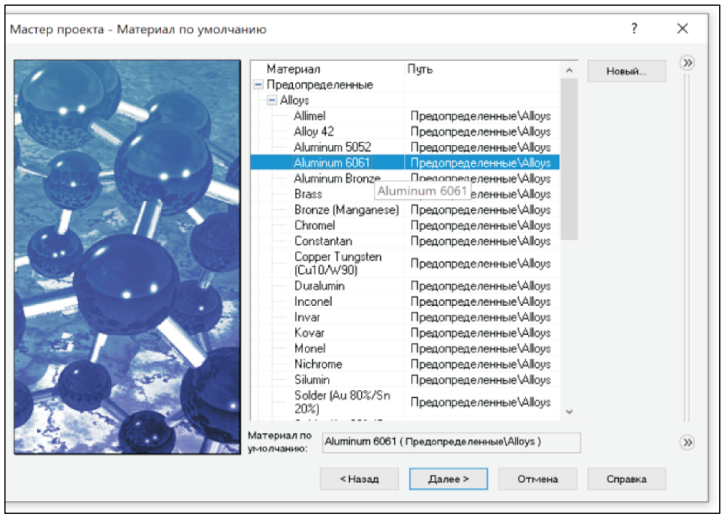


Рис. 2.125. Выбор материала твердого тела по умолчанию

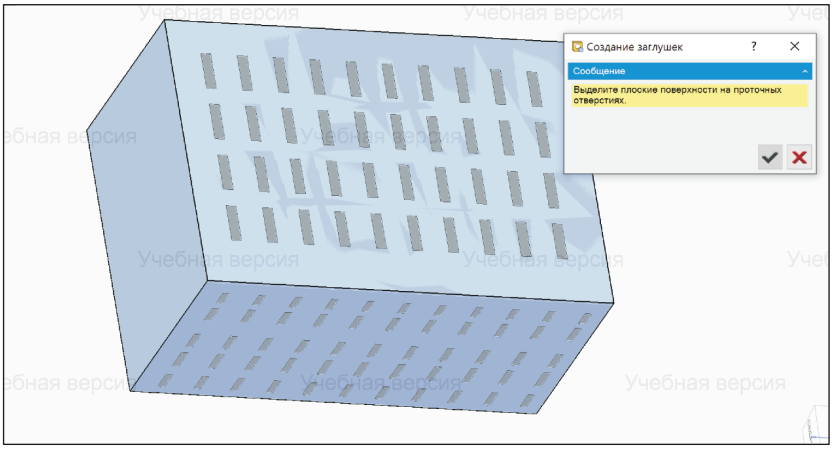


Рис. 2.126. Создание заглушек с помощью инструмента «Создание заглушек»

Затем для всех созданных заглушек назначим граничное условие второго рода «Давление окружающей среды» (рис. 2.127). Таким образом, мы указываем решателю, что данные отверстия являются внешними и связаны с окружающей средой, при этом пространство внутри корпуса по-прежнему остается замкнутым.

Далее к печатным платам применим граничное условие «Печатная плата» (рис. 2.128), а к микросхемам — условие «2R-модель» (рис. 2.129).

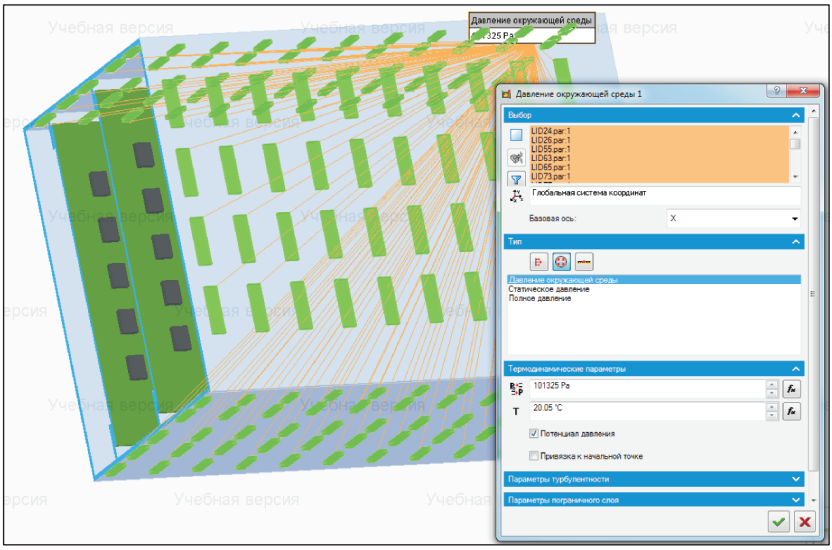


Рис. 2.127. Назначение граничного условия «Давление окружающей среды»

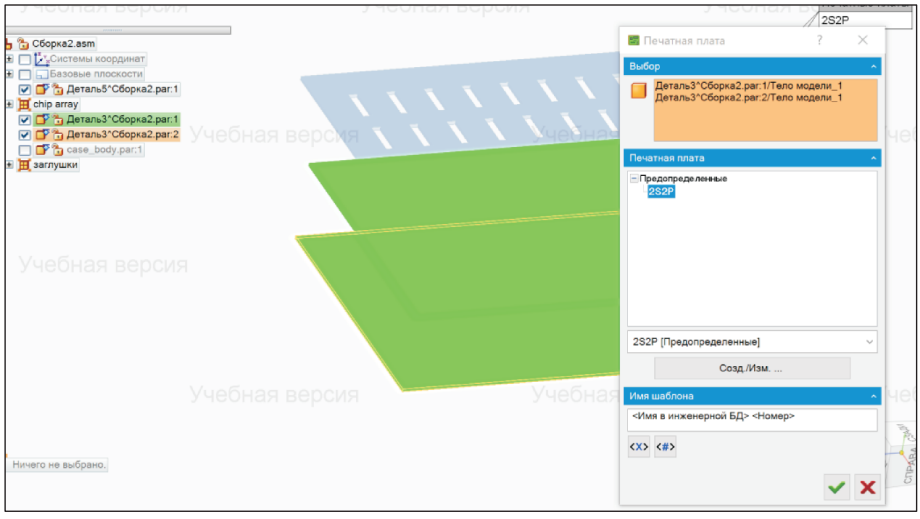


Рис. 2.128. Назначение граничного условия «Печатная плата»

После этого запустим расчет и выведем результаты (рис. 2.130).

Как следует из результатов, максимальная температура платы составила 45,5°C, причем верхняя плата нагрелась сильнее, поскольку из-за горизонтального положения плат и конвекции нижняя плата дополнительно нагревает верхнюю. Контрольная микросхема нагрелась до 50 °C.

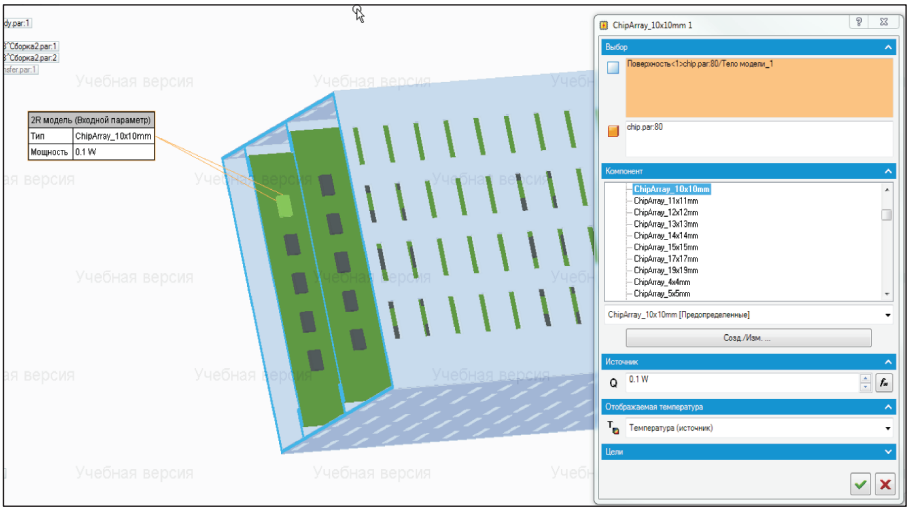


Рис. 2.129. Назначение граничного условия «2R-модель»

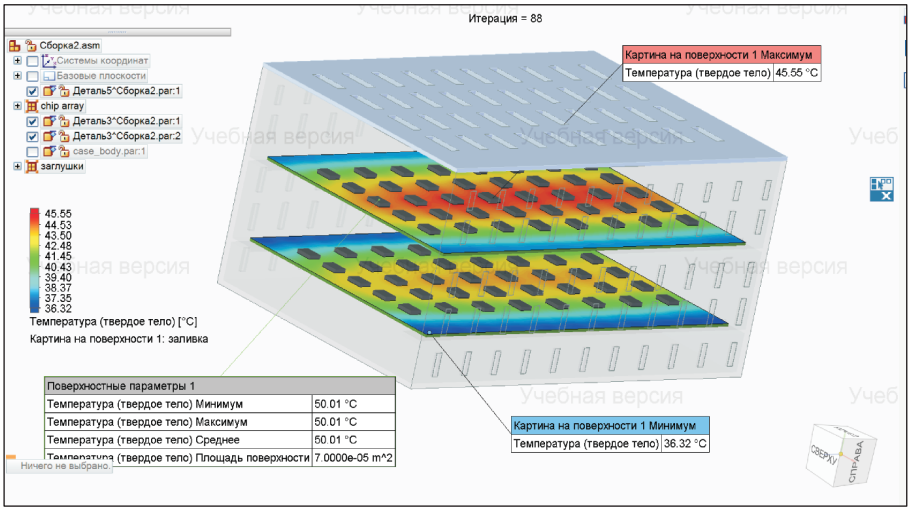


Рис. 2.130. Результаты расчета исходного блока

Попробуем улучшить охлаждение блока, повернув его на бок. Для этого в условиях расчета изменим проекции вектора ускорения свободного падения (рис. 2.131).

После введения этого изменения в проект запустим новый расчет и выведем результаты (рис. 2.132).

Как следует из результатов, максимальная температура платы снизилась до 40 °C за счет уменьшения влияния нижней платы на верхнюю. Более того,

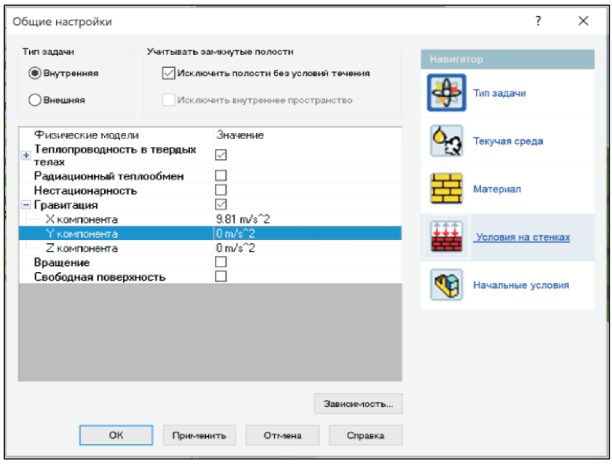


Рис. 2.131. Изменение проекций вектора ускорения свободного падения в параметрах физической модели гравитации

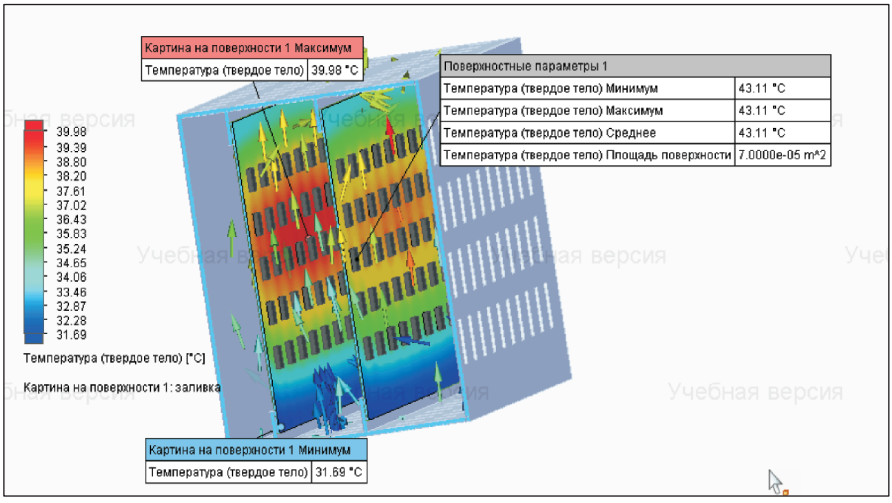


Рис. 2.132. Результаты расчета перевернутого блока

верхняя плата стала нагреваться даже меньше нижней, поскольку вокруг нее больше свободного пространства и вентиляционных отверстий. Контрольная микросхема также стала нагреваться меньше на 7 °C.

Содержание отчета

1. Краткий конспект теоретической части.
2. Скриншоты финальных моделей и результирующие файлы моделей в электронном виде.

3. Исходные данные и результаты анализов в печатном и электронном виде.

4. Выводы по работе.

5. Ответы на контрольные вопросы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. По какой причине и каким образом необходимо закрывать входные/выходные отверстия в корпусе блока?

2. Какие условия должны быть выполнены для автоматического формирования заглушек?

3. Какие граничные условия необходимо применить на входах и выходах модели?

4. Влияет ли ориентация плат в блоке на эффективность естественной конвекции?

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 20. МОДЕЛЬ ТЕПЛОВОЙ ШИНЫ

Цель работы — научиться применять идеализированные модели тепловых шин при моделировании тепловых режимов ЭА.

Задание

Создать идеализированную модель тепловой шины:

– назначить для предполагаемого компонента тепловой шины граничное условие «Реальная стенка»;

– задать стабилизированную температуру;

– проконтролировать правильность задания тепловой шины в модели;

– выполнить анализ теплового режима изделия с участием тепловой шины (модель изделия задает преподаватель).

Теоретическая часть

В том случае, когда несколько однотипных блоков установлены в одном месте, как, например, в дата-центрах, целесообразно использовать централизованную систему охлаждения для всех блоков сразу. В этом случае в блоке может использоваться внешний теплосъемник, имеющий постоянную температуру. Смоделируем нагрев блока при наличии подобных тепловых шин. В качестве условных тепловых шин с постоянной температурой укажем опоры плат, назначим им граничное условие «Реальная стенка» и зададим температуру (рис. 2.133).

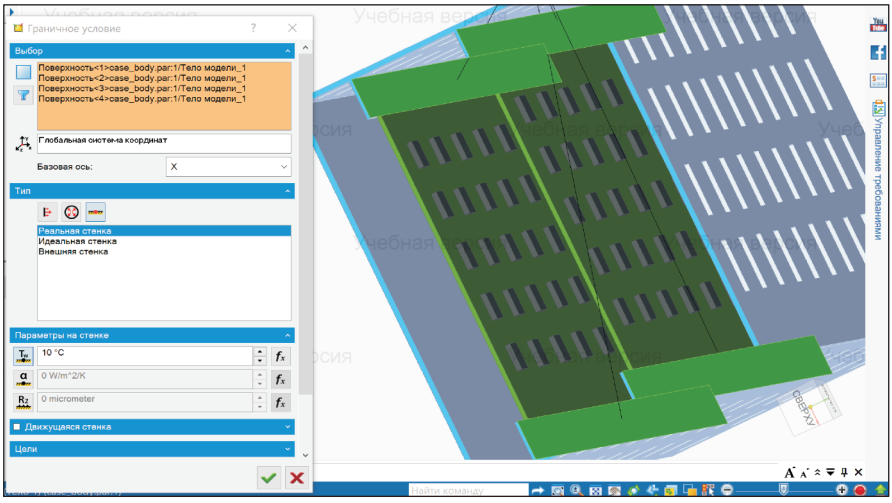


Рис. 2.133. Назначение постоянной температуры

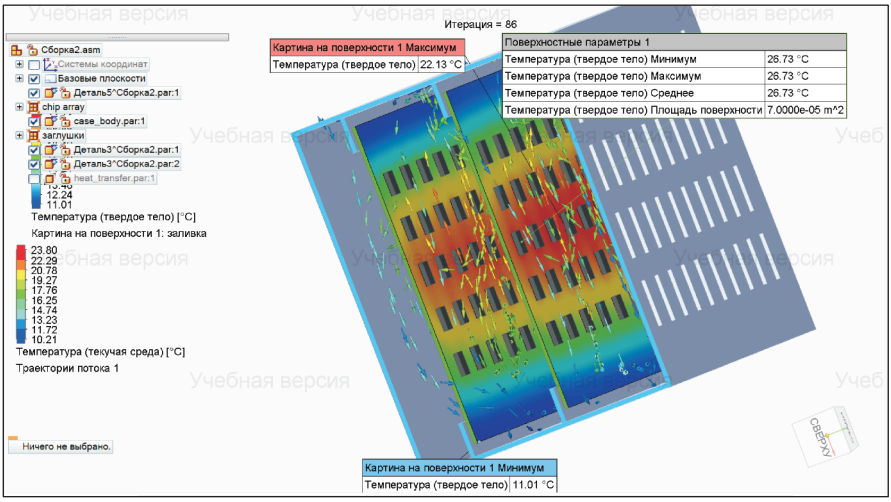


Рис. 2.134. Результаты расчета

Проведем расчет и отобразим результаты (рис. 2.134).

Как показывают результаты, тепловые шины с постоянной низкой температурой значительно снизили нагрев ячеек. Максимальная температура нагрева платы составила 22 °C, контрольная микросхема нагрелась до 26 °C.

Содержание отчета

1. Краткий конспект теоретической части.
2. Скриншоты финальных моделей и результирующие файлы моделей в электронном виде.
3. Исходные данные и результаты анализов в печатном и электронном виде.
4. Выводы по работе.
5. Ответы на контрольные вопросы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте определение и сформулируйте назначение тепловой шины.
2. В каких изделиях обычно применяют тепловые шины?
3. Какое граничное условие следует назначить для тепловых шин?
4. Как визуализировать результаты применения тепловых шин?

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 21. МОДЕЛЬ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Цель работы — научиться использовать параметрический анализ и оптимизацию при моделировании тепловых режимов ЭА.

Задание

Задать и выполнить параметрический анализ модели:
– открыть готовый проект анализа;
– назначить изменяемый параметр;
– создать параметрическое исследование;
– выбрать режим «Оптимизация цели» и добавить назначенный ранее изменяемый параметр;
– задать диапазон изменения значений параметра;
– задать целевое значение;
– задать допустимый диапазон отклонения от целевого значения;
– проконтролировать правильность задания параметрического анализа модели;
– выполнить серию расчетов для изделия (модель изделия задает преподаватель).
– получить оптимальное значение изменяемого параметра.

Теоретическая часть

Одной из самых значимых возможностей системы CFD-анализа является возможность проведения параметрического анализа, которая позволяет изменять различные параметры модели в заданных конструктором пределах для достижения требуемого теплового режима, например для обеспечения требований ТЗ с помощью минимальных усилий. Параметрами могут выступать как геометрические размеры отдельных элементов, так и параметры различных граничных условий (скорость вращения вентилятора, температура тепловой шины, значение тока через термоэлектрический элемент и др.).

В качестве примера для оптимизации рассмотрим проект анализа тепловой трубки, которая была использована ранее для расчета охлаждения компонента, заданного 2R-моделью.

В качестве изменяемого параметра зададим высоту ребер радиатора (рис. 2.135). Для этого необходимо назначить размер, а затем зафиксировать его.

Далее создадим параметрическое исследование на основе существующего проекта анализа (рис. 2.136).

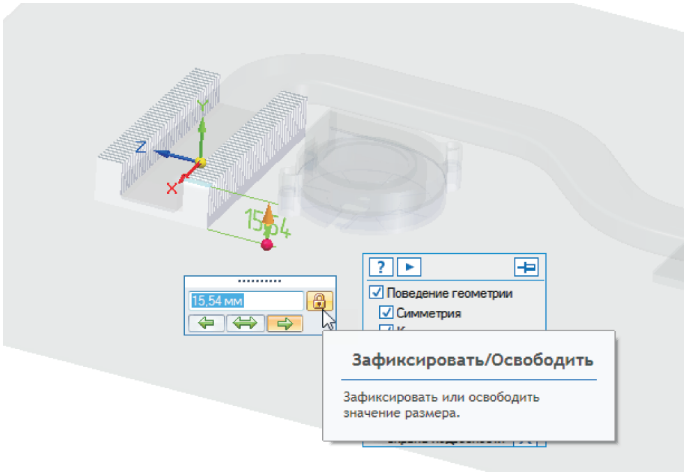


Рис. 2.135. Назначение и фиксирование размера

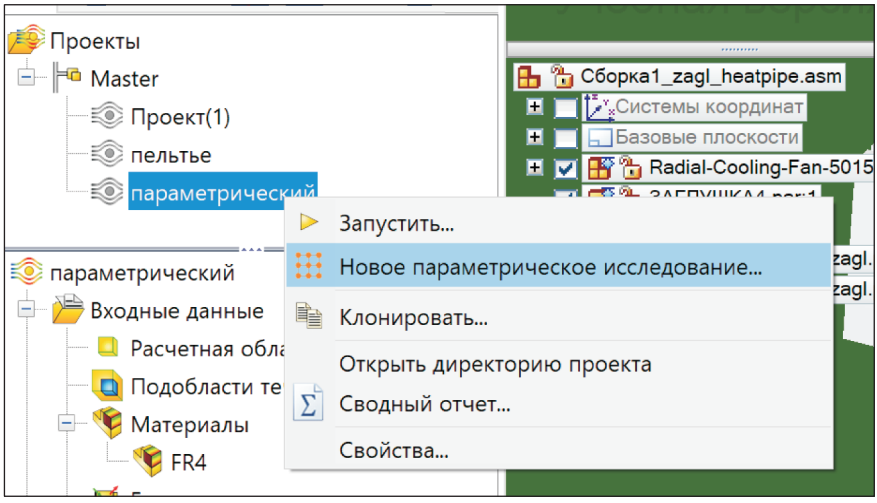


Рис. 2.136. Запуск создания нового параметрического исследования

Выберем режим параметрического анализа «Оптимизация цели» и добавим в качестве изменяемого параметра заданный ранее размер высоты радиатора (рис. 2.137).

Зададим диапазон значений, в пределах которого может изменяться размер решателя (рис. 2.138), после этого назначим искомое (целевое) значение параметра (рис. 2.139). В данном случае это значение температуры поверхности в непосредственной близости от источника нагрева. Следует также задать допустимый диапазон отклонения от искомого значения. Данный параметр является одной из целей расчета, указанных в проекте.

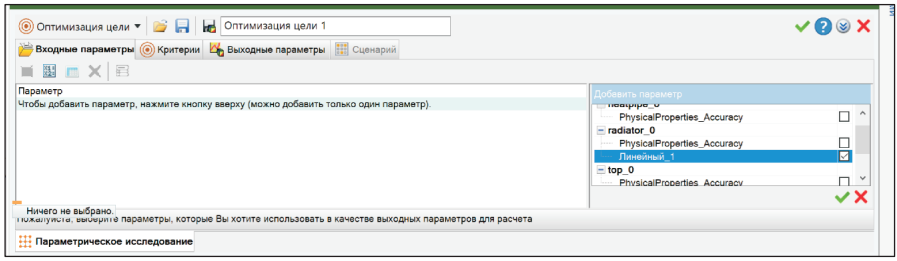


Рис. 2.137. Назначение изменяемого параметра оптимизации

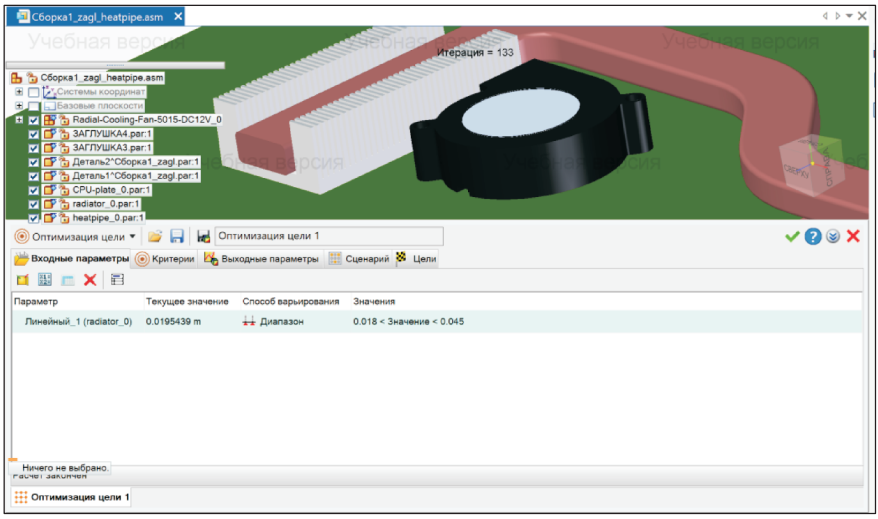


Рис. 2.138. Назначение диапазона допустимых значений параметра

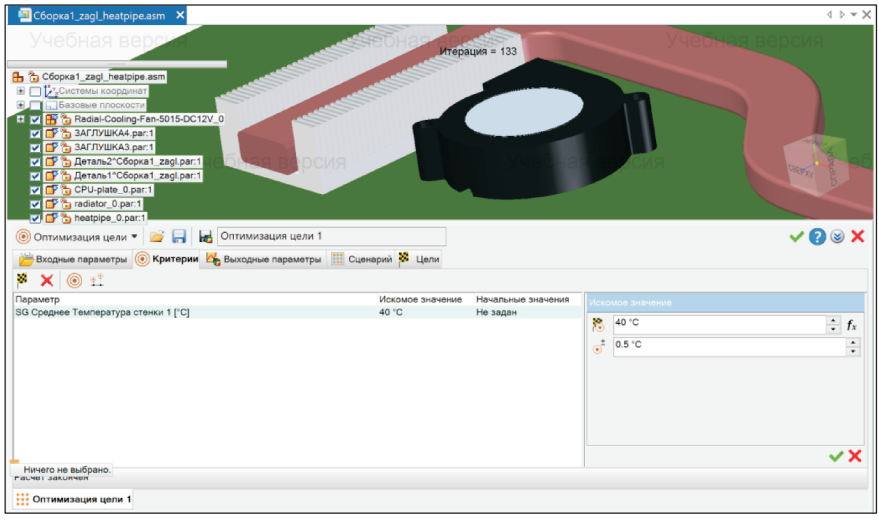


Рис. 2.139. Назначение искомого значения параметра

Во вкладке «Сценарий» запустим серию расчетов (рис. 2.140), которые будут итеративно выполняться при разных значениях высоты радиатора, пока не будет достигнуто необходимое целевое значение температуры с учетом ранее заданного допуска.

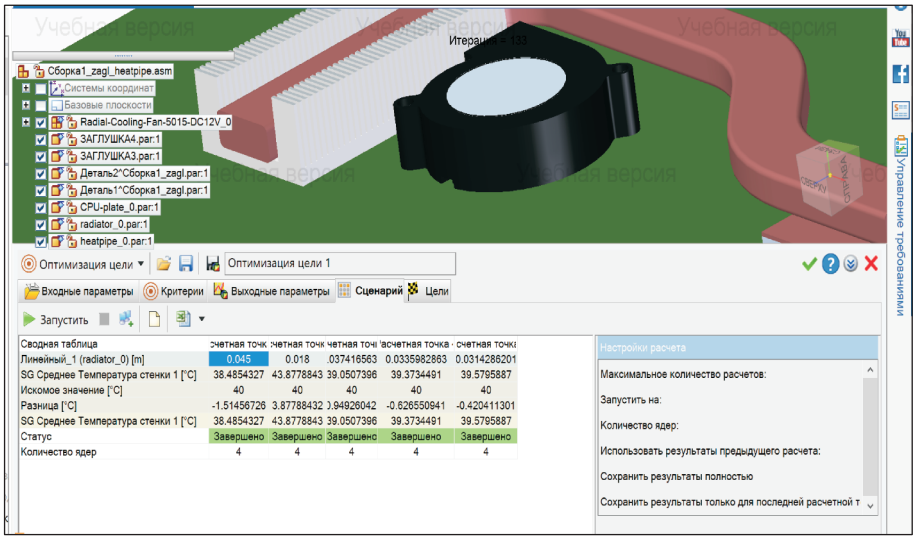


Рис. 2.140. Запуск серии расчетов

Таким образом, зная лишь допустимый диапазон значений, в пределах которых конструктор имеет возможность менять параметры разрабатываемого устройства, можно достичь поставленной цели или убедиться в ее недостижимости в автоматическом режиме при заданном наборе параметров.

Содержание отчета

1. Краткий конспект теоретической части.
2. Скриншоты финальных моделей и результирующие файлы моделей в электронном виде.
3. Исходные данные и результаты анализов в печатном и электронном виде.
4. Выводы по работе.
5. Ответы на контрольные вопросы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каково назначение параметрического анализа?
2. Можно ли выполнить многокритериальную оптимизацию?
3. Каким образом задается сценарий моделирования?
4. В каком виде выводятся результаты оптимизации цели?

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 22. СОЗДАНИЕ ПРОЕКТА И ЗАДАНИЕ ПАРАМЕТРОВ CFD-АНАЛИЗА

Цель работы — научиться создавать проекты гидрогазодинамического анализа и задавать их общие параметры при моделировании тепловых режимов ЭА.

Задание

Создать проект CFD-анализа и задать набор его необходимых параметров:
– задать имя проекта;
– выбрать конфигурацию модели;
– задать систему физических единиц;
– назначить тип задачи и физические модели;
– назначить материал по умолчанию;
– назначить условие на внешних стенках по умолчанию;
– назначить начальные условия для стационарной задачи;
– проконтролировать правильность задания CFD-анализа модели и правильность построения расчетной и проточной области.

Теоретическая часть

Применим представленную в лекционном (см. п. 1.15–1.17) и практическом (см. практические работы № 13–21) курсе методику к задаче анализа модели аудиоусилителя в корпусе. Модель является примером типового блока ЭА с одним модулем в металлическом корпусе, снабженном системой активного охлаждения (рис. 2.141).

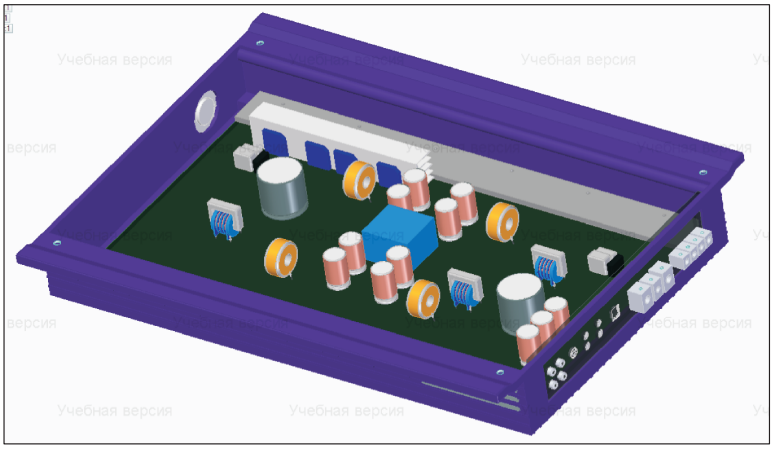


Рис. 2.141. Расчетная модель аудиоусилителя

В данном примере уже проведена предварительная подготовка модели: вентилятор охлаждения и печатная плата заменены упрощенными моделями, вентиляционные отверстия уже закрыты заглушками.

Создадим новый проект расчета (рис. 2.142).

Определим систему единиц измерения, выберем систему СИ и изменим единицы измерения температуры на градусы Цельсия (рис. 2.143).

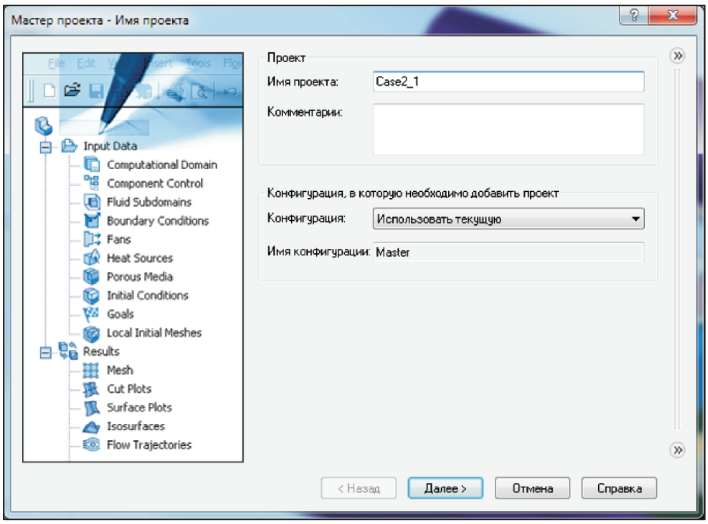


Рис. 2.142. Создание проекта расчета

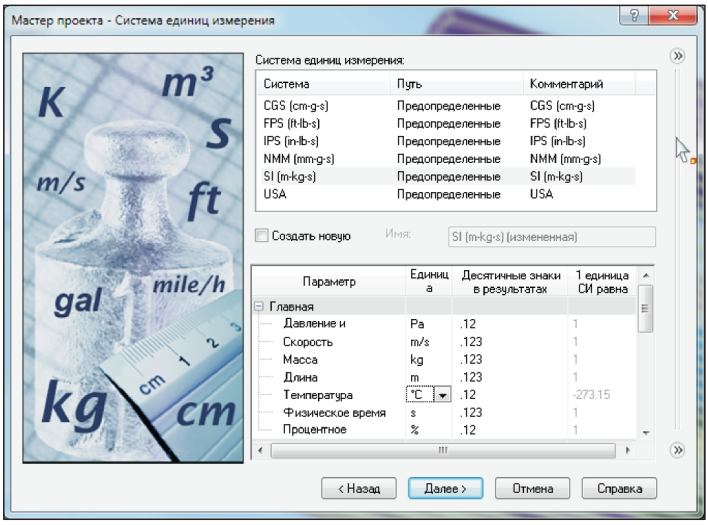


Рис. 2.143. Выбор системы единиц измерения

Определим тип задачи. Назначим тип задачи «Внутренняя», так как имеется замкнутый объем текучей среды, ограниченный корпусом устройства. Поскольку необходимо учитывать кондуктивный теплообмен, включим физическую модель теплопроводности в твердых телах (рис. 2.144).

Выберем воздух в качестве текучей среды по умолчанию (рис. 2.145).

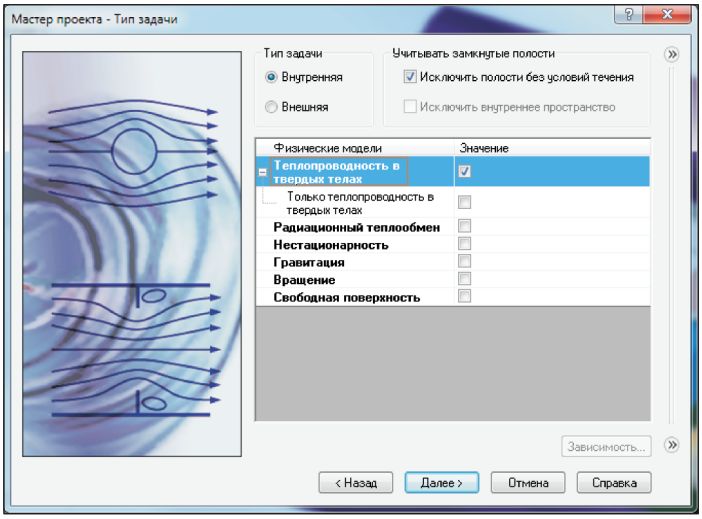


Рис. 2.144. Выбор типа задачи и включение физических моделей

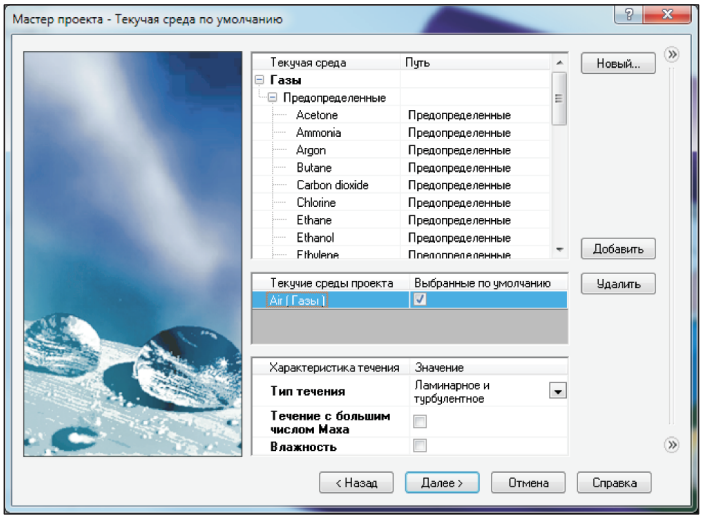


Рис. 2.145. Выбор текучей среды по умолчанию

Назначим «Алюминий» материалом твердого тела по умолчанию (рис. 2.146).

Назначим коэффициент теплоотдачи для внешней стенки как тепловое условие по умолчанию (рис. 2.147).

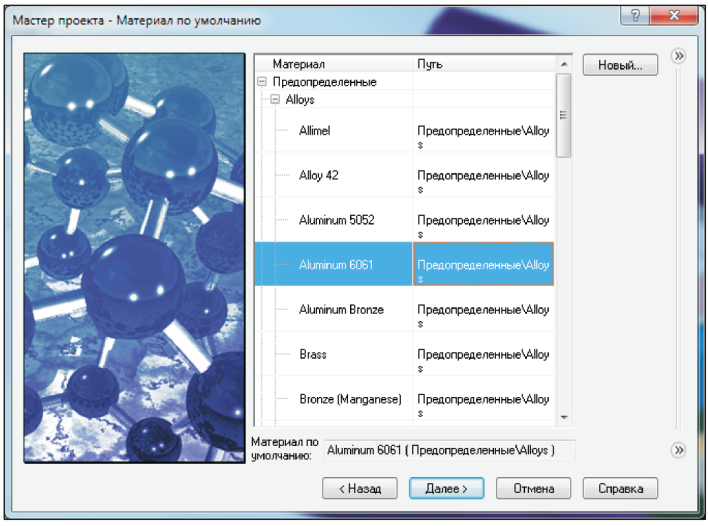


Рис. 2.146. Выбор материала твердого тела по умолчанию

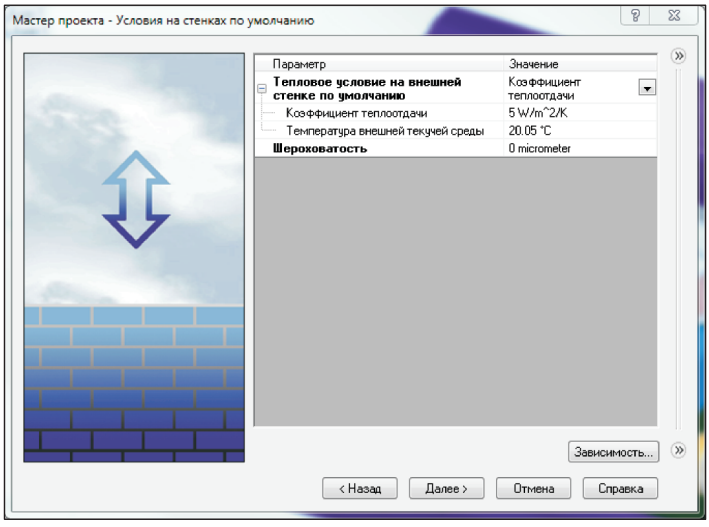


Рис. 2.147. Назначение условия на внешней стенке по умолчанию

Определим общие начальные условия (рис. 2.148).
Проверим границы расчетной области (рис. 2.149).

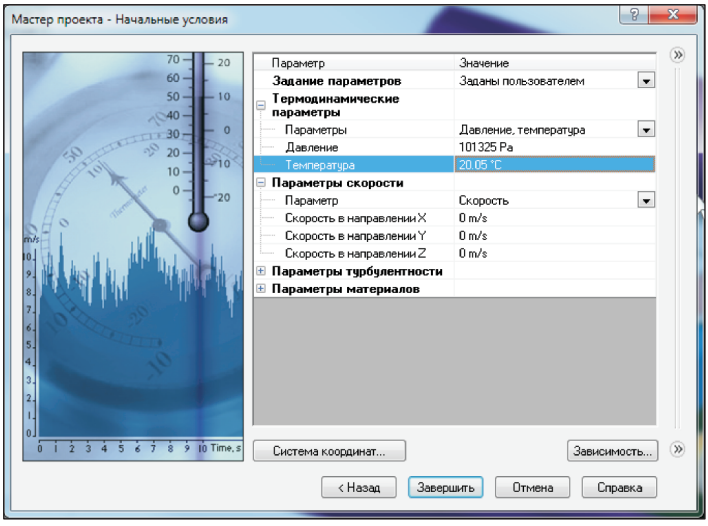


Рис. 2.148. Назначение общих начальных условий среды

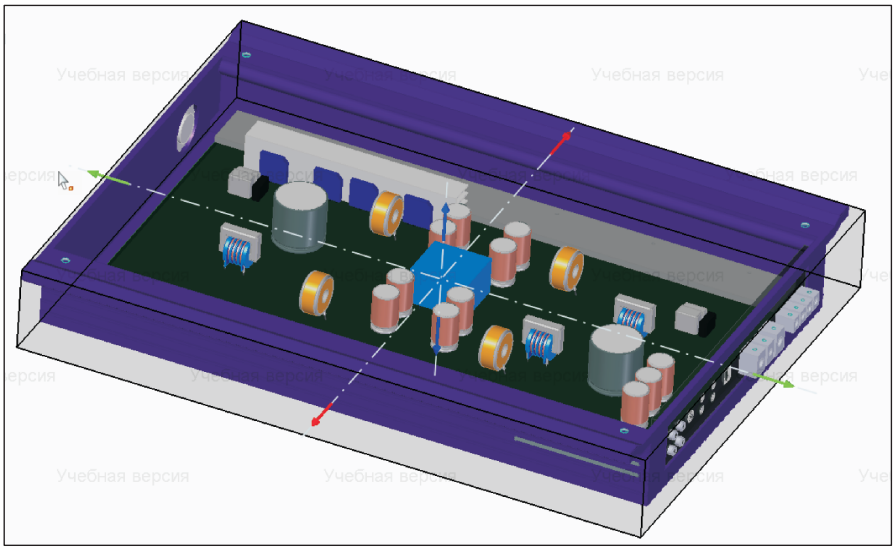


Рис. 2.149. Отображение размеров расчетной области

Содержание отчета

1. Краткий конспект теоретической части.
2. Скриншоты финальных моделей и результирующие файлы моделей в электронном виде.
3. Исходные данные и результаты построений в печатном и электронном виде.
4. Выводы по работе.
5. Ответы на контрольные вопросы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Чем различаются внешняя, внутренняя и смешанная задачи?
2. В каких случаях необходимо включать физическую модель «Теплопроводность в твердых телах»?
3. К каким объектам будет применен назначенный материал?
4. Для каких задач актуально назначение начальных условий в явном виде?

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 23. НАЗНАЧЕНИЕ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ И ИСТОЧНИКОВ ДЛЯ ЭЛЕМЕНТОВ. НАЗНАЧЕНИЕ ЦЕЛЕЙ И НАСТРОЙКА СЕТКИ

Цель работы — научиться назначать граничные условия и источники, назначать цели и настраивать сетку решателя для проектов гидрогазодинамического анализа при моделировании тепловых режимов ЭА.

Задание

Назначить граничные условия для элементов в проекте CFD-анализа:
– назначить материалы кроме материала по умолчанию;
– назначить граничные условия первого рода;
– назначить граничные условия второго рода;
– назначить стабилизированные температуры (если применимо);
– назначить вентиляторы (если применимо);
– назначить прочие граничные условия;
– назначить источники тепловыделения (объемные, поверхностные, 2R-модели и пр.);
– назначить цели;
– настроить параметры сетки;
– проконтролировать правильность задания параметров анализа;
– запустить анализ на выполнение.

Теоретическая часть

Продолжим работу с проектом аудиоусилителя, общие параметры для которого были заданы в практической работе № 22.

Поскольку проект не содержит подобластей течения, их назначать с помощью инструмента «Подобласти течения» не требуется.

Устройство содержит элементы, материал которых отличается от алюминия, выбранного по умолчанию, поэтому необходимо назначить эти материалы с помощью инструмента «Материалы» (рис. 2.150).

Далее назначим граничные условия. В данном случае их два: постоянная температура в месте соприкосновения корпуса устройства с предполагаемым теплосъемником (рис. 2.151) и давление окружающей среды (рис. 2.152), примененное к заглушкам вентиляционных отверстий.

Устройство имеет вентилятор охлаждения, модель которого предварительно была заменена упрощенной. Назначим граничное условие «Вентилятор» с выбором модели из инженерной базы, определим также скорость и температуру входящего потока (рис. 2.153).

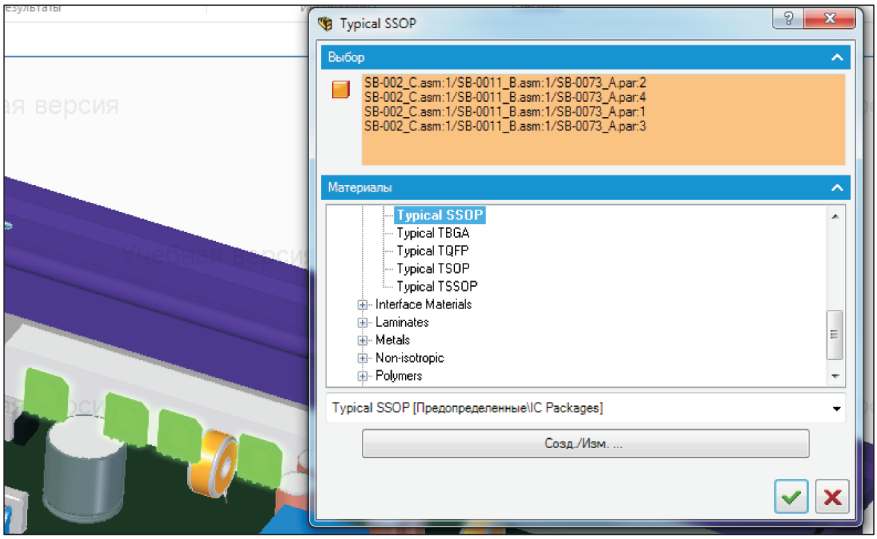


Рис. 2.150. Назначение материала элементам

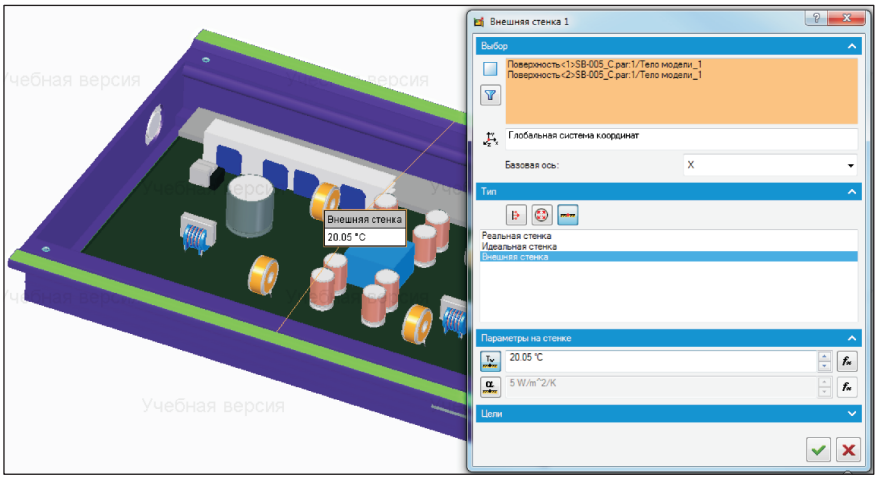


Рис. 2.151. Назначение граничного условия постоянной температуры внешней стенки

Проект также содержит упрощенную модель печатной платы, для которой необходимо назначить специальное граничное условие (рис. 2.154).

Назначим источники нагрева — транзисторы (рис. 2.155).

Назначим цели расчета для определения критериев сходимости. В данной задаче анализируется перегрев электронных компонентов, поэтому наибольший интерес представляют максимальная и средняя температуры их нагрева. Назначим соответствующие цели (рис. 2.156).

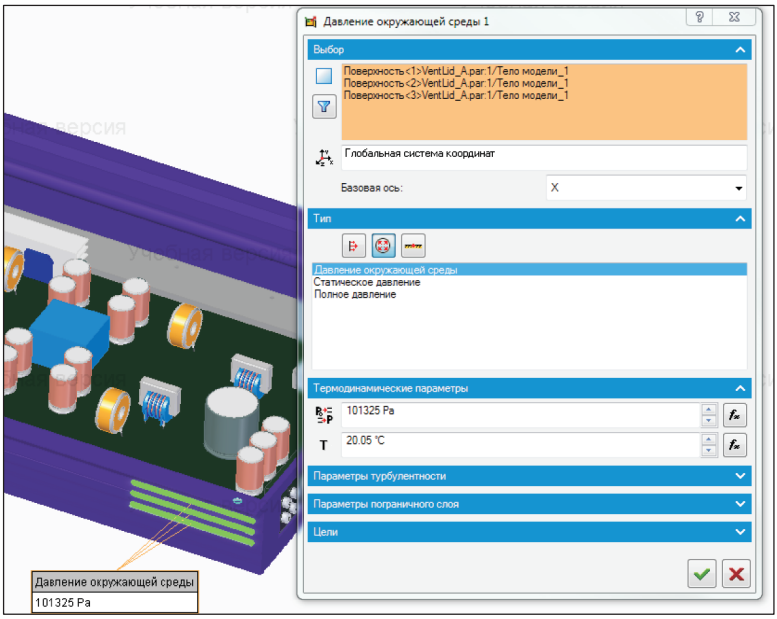


Рис. 2.152. Назначение граничного условия второго рода «Давление окружающей среды»

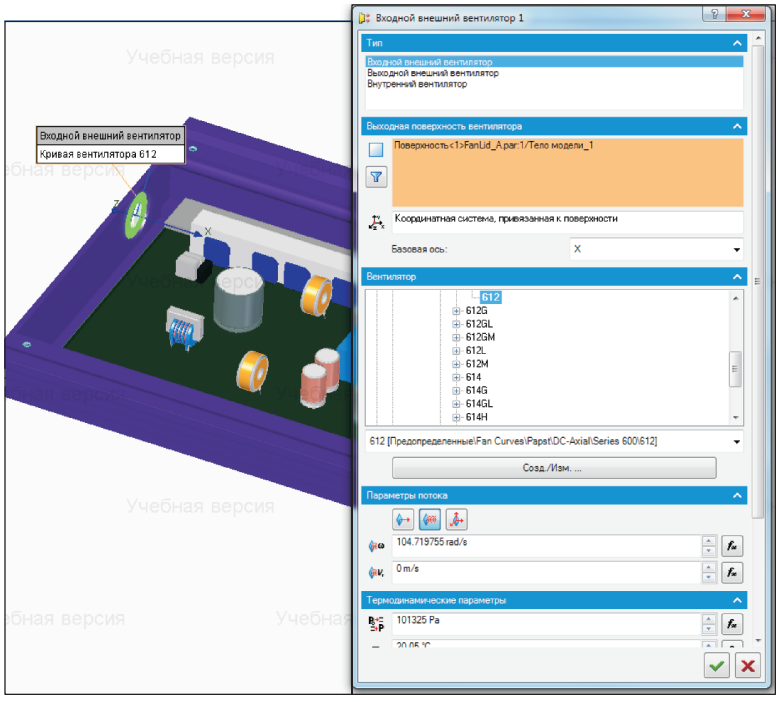


Рис. 2.153. Назначение граничного условия «Вентилятор»

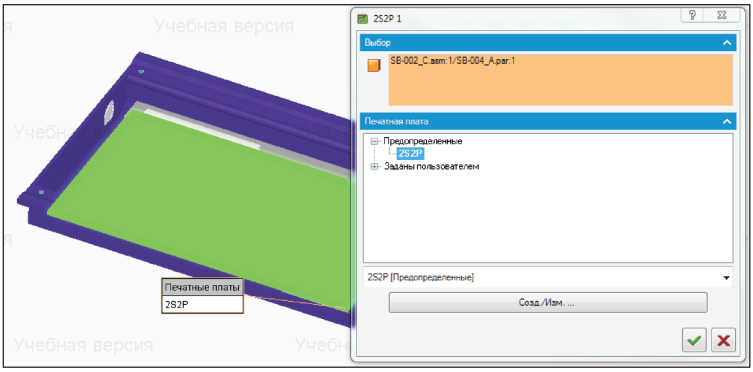


Рис. 2.154. Назначение граничного условия «Печатная плата»

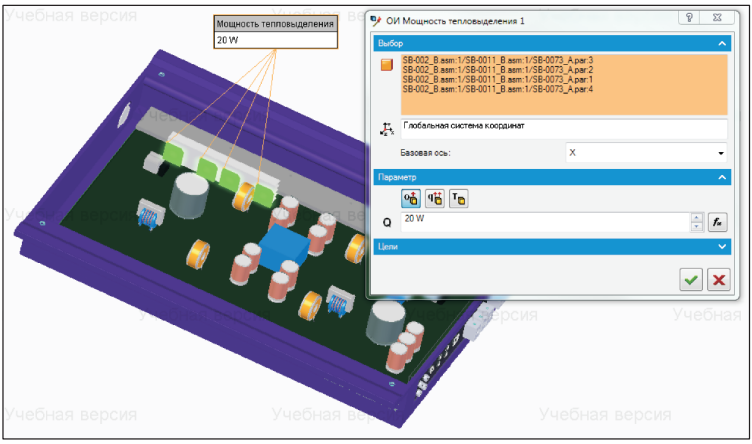


Рис. 2.155. Назначение источников нагрева

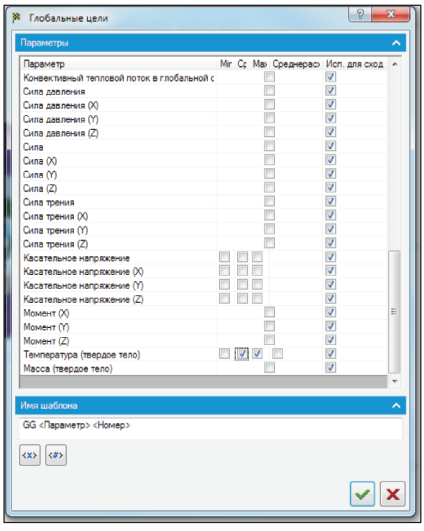


Рис. 2.156. Назначение целей расчета

Настроим параметры сетки решателя (рис. 2.157).

Проект не содержит узких каналов для протекания охлаждающей среды, поэтому нет необходимости включать улучшение разрешающей способности каналов.

Запустим расчет на выполнение (рис. 2.158).

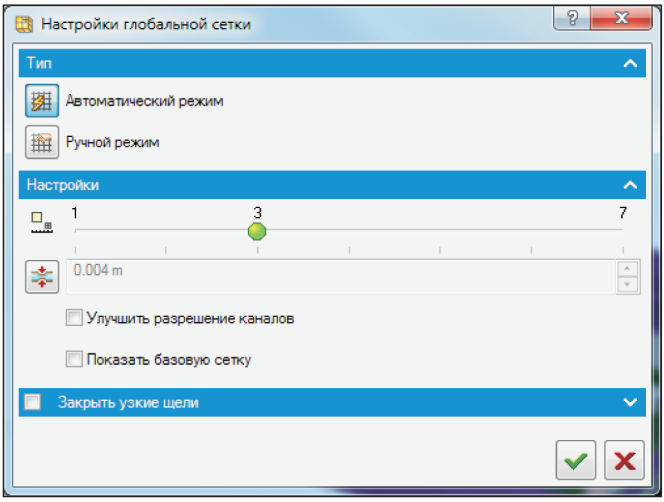


Рис. 2.157. Настройка параметров генерации сетки решателя

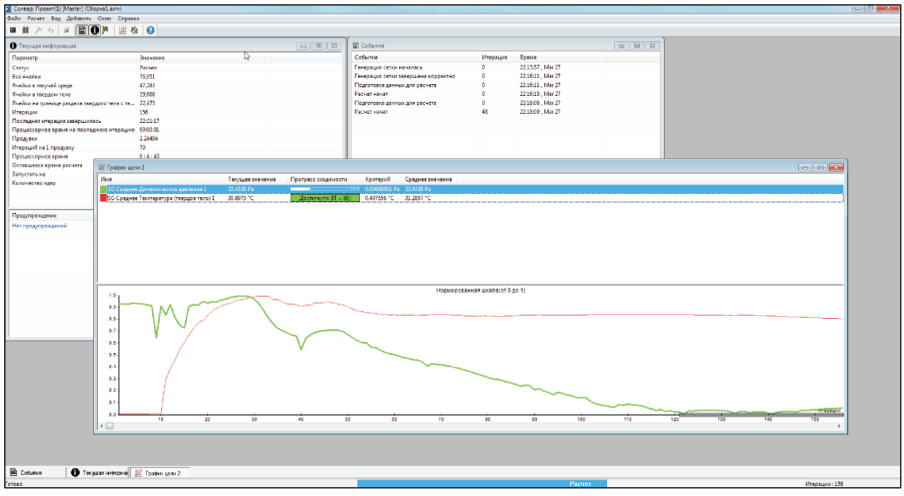


Рис. 2.158. Прогресс решения

Содержание отчета

1. Краткий конспект теоретической части.
2. Скриншоты финальных моделей и результирующие файлы моделей в электронном виде.
3. Исходные данные и результаты анализов в печатном и электронном виде.
4. Выводы по работе.
5. Ответы на контрольные вопросы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие параметры необходимо задавать для объектов модели?
2. Как задавать граничное условие для внешнего вентилятора?
3. Почему необходимо задавать цели моделирования?
4. В каких случаях необходимо перестраивать сетку по умолчанию?

2.24. ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 24. ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ CFD-АНАЛИЗА

Цель работы — научиться визуализировать и исследовать результаты гидрогазодинамического анализа при моделировании тепловых режимов ЭА.

Задание

Исследовать результаты CFD-анализа и выполнить модификацию конструкции:

– загрузить результаты выполненного анализа;

– построить картины в сечении, картины на поверхности, траектории потока либо воспользоваться прочими средствами визуализации результатов анализа;

– исследовать полученные результаты;

– изменить конструкцию модели на базе выполненного исследования;

– получить новые результаты и сравнить их с предыдущими;

– сделать выводы о возможности успешной модификации конструкции с целью удовлетворения требований ТЗ.

Теоретическая часть

Загрузим результаты анализа теплового режима аудиоусилителя (см. практические работы № 22 и 23) и исследуем их (рис. 2.159).

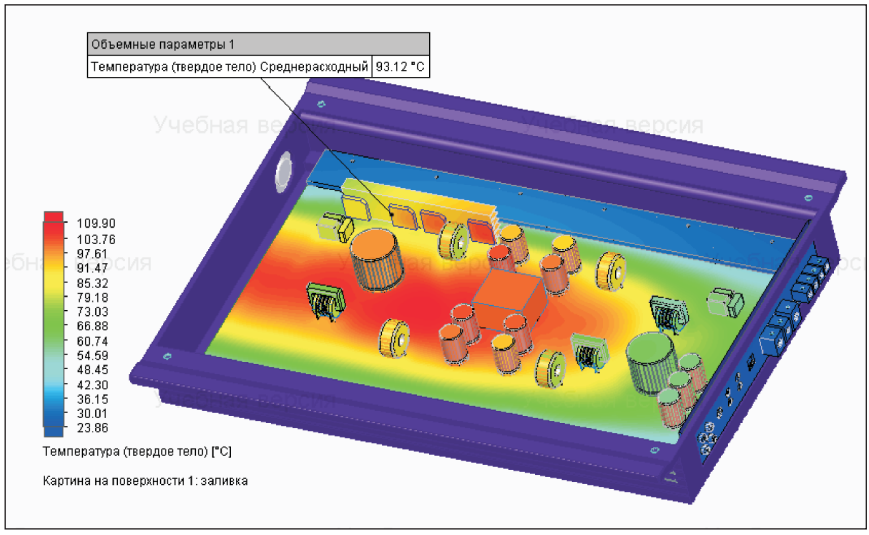


Рис. 2.159. Результаты CFD-расчета

Анализ показал, что компоненты испытывают перегрев. Результаты анализа можно дополнительно передать в ECAD-систему, что позволит конструкторам электронной и механической частей изделия проводить параллельно работу по устранению проблем с охлаждением.

Внесем изменения в конструкцию, а именно: увеличим размер радиатора и сместим вентилятор, чтобы он лучше обдувал центральную зону платы. Затем повторим расчет (рис. 2.160).

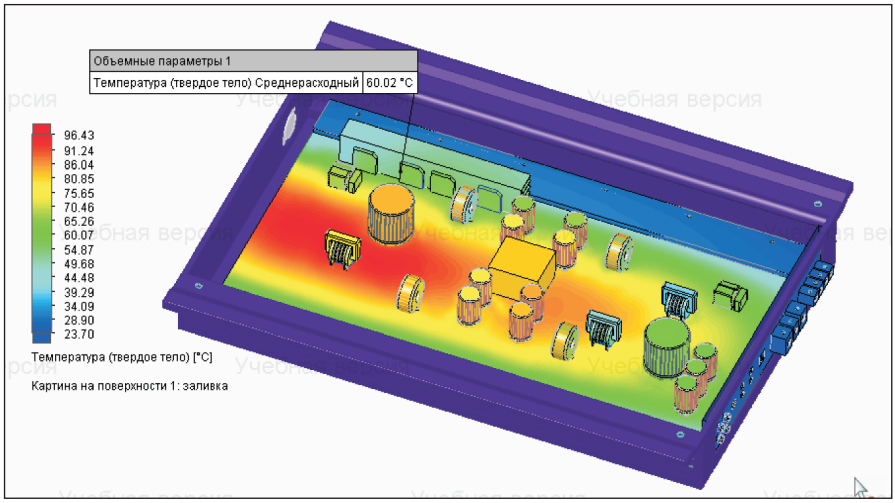


Рис. 2.160. Результаты расчета после внесения изменений в конструкцию

Очевидно значительное снижение нагрева компонентов.

Таким образом, благодаря анализу с использованием ПО CFD удалось улучшить тепловой режим компонентов аудиоусилителя и повысить его эксплуатационные качества. Предпринятые меры по улучшению качества охлаждения в ожидаемой степени отразились на результатах повторного теплового расчета и позволяют судить о соответствии полученных результатов анализа процессам в реальном устройстве.

Содержание отчета

1. Краткий конспект теоретической части.
2. Скриншоты финальных моделей и результирующие файлы моделей в электронном виде.
3. Исходные данные и результаты анализов в печатном и электронном виде.
4. Выводы по работе.
5. Ответы на контрольные вопросы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие механизмы постпроцессинга предлагает среда FloEFD?
2. Чем отличаются объемные и поверхностные картины?
3. Как визуализировать потоки текучих сред?
4. Можно ли визуализировать несколько видов результатов для одной модели одновременно?

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 25. МОДЕЛИРОВАНИЕ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛАСТИН

Цель работы — научиться моделировать биметаллические пластины.

Задание

Создать расчетную 3D-модель и выполнить моделирование биметаллической пластины:

– создать вспомогательную сборочную единицу;

– создать пустые детали в соответствии с количеством слоев пластины;

– скопировать геометрию исходной модели во вспомогательные модели;

– создать упрощенное представление для исключения исходной пластины;

– создать статический анализ;

– включить опции «Нелинейность» и «Вычислять большие деформации»;

– задать различные материалы для деталей;

– выполнить закрепление;

– задать температурную нагрузку;

– создать измеритель, вычисляющий вертикальную деформацию пластины;

– выполнить анализ;

– исследовать результаты;

– принять решение по изменению конструкции, если это необходимо.

Теоретическая часть

Сложность моделирования биметаллических пластин заключается в том, что, как правило, модель создается конструктором в режиме детали, а материалы требуется назначать разные. Кроме того следует учитывать нелинейный характер поведения таких пластин, поэтому необходимо использовать анализ «больших деформаций».

Рассмотрим один из приемов создания модели биметаллической пластины (рисунки демонстрируются для ПО Creo/Elements Mechanica). Работа проводится в несколько этапов:

- создание вспомогательной сборочной единицы;
- создание пустых деталей по количеству слоев пластины;
- копирование геометрии исходной модели во вспомогательные;
- создание упрощенного представления для исключения исходной пластины.

Итак, имеется модель пластины (рис. 2.161).

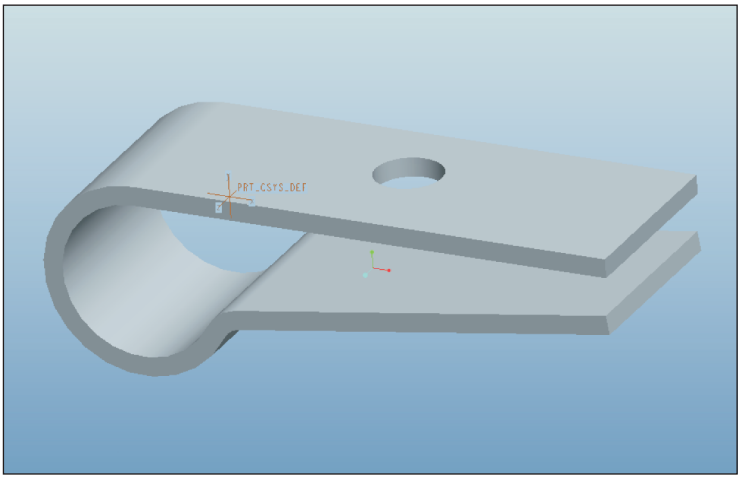


Рис. 2.161. Модель биметаллической пластины

Создадим вспомогательную сборку и разместим там эту пластину по умолчанию (рис. 2.162).

Создадим последовательно две пустые вспомогательные детали sloj1 и sloj2 (рис. 2.163).

Активизируем деталь sloj1 (щелкнем правой кнопкой мыши на имени детали в дереве команд и выберем команду «Активизировать»). Выделим

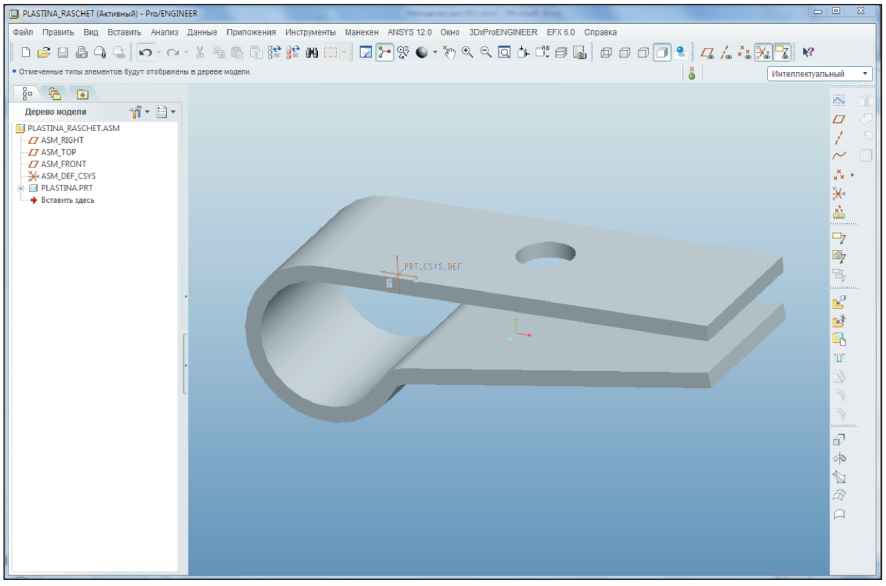


Рис. 2.162. Размещение модели биметаллической пластины в сборке по умолчанию

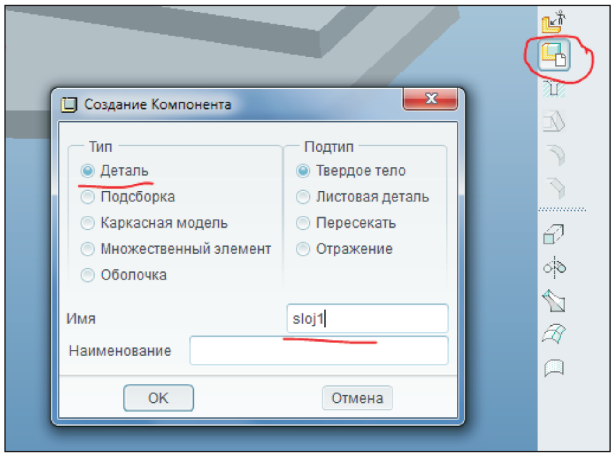


Рис. 2.163. Создание вспомогательных деталей

аккуратно при нажатой клавише “Ctrl” все поверхности на одной стороне детали; сначала нужно щелкнуть мышью по самой детали, затем появится возможность выделять ее поверхности (рис. 2.164).

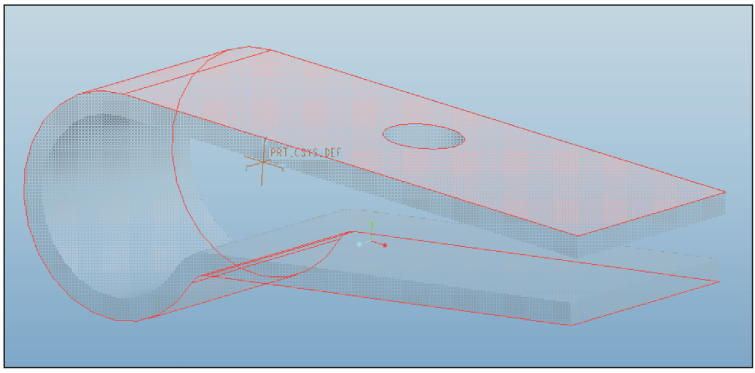


Рис. 2.164. Выделение поверхностей на одной стороне детали

Затем применим последовательно команды «Копировать», «Вставить» или воспользуемся комбинациями клавиш “Ctrl+C”, “Ctrl+V”, подтвердим команду, активировав зеленую галочку. Геометрия будет скопирована в деталь sloj1.

Далее раскроем содержимое детали sloj1 и поместим курсор на команду «Копия1», затем вызовем меню «Править» — «Утолщить», проверим направление создания материала и введем толщину слоя (рис. 2.165).

Подтвердим команду. Создание детали sloj1 завершено.

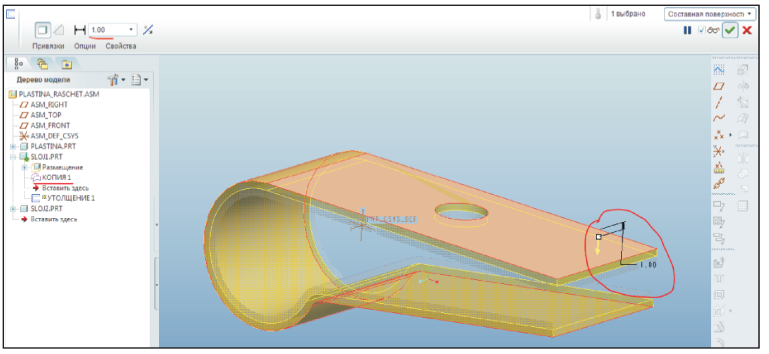


Рис. 2.165. Увеличение толщины детали sloj1

Теперь желательно скрыть исходную деталь, чтобы она не мешала созданию последующих слоев (щелкнем правой кнопкой мыши на детали в дереве команд и выберем команду «Скрыть»).

Активизируем деталь sloj2. Проделаем процедуру копирования геометрии еще раз, выделяя теперь соответствующие поверхности детали sloj1 (рис. 2.166).

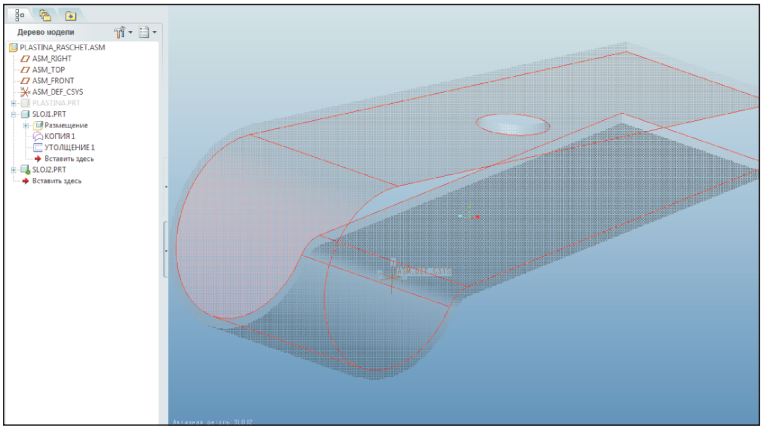


Рис. 2.166. Выделение поверхностей на другой стороне детали

Снова выполним операции «Копировать», «Вставить», «Править» — «Утолщить». Введем толщину, проверим направление (рис. 2.167).

Подтвердим команду. Создание детали sloj2 завершено.

Активизируем главную сборку (plastina_raschet.asm) — правой кнопкой мыши на команде «Активизировать».

Следующий шаг — создание упрощенного представления для исключения исходной детали, поскольку ее геометрия пересекается со вспомогательными деталями. Упрощение происходит так, как показано в лекции 1.11

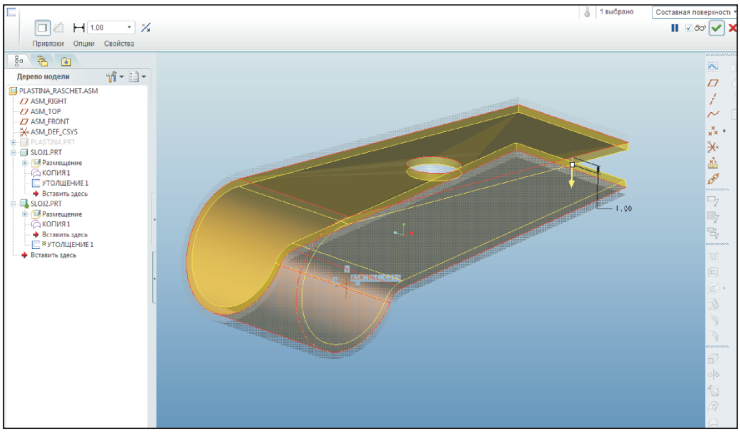


Рис. 2.167. Задание толщины детали sloj2

«Создание расчетной модели», простого скрытия детали недостаточно (рис. 2.168).

Модель готова к расчету, переходим в модуль Creo/Simulate.

Рассмотрим следующий вариант: пластину закрепляют за одну из поверхностей, всю пластину нагревают от 20 до 40 °C.

Зададим разные материалы для деталей sloj1 и sloj2, закрепим поверхность, введем температурную нагрузку. Модель приобретет вид, показанный на рис. 2.169.

Создадим статический анализ (рис. 2.170) и для этого включим опции «Нелинейность», «Вычислять большие деформации». Эти опции включаются

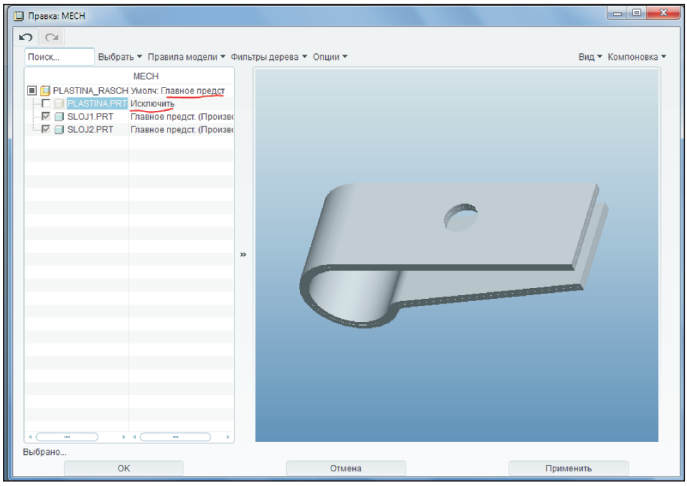


Рис. 2.168. Создание упрощенного представления для исключения исходной детали

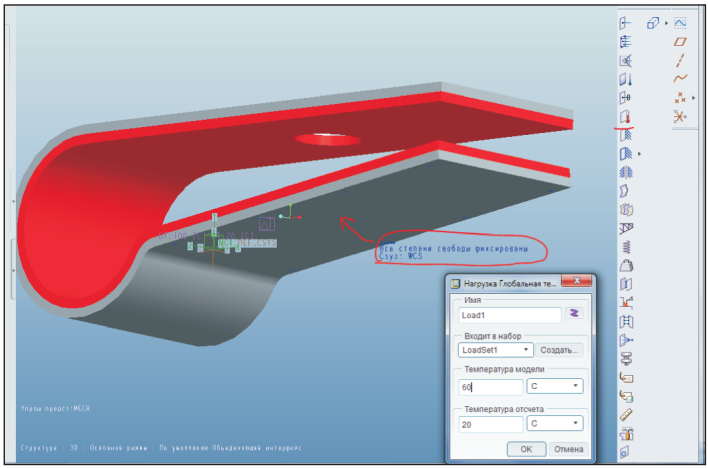


Рис. 2.169. Вид модели биметаллической пластины после задания материалов, закрепления поверхности и введения температурной нагрузки

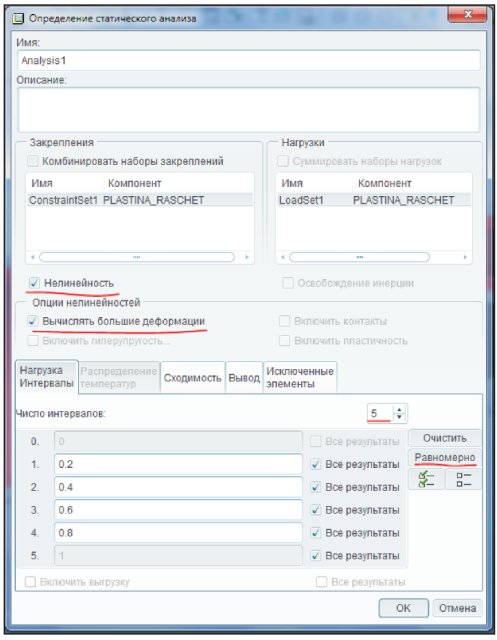


Рис. 2.170. Включение опций «Нелинейность», «Вычислять большие деформации»

только при отсутствии пластинчатых и балочных идеализаций. Если таковые были, все их необходимо подавить либо удалить.

Рекомендуется ставить 3–5 шагов. Опции «Все результаты» позволяют получить промежуточные результаты на каждом шаге, однако это увеличивает время расчета, поэтому без особой необходимости их лучше не включать.

Анализ создан. Перед запуском следует продумать систему измерителей и настроить опции анализа, поскольку сам расчет занимает продолжительное время. Например, создадим измеритель, вычисляющий вертикальную деформацию пластины (рис. 2.171).

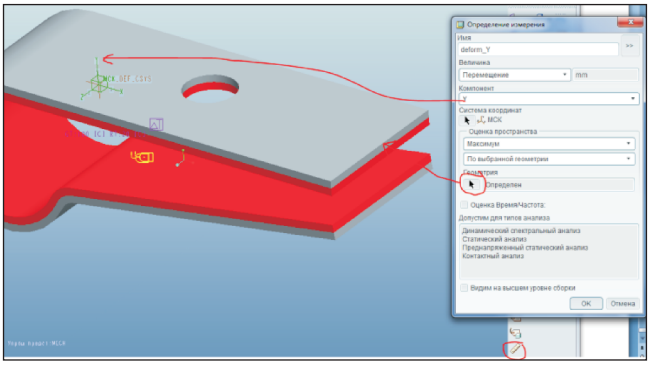


Рис. 2.171. Создание измерителя, вычисляющего вертикальную деформацию пластины

Далее проводятся расчет и анализ, после чего принимают решения по изменению конструкции, если это необходимо.

Содержание отчета

1. Краткий конспект теоретической части.
2. Скриншоты финальных моделей и результирующие файлы моделей в электронном виде.
3. Исходные данные и результаты построений и анализов в печатном и электронном виде.
4. Выводы по работе.
5. Ответы на контрольные вопросы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем заключается сложность моделирования биметаллических пластин?
2. Опишите этапы создания модели биметаллической пластины.
3. Какие опции статического анализа необходимо задействовать при моделировании биметаллических пластин?
4. Каким образом частям модели назначаются разные материалы?

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 26. АНАЛИЗ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА МОДУЛЯ С ЕСТЕСТВЕННЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ В КОНСТРУКТОРСКОЙ САПР

Цель работы — научиться задавать параметры анализа, выполнять расчет, визуализировать и анализировать результаты моделирования тепловых режимов модулей ЭА на печатных платах при естественном конвективном охлаждении в конструкторских САПР.

Задание

Создать расчетную 3D-модель и выполнить моделирование теплового режима электронного модуля управления электроприводом велосипеда при работе на 50 и 100% мощности в конструкторской САПР Solid Edge с использованием естественного охлаждения:

– определить компоненты для теплового анализа;
– назначить материалы;
– задать нагрузки;
– задать контакты в сборке;
– назначить источники тепловыделения;
– назначить параметры естественной конвекции: коэффициент конвективного теплообмена и соответствующую температуру окружающей среды;
– выполнить расчет;
– визуализировать результаты в виде теплового поля электронного модуля;
– проанализировать результаты, сделать выводы.

Моделирование № 1 (рис. 2.172) представляет собой анализ теплопередачи в режиме работы на 50% мощности.

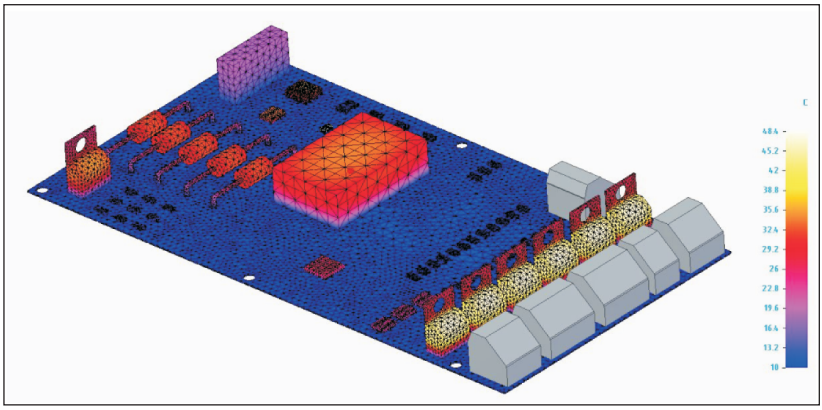


Рис. 2.172. Моделирование № 1 (50% мощности)

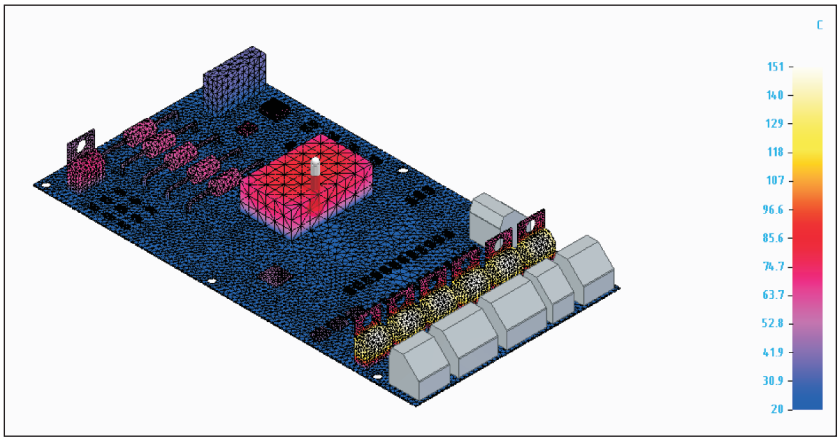


Рис. 2.173. Моделирование № 2 (100% мощности)

Результаты свидетельствуют о том, что максимальная температура электронных компонентов составляет 48,4°C (у силовых ключей, управляющих бесколлекторным двигателем постоянного тока). Остальные компоненты на печатной плате имеют среднее значение температуры примерно 30 °C.

Моделирование № 2 (рис. 2.173) представляет собой анализ теплопередачи в режиме работы на 100% мощности.

Результаты показывают, что максимальная температура электронных компонентов составляет 151°C (у силовых ключей). Остальные компоненты на печатной плате имеют среднее значение температуры примерно 80 °C.

Содержание отчета

1. Скриншоты финальных моделей и результирующие файлы моделей в электронном виде.
2. Исходные данные и результаты анализов в печатном и электронном виде.
3. Выводы по работе.
4. Ответы на контрольные вопросы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какой параметр должен быть известен, чтобы можно было осуществить анализ естественного конвективного теплообмена в механической САПР среднего уровня?
2. Каким образом можно узнать значение коэффициента конвективного теплообмена для того, чтобы задать его в анализе?
3. Какие значения коэффициента конвективного теплообмена характерны для естественной конвекции в блоках ЭА?
4. Каким образом можно визуализировать результаты в виде теплового поля сборки на печатной плате?

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 27. АНАЛИЗ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА БЛОКА С ЕСТЕСТВЕННЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ В САПР ГИДРОГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Цель работы — научиться задавать параметры анализа, выполнять расчет, визуализировать и анализировать результаты моделирования тепловых режимов блоков ЭА при естественном конвективном охлаждении в специализированных САПР гидрогазодинамического анализа.

Задание

Создать расчетную 3D-модель и выполнить моделирование теплового режима электронного блока управления электроприводом велосипеда в САПР гидрогазодинамического анализа с использованием естественного охлаждения:

– задать основные параметры проекта;
– задать граничные условия;
– назначить материалы;
– задать источники тепловыделения;
– задать цели анализа;
– настроить сетку;
– выполнить расчет;
– визуализировать результаты в виде теплового поля электронного модуля и траекторий потоков воздуха;
– проанализировать результаты, сделать выводы.

Моделирование выполняется в модуле гидрогазодинамического анализа FloEFD без активного охлаждения при максимальной температуре воздуха +40°С и движении велосипеда со скоростью 7 и 35 км/ч.

1) Скорость 7 км/ч (рис. 2.174). Массовый расход воздуха составляет 0,05 кг/с. Максимальная температура силовых ключей, согласно результатам моделирования, составляет 164 °С. Траектории потока воздуха через корпус представлены на рис. 2.175.

2) Скорость 35 км/ч (рис. 2.176). Массовый расход воздуха составляет 0,2 кг/с. Максимальная температура силовых ключей, согласно результатам моделирования, составляет 122°С. Траектории потока воздуха через корпус представлены на рис. 2.177.

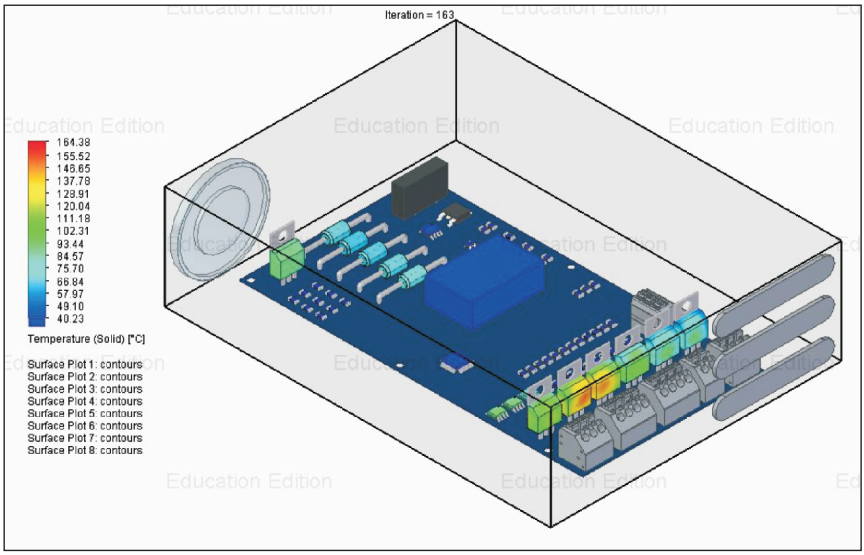


Рис. 2.174. Тепловое поле при моделировании при скорости 7 км/ч с естественным охлаждением

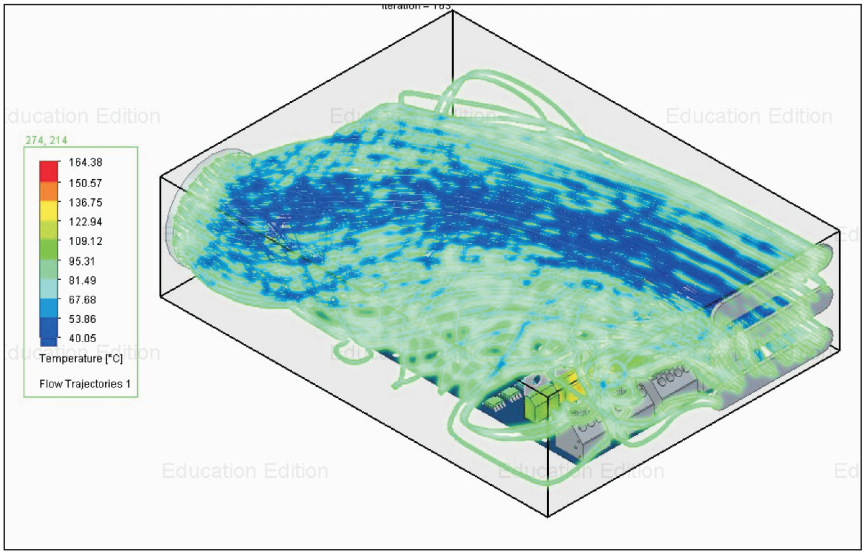


Рис. 2.175. Воздушный поток через корпус при моделировании при скорости 7 км/ч с естественным охлаждением

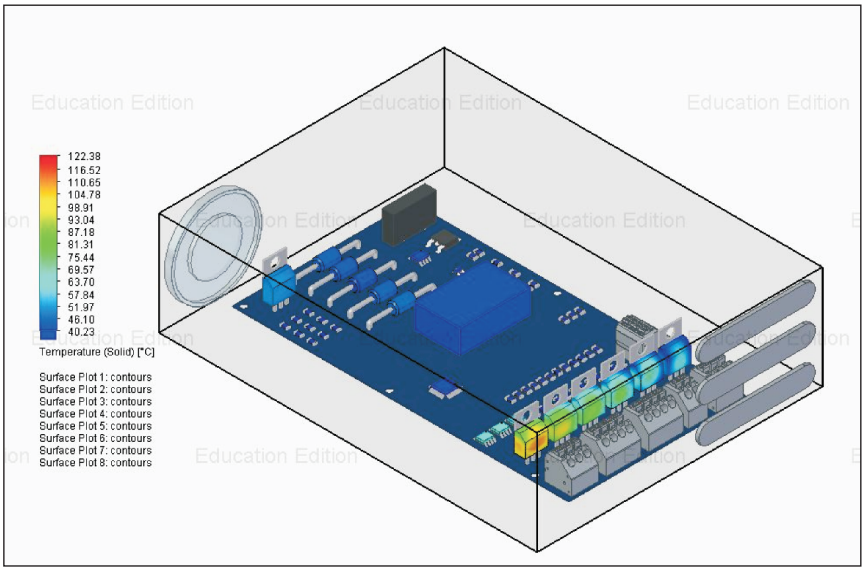


Рис. 2.176. Тепловое поле при моделировании при скорости 35 км/ч с естественным охлаждением

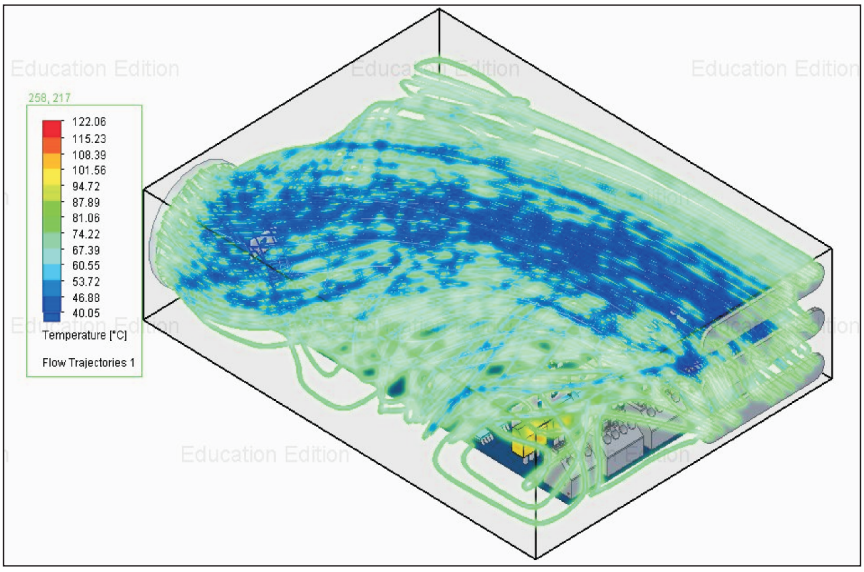


Рис. 2.177. Воздушный поток через корпус при моделировании при скорости 35 км/ч с естественным охлаждением

Содержание отчета

1. Скриншоты финальных моделей и результирующие файлы моделей в электронном виде.
2. Исходные данные и результаты анализов в печатном и электронном виде.
3. Выводы по работе.
4. Ответы на контрольные вопросы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие преимущества дает выполнение анализа естественного конвективного теплообмена в системе гидрогазодинамического моделирования по сравнению с использованием для этих целей механической САПР среднего уровня?
2. Каким образом задаются граничные условия на входе и выходе блока?
3. Перечислите различия между граничными условиями первого и второго рода.
4. Как визуализировать поток воздуха, проходящий через блок?

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 28. АНАЛИЗ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА БЛОКА С ПРИНУДИТЕЛЬНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ В САПР ГИДРОГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Цель работы — научиться визуализировать и анализировать результаты моделирования тепловых режимов блоков ЭА при принудительном конвективном охлаждении в специализированных САПР гидрогазодинамического анализа.

Задание

Создать расчетную 3D-модель и выполнить моделирование теплового режима электронного блока управления электроприводом велосипеда в САПР гидрогазодинамического анализа с использованием принудительного охлаждения (рис. 2.178):

– задать основные параметры проекта;
– задать граничные условия, включая вентилятор;
– назначить материалы;
– задать источники тепловыделения;
– задать цели анализа;
– настроить сетку;

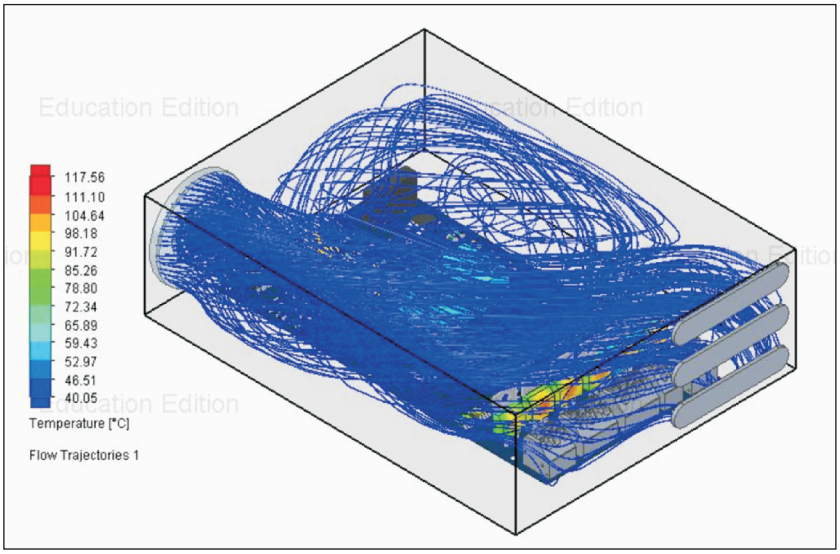


Рис. 2.178. Тепловое поле при моделировании при скорости 35 км/ч с принудительным охлаждением

– выполнить расчет;

– визуализировать результаты в виде теплового поля электронного модуля и траекторий потоков воздуха;

– проанализировать результаты, сделать выводы.

Моделирование выполняется в модуле гидрогазодинамического анализа FloEFD. Оно проводится с активным охлаждением (вентилятор) при максимальной температуре воздуха +40°C и движении велосипеда со скоростью 35 км/ч.

Максимальная температура силовых ключей, согласно результатам моделирования, составляет 118 °C.

Содержание отчета

1. Скриншоты финальных моделей и результирующие файлы моделей в электронном виде.

2. Исходные данные и результаты анализов в печатном и электронном виде.

3. Выводы по работе.

4. Ответы на контрольные вопросы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем состоят различия между процедурами моделирования блока с естественным и принудительным охлаждением?

2. Как задать граничное условие «Входной вентилятор»?

3. Как задать граничные условия на выходе воздуха из блока?

4. Как поступить, если подходящей модели вентилятора в базе данных не существует?

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 29. ДЕКОМПОЗИЦИЯ И ПОСТРОЕНИЕ 3D-МОДЕЛИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ОПЕРАЦИЙ СБОРКИ

Цель работы — научиться создавать и декомпозировать 3D-модели сборочного оборудования для автоматизированных операций производства ЭА.

Задание

Создать 3D-модель сборочного оборудования в САПР с декомпозицией на отдельные узлы и учетом их кинематики (технологическую операцию и конкретную модель оборудования задает преподаватель):

– декомпозировать автомат на отдельные узлы;

– выделить набор узлов, которые будут участвовать в анимации кинематики автомата;

– создать 3D-модели узлов из данного набора;

– объединить созданные 3D-модели узлов в общую модель автомата;

– сохранить общую модель в формате JT.

Теоретическая часть

Модели технологического оборудования проектируются в среде синхронного моделирования Siemens Solid Edge. Создание сборок позволяет импортировать модель оборудования в среду Plant Simulation, разделить на составные узлы и анимировать только отдельные части сборки. При этом возможна реализация иерархической модели для управления отдельными узлами, объединенными в подсборки. Такая иерархия представлена на рис. 2.179.

Модель автомата установки компонентов Topaz X имеет в своем составе блок сборочных головок на Н-образном портале перемещения по осям *XY*, питатель с катушками, два монитора (контрольный и управления), камеры системы технического зрения, а также направляющие конвейера, по которому будет передвигаться плата; 3D-модель блока сборочных головок и балка представлены на рис. 2.180.

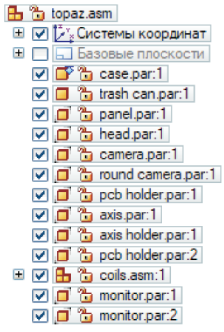


Рис. 2.179. Дерево элементов 3D-модели автомата Topaz X

Монитор в кинематике автомата не будет принимать участие, однако его следует использовать в качестве основы для установки объекта отображения информации; его 3D-модель представлена на рис. 2.181.

Модель блока сгруппированных ленточных питателей (рис. 2.182) реализована отдельной сборкой для

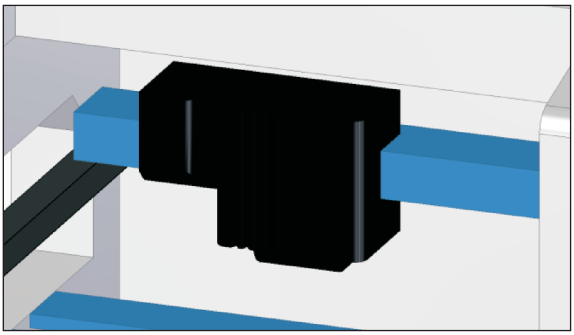


Рис. 2.180. 3D-модель блока сборочных головок автомата Topaz X на портале

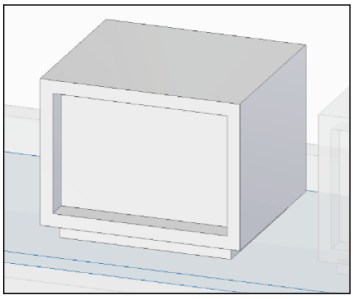


Рис. 2.181. 3D-модель монитора автомата Topaz X

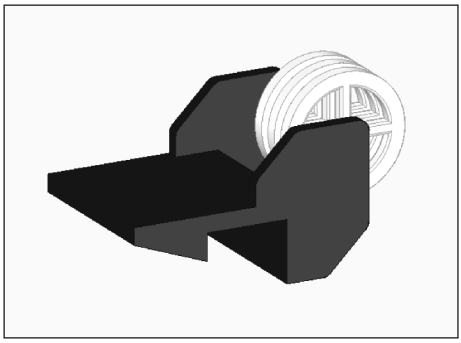


Рис. 2.182. 3D-модель блока ленточных питателей автомата Topaz X

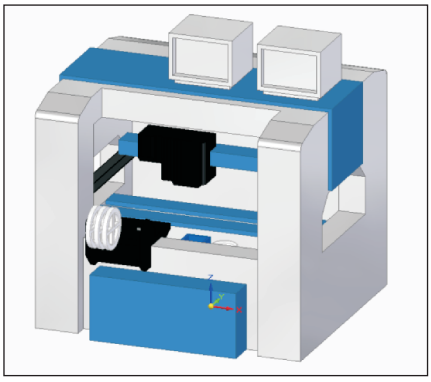


Рис. 2.183. Полная 3D-модель автомата установки компонентов Topaz X

удобства ее использования при дальнейшем моделировании. Ее можно будет, например, отделять от модели автомата при переналадке, при этом не надо будет работать с каждой моделью питателя отдельно.

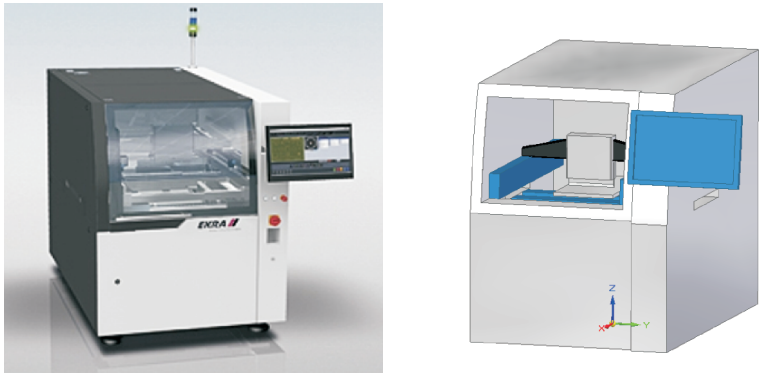
Таким образом, модель автомата содержит следующий набор узлов, которые будут участвовать в анимации кинематики автомата:

- блок питателей;
- блок сборочных головок;
- портал перемещения блока сборочных головок;
- направляющие конвейера для перемещения платы.

Полная 3D-модель автомата Topaz X представлена на рис. 2.183.

Аналогичным образом проектируются представленные далее модели технологического оборудования для выполнения других операций техпроцесса сборки электронных модулей на печатных платах.

Так, в качестве установки нанесения паяльной пасты трафаретной печатью представлен принтер Ekra X5 Professional. Внешний вид и соответствующая 3D-модель принтера представлены на рис. 2.184.



а *б*

Рис. 2.184. Внешний вид (*а*) и 3D-модель (*б*) установки трафаретной печати Ekra X5 Professional

В состав установки входит перемещающийся на балке держатель с закрепленным в нем ракелем. Модель узла ракеля представлена на рис. 2.185.

Модель трафаретного принтера включает в себя также монитор для отображения информации, направляющие конвейера для перемещения платы и раму с установленным трафаретом.

Таким образом, данная модель содержит следующий набор узлов, которые будут участвовать в анимации кинематики автомата:

- держатель;
- ракель;
- балка держателя;
- рама с трафаретом.

Для выполнения операции пайки оплавлением выбрана конвекционная печь Ersa Hotflow 3/14. Внешний вид и соответствующая 3D-модель печи представлены на рис. 2.186.

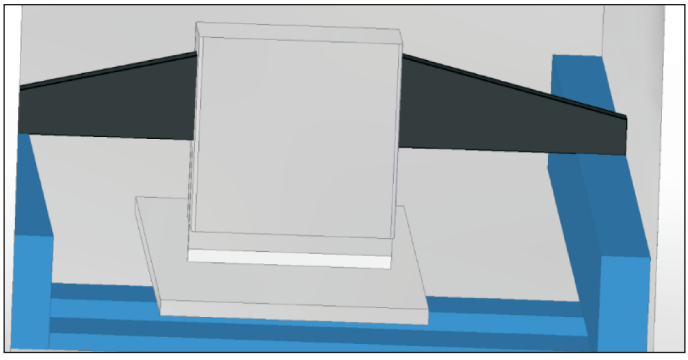
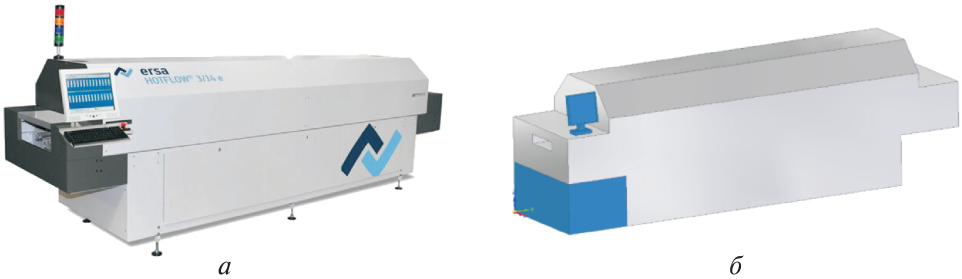


Рис. 2.185. 3D-модель узла ракеля установки трафаретной печати Ekra X5 Professional



а *б*

Рис. 2.186. Внешний вид (*а*) и 3D-модель (*б*) печи пайки оплавлением Ersa Hotflow 3/14

Поскольку печь не предполагает открытия кожуха во время работы, ее подвижные элементы не моделируются. Модель содержит только приемное и выходное отверстия конвейера для платы, а также монитор.

Содержание отчета

1. Краткий конспект теоретической части.
2. Скриншоты финальных моделей и результирующие файлы моделей в электронном виде.
3. Исходные данные и результаты построений в печатном и электронном виде.
4. Выводы по работе.
5. Ответы на контрольные вопросы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как осуществляется декомпозиция модели оборудования на отдельные функциональные узлы?
2. Перечислите узлы, из которых состоит модель автомата установки компонентов.
3. Перечислите узлы, из которых состоит модель автомата трафаретной печати.
4. Перечислите узлы, из которых состоит модель печи пайки оплавлением.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 30. ДЕКОМПОЗИЦИЯ И ПОСТРОЕНИЕ 3D-МОДЕЛИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ ДЛЯ РУЧНЫХ ОПЕРАЦИЙ СБОРКИ

Цель работы — научиться создавать и декомпозировать 3D-модели сборочного оборудования, рабочих мест и технологического оснащения для ручных операций производства ЭА.

Задание

Создать цифровую модель установщика компонентов на печатную плату на примере модели SMP-330 в САПР, декомпозировав оборудование на отдельные функциональные узлы:

– декомпозировать установщик на отдельные функциональные узлы;
– создать 3D-модели для набора декомпозированных узлов;
– объединить созданные 3D-модели узлов в общую модель установщика;
– сохранить общую модель в формате JT.

Теоретическая часть

Установщик декомпозируется на отдельные функциональные узлы (рис. 2.187, *1*), в числе которых рабочий стол для фиксации печатной платы (*2*), блок ленточных питателей компонентов из катушек (*3*), карусельный

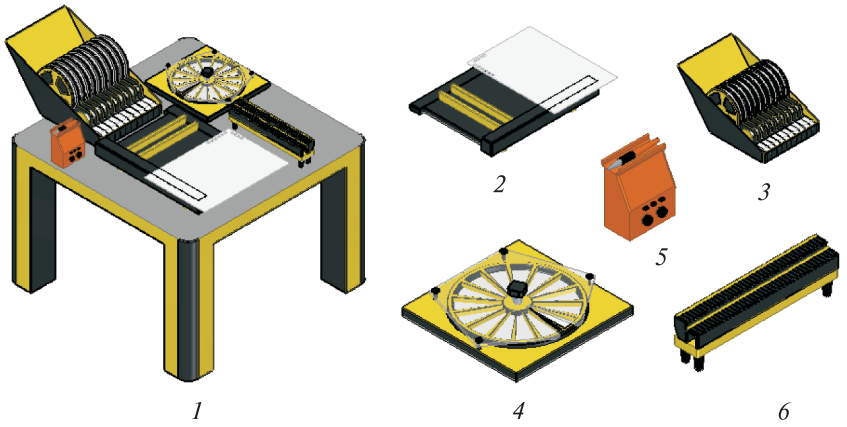


Рис. 2.187. Декомпозиция рабочего места, оснащенного системой ручной установки компонентов:

1 — общий вид рабочего места; *2* — рабочий стол; *3* — блок ленточных питателей; *4* — карусельный питатель из россыпи; *5* — блок питателей из обрезков лент; *6* — дозатор паяльной пасты с вакуумным пинцетом

питатель компонентов из россыпи (*4*), блок питателей компонентов из обрезков лент (*5*), а также дозатор паяльной пасты с вакуумным пинцетом для установки компонентов (*6*).

Такое построение облегчает последующее формирование цифровых моделей технологических переходов вида «Взять вакуумный пинцет», «Захватить компонент из питателя вакуумным пинцетом», «Установить компонент на поверхность печатной платы» и пр. Декомпозированное таким образом рабочее место интегрируется в цифровую модель операции ручной установки компонентов, которая в свою очередь создается с участием цифровых моделей персонала — монтажников в виде антропоморфных цифровых манекенов.

Процесс создания моделей отдельных декомпозированных узлов установщика выполняется в САПР Solid Edge.

Создадим монтажный стол, представленный на рис. 2.188. Рабочий стол установщика SMP-330 оснащен скользящим упором для руки. Он может быть зафиксирован с помощью тормоза в любом положении. В крайнем левом положении скользящий упор полностью закрывает зону монтажа. Таким образом, рука оператора может удобно перемещаться над платой, не задевая нанесенную паяльную пасту и компоненты на плате.

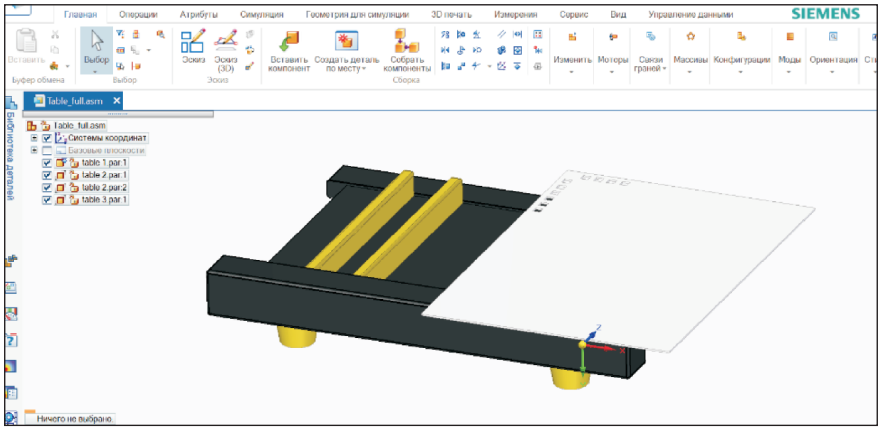


Рис. 2.188. Монтажный стол установщика SMP-330

Далее создадим ячейку с десятью ленточными питателями для лент различной ширины, представленную на рис. 2.189. Ленточные питатели для катушек диаметром 7 дюймов устанавливаются в универсальную ячейку, в которой может быть размещено до 10 питателей с лентой шириной 8 мм. Предусмотрены также питатели для лент шириной 12 и 16 мм. Катушки диаметром 14 дюймов устанавливаются на стандартный питатель с помощью специального адаптера.

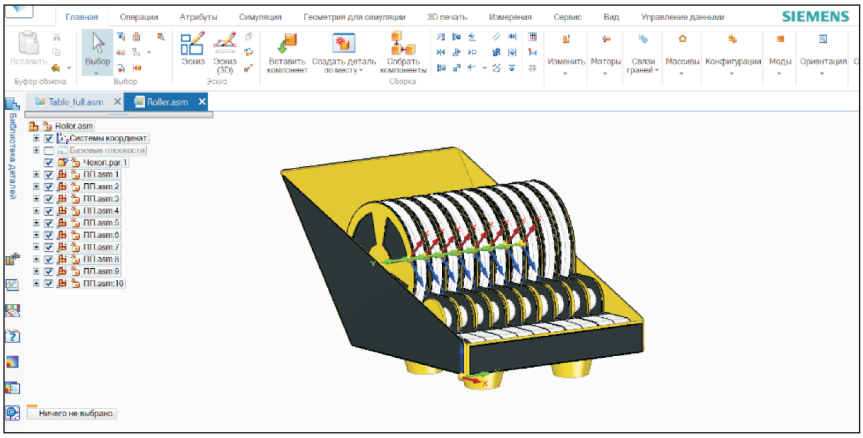


Рис. 2.189. Ячейка с десятью ленточными питателями установщика SMP-330 для лент различной ширины

Питатели удерживаются в ячейке с помощью пазов и магнитной ленты. Потянув за кольцо, оператор может извлечь требуемый питатель из ячейки в произвольном порядке.

Далее создадим карусельный питатель на 24 ячейки из россыпи, представленный на рис. 2.190 и предназначенный для хранения мелких рассыпных компонентов. На основании смонтирован шарикоподшипник, на котором вращается карусель. Вращение карусели в любом направлении обеспечивается рукояткой. Карусель накрыта антистатическим стеклом, которое установлено на подпружиненных стойках и закреплено гайками. В стекле предусмотрена прорезь, через которую оператор имеет доступ к одной из ячеек с компонентами.

Далее создадим подставку с кассетными двухъярусными питателями для обрезков лент различной ширины, представленную на рис. 2.191.

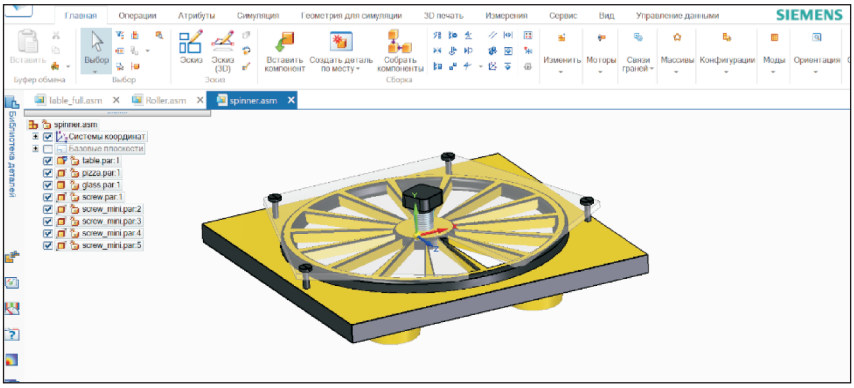


Рис. 2.190. Карусельный питатель установщика SMP-330 на 24 ячейки

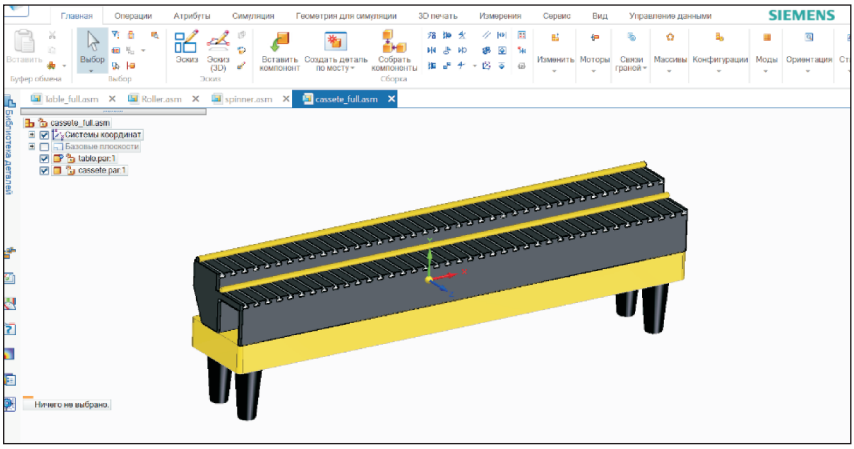


Рис. 2.191. Подставка с кассетными двухъярусными питателями для обрезков лент установщика SMP-330

Такие питатели предназначены для компонентов в обрезках лент. При двухъярусной конфигурации достигается максимально удобная концентрация различных компонентов на рабочем месте.

Затем создадим общую 3D-модель сборки, в состав которой будут входить все модули установщика SMP-330. Результат решения задачи представлен на рис. 2.192.

Сохраним модель в формате JT — открытом формате описания 3D-данных, разработанном и поддерживаемом компанией Siemens DI. Данный формат

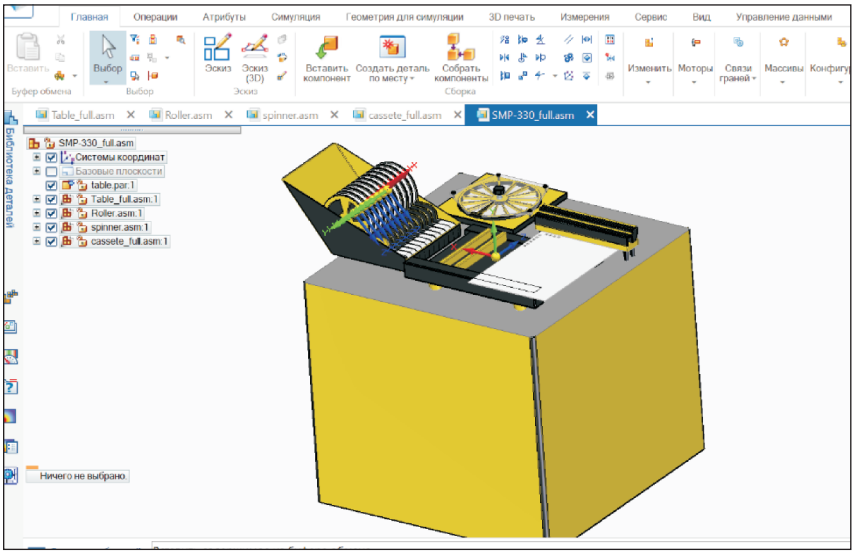


Рис. 2.192. 3D-модель установщика SMP-330

отличается сравнительно небольшим размером файлов и используется в САПР в целях визуализации моделей, организации совместной работы и обмена данными.

Содержание отчета

1. Краткий конспект теоретической части.
2. Скриншоты финальных моделей и результирующие файлы моделей в электронном виде.
3. Исходные данные и результаты построений в печатном и электронном виде.
4. Выводы по работе.
5. Ответы на контрольные вопросы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Перечислите узлы, из которых состоит модель установщика компонентов.
2. Как осуществляется подача компонентов из россыпи?
3. Как осуществляется подача компонентов из обрезков лент?
4. В каком формате данных сохраняется декомпозированная модель?

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 31. ИМПОРТ МОДЕЛИ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ РУЧНЫХ ОПЕРАЦИЙ В МОДУЛЬ PLANT SIMULATION И НАСТРОЙКА ПЕРВОНАЧАЛЬНОЙ КИНЕМАТИКИ И ПОДВИЖНОГО ОБЪЕКТА

Цель работы — научиться импортировать декомпозированные 3D-модели сборочного оборудования для ручных операций производства ЭА в модуль Plant Simulation, выполнять настройку первоначальной кинематики и подвижного объекта.

Задание 1

Импортировать 3D-модель оборудования в модуль Plant Simulation:
– создать новую 3D-модель в модуле Plant Simulation;
– импортировать графику модели;
– сделать модель анимируемой;
– сохранить созданную модель в формате s3d;
– снова создать новую 3D-модель;
– создать элементы «Источник», «Обработчик» и «Разборщик»;
– сменить стандартный «Обработчик» на пользовательский, сменив графику на сохраненную модель в формате s3d.

Теоретическая часть

В приветственном окне модуля Plant Simulation следует нажать кнопку “Create New Model” («Создать новую модель»). В высветившемся окне выбираем «3D», после чего откроется основное рабочее окно Tecnomatix Plant Simulation, представленное на рис. 2.193. Далее нажимаем кнопку “Import Graphics” («Импортировать графику»), которая находится в левом верхнем углу, выбираем созданный в практической работе № 30 файл в формате JT и нажимаем кнопку «Открыть».

В открывшемся окне параметров размещения модели необходимо отметить соответствующие пункты и нажать кнопку «OK». Далее разместим в модуле модель установщика (рис. 2.194).

Ориентацией модели можно управлять с помощью комбинаций клавиш «Ctrl + стрелка вверх/вниз/вправо/влево», масштабирование управляется колесом мыши, панорамирование по рабочему пространству осуществляется с помощью зажатой правой кнопки мыши.

На текущий момент модель представляет собой простой графический элемент. Для того чтобы внедрить его в модуль Plant Simulation, проводить его анализ, анимировать и т. д, необходимо создать файл с расширением *.s3d. Для этого выделим объект и в меню выберем команду “Make

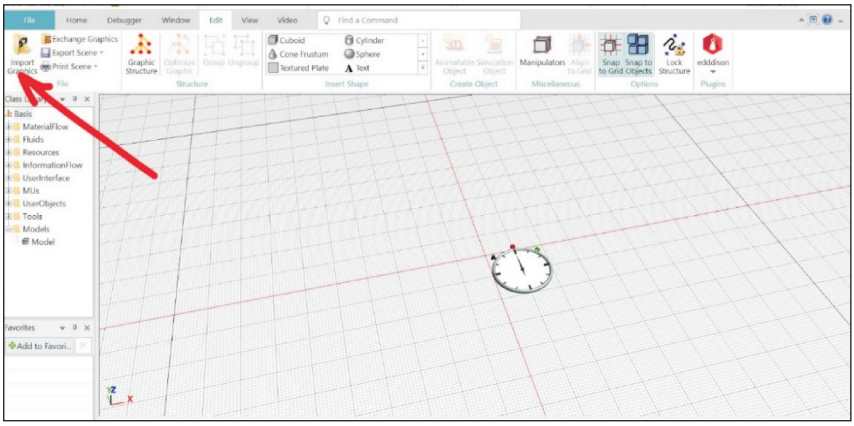


Рис. 2.193. Основное рабочее окно Tecnomatix Plant Simulation

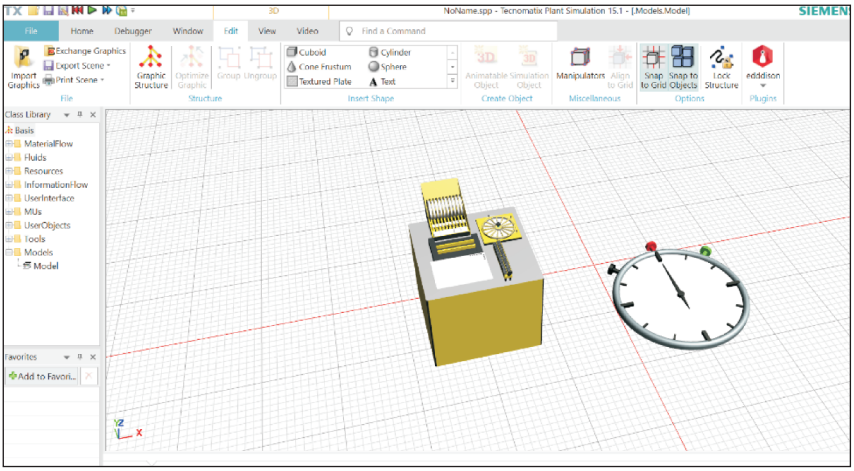


Рис. 2.194. Модель установщика SMP-330, размещенная в модуле Plant Simulation

Animatable Object” («Сделать объект анимируемым»). Зададим объекту новое имя и координаты. Далее в высветившемся окне настроим необходимые параметры, нажмем кнопки “Apply” («Применить») и «OK». Если все сделано правильно, объект приобретет фиолетовый цвет (рис. 2.195).

Далее необходимо в левом верхнем углу выбрать команду “Export Scene” («Экспортировать сцену») и в раскрывшемся списке — команду “Export Object” («Экспортировать объект»). Сохраняем файл с расширением *.s3d и выходим в главное меню, чтобы изменения применились. Если этого не сделать, текущая модель и далее будет восприниматься как простой графический элемент. После этого снова нажимаем кнопку “Create New Model” («Создать новую модель») и выбираем «3D».

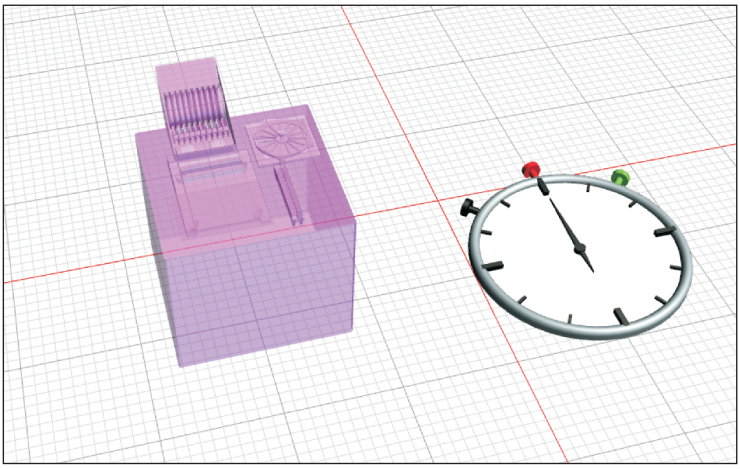


Рис. 2.195. Анимируемый установщик SMP-330

Для создания самого простого проекта понадобятся как минимум три элемента: Source («Источник»), SingleProc («Обработчик») и Drain («Разборщик»). Все они располагаются над рабочим пространством в панели инструментов, представленной на рис. 2.196.

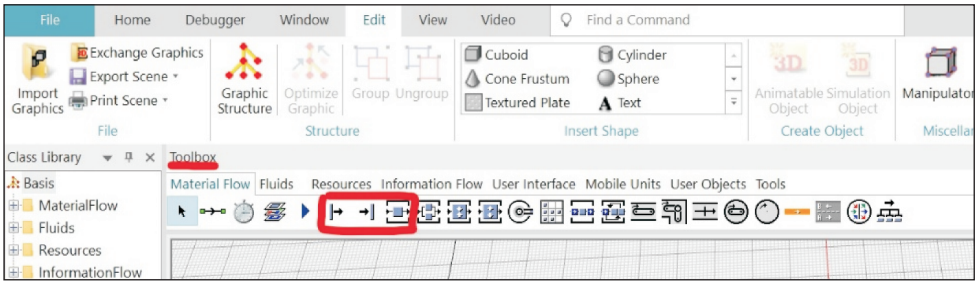


Рис. 2.196. Панель инструментов модуля Plant Simulation

Source («Источник») — элемент, который создает подвижные объекты MU и пытается передать их. Он используется в местах, где элемент MU создается/генерируется (обычно в начале процесса). Время между последовательными созданиями объектов MU может быть задано как случайная величина.

SingleProc («Обработчик» — одиночный автомат) получает элемент MU, сохраняет его во время обработки и затем пытается передать дальше. В данном случае это будет установщик SMP-330.

Drain («Разборщик») уничтожает объекты MU после их обработки. Он используется в местах, где объекты MU должны покинуть систему (обычно в конце процесса).

Необходимо разместить все эти элементы, а затем поменять стандартный элемент SingleProc на пользовательский. Для этого выбираем элемент SingleProc с помощью левой кнопки мыши, затем в правом верхнем углу окна выбираем команду “Exchange Graphics” («Сменить графику»), после чего выбираем сохраненный файл с расширением *.s3d и нажимаем кнопку «Открыть». На месте стандартного элемента SingleProc теперь находится пользовательский элемент. Кнопками управления придадим ему необходимую ориентацию в пространстве (рис. 2.197).

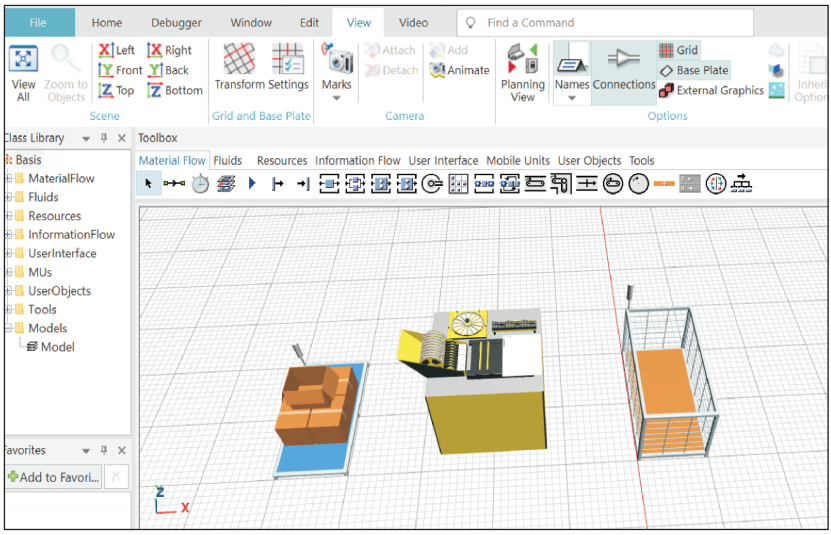


Рис. 2.197. Элементы Source («Источник»), пользовательский SingleProc («Обработчик») и Drain («Разборщик»)

Задание 2

Настроить первоначальную кинематику:
– настроить соединители, указав направление работы;
– указать места размещения подвижных объектов на модели;
– выбрать объект моделирования;
– запустить процесс моделирования и проверить правильность перемещения объекта.

Теоретическая часть

Для настройки кинематики размещенной модели установщика SMP-330 необходимо выполнить следующие действия. Сначала следует выбрать элемент “Connector” («Соединитель») в инструментальной панели и указать с его помощью направление работы.

Connector («Соединитель») устанавливает соединения между объектами материального потока MaterialFlow таким образом, чтобы объекты MU могли перемещаться по модели. Стрелка в середине разъема указывает направление. Одно соединение может указывать только одно направление.

Далее необходимо указать, где именно должны располагаться элементы MU на объекте. Для этого надо щелкнуть правой кнопкой мыши на объекте и в открывшемся списке выбрать “Edit 3D Properties...” («Редактировать 3D-параметры»).

В открывшемся окне выбираем вкладку “MU Animations” («Анимация элементов MU») и нажимаем кнопку “Show” («Показать»), при этом кнопка меняется на “Hide” («Скрыть»). Появится указатель, отображающий текущее расположение элементов MU на объекте (рис. 2.198).

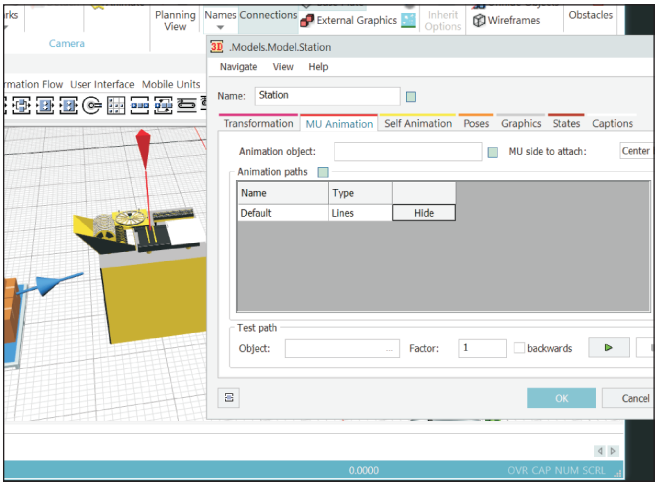


Рис. 2.198. Настройка кинематики установщика SMP-330

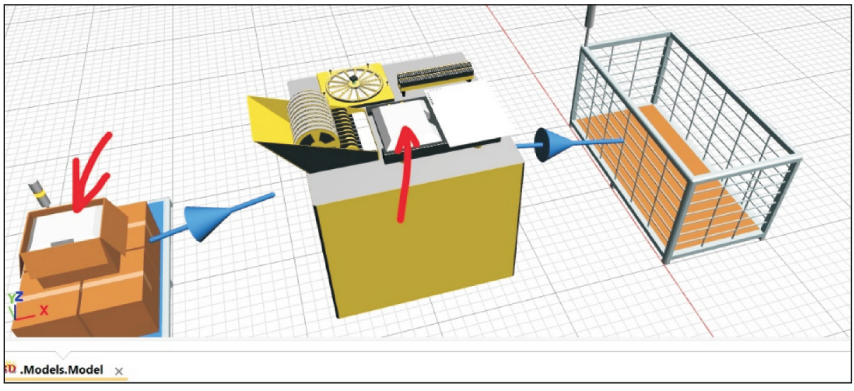


Рис. 2.199. Настроенная кинематика модели установщика SMP-330

Зададим необходимое положение комбинацией клавиш «Ctrl + стрелка вверх/вниз/вправо/влево» и нажмем кнопку OK.

Далее для проведения моделирования выберем объект, нажмем правую кнопку мыши и выберем в открывшемся списке команду “Start/Stop Simulation” («Запустить/Остановить моделирование»). Запустится процесс моделирования, который в любой момент можно прервать, еще раз выполнив указанную ранее команду; на рис. 2.199 видно, где располагаются объекты MU.

Задание 3

Настроить подвижный объект (конкретный объект задает преподаватель:

– создать пользовательский подвижный объект — печатную плату;

– добавить для данного объекта, геометрию, содержащую компоненты;

– импортировать модели сборки в разном состоянии заполнения компонентами;

– задать пользовательские атрибуты — количество компонентов разных типов;

– настроить прочие необходимые параметры подвижного объекта.

Теоретическая часть

Описание процесса см. в курсе лекций, п. 1.27 «Наполнение базы данных объектов имитационного моделирования».

Содержание отчета

1. Краткий конспект теоретической части.
2. Скриншоты финальных моделей и результирующие файлы моделей в электронном виде.
3. Исходные данные и результаты построений в печатном и электронном виде.
4. Выводы по работе.
5. Ответы на контрольные вопросы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Сформулируйте последовательность операций импорта модели в модуль Plant Simulation.
2. Опишите функционал элементов Source («Источник»), SingleProc («Контейнер обработки») и Drain («Сброс»).
3. Как настроить кинематику размещенной модели?
4. Как настроить подвижный объект?

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 32. ИМПОРТ МОДЕЛИ В МОДУЛЬ JACK И НАСТРОЙКА МАНЕКЕНОВ

Цель работы — научиться импортировать декомпозированные 3D-модели сборочного оборудования для ручных операций производства ЭА в модуль Jack, выполнять настройку антропоморфных манекенов и записывать на видео последовательность и результаты их работы.

Задание 1

Импортировать 3D-модель оборудования в модуль Jack:

– разделить декомпозированные модели узлов оборудования на статические и динамические;

– экспортировать декомпозированные модели узлов из модуля Plant Simulation (сцену и графику);

– импортировать декомпозированные модели узлов в модуль Jack;

– расположить импортированные модели в пространстве.

Теоретическая часть

Прежде чем импортировать модели в модуль Jack, следует определиться, какие из них будут статическими, т. е. выполняющими роль статичного окружения, а какие — динамическими. Последние надо подгружать отдельно, поскольку в отличие от модуля Plant Simulation в модуле Jack впоследствии не будет возможности осуществить их декомпозицию на отдельные узлы.

Сначала экспортируем по частям модель установщика SMP-330 (рис. 2.200).

Первым экспортируем стол, на котором располагаются все остальные узлы, для чего удалим все лишние компоненты модели с помощью дерева (рис. 2.201).

Экспортировать стол будем как графический элемент в формате JT. Для этого выберем вкладку “Edit” («Редактировать») в модуле Plant Simulation, выберем команду “Export Scene” («Экспортировать сцену»), а затем — команду “Export Graphics” («Экспортировать графику»). Далее потребуется выбрать место для сохранения сгенерированного файла (рис. 2.202). Таким же образом экспортируем модели всех узлов установщика SMP-330.

Далее, запустив модуль Jack, откроем главное окно рабочего пространства (рис. 2.203).

Команды управления камерой:

- «Ctrl + левая кнопка мыши» — вращение камеры в пространстве;
- «Ctrl + средняя кнопка мыши» — перемещение камеры в пространстве;
- «Ctrl + правая кнопка мыши» — масштабирование.

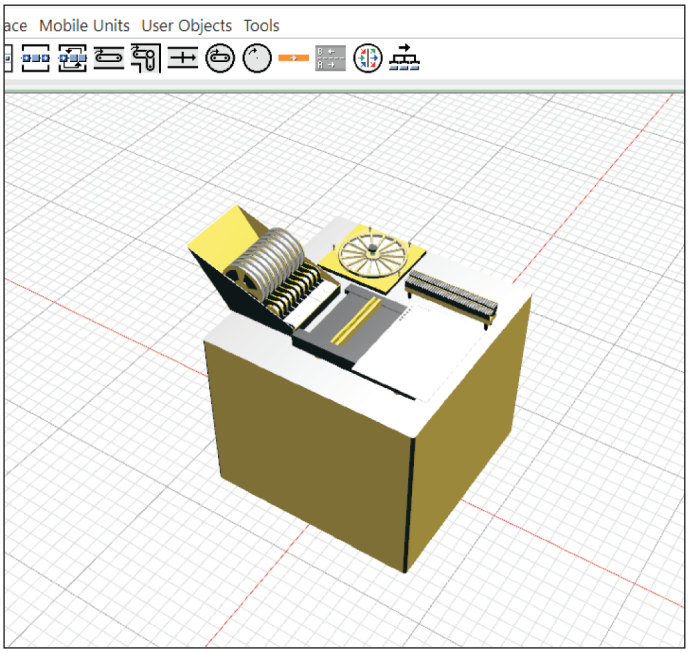


Рис. 2.200. Установщик SMP-330 в модуле Plant Simulation

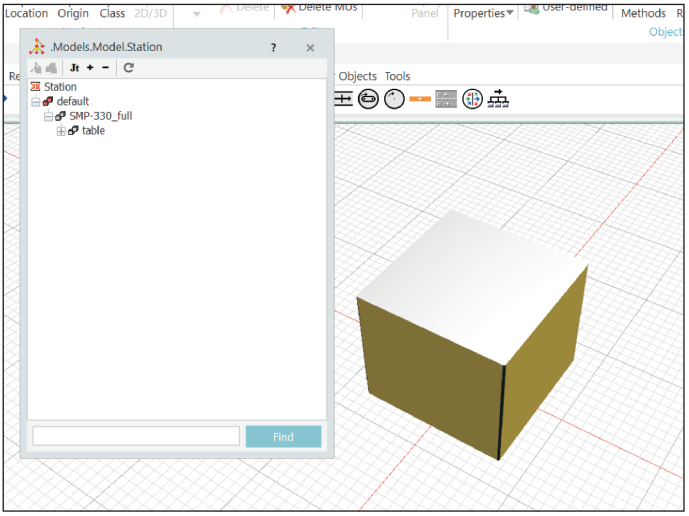


Рис. 2.201. Модель стола автомата установки компонентов SMP-330

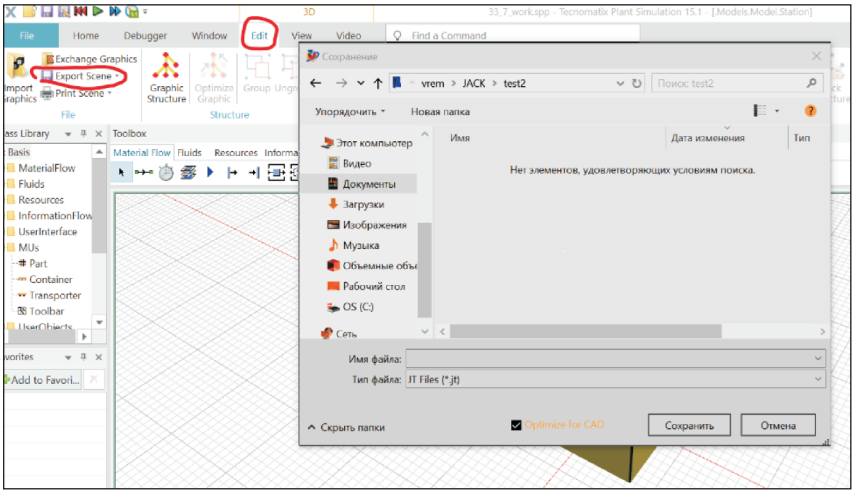


Рис. 2.202. Экспорт модели стола в файл формата JT

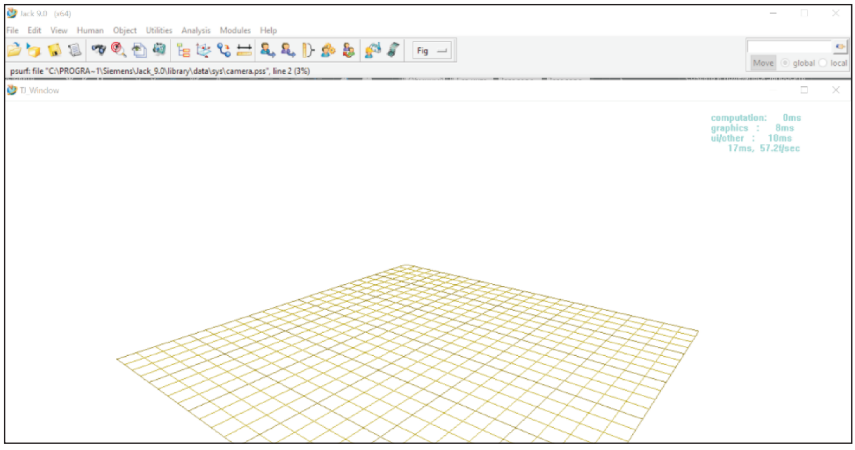


Рис. 2.203. Главное окно модуля Jack

Рассмотрим функции некоторых основных иконок панели инструментов (рис. 2.204).

Первые три иконки отвечают за открытие существующего файла модели, импорт модели и сохранение текущего рабочего пространства; вид и назначение остальных иконок представлены на рис. 2.205.

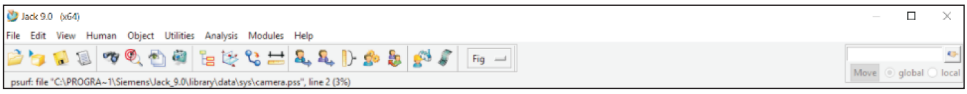


Рис. 2.204. Панель инструментов модуля Jack

Рис. 2.205. Основные иконки панели инструментов модуля Jack:

1 — найти и отцентрировать объект; *2* — показать файл журнала; *3* — создать манекен мужчины; *4* — создать манекен женщины; *5* — задать параметры манекена; *6* — открыть контроль управления манекеном; *7* — скопировать атрибуты манекена; *8* — открыть инструмент Task Simulation Builder (TSB); *9* — открыть окно записи анимации и создания видеофайла; *10* — селектор объектных уровней

Селектор объектных уровней работает в сочетании с главным графическим окном. Текущий тип объекта определяет, какое контекстное меню будет отображаться при нажатии правой кнопки мыши на объекте или типе объекта в режиме выбора (рис. 2.206).

Можно выбрать любой из основных типов объектов Jack, чтобы влиять на контекстное меню: рисунок, сегмент, участок или соединение. Можно также получить доступ к параметрам окна через контекстно-зависимые меню, щелкнув правой кнопкой мыши на объектах.

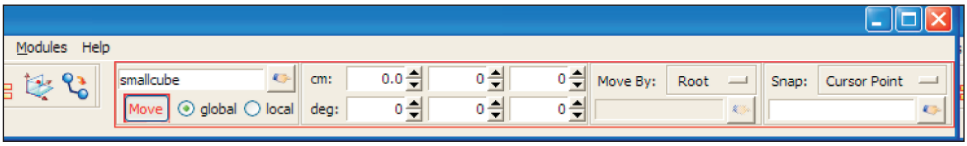
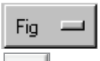


Рис. 2.206. Интерфейс выбранного типа в селекторе объектных уровней

Режим выбора выполняет поиск определенных типов объектов в окне задания графики. В этом случае тип объекта автоматически изменяется при нажатии соответствующего значка ручного переключателя в диалоговых окнах модуля Jack. В дополнение к базовым типам объектов Jack вы можете выбрать «Лица», «Края» и «Узлы».

Перейдем к импорту модели в модуль Jack. Сначала щелкнем мышью на иконке («Импорт файла»), далее выберем сам файл (рис. 2.207), откроется окно настройки импорта. Существуют правила: путь сохранения файла не должен быть на системном диске (если это не исправить, импорт завершится ошибкой); имя импортируемого файла должно быть написано латиницей.

После завершения настроек следует нажать кнопку “Translate” («Преобразовать») (рис. 2.208). Если все выполнено корректно, будет выдано сообщение об успешном преобразовании и импортированная модель отобразится в главном графическом окне (рис. 2.209).

Перейдем теперь к манипулированию объектом. Сначала нажмем иконку селектора объектных уровней 

и выберем “figure” («Объект»), затем щелкнем мышью на иконке , которая находится в правом верхнем углу, и выберем объект в графическом окне (рис. 2.210).

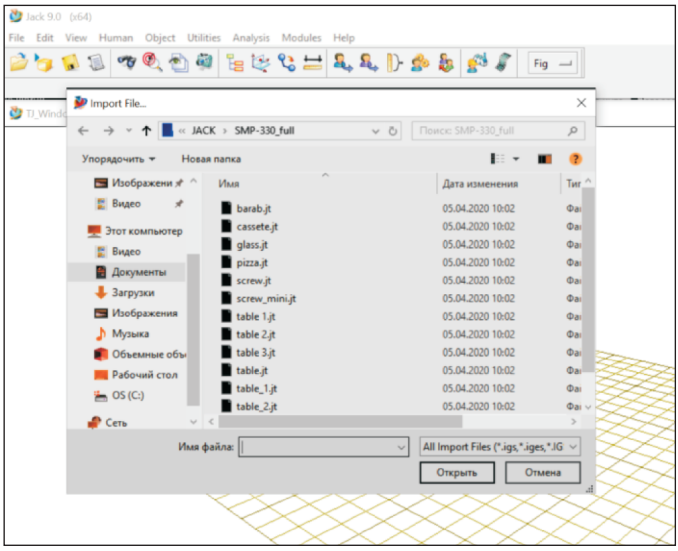


Рис. 2.207. Выбор импортируемой модели

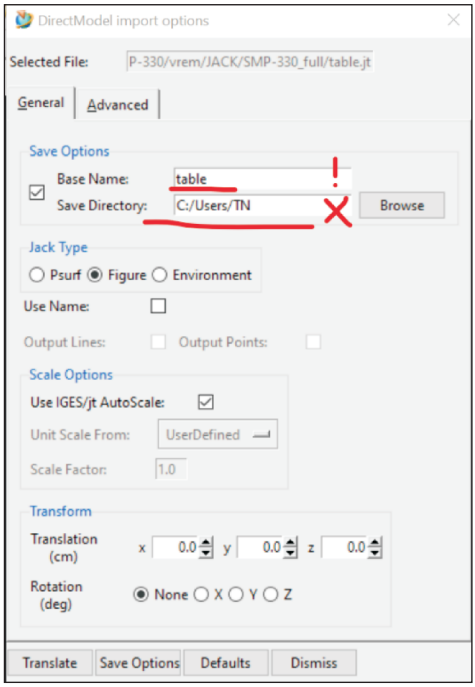


Рис. 2.208. Окно настройки импорта

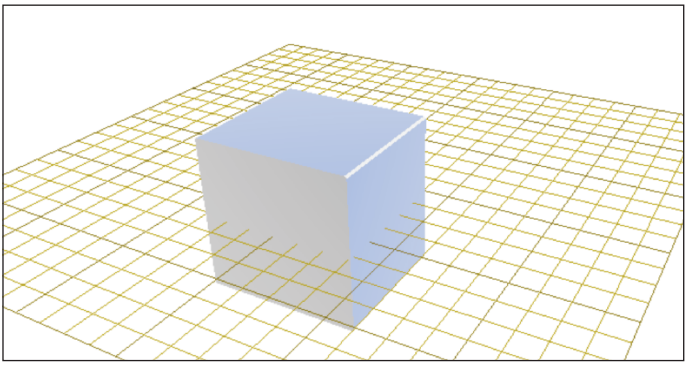


Рис. 2.209. Импортированная модель

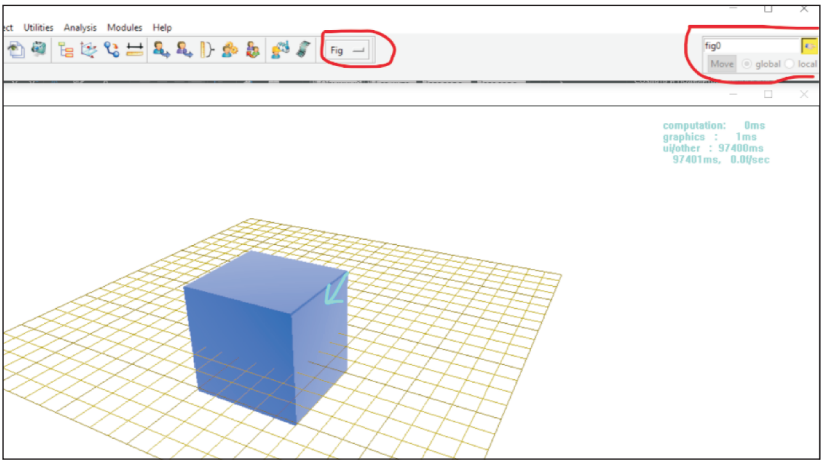


Рис. 2.210. Выбор объекта в модуле Jack

Выбрав объект, можно начать им манипулировать: перемещать по трем осям *X*, *Y*, *Z* с помощью нажатых правой, средней и левой кнопок мыши соответственно; вращать вдоль одной из осей с помощью комбинаций клавиши «Shift» + правая / средняя / левая кнопка мыши соответственно.

Продолжим импортировать модели и перемещать их, пока не будет собрана полная модель установщика SMP-330 (рис. 2.211).

Далее необходимо импортировать все окружение, в котором находился установщик в модуле Plant Simulation. Иными словами: следует перенести в Jack весь этап производства, с которым мы будем работать и проводить манипуляции. Перенос происходит аналогично описанному ранее, результаты полного импорта представлены на рис. 2.212.

Экспорт моделей и рабочего пространства завершен, и можно переходить к созданию антропоморфных манекенов, их настройке и проведению эксперимента.

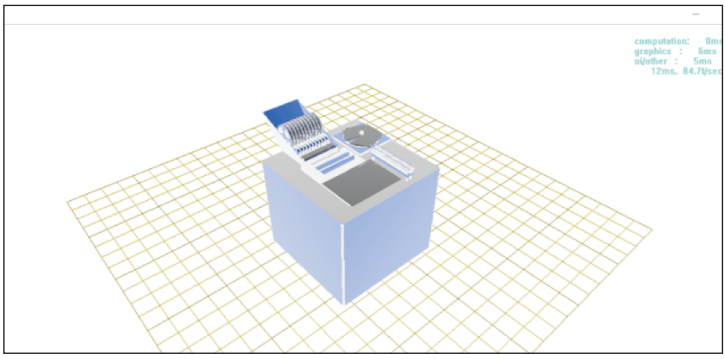


Рис. 2.211. Полностью импортированная модель установщика SMP-330

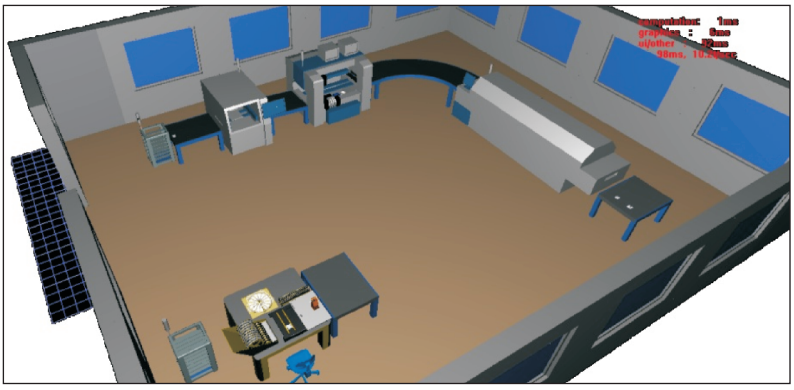


Рис. 2.212. Полностью импортированный этап производства

Задание 2

Настроить антропоморфные манекены и анимацию (конкретное назначение манекена и выполняемую операцию задает преподаватель):

– создать манекен согласно его назначению;
– задать антропометрические параметры манекенов;
– поставить манекен на исходную позицию;
– построить путь перемещения манекена;
– настроить взаимодействие манекена с рабочими объектами;
– создать видеоролик работы манекена.

Теоретическая часть

Создадим два манекена: оператора-монтажника и оператора автоматизированного оборудования. Для того чтобы продемонстрировать возможности модуля Jack, монтажник будет представлен манекеном мужчины (псев-

доним Jack — Джек), вспомогательный персонал — манекеном женщины (Jill — Джилл). На инструментальной панели за это отвечают соответственно иконки и . Результат представлен на рис. 2.213.

Перемещать в пространстве манекены можно так же, как и обычные объекты (см. описание инструментов манипулирования).

Далее следует задать физические параметры манекенов (рост, вес и т. д.) с помощью иконки на панели инструментов. В появившемся меню надо указать манекен, параметры которого необходимо изменить, с помощью иконки с последующим выбором манекена (рис. 2.214).

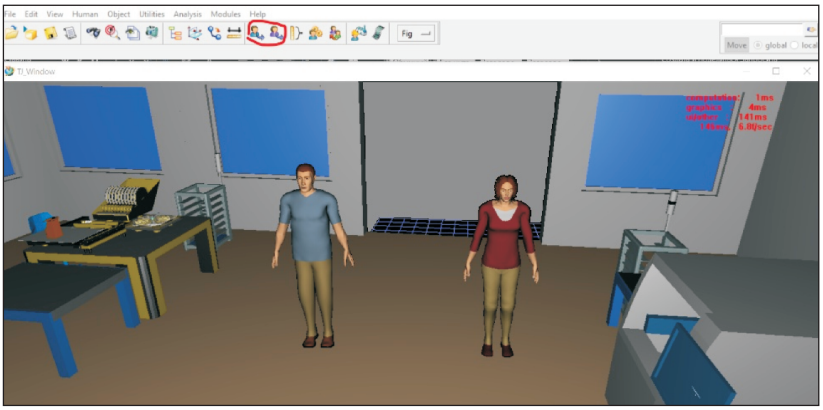


Рис. 2.213. Создание антропоморфных манекенов Jack и Jill

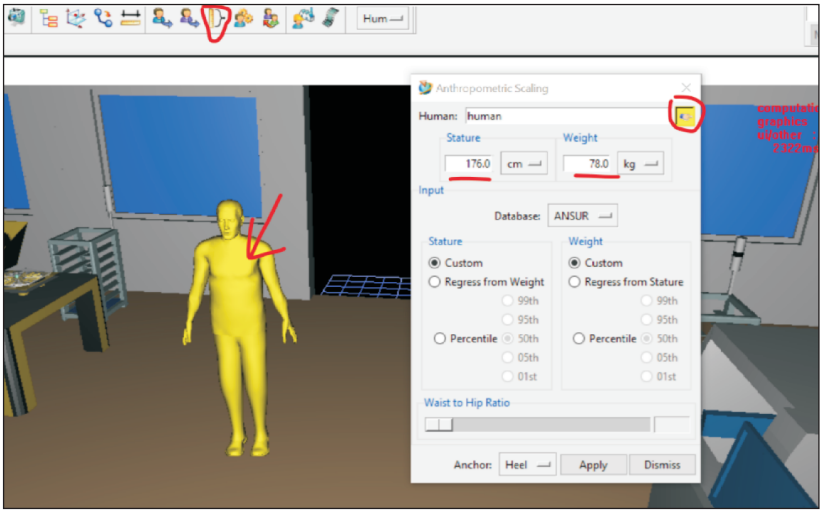


Рис. 2.214. Настройка физических параметров манекенов

Изменим рост и вес манекена, задав в целях значительного изменения внешнего вида параметры 150 см и 90 кг соответственно, далее нажмем кнопку “Apply” («Применить»); результат представлен на рис 2.215.

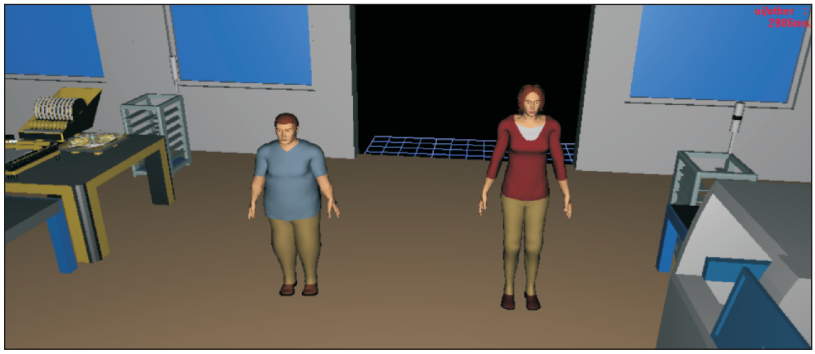


Рис. 2.215. Результат изменения параметров манекена Jack

Как видно из рисунка, антропометрические параметры манекена Jack претерпели сильные изменения: манекен стал ниже и более полным. Задание параметров позволяет, в частности, обоснованно оценить физическую достижимость объектов конкретным человеком при выполнении производственных операций.

Настроив и расставив манекены на исходные позиции, перейдем к инструменту Task Simulation Builder (TSB), нажав мышью иконку на панели инструментов (рис. 2.216).

В правой части располагается графическое окно управления настроенными моделями и манекенами; управление объектами в данном окне аналогично описанному ранее.

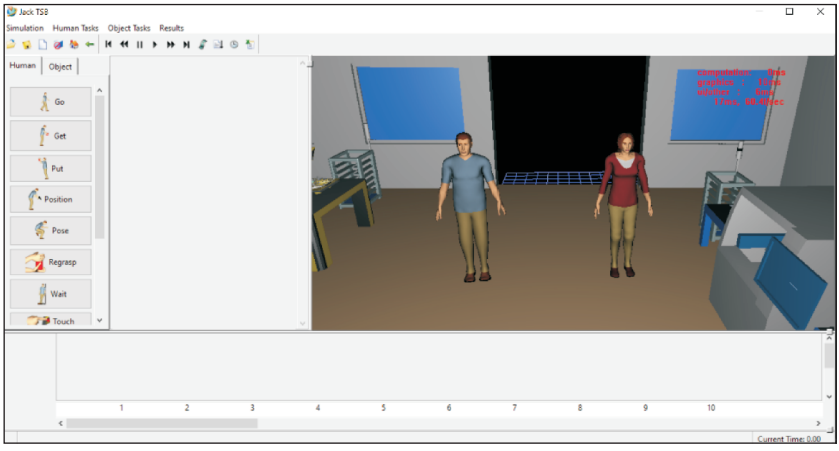


Рис. 2.216. Главное окно инструмента Task Simulation Builder (TSB)

В левой части располагается меню, поделенное на две части: “Human” («Человек») и “Object” («Объект»), отвечающее за анимацию манекенов и объектов соответственно. В этом меню собраны все доступные действия для тех или иных моделей. Например, чтобы манекен Jack мог пройти из одной точки в другую, следует нажать кнопку “Go” («Идти»), после чего откроется показанное на рис. 2.217 меню.

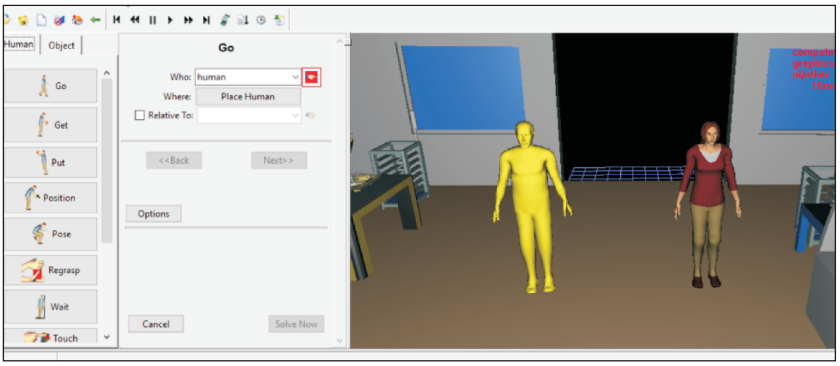


Рис. 2.217. Окно “Go” («Идти») инструмента TSB

В первую очередь надо указать манекен, который будет идти (строка “Who” («Кто»), затем нажать на кнопку “Place Human” («Поместить человека»), чтобы переместить манекен в конечную точку, после чего — кнопку “Next” («Далее») (рис. 2.218).

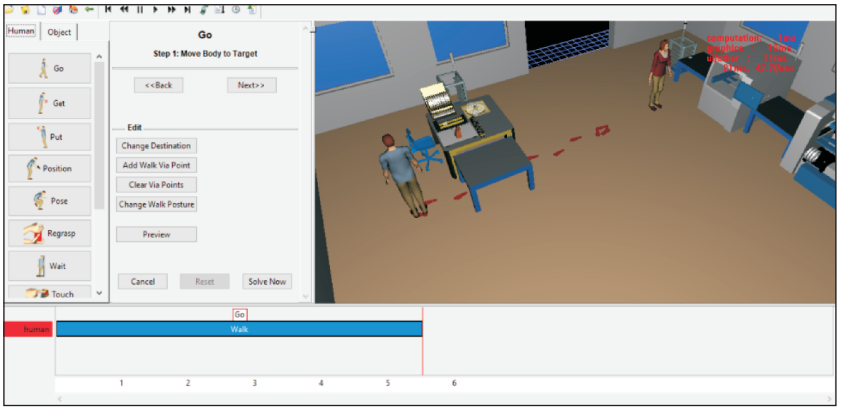


Рис. 2.218. Окно “Go” («Идти») инструмента TSB (продолжение)

Следует отметить, что манекен построит свой путь по кратчайшему пути, невзирая на препятствия. Слева появилось новое подменю “Edit” («Редактировать») — с его помощью можно изменить выполнение команды “Go” («Идти»). Схожий принцип построения меню реализуется при выполнении любой команды из списка “Human” («Человек»).

Снизу появилась полоса времени в секундах, отображающая продолжительность выполнения данной команды манекеном.

Вернемся к подменю “Edit” («Редактировать») и рассмотрим его пункты более подробно. Команда “Change Destination” («Изменить конечную точку») позволяет изменить конечную точку перемещения. Команда “Add Walk Via Point” («Добавить промежуточную точку пути») дает возможность установить промежуточные точки перемещения, чтобы манекен не проходил сквозь препятствия. Воспользуемся этой командой и расставим несколько промежуточных состояний (рис. 2.219).

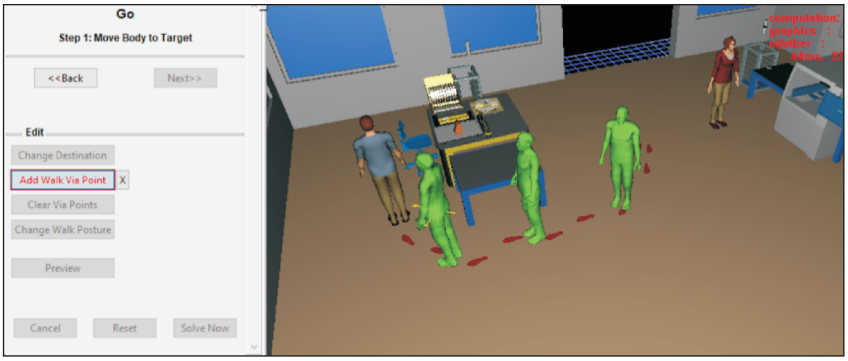


Рис. 2.219. Результат выполнения команды “Add Walk Via Point” («Добавить промежуточную точку пути») в окне “Go” («Идти») инструмента TSB

Команда “Clear Via Point” («Удалить промежуточные точки») удаляет все промежуточные состояния, добавленные с помощью команды “Add Walk Via Point” («Добавить промежуточную точку пути»). Команда “Change Walk Posture” («Изменить позу при перемещении») изменяет позу манекена, в которой он перемещается. Нажав кнопку “Preview” («Предварительный просмотр»), можно увидеть предварительную анимацию того, как Jack выполняет настроенную команду “Go” («Идти»). Для завершения следует нажать кнопку “Next” («Далее») (рис. 2.220).

Далее заставим манекен Jack взять и развернуть объект (стул). Поскольку стул находится справа от манекена, нажмем правой кнопкой мыши на красную полоску внизу с надписью “Go” («Идти») и выберем команду “Edit task” («Редактировать задачу») в выпадающем меню (рис. 2.221).

В открывшемся меню нажмем кнопку “Next” («Далее»), а затем кнопку “Change Destination” («Изменить конечную точку»), изменив конечную точку перемещения (рис. 2.222). Далее применим к стулу команду “Get” («Взять») из меню слева (рис. 2.223).

Здесь надо указать, кто (who) — “human” («человек»), что берет — “chair” («стул») и чем — автоматически (Automatic), левой рукой (Left), правой рукой (Right) или обеими (Both). Выберем Both (обеими руками) и нажмем кнопку “Next” («Далее») два раза (рис. 2.224).

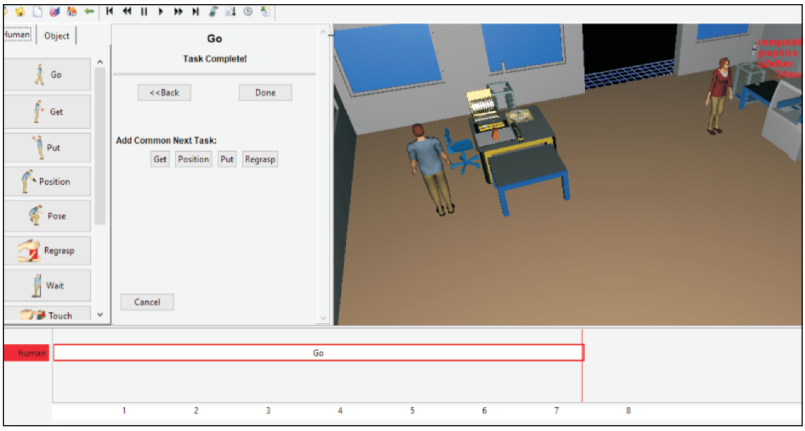


Рис. 2.220. Окно выполнения команды “Go” («Идти») инструмента TSB

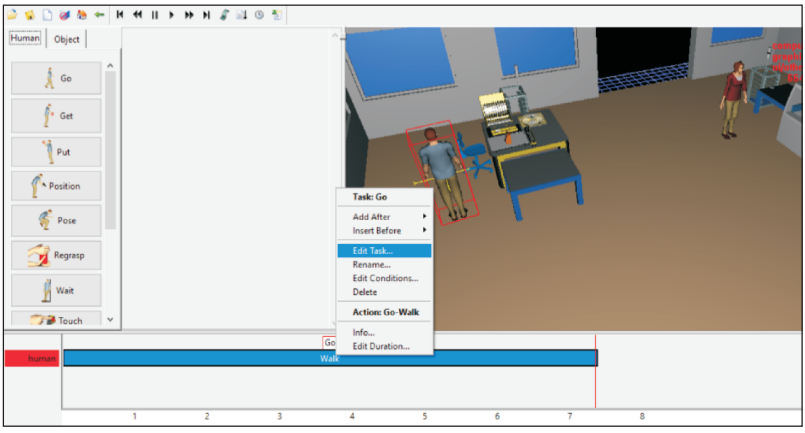


Рис. 2.221. Изменение команды “Go” («Идти») инструмента TSB

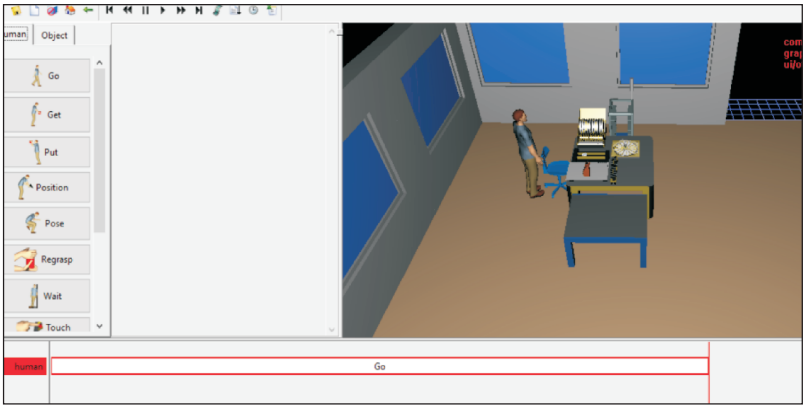


Рис. 2.222. Новое положение манекена Jack

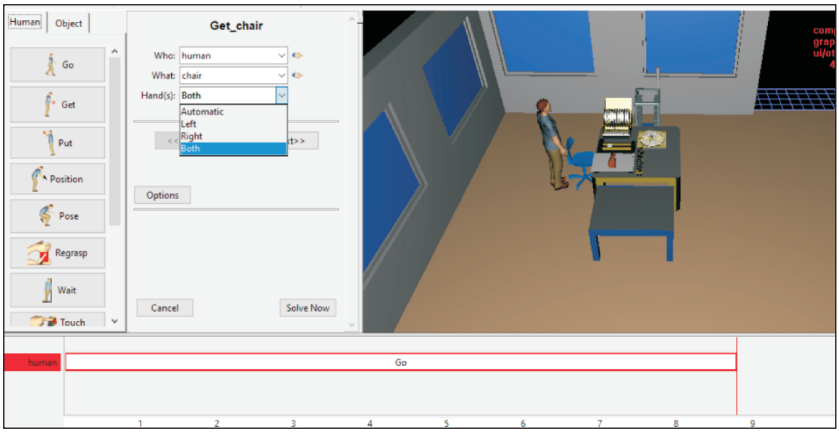


Рис. 2.223. Окно “Get” («Взять») инструмента TSB

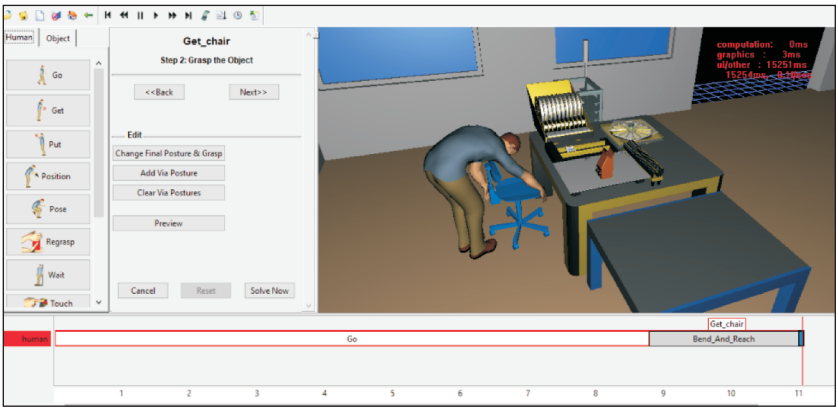


Рис. 2.224. Предварительный результат выполнения команды “Get” («Взять») инструмента TSB

Как видно из рис. 2.224, Jack попытался самостоятельно решить, как лучше брать указанный объект двумя руками. Однако необходимо, чтобы он взялся за спинку стула для последующего его разворота. Изменим конечную позицию, нажав мышью кнопку “Change Final Posture & Grasp” («Изменить конечную позу и хват»), — откроется панель управления манекеном (рис. 2.225).

После нажатия левой кнопкой мыши на разные части тела будут появляться контекстные меню с предлагаемыми действиями. Например, для левой руки наиболее важные пункты здесь “Manipulate” («Манипулировать») для манипуляций рукой, “Adjust Wrist Point” («Настроить точку запястья») для задания положения кисти, “Adjust Finger Point” («Настроить точку пальца») для задания положения пальцев, “Mirror The Right Arm” («Зеркально

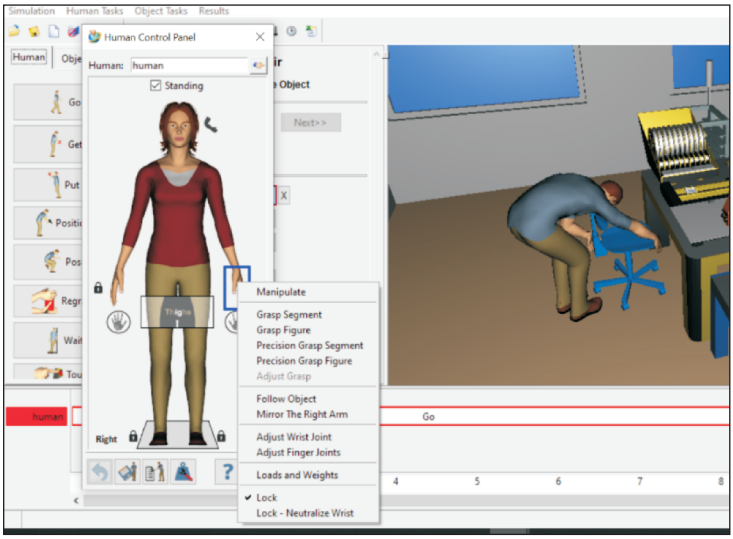


Рис. 2.225. Панель управления манекеном инструмента TSB

отразить правую руку») для зеркального повторения действия правой руки. Зададим необходимое положение, результат выполнения представлен на рис. 2.226.

Теперь модель стула присоединена к рукам манекена, и он сможет отодвинуть стул так, чтобы на него было удобно сесть. Отметим, что на временно́й шкале внизу возникло новое деление, показывающее, сколько секунд заняло у манекена проделанное действие.

Для того чтобы отодвинуть стул, воспользуемся пунктом меню слева “Put” («Положить»). Данный пункт идентичен пункту “Get” («Взять»),

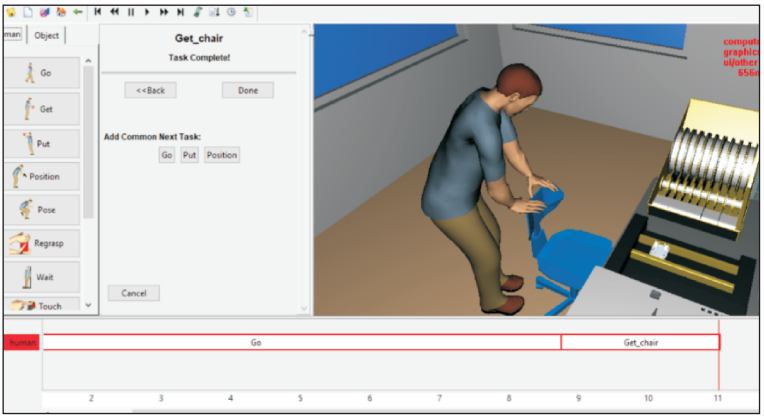


Рис. 2.226. Окончательный результат выполнения команды “Get” («Взять») инструмента TSB

единственное отличие в том, что в прошлый раз объект в результате операции присоединялся к манекену, а теперь отсоединится от него.

Так же, как в прошлый раз, укажем, кто будет воздействовать, объект воздействия, а затем само воздействие. Нажмем мышью кнопку “Next” («Далее»), проверим правильность анимации с помощью предварительного просмотра (Preview) и подтвердим действия с помощью нажатия кнопки “Done” («Готово») (рис. 2.227).

Далее усадим манекен на стул с помощью комбинации из трех операций. Вначале заставим его подойти к стулу с помощью команды “Go” («Идти») (рис. 2.228).

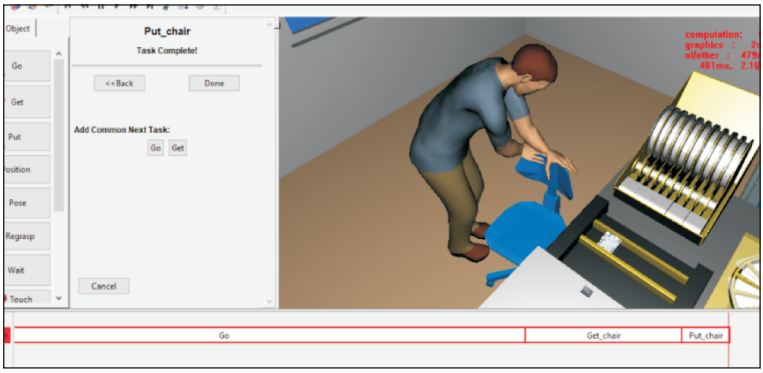


Рис. 2.227. Окончательный результат выполнения команды “Put” («Положить») инструмента TSB

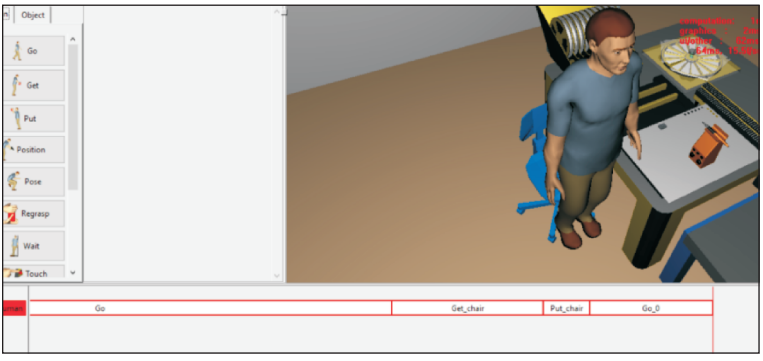


Рис. 2.228. Посадка манекена на стул, шаг 1 “Go” («Идти»)

Изменим позу манекена с помощью команды “Pose” («Поза») так, чтобы он принял сидячее положение (рис. 2.229).

В завершение зафиксируем сидячее положение манекена с помощью команды “Sit” («Сесть»), после этого любые последующие операции манекен будет выполнять сидя (рис. 2.230).

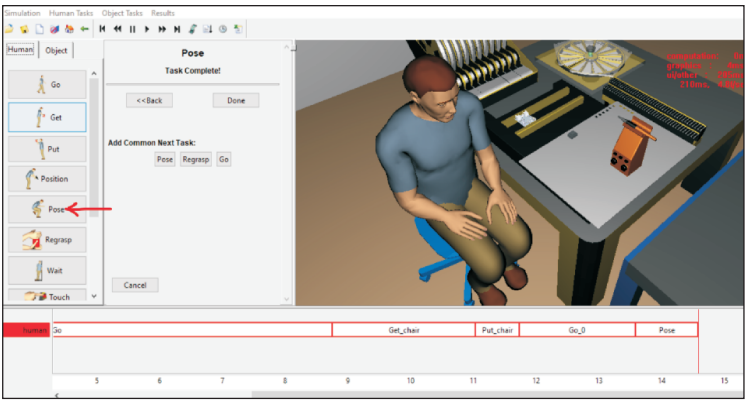


Рис. 2.229. Посадка манекена на стул, шаг 2 “Pose” («Поза»)

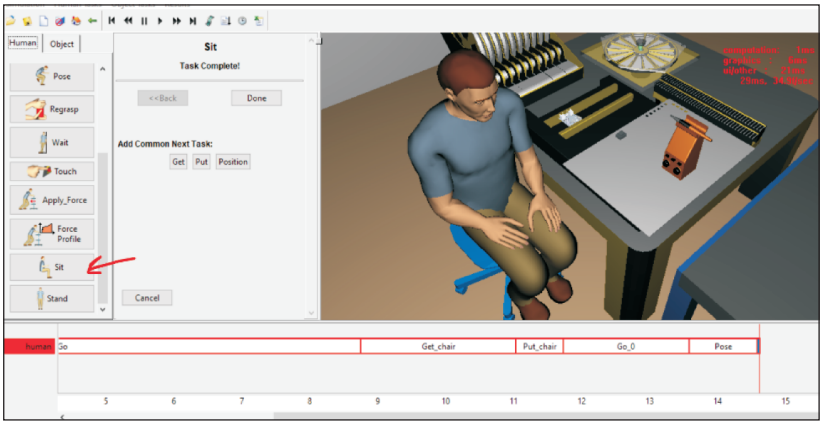


Рис. 2.230. Посадка манекена на стул, шаг 3 «Sit» («Сесть»)

Теперь смоделируем работу оператора автоматизированного оборудования за сенсорным монитором установки трафаретной печати Ekra X5 Professional с помощью манекена Jill. Для этого сначала подведем манекен к установке, используя команду “Go” («Идти») (рис. 2.231).

Далее выберем команду “Touch” («Коснуться»), которая отвечает за касание объекта манекеном. Нажимать на экран монитора Jill будет правой рукой (рис. 2.232).

После этого откорректируем положение руки с помощью команды “Change Final Posture” («Изменить конечную позу»), а также согнем пальцы кисти манекена, чтобы было видно, что Jill нажимает на экран (рис. 2.233).

Скорректировав необходимое положение кисти, подтвердим эту операцию, нажав кнопку “Next” («Далее»), а затем кнопку “Done” («Готово»). Для проверки правильности анимации воспользуемся предварительным просмотром (Preview).

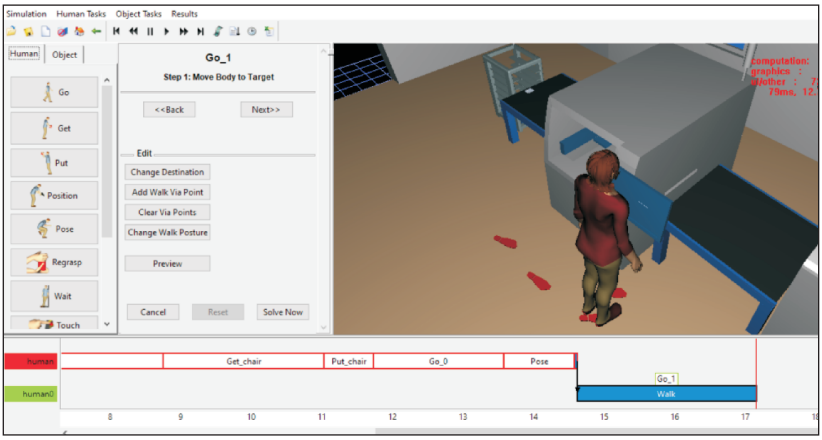


Рис. 2.231. Выполнение манекеном команды “Go” («Идти»)

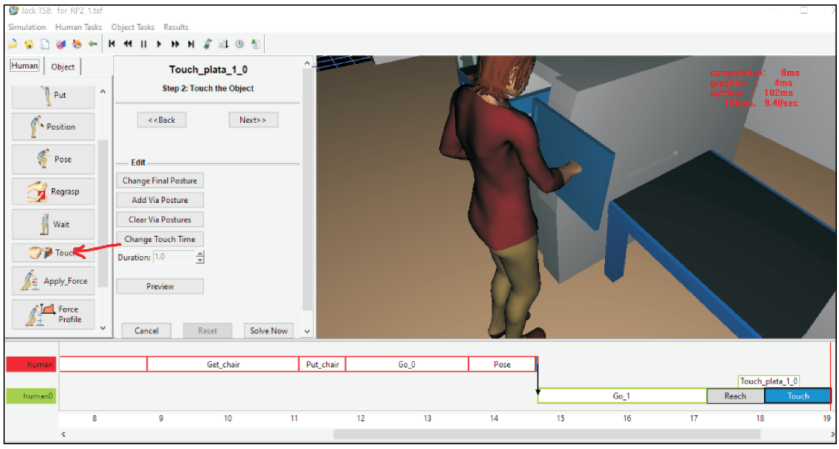


Рис. 2.232. Нажатие на сенсорный экран манекеном, шаг 1 “Touch” («Коснуться»)

Далее перейдем к анимации самих объектов: переместим печатную плату (PCB), перейдем во вкладку “Object” («Объект»), нажмем мышью кнопку “Move” («Переместить») и выберем плату (рис. 2.234).

Команда “Move” («Переместить») представляет собой аналог команды “Go” («Идти») для объектов, поэтому шаги ее выполнения будут практически идентичными. Переместим плату в новую позицию с помощью команды “Place Object” («Поместить объект») (рис. 2.235).

Выполним обзор нескольких необходимых в работе команд. Команда “Pose” («Поза») у объекта аналогична таковой у манекена, команда “Wait” («Ожидать») используется для создания задержки. У объекта есть также

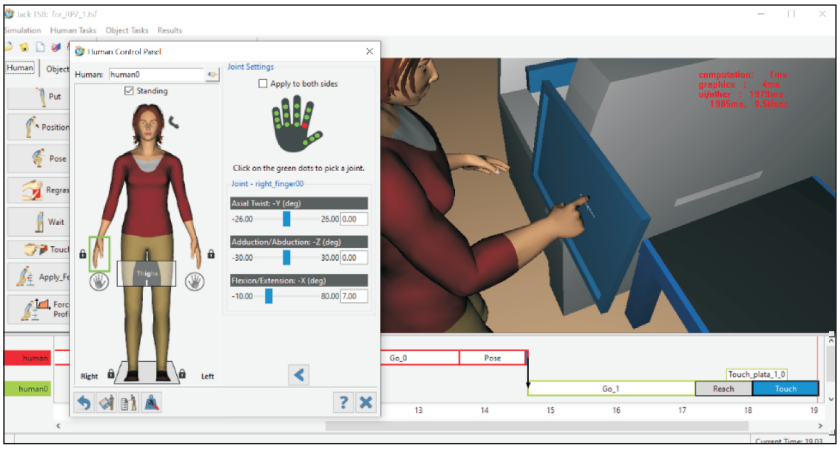


Рис. 2.233. Нажатие на сенсорный экран манекеном, шаг 2 “Change Final Posture” («Изменить конечную позу»)

важные команды “Attach” («Присоединить») и “Detach” («Отсоединить»). Они необходимы, когда нужно осуществить взаимодействие с объектом, на котором располагаются другие объекты.

Приведем пример: передвинем подставку на установщике компонентов SMP-330 с помощью команды “Move” («Переместить») без использования команды “Attach” («Присоединить») (рис. 2.236).

Как видно из результатов, объект «Подставка» передвинут, но остальные размещенные на нем объекты остались в своем исходном положении. Чтобы этого не происходило, предварительно присоединим объекты к подставке

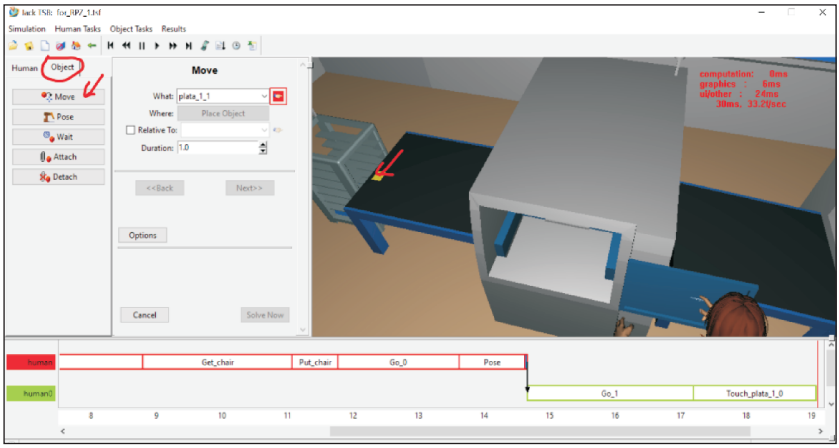


Рис. 2.234. Перемещение объекта с помощью команды “Move” («Переместить»), шаг 1

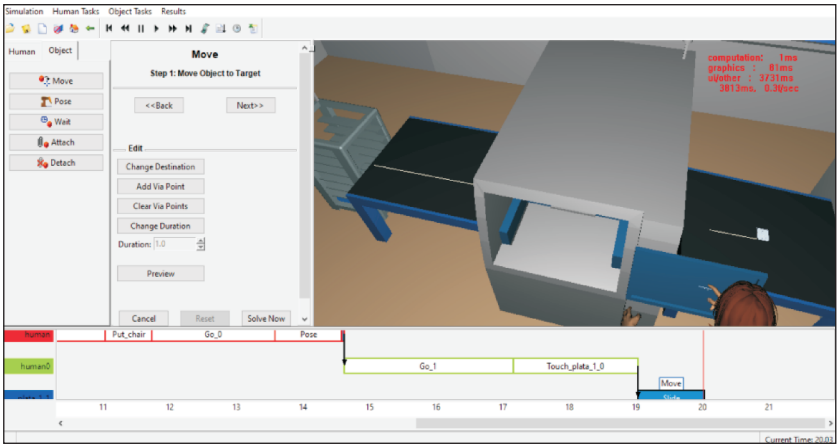


Рис. 2.235. Перемещение объекта командой “Move” («Переместить»), шаг 2

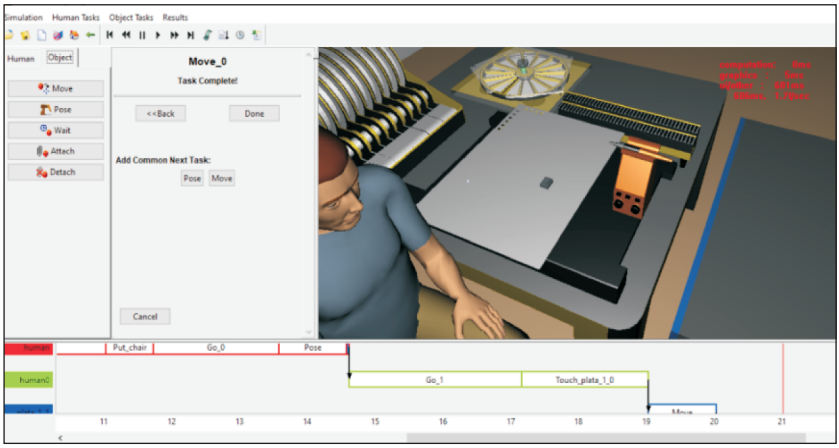


Рис. 2.236. Перемещение объекта без использования команды “Attach” («Присоединить»)

с помощью команды “Attach” («Присоединить»), а затем уже передвинем ее с помощью команды “Move” («Переместить») (рис. 2.237).

Теперь переместились все объекты. Важно после подобных перемещений не забыть отсоединить объекты с помощью “Detach” («Отсоединить»), в противном случае впоследствии манекен, пытаясь, например, взять паяльник, одновременно поднимет все объекты.

Отметим, что все действия выполняются последовательно, в чем можно убедиться по показаниям на временно́й полосе внизу. Это особенность модуля Jack, в текущих версиях не позволяющего манекенам выполнять параллельные процессы.

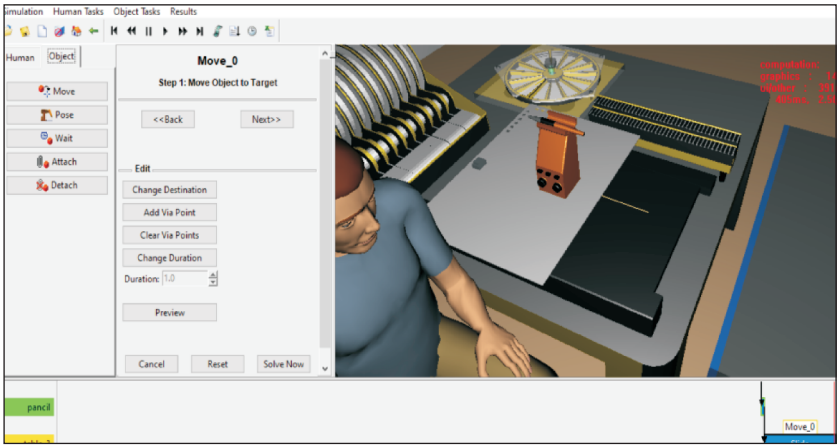


Рис. 2.237. Перемещение объекта с использованием команды “Attach” («Присоединить»)

После завершения настройки и моделирования процесса производства существует возможность записать его на видео. Для этого следует нажать на панели инструментов иконку . В появившемся окне настраивается качество видео (рис. 2.238).

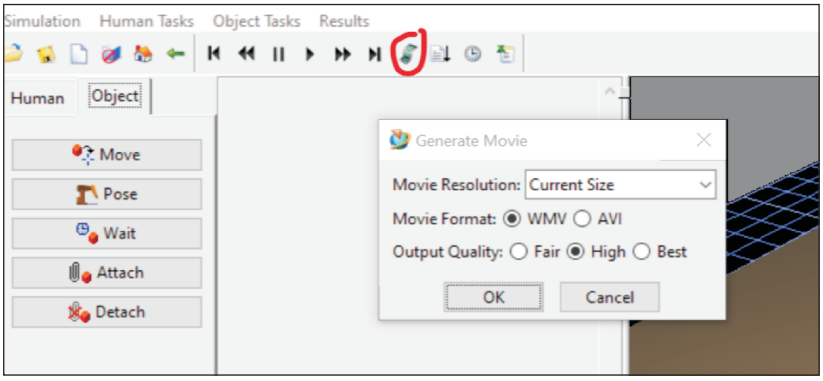


Рис. 2.238. Запись видео, шаг 1

После нажатия кнопки OK появится диалоговое окно для сохранения файла. После выбора и подтверждения места сохранения начнется запись видео. Записываться будет то, что видит камера в настоящий момент, управление ею осуществляется с помощью описанного ранее механизма. Процесс записи иллюстрирует рис. 2.239.

Далее можно создать временно́й отчет. Для этого следует нажать на панели инструментов иконку . В появившемся окне настраиваются параметры отчета (рис. 2.240).

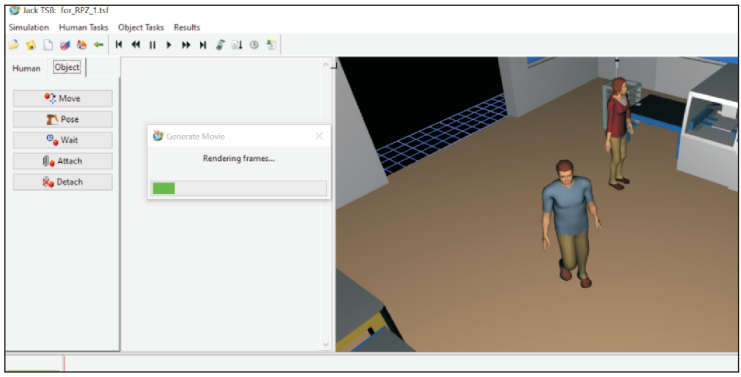


Рис. 2.239. Запись видео, шаг 2

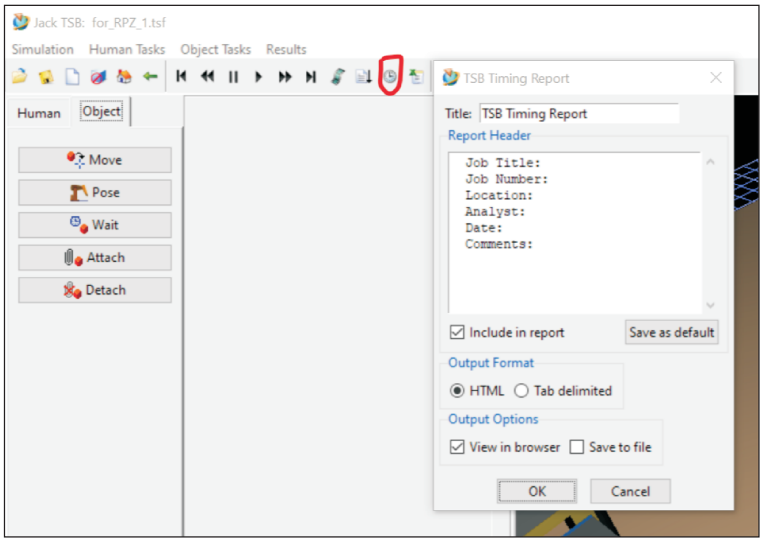


Рис. 2.240. Создание временно́го отчета

Task Summary

human			
Task	*Action*	*Duration*	*Code*
Go		**8.77**	
	Walk	8.77	W23FT
Get_chair		**2.28**	
	Bend_And_Reach	2.21	B + R26.628A(b)
	Grasp	0.07	G1A(b)
Put_chair		**0.70**	
	Reach	0.63	R12.080A(b)
	Release	0.07	RL1(b)
Go_0		**1.85**	
	Arise_From_Bend	1.15	AB
	Walk	0.70	W2FT
Pose		**1.00**	
	Pose	1.00	Pose
Sit		**0.04**	
	Sit	0.04	Sit

human0			
Task	*Action*	*Duration*	*Code*
Go_1		**2.54**	
	Walk	2.54	W7FT
Touch_plata_1_0		**1.88**	

Выбрав необходимые параметры и место сохранения, получаем сформированный отчет (рис. 2.241).

Таким образом, выполнен полный процесс настройки манекенов, заданы анимации манекенов и прочих объектов, рассмотрено получение выходных данных. Этот процесс является основой настройки и моделирования техпроцесса ручных операций сборки изделий приборостроения.

Рис. 2.241. Фрагмент сформированного временно́го отчета

Содержание отчета

1. Краткий конспект теоретической части.
2. Скриншоты финальных моделей и результирующие файлы моделей в электронном виде.
3. Исходные данные и результаты работы манекена в печатном и электронном виде.
4. Выводы по работе.
5. Ответы на контрольные вопросы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Сформулируйте последовательность операций импорта модели в модуль Jack.
2. Как настроить параметры антропоморфного манекена?
3. Как настроить перемещение объекта манекеном?
4. Как создать временно́й отчет работы манекена?

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 33. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЛИНИИ

Цель работы — научиться визуализировать и анализировать результаты имитационного моделирования технологической линии сборки электронных модулей на печатных платах, выполнять модернизацию линии в целях балансировки производительности технологического оборудования.

Задание 1

Вывести результаты имитационного моделирования технологической линии сборки электронных модулей на печатных платах:

– настроить объект потока информации Chart для оборудования в технологической линии;

– запустить имитационное моделирование работы линии;

– вывести в табличном виде статистику по состоянию оборудования, свойствам материалопотока, временным характеристикам, персоналу;

– составить таблицу суммарной статистики работы технологической линии с одним рабочим местом монтажника.

Теоретическая часть

Визуализация состояния и анализ модели в системе Plant Simulation выполняются несколькими способами. Один из них — использование объекта потока информации Chart, отображающего статистику использования объекта в графическом виде. Чтобы это сделать, объект потока необходимо добавить на модель и привязать к автомату, с которого будет собираться статистика. Иконка объекта показана на рис. 2.242.

Нажав клавишу F6, можно получить суммарную статистику по одному или нескольким выбранным объектам в табличном виде. Откроется окно (пример представлен на рис. 2.243), в котором выводится информация по состоянию каждого объекта, свойствам материалопотока, основным временны́м характеристикам (ожидание, работа, переналадка и др.), а также накопленная статистика ресурсов, сводная статистика классов и статистика по персоналу.

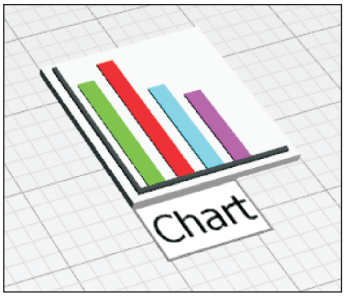


Рис. 2.242. Объект потока информации Chart

Основные результаты имитационного моделирования по созданию модели технологической линии сборки с одним рабочим местом монтажника представлены на рис. 2.244 и в табл. 2.1.

Статистика ресурсов - Статистика ресурсов

Доли состояний

Объект	Работа	Переналадка	Ожидание	Блокировка	Включение/выключение	Отказал	Остановлен	Пауза	Перерыв	Часть
Source	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
Stacker	1.36%	0.41%	0.07%	98.16%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
ekrax5	1.63%	0.00%	98.37%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
topaz	32.57%	0.06%	65.34%	0.00%	0.00%	2.04%	0.00%	0.00%	0.00%	
slow	5.82%	0.00%	94.18%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
Soldering	98.63%	0.00%	0.37%	1.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
Inspection	15.99%	0.00%	84.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
Washing	15.98%	0.00%	84.02%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
Drain	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	

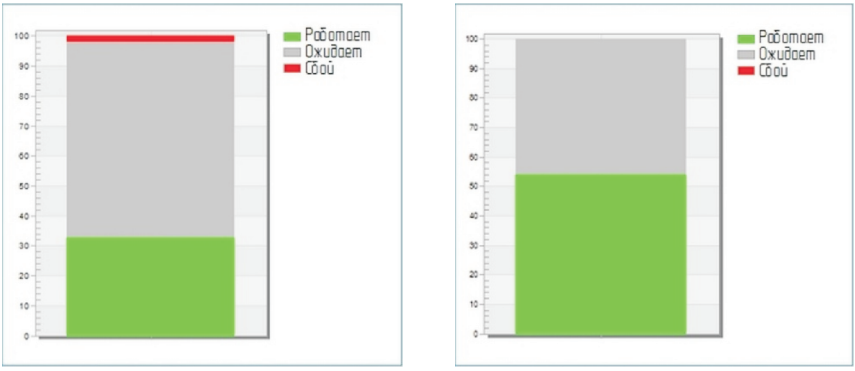
Свойства материалопотока

Объект	Входов ПО	Выходов ПО	Хранил минимум	Хранил максимум	Relative Empty	Relative Full	Относительная занятость без перерывов	Относительная занятость с перерывами
Source	1057	1056	0	1	0.00%	-	100.00%	100.00%
Stacker	1056	1055	0	1	0.00%	-	100.00%	100.00%
ekrax5	1054	1053	0	1	0.01%	-	99.99%	99.99%
topaz	1052	1051	0	1	0.12%	-	99.88%	99.87%
slow	94	94	0	1	94.18%	-	5.82%	5.82%
Soldering	1034	1033	0	1	0.37%	-	99.63%	99.63%
Inspection	1033	1032	0	1	84.01%	-	15.99%	15.99%
Washing	1032	1032	0	1	84.02%	-	15.98%	15.98%
Drain	1032	1032	0	1	100.00%	-	0.00%	0.00%

Время работы

Объект	Часть	Количество	Сумма	Среднее значение	Среднеквадратическое отклонение
Source	0.00%	0	0.0000	0.0000	0.0000
Stacker	1.36%	1056	1:28:00.0000	5.0000	0.0000
ekrax5	1.63%	1054	1:45:24.0000	6.0000	0.0000
topaz	32.57%	1053	1:11:03:57.8314	1:59.8840	3.7019
slow	5.82%	94	6:16:00.0000	4:00.0000	0.0000
Soldering	98.63%	1034	4:10:11:10.7466	6:09.7009	9.6173
Inspection	15.99%	1033	17:12:59.0819	59.9991	0.0286
Washing	15.98%	1032	17:12:00.0000	1:00.0000	0.0000
Drain	0.00%	1032	0.0000	0.0000	0.0000

Рис. 2.243. Окно статистики ресурсов



а *б*

Рис. 2.244. Основные результаты имитационного моделирования по созданной модели технологической линии сборки с одним рабочим местом монтажника: статистика автомата установки компонентов Topaz X (*а*) и печи пайки оплавлением HotFlow 3/14e (*б*)

Одним из достоинств имитационного моделирования по сравнению с натурными экспериментами является возможность виртуальной реализации различных сценариев работы линии вида «что, если». Изменения в цифровой модели можно вносить в любой момент времени, а результаты такого изменения практически сразу же визуализируются.

Таблица 2.1

Суммарная статистика работы технологической линии с одним рабочим местом монтажника

Параметр	Значение
Штучное время	93 ч 59 мин
Производительность	9 шт./ч
Загрузка: – штабелера	2,2%
– Ekra X5 Professional	2,2%
– Topaz X	32,4%
– HotFlow 3/14e	55,1%
– монтажника	88,2%
– контролера	18,7%
– автомата отмывки и сушки	6,5%

Задание 2

Модернизировать технологическую линию с целью снижения штучного времени и повышения производительности сборки:

– проанализировать полученные в Задаче 1 результаты;

– отметить пути балансировки производительности линии в части увеличения количества рабочих мест монтажников;

– построить модернизированную модель;

– запустить имитационное моделирование работы линии;

– составить таблицу суммарной статистики работы технологической линии с тремя рабочими местами монтажников;

– проанализировать полученные результаты и сравнить их с результатами, полученными в Задаче 1;

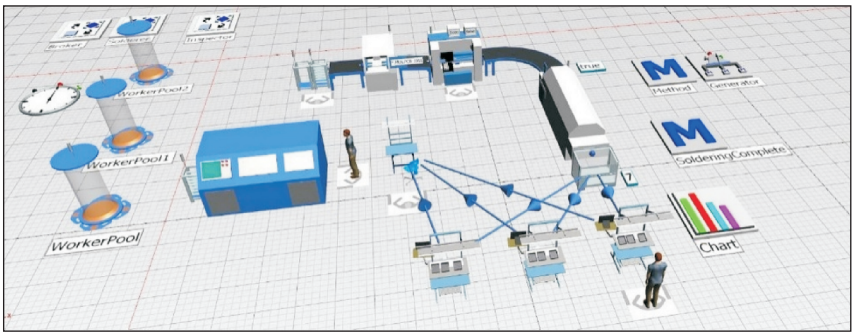
– сделать выводы о повышении производительности работы линии.

Теоретическая часть

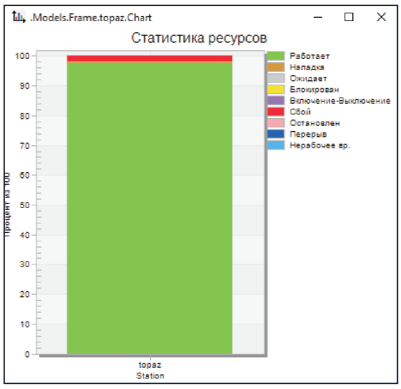
Выполним модернизацию модели линии с отработкой нового сценария. Анализируя приведенные на рис. 2.244 и в табл. 2.1 результаты моделирования, можно отметить существенную недозагрузку автоматизированного оборудования линии, так как при такой организации рабочих мест бóльшую часть времени техпроцесса занимает ручная пайка, а автоматы установки компонентов и пайки оплавлением значительную часть времени находятся в режиме ожидания.

Для решения данной проблемы необходимо изменить состав рабочих мест, выполнив балансировку линии по производительности. Введем двух дополнительных работников, осуществляющих установку и пайку компо-

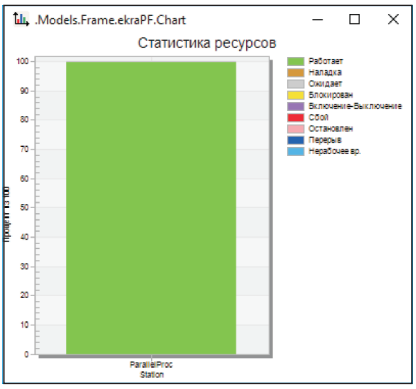
нентов в отверстия. Модернизированная модель с использованием трех монтажников и соответствующие изменениям результаты моделирования приведены на рис. 2.245 и в табл. 2.2. Эти результаты свидетельствуют о близкой к 100% загрузке оборудования, что обуславливает в 2,5 раза более высокие показатели производительности данного сценария работы линии по сравне-



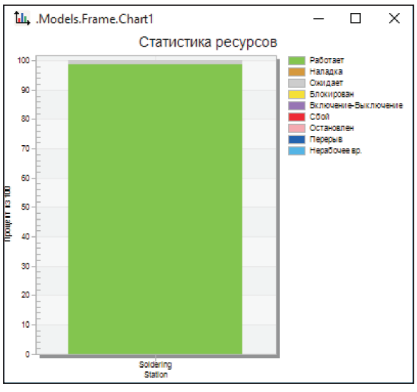
а



б



в



г

Рис. 2.245. Модернизированная имитационная модель технологической линии сборки с использованием трех рабочих мест монтажников вместо одного и соответствующие результаты моделирования: топология модернизированной имитационной модели (*а*); статистика автомата установки компонентов Topaz X (*б*); статистика печи пайки оплавлением HotFlow 3/14e (*в*); статистика монтажника (*г*)

нию с исходным вариантом по количеству выпущенных изделий в единицу времени. Сводный график, по которому можно оценить результаты, показан на рис. 2.246.

Таблица 2.2

Суммарная статистика работы технологической линии с тремя рабочими местами монтажников

Параметр	Значение
Штучное время	45 ч 24 мин
Производительность	23 шт./ч
Загрузка: – штабелера	4,1%
– Ekra X5 Professional	4,1%
– Topaz X	95,7%
– Ersa HotFlow 3/14e	100%
– монтажника	97,8%
– контролера	40,4%
– автомата отмывки и сушки	15,1%

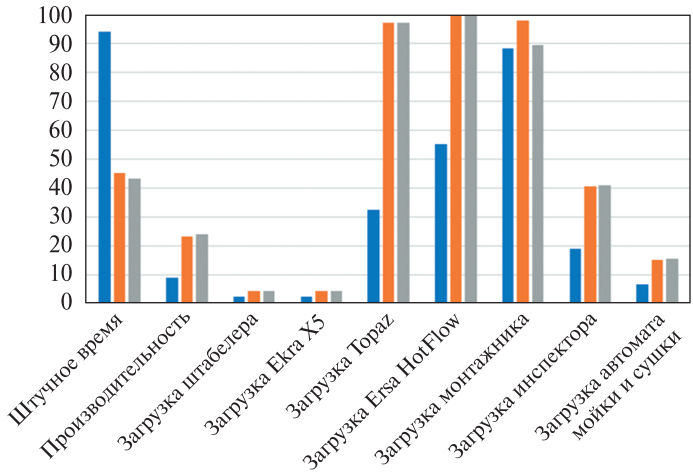


Рис. 2.246. Сводный график статистики объектов модели

Несмотря на то что полученные результаты демонстрируют низкие показатели простоя, а следовательно, и высокие показатели производительности линии, в получившийся технологический процесс имеет смысл добавить монтажников, выполняющих операцию ручной пайки, либо установку автоматизированной селективной пайки. Таким образом цифровое производство может быть подвергнуто модернизации.

Задание 3

Изыскать возможности дополнительной модернизации линии:

– изменить состав оборудования линии (перед выполнением моделирования утвердить решение у преподавателя);

– запустить имитационное моделирование работы линии;

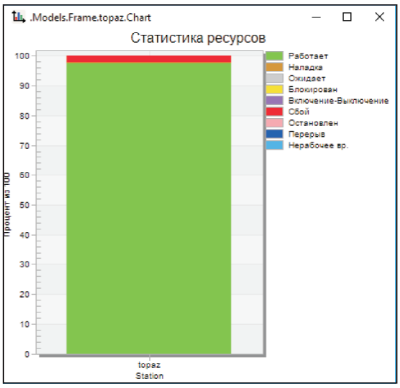
– составить таблицу суммарной статистики работы технологической линии с выполненными изменениями;

– проанализировать полученные результаты и сравнить их с результатами, полученными для исходной модели линии;

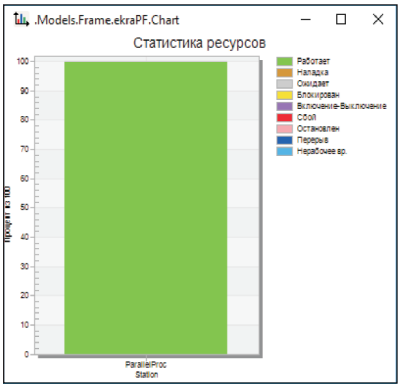
– сделать выводы об изменении производительности работы линии.

Теоретическая часть

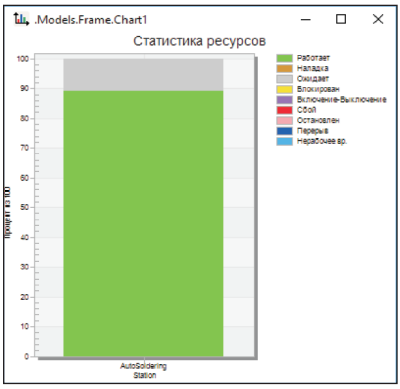
Для решения поставленной задачи проведем эксперимент с использованием установки селективной пайки волной модели Ersa Versaflow 3/45 вместо рабочих мест монтажников. Результаты этого эксперимента приведены на рис. 2.247.



а



б



в

Рис. 2.247. Результаты эксперимента с использованием установки селективной пайки волной: статистика автомата установки компонентов Topaz X (*а*); статистика печи пайки оплавлением HotFlow 3/14e (*б*); статистика установки селективной пайки Versaflow 3/45 (*в*)

Статистика объектов по данному варианту реализации техпроцесса приведена в табл. 2.3.

Таблица 2.3

Суммарная статистика работы технологической линии с установкой селективной пайки вместо рабочих мест монтажников

Параметр	Значение
Штучное время	43 ч 16 мин
Производительность	24шт./ч
Загрузка: – штабелера	4,1%
– Ekra X5 Professional	4,1%
– Topaz X	96,7%
– HotFlow 3/14e	100%
– Versaflow 3/45	89,2%
– контролера	40,7%
– автомата отмывки и сушки	15,4%

Содержание отчета

1. Краткий конспект теоретической части.
2. Скриншоты финальных моделей и результирующие файлы моделей в электронном виде.
3. Исходные данные и статистика по моделям в печатном и электронном виде.
4. Выводы по работе.
5. Ответы на контрольные вопросы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как следует использовать для визуализации результатов моделирования объект потока информации Chart?
2. В чем заключаются преимущества имитационного моделирования по сравнению с натурными экспериментами?
3. Как осуществлять эксперименты вида «что, если» с помощью имитационного моделирования?
4. Какие формы визуализации выходных данных предлагает система Plant Simulation?

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 34. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РУЧНЫХ ОПЕРАЦИЙ СБОРКИ

Цель работы — научиться визуализировать и анализировать результаты имитационного моделирования ручных операций сборки электронных модулей на печатных платах.

Задание

Вывести результаты имитационного моделирования ручных операций сборки электронных модулей на печатных платах (операцию задает преподаватель):

– настроить действия антропоморфного манекена для выполнения операции;

– провести хронометраж выполнения операции;

– настроить статистику отображения времени выполнения операции в табличном виде;

– проанализировать полученные результаты;

– наметить пути повышения производительности выполнения операции;

– модернизировать модель рабочего места, соответственно изменить действия манекена;

– проанализировать полученные результаты;

– сделать выводы об изменении производительности операции.

Теоретическая часть

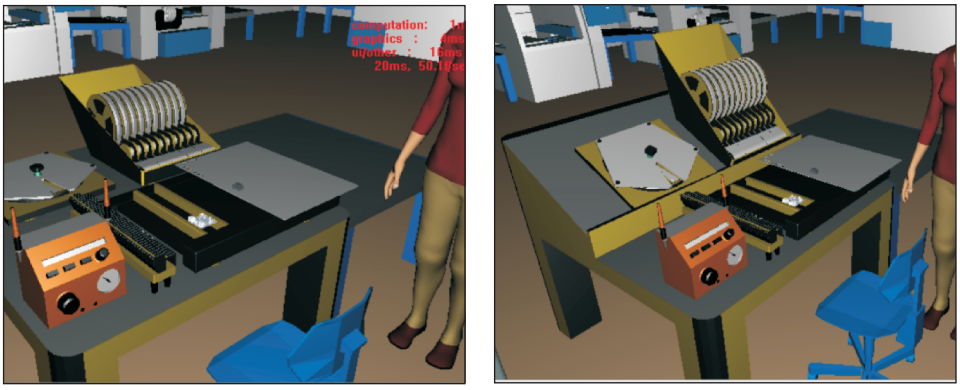
Подготовленное к моделированию рабочее место монтажника с применением установщика компонентов SMP-330, изученного в предшествующих практических работах № 30–32, представлено на рис. 2.248.

Выполним ряд исследований с помощью данной цифровой модели, в частности исследование влияния формы основания на доступность функциональных узлов для монтажника и производительность выполнения операции. Варианты исполнения основания представлены на рис. 2.249.

Порядок действий монтажника предполагался одинаковым для обоих вариантов исполнения: с вакуумным пинцетом в руке достать до всех функциональных узлов рабочего места. Успешным результатом считается тот, в котором монтажник может выполнять действия сидя, не привставая со стула. Анализ результатов, представленных на рис. 2.250, показывает, что в варианте исполнения *а* в отличие от варианта *б* монтажнику приходится привставать, чтобы достать до дальних функциональных узлов.

Проведем количественную оценку затрат времени монтажника, для чего выполним автоматизированное цифровое хронометрирование после-

Рис. 2.248. Цифровая модель рабочего места монтажника

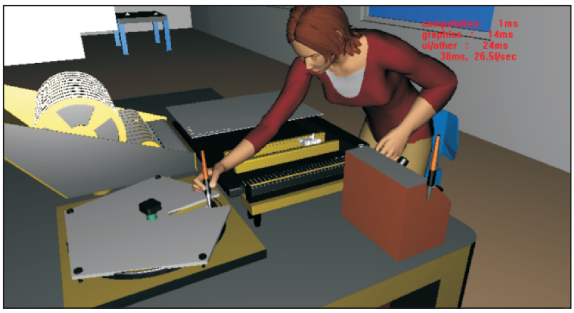


а *б*

Рис. 2.249. Варианты исполнения основания рабочего места монтажника: плоский стол (*а*); стол с подставкой-возвышением (*б*)

довательного обхода четырех узлов (рис. 2.251, позиции рабочего стола Р1, блока питателей из катушек Р2, карусельного питателя Р3 и дозатора Р4) для обоих вариантов исполнения оснований. Из полученных результатов (см. рис. 2.251 и табл. 2.4) видно, что в варианте плоского стола выполнение указанной последовательности действий заняло у монтажника почти в два раза больше времени, чем в варианте с подставкой-возвышением (15,3 с против 7,7 с). Для дальнейших исследований используем данный вариант.

Далее проведем исследование доступности функциональных узлов установщика компонентов в зависимости от их расположения с целью



а

б

Рис. 2.250. Результаты исследования вариантов основания рабочего стола монтажника: есть необходимость привставать (*а*); нет необходимости привставать (*б*)

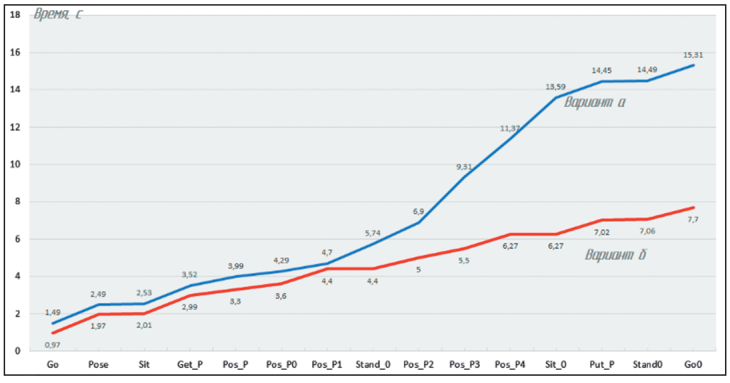


Рис. 2.251. Накопленное время последовательного обхода четырех функциональных узлов рабочего места монтажника в вариантах исполнения основания *а* и *б*

Таблица 2.4

Накопленное время достижения узлов в зависимости от варианта компоновки рабочего места, с

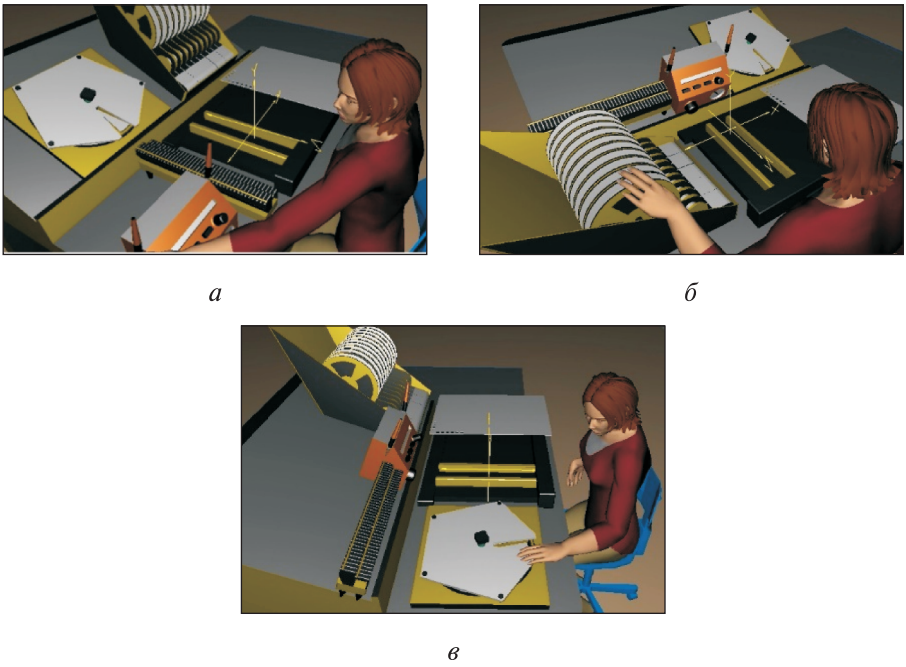
Название позиции	Вариант компоновки рабочего места	
	а	*б*
Go	1,5	1,0
Pose	2,5	2,0
Sit	2,5	2,0
Get_P	3,5	3,0
Position_P	4,0	3,3
Position_P0	4,3	3,6
Position_P1	4,7	4,4
Stand	4,7	–
Position_P2	6,9	5,0
Position_P3	9,3	5,5
Position_P4	11,4	6,3
Position_P5	13,6	–
Sit0	13,6	–
Put_P	14,5	7,0
Stand0	14,5	7,1
Go0	15,3	7,7

достижения рациональной компоновки узлов на рабочем месте. Критерием рациональности будет возможность работы с узлами из положения сидя. Исследуемые варианты компоновки представлены на рис. 2.252, результаты исследования — в табл. 2.5.

Результаты показывают, что только при варианте компоновки *а* монтажник может, не вставая с рабочего места, дотянуться до всех функциональных узлов, и пространство стола используется рационально. Данный способ расположения функциональных узлов признаем предпочтительным.

Созданную цифровую модель выполнения ручных операций можно встроить в модель всего производственного участка и проводить исследования уже на уровне производства в целом. Отметим, что возможности использования созданной цифровой модели не ограничиваются приведенными в данной практической работе примерами исследований. Например, можно исследовать поведение производственной структуры при выполне-

нии различных сценариев вида «что, если», в том числе при внесении возмущений в работу линии (отказов оборудования, влияния человеческого фактора и пр.).



а *б* *в*

Рис. 2.252. Варианты компоновки функциональных узлов установщика компонентов на рабочем месте монтажника

Таблица 2.5

Доступность функциональных узлов установщика компонентов в зависимости от их расположения на рабочем месте монтажника

Функциональный узел	Варианты компоновки		
	а	*б*	*в*
Рабочий стол	Доступен	Доступен	Доступен
Карусельный питатель	Доступен	Недоступен	Доступен
Дозатор	Доступен	Доступен	Доступен
Блок питателей из обрезков лент	Доступен	Недоступен	Доступен
Блок питателей из катушек	Доступен	Доступен	Недоступен
Затраченное время, с	40	44	42

Содержание отчета

1. Краткий конспект теоретической части.
2. Скриншоты финальных моделей и результирующие файлы моделей в электронном виде.
3. Исходные данные и статистика по моделям в печатном и электронном виде.
4. Выводы по работе.
5. Ответы на контрольные вопросы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. С какой целью проводится анализ реализуемости ручной операции?
2. Как выполнить количественную оценку затрат времени монтажника?
3. Можно ли встроить созданную цифровую модель ручных операций в модель всего производственного участка?
4. Как учесть при моделировании возможные отказы оборудования?

2.2. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ДОМАШНЕГО ЗАДАНИЯ

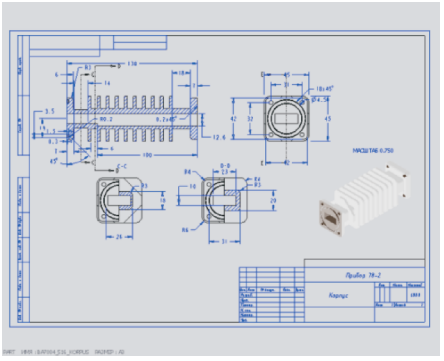
ПОСТРОЕНИЕ 3D-МОДЕЛЕЙ ДЕТАЛЕЙ И СБОРОЧНЫХ ЕДИНИЦ С ОФОРМЛЕНИЕМ КД В ФОРМАТЕ ВИДОВ МОДЕЛИ С PMI

Формулировка задания

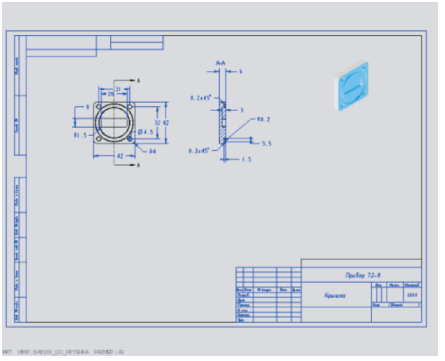
Дано:
– 2D-чертежи и/или эскизы деталей в составе сборки;
– сборочный 2D-чертеж и/или собранный/разнесенный вид сборки.

В среде САПР необходимо:
– построить 3D-модели деталей в составе сборки с оформлением КД в формате видов модели с PMI;
– построить 3D-модель сборки с оформлением КД в формате видов модели с PMI.

Примеры исходных данных для выполнения домашнего задания приведены на рис. 2.253, 2.254.

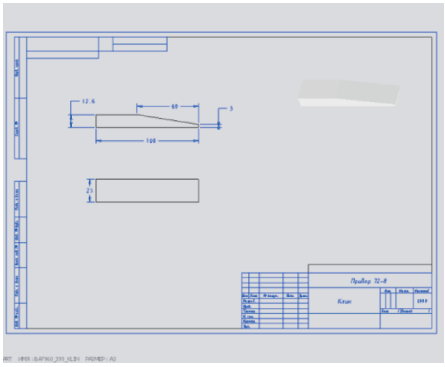


а

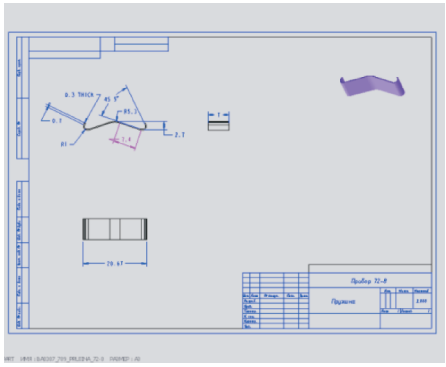


б

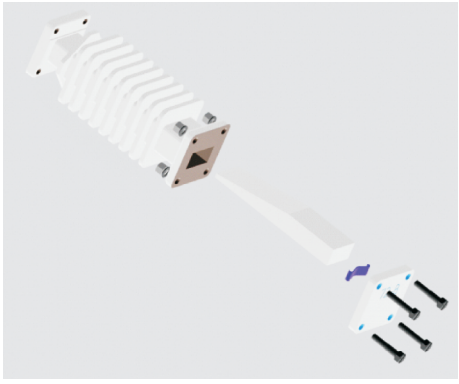
Рис. 2.253 (начало). Пример варианта домашнего задания № 1 «Волноводный тракт»: эскизы деталей (*а–г*)



в

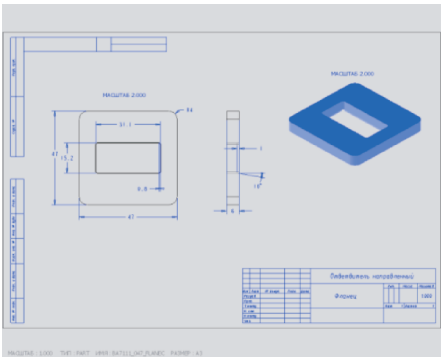


г

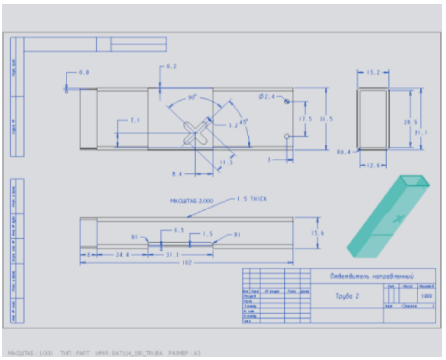


д

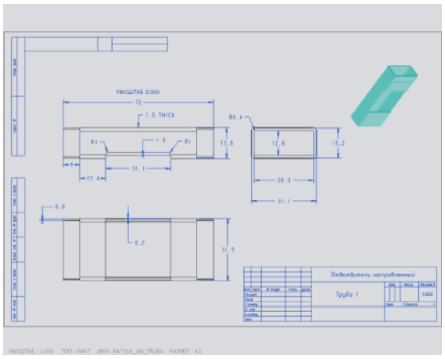
Рис. 2.253 (окончание). Пример варианта домашнего задания № 1 «Волноводный тракт»: эскизы деталей (*в*–*г*) и разнесенный вид сборки (*д*)



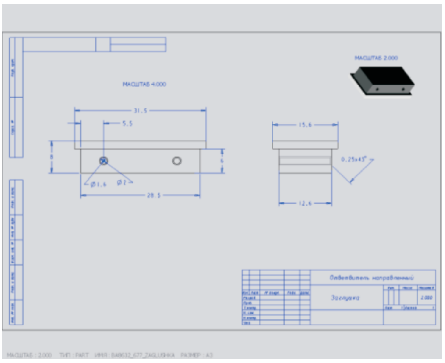
а



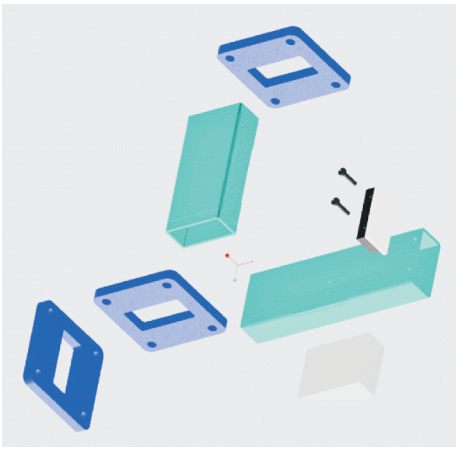
б



в



г



д

Рис. 2.254. Пример варианта домашнего задания № 2 «Направленный ответвитель»: эскизы деталей (*а*–*г*) и разнесенный вид сборки (*д*)

2.3. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ РУБЕЖНОГО КОНТРОЛЯ

РУБЕЖНЫЙ КОНТРОЛЬ № 1

Анализ сборки вала с кронштейнами на механические воздействия и оптимизация конструкции

Формулировка задания

Дано:

- 3D-модели деталей в электронном виде;
- 3D-модель сборки в электронном виде;
- материалы;
- нагрузки (структурные, тепловые);
- ограничения;
- проектный параметр, ограничения, переменные для оптимизации.

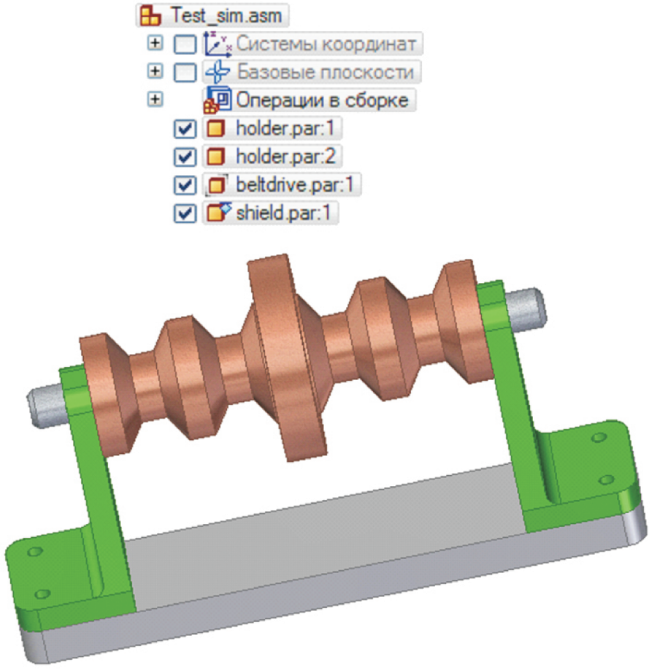


Рис. 2.255. Внешний вид исходной модели сборки вала с кронштейнами

В среде САПР необходимо:
- создать требуемый вид инженерного анализа;
- задать материалы;
- задать нагрузки;
- наложить ограничения;
- выполнить анализ;
- выполнить оптимизацию конструкции;
- проанализировать полученные результаты;
- сделать выводы;
- составить отчет.

Внешний вид исходной модели сборки представлен на рис. 2.255, исходные данные для анализа — в табл. 2.6.

Таблица 2.6

Варианты задания «Анализ сборки вала с кронштейнами на механические воздействия»

Номер варианта	Крутящий момент на шкиве, Н	Диаметр крепежных отверстий, диапазон изменяемых значений, мм	Расстояние между крепежными отверстиями, диапазон изменяемых значений, мм
1	50	6,0 — 9,0	195,0 — 220,0
2	55	6,2 — 8,8	195,5 — 220,0
3	60	6,4 — 8,6	196,0 — 220,0
4	65	6,6 — 8,4	196,5 — 220,0
5	70	6,8 — 8,2	197,0 — 220,0
6	75	6,2 — 8,2	197,5 — 220,0
7	80	6,4 — 8,4	198,0 — 220,0
8	75	6,6 — 8,6	198,5 — 220,0
9	70	6,0 — 9,0	195,0 — 220,0
10	65	6,2 — 8,8	195,5 — 220,0
11	60	6,4 — 8,6	196,0 — 220,0
12	55	6,6 — 8,4	196,5 — 220,0
13	50	6,8 — 8,2	197,0 — 220,0
14	45	6,2 — 8,2	197,5 — 220,0
15	40	6,4 — 8,4	198,0 — 220,0

Методические указания по выполнению

1. Анализ конструкции.
Анализ: линейный статический, все параметры по умолчанию.
Геометрия для включения в анализ: все детали.

Материал компонентов сборки: без изменений (Iron, grey cast type 60).

Нагрузка: крутящий момент на центральном шкиве, равный 50 Н·м, приложен к оси вала (рис. 2.256).

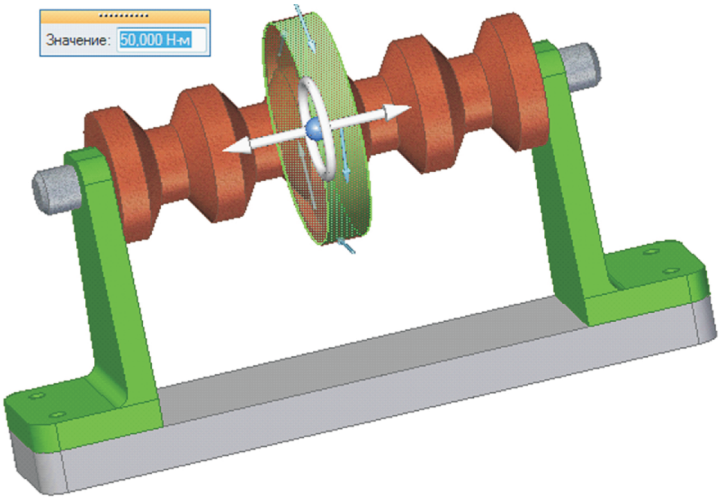


Рис. 2.256. Приложение нагрузки

Ограничения: фиксация основания снизу (рис. 2.257), фиксация вала (ограничение «Цилиндр» с включенной опцией «Ограничить перемещение вдоль оси») (рис. 2.258).

Контакты:

– 1, 2: команда «Автоматически», тип «Без проникновения», между кронштейнами и валом, параметры по умолчанию (рис. 2.259);

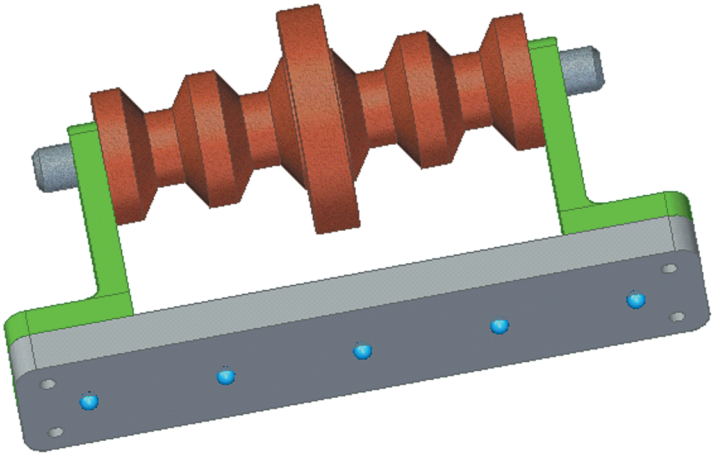
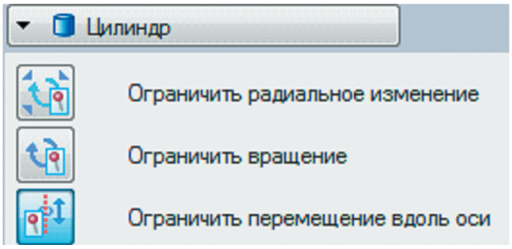
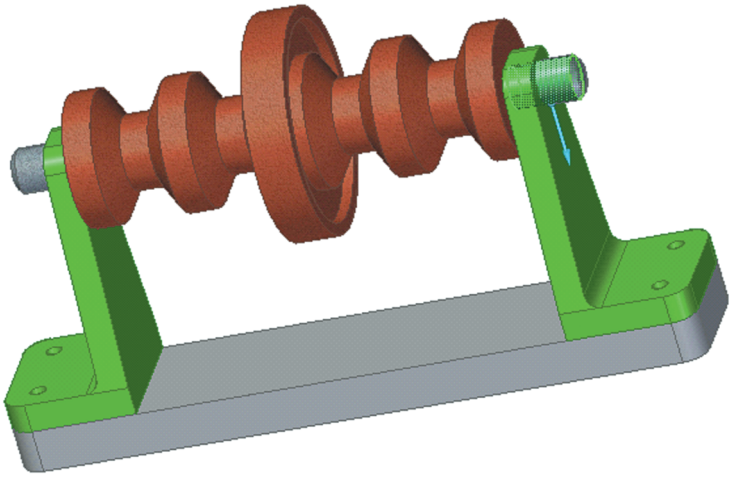


Рис. 2.257. Наложение ограничения на основание



а



б

Рис. 2.258. Наложение ограничения на вал: выбор опций (*а*) и вид наложенного ограничения в модели (*б*)

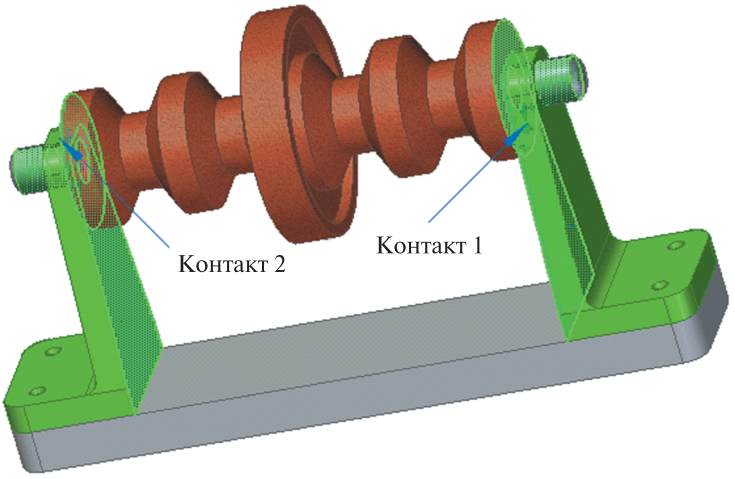


Рис. 2.259. Создание контактов между кронштейнами и валом

– 3, 4: команда «Автоматически», тип «Без проникновения», между кронштейнами и плитой основания, параметры по умолчанию (рис. 2.260);

– 5: болтовое соединение (команда «Болт»). Параметры: «Материал» — Steel; «Тип выбора» — одно отверстие; «Паутинный элемент» — выкл.; «Множество болтов» — вкл.; «Резьба» — отверстие неплотной посадки; геометрия болта, вала, гайки — по умолчанию (рис. 2.261).

Настройки сетки. Параметры (рис. 2.262): один размер сетки для компонентов — вкл.; размер сетки — 1 (в целях ускорения решения).

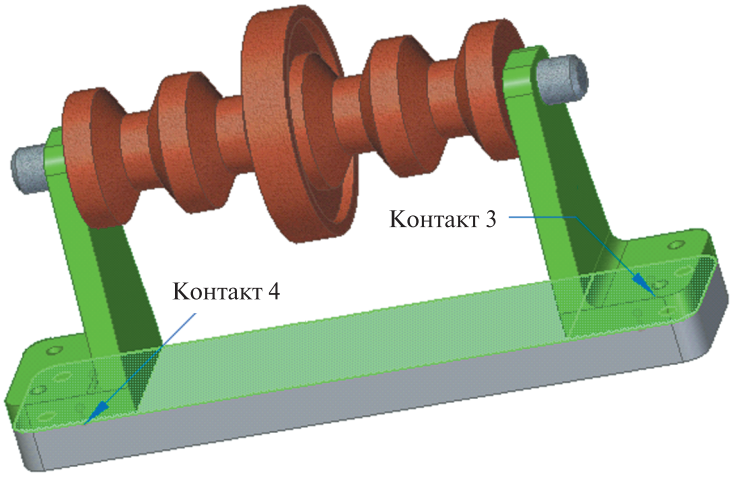
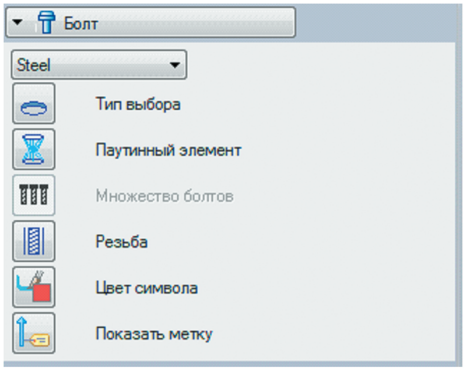
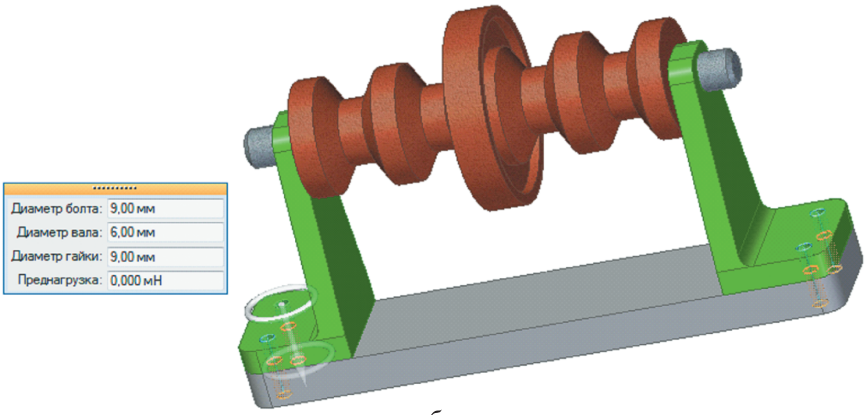


Рис. 2.260. Создание контактов между кронштейнами и плитой основания

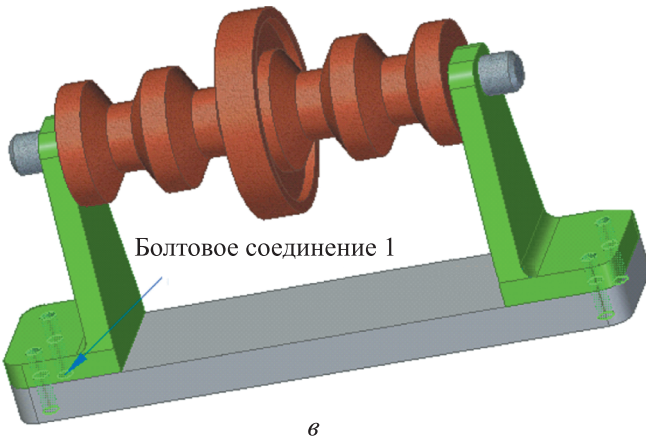


а

Рис. 2.261 (начало). Создание контакта в виде болтового соединения: меню команды (*а*)



б



в

Рис. 2.261 (окончание). Создание контакта в виде болтового соединения: параметры геометрии болта, вала и гайки (*б*), вид наложенного ограничения в модели (*в*)

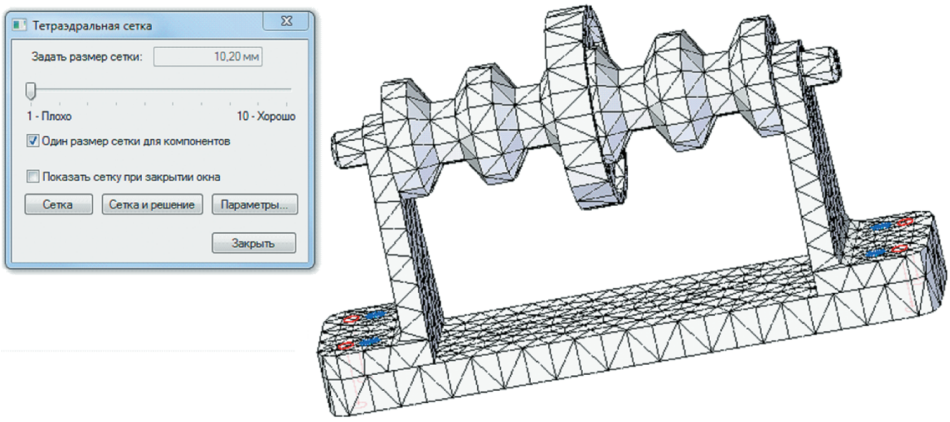


Рис. 2.262. Создание сетки

Далее следует выполнить анализ. По результатам анализа необходимо:

– вывести эпюру напряжений в модели, дополнительно отметив в графической части:

- модель до деформации;
- маркеры минимального и максимального значений;
- вещественный формат чисел в легенде;
- масштаб отображения результатов с минимальным значением 5000 кПа;

– вывести эпюру коэффициента запаса прочности модели, дополнительно отметив в графической части:

- модель до деформации;
- маркеры минимального и максимального значений;
- вещественный формат чисел в легенде;
- масштаб отображения результатов с максимальным значением 50;

– вывести эпюру перемещений в модели, дополнительно отметив в графической части:

- модель до деформации;
- маркеры минимального и максимального значений;
- научный формат чисел в легенде;
- масштаб всех результатов;

– сгенерировать отчет в формате html с параметрами по умолчанию;

– проанализировать результаты, сделать выводы.

В отчет необходимо включить:

– готовую модель;

– сгенерированный отчет по модели в формате html;

– скриншоты графического окна по трем указанным выше видам результатов;

– выводы по результатам анализа (в текстовом файле).

2. Оптимизация конструкции.

Проектный параметр: суммарное перемещение, текущее значение — максимум, минимизировать.

Проектное ограничение: напряжение по Мизесу, текущее значение — максимум, максимальное ограничение: 150 000 кПа.

Проектные переменные: см. рис. 2.263.

Прочие параметры оптимизации — по умолчанию.

Далее следует выполнить оптимизацию. По результатам оптимизации для итоговой итерации необходимо:

– вывести эпюру напряжений в модели, дополнительно отметив в графической части:

- модель до деформации;
- маркеры минимального и максимального значений;
- вещественный формат чисел в легенде;
- масштаб отображения результатов с минимальным значением 5000 кПа;

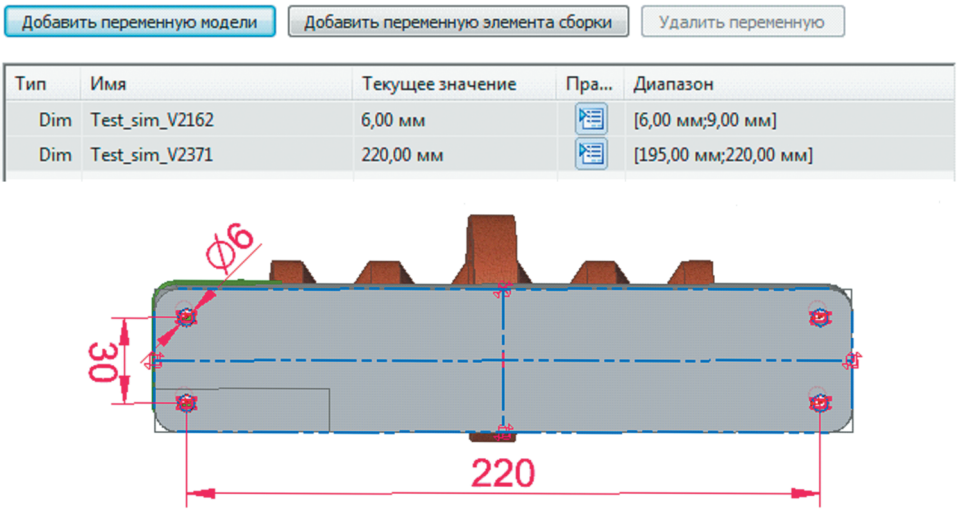


Рис. 2.263. Проектные переменные для оптимизации конструкции

– вывести эпюру коэффициента запаса прочности модели, дополнительно отметив в графической части:

- модель до деформации;
- маркеры минимального и максимального значений;
- вещественный формат чисел в легенде;
- масштаб отображения результатов с максимальным значением 50;

– вывести эпюру перемещений в модели, дополнительно отметив в графической части:

- модель до деформации;
- маркеры минимального и максимального значений;
- научный формат чисел в легенде;
- масштаб результатов;

– сгенерировать отчет в формате html с параметрами по умолчанию;

– проанализировать результаты, сделать выводы.

В отчет необходимо включить:

– готовую модель;

– численные результаты оптимизации в виде файла Excel с таблицей данных и графиком изменения проектного параметра по итерациям;

– скриншоты графического окна по трем указанным выше видам результатов;

– выводы по результатам оптимизации (в текстовом файле).

РУБЕЖНЫЙ КОНТРОЛЬ № 2

Анализ тепловых режимов интегральной микросхемы (ИМС) с термоинтерфейсом и пластинчатым радиатором, оптимизация конструкции

Формулировка задания

Дано:

- 3D-модели деталей в электронном виде;
- 3D-модель сборки в электронном виде;
- материалы;
- нагрузки (структурные, тепловые);
- ограничения;
- проектный параметр, ограничения, переменные для оптимизации.

В среде САПР необходимо:

- создать требуемый вид инженерного анализа;
- задать материалы;
- задать нагрузки;
- наложить ограничения;
- выполнить анализ;
- выполнить оптимизацию конструкции;
- проанализировать полученные результаты;
- сделать выводы;
- составить отчет.

Внешний вид исходной модели сборки представлен на рис. 2.264, исходные данные для анализа — в табл. 2.7.

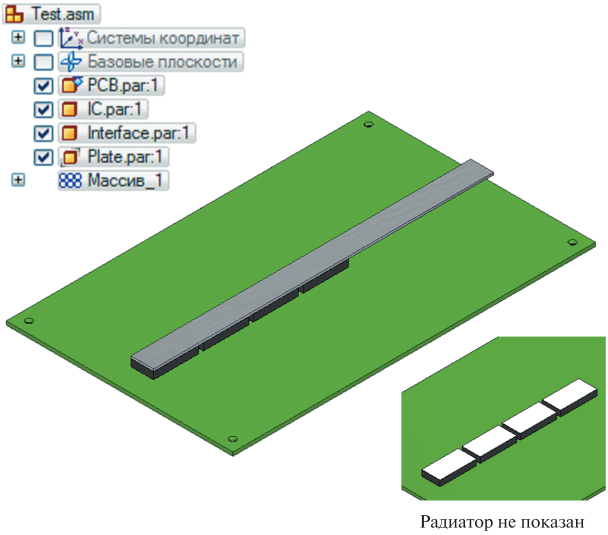


Рис. 2.264. Внешний вид исходной модели сборки в составе ИМС с термоинтерфейсом и пластинчатым радиатором

Таблица 2.7

Варианты задания «Анализ тепловых режимов ИМС с термоинтерфейсом и пластинчатым радиатором»

Номер варианта	Тепловой поток с верхних поверхностей ИМС, Вт	Ширина радиатора, диапазон изменяемых значений, мм	Шаг между центрами ИМС, диапазон изменяемых значений, мм
1	1,0	10,0–18,0	22,0–40,0
2	1,1	10,2–18,8	22,5–40,5
3	1,2	10,4–18,6	21,0–41,0
4	1,3	10,6–18,4	22,0–40,0
5	1,4	10,8–18,2	22,5–40,5
6	1,5	11,0–18,0	21,0–41,0
7	1,6	11,2–18,4	22,0–40,0
8	1,7	11,4–18,6	22,5–40,5
9	1,8	11,6–19,0	21,0–41,0
10	1,9	11,8–18,8	22,0–40,0
11	2,0	12,0–18,6	22,5–40,5
12	2,1	12,2–18,4	21,0–41,0
13	2,2	12,4–18,2	22,0–40,0
14	2,3	12,6–18,6	22,5–40,5
15	2,4	12,8–18,8	21,0–41,0

Анализ тепловых режимов модуля на печатной плате и оптимизация конструкции

Формулировка задания

Дано:

- 3D-модели деталей в электронном виде;
- 3D-модель сборки в электронном виде;
- материалы;
- нагрузки (структурные, тепловые);
- ограничения;
- проектный параметр, ограничения, переменные для оптимизации.

В среде САПР необходимо:

- задать тепловые нагрузки и граничные условия;
- провести анализ стационарного теплового режима сборки и оформить результаты анализа в виде теплового поля;
- использовать результаты теплового анализа для расчета механических напряжений, вызванных неравномерным нагревом модели;

• оформить результаты расчета в виде эпюр напряжений и деформаций сборки;

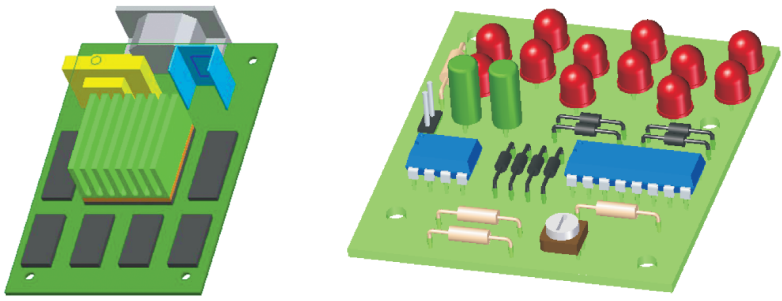
• задать анализ с однопроходной адаптацией;

• задать анализ с многопроходной адаптацией;

• объяснить различия в результатах анализов с применением одно- и многопроходной адаптации;

• сделать выводы.

Внешний вид исходной модели сборки представлен на рис. 2.265, исходные данные для анализа — в табл. 2.8 и 2.9.



а *б*

Рис. 2.265. Внешний вид исходной модели сборки модуля на печатной плате: сборка № 1 (*а*); сборка № 2 (*б*)

Таблица 2.8

Варианты задания «Анализ тепловых режимов модуля на печатной плате», сборка №1

Номер варианта	Мощность, рассеиваемая ИМС CHIP_DIE, Вт	Мощность, рассеиваемая ИМС IC1, Вт	Мощность, рассеиваемая ИМС IC2, Вт
1	2,0	1,9	0,50
2	2,2	1,8	0,55
3	2,4	1,7	0,60
4	2,6	1,6	0,65
5	2,8	1,5	0,70
6	3,0	1,4	0,75
7	3,2	1,3	0,80
8	3,4	1,2	0,85
9	3,6	1,1	0,90
10	3,8	1,0	0,95

Таблица 2.9

Варианты задания «Анализ тепловых режимов модуля на печатной плате», сборка №2

Номер варианта	Мощность, рассеиваемая ИМС IC1, Вт	Мощность, рассеиваемая ИМС IC2, Вт	Мощность, рассеиваемая светодиодами, Вт
1	1,9	2,0	0,20
2	1,8	2,2	0,25
3	1,7	2,4	0,30
4	1,6	2,6	0,35
5	1,5	2,8	0,40
6	1,4	3,0	0,20
7	1,3	3,2	0,25
8	1,2	3,4	0,30
9	1,1	3,6	0,35
10	1,0	3,8	0,40

Методические указания по выполнению

1. Анализ конструкции

Анализ: стационарный теплообмен, все параметры по умолчанию. Включить опцию «Тепловой поток» в группе результатов «По элементам» (рис. 2.266).

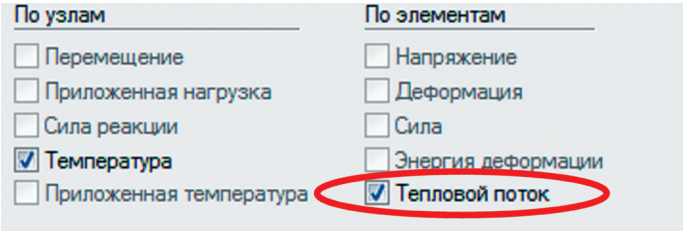


Рис. 2.266. Опция «Тепловой поток» в группе результатов «По элементам» при настройке параметров анализа стационарного теплообмена

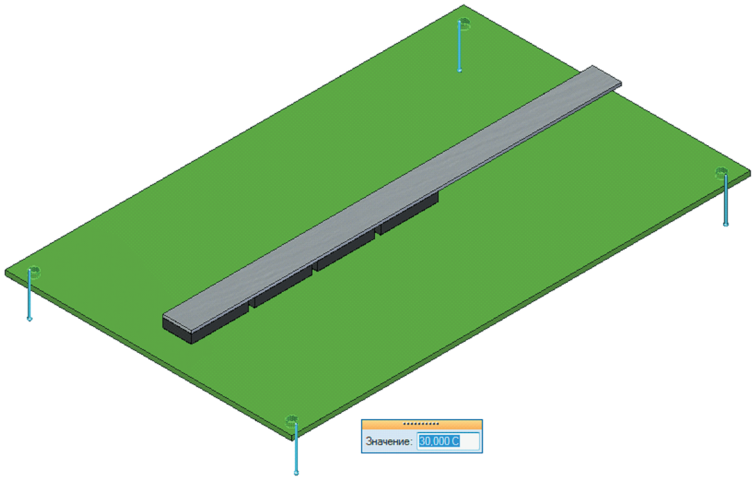
Геометрия для включения в анализ: все детали.

Материал компонентов сборки: без изменений.

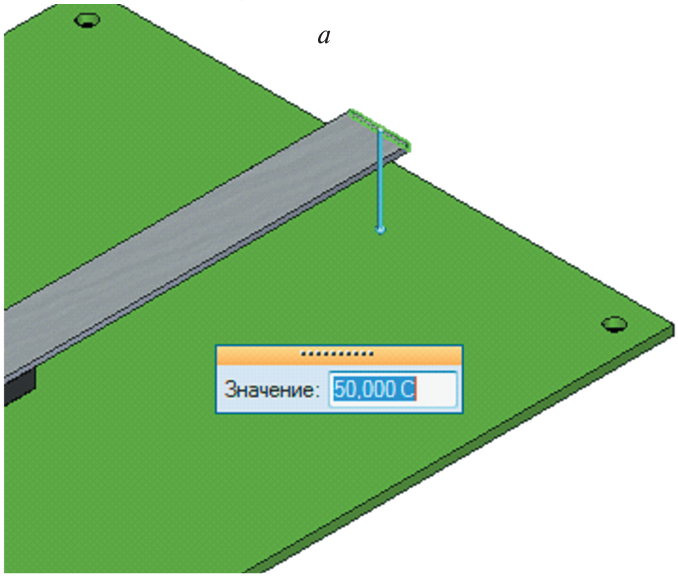
Тепловые нагрузки:

– фиксированная температура внутренних поверхностей базовых отверстий платы: 30 °C (рис. 2.267, *а*);

– фиксированная температура дальней торцевой поверхности радиатора: 50 °C (рис. 2.267, *б*; предполагается подключение к общей тепловой шине с термостатированием).



а



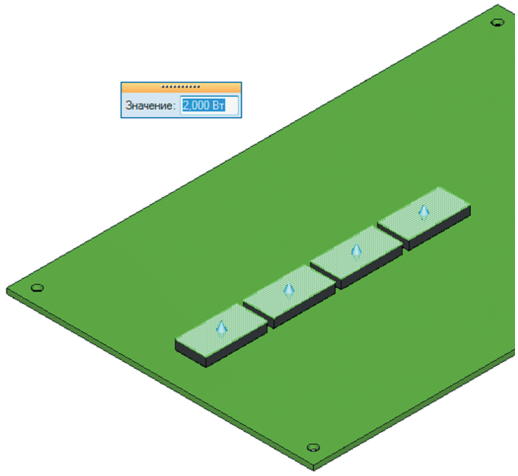
б

Рис. 2.267. Задание тепловых нагрузок в виде фиксированной температуры: поверхностей базовых отверстий платы (*а*) и дальней торцевой поверхности радиатора (*б*)

– тепловой поток с верхних поверхностей ИМС (общая нагрузка равна 2 Вт) (рис. 2.268);

– естественная конвекция с верхней поверхности радиатора (пленочный коэффициент равен 4 Вт/(м^2·К); температура среды 20 °С) (рис. 2.269).

Контакты: команда «Автоматически», тип «Склейка», выбрать все компоненты. Параметры по умолчанию (рис. 2.270).



Радиатор не показан

Рис. 2.268. Задание тепловых нагрузок в виде теплового потока с верхних поверхностей ИМС

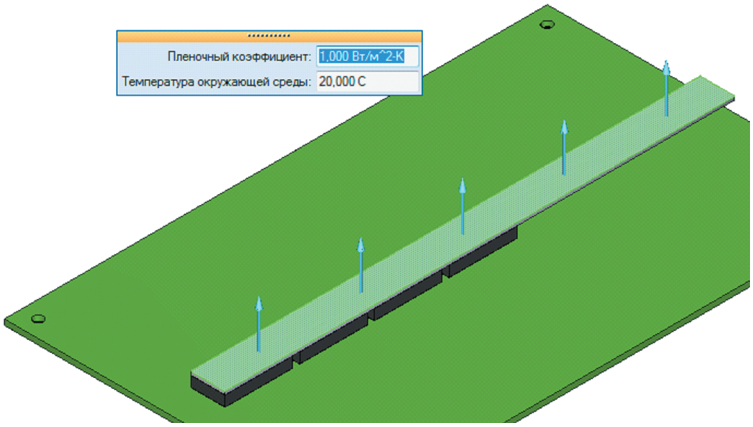


Рис. 2.269. Задание тепловых нагрузок в виде естественной конвекции с верхней поверхности радиатора

Настройка сетки: параметры по умолчанию (рис. 2.271).

Далее следует выполнить анализ. По результатам анализа необходимо:

– вывести тепловое поле модели, дополнительно отметив в графической части маркеры минимального и максимального значений;

– сгенерировать отчет в формате html с параметрами по умолчанию;

– проанализировать результаты, сделать выводы.

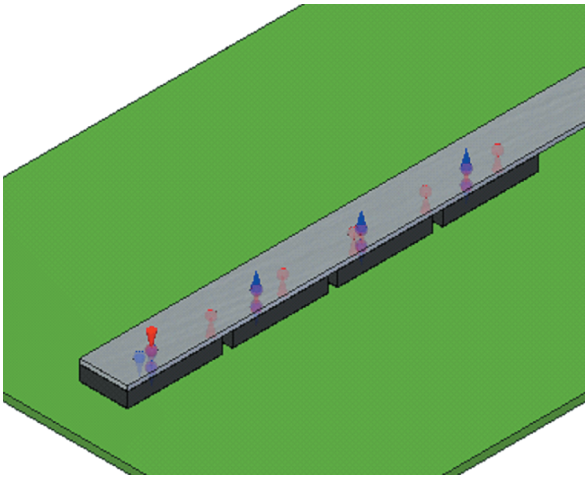


Рис. 2.270. Создание контактов

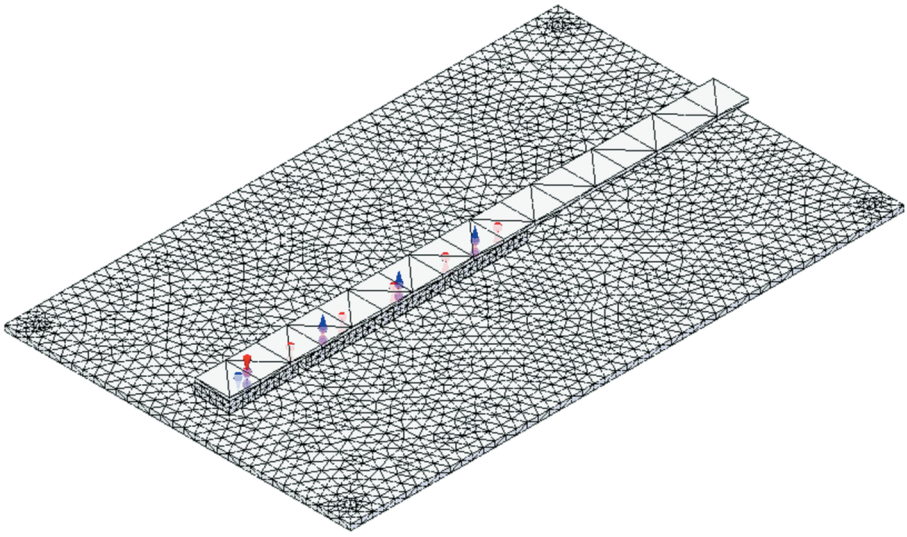


Рис. 2.271. Создание сетки

В отчет необходимо включить:
– готовую модель;
– сгенерированный отчет по модели в формате html;
– скриншот графического окна по указанному выше виду результатов;
– выводы по результатам анализа (в текстовом файле).

2. Оптимизация конструкции

Проектный параметр: температура, текущее значение — максимум, минимизировать.

Проектное ограничение: общая разница температур, максимальное ограничение: 20 000 град/м (фиктивное ограничение, вводится для корректности задания модели оптимизации).

Проектные переменные: см. рис. 2.272.

Прочие параметры оптимизации — по умолчанию.

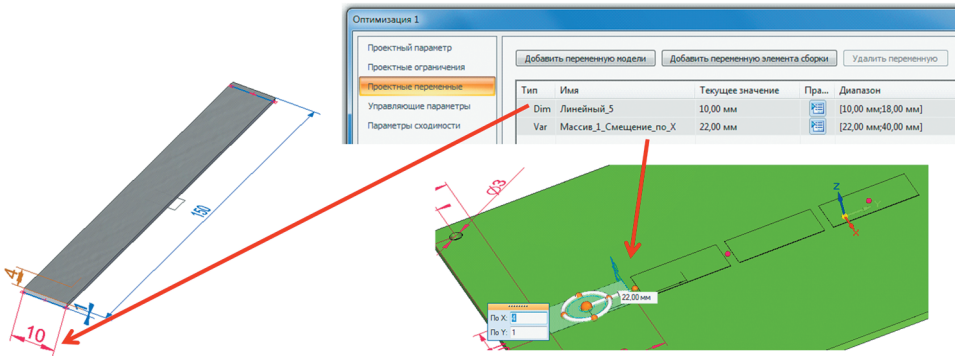


Рис. 2.272. Проектные переменные для оптимизации конструкции

Далее следует выполнить оптимизацию. По результатам оптимизации для итоговой итерации вывести тепловое поле модели, дополнительно отметив в графической части маркеры минимального и максимального значений.

В отчет необходимо включить:

– готовую модель;

– численные результаты оптимизации в виде файла Excel с таблицей данных и графиком изменения проектного параметра по итерациям;

– скриншоты графического окна по трем указанным выше видам результатов;

– выводы по результатам оптимизации (в текстовом файле).

Анализ и оптимизация расположения ИМС на печатной плате в целях обеспечения заданного теплового режима

Формулировка задания

Дано:

- 3D-модели деталей в электронном виде;
- 3D-модель сборки в электронном виде;
- материалы;
- нагрузки (структурные, тепловые);
- ограничения;
- проектный параметр, ограничения, переменные для оптимизации.

В среде САПР необходимо:

- задать тепловые нагрузки и граничные условия;

• провести анализ стационарного теплового режима сборки и оформить результаты анализа в виде теплового поля;

• выполнить оптимизацию расположения ИМС, добившись обеспечения заданного теплового режима центральной ИМС при 90 °С (увеличив расстояние между ИМС).

Внешний вид исходной модели сборки представлен на рис. 2.273, исходные данные для анализа — в табл. 2.10.

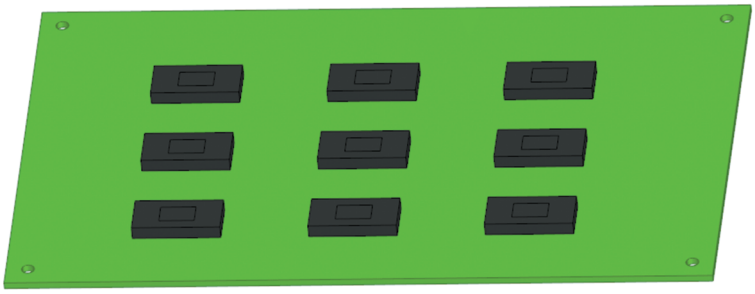


Рис. 2.273. Внешний вид исходной модели сборки в составе ИМС на печатной плате

Таблица 2.10

Варианты задания «Анализ и оптимизация расположения ИМС на печатной плате в целях обеспечения заданного теплового режима»

Номер варианта	Мощность, рассеиваемая центральной ИМС, Вт	Суммарная мощность, рассеиваемая прочими ИМС, Вт	Целевая температура, °С*
1	0,65	4,0	85
2	0,60	4,5	90
3	0,55	4,5	90
4	0,50	5,0	92
5	0,75	4,0	95
6	0,70	4,5	95
7	0,75	4,5	95
8	0,80	5,0	105
9	0,85	4,0	100
10	0,90	4,0	100

* Если указанных значений целевой температуры достичь не удается, следует увеличить диапазон изменения шага расположения ИМС.

Методические указания по выполнению

1. Анализ конструкции

Анализ: «Стационарный теплообмен», тип сетки «Тетраэдральная», в параметрах анализа включить опцию «Тепловой поток» в группе результатов «По элементам» (см. рис. 2.266).

Материалы: для детали “PCB” — Epoxy cast rigid, для деталей “IC” — PVC.

Геометрия — все детали в сборке.

Нагрузки:

– «Температура тела» (группа «Нагрузки на тело») 60 °**C** — начальная температура для выполнения анализа (рис. 2.274);

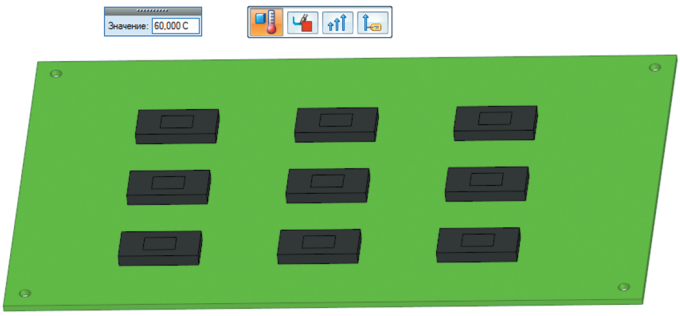


Рис. 2.274. Задание нагрузки «Температура тела» как начального условия

– «Температура» 40 °C — применить к внутренним цилиндрическим поверхностям крепежных отверстий и к торцевым поверхностям ПП (рис. 2.275);

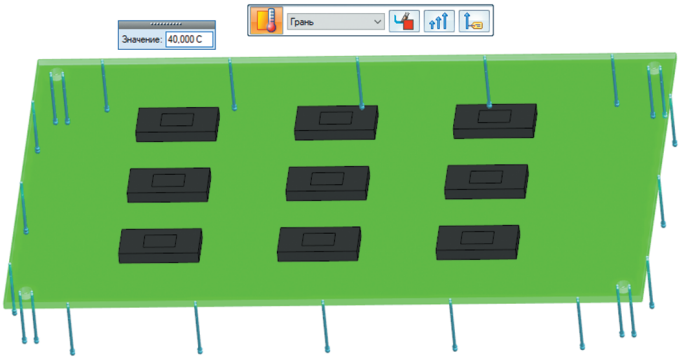


Рис. 2.275. Задание нагрузки «Температура» для элементов ПП

– «Тепловой поток 1» 0,65 Вт — к участку поверхности центральной ИМС, соответствующему размерам и расположению кристалла. Размер участка (излучающего полигона) 10x5 мм (рис. 2.276);

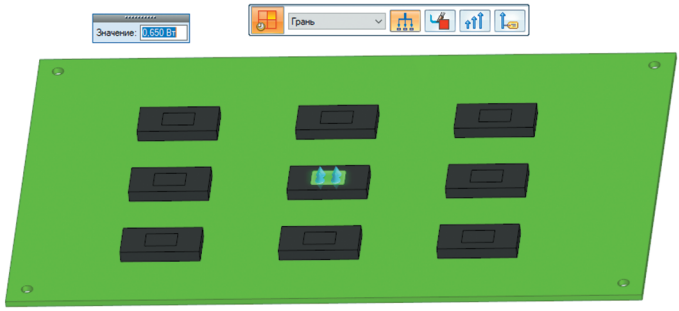


Рис. 2.276. Задание нагрузки «Тепловой поток 1» для центральной ИМС

– «Тепловой поток 2» 4,0 Вт — к участку поверхности прочих ИМС, соответствующему размерам и расположению кристалла. Размер участка (излучающего полигона) 10x5 мм (рис. 2.277);

– «Конвекция 1»: пленочный коэффициент 4,5 Вт/(м^2·К); температура окружающей среды 20 °С — ко всем внешним граням, кроме нижней, у всех ИМС (рис. 2.278);

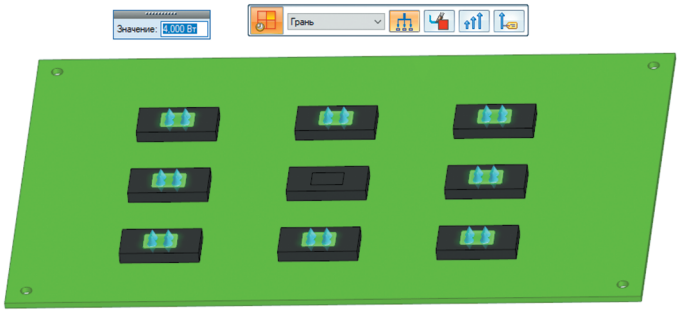


Рис. 2.277. Задание нагрузки «Тепловой поток 2» для прочих ИМС кроме центральной

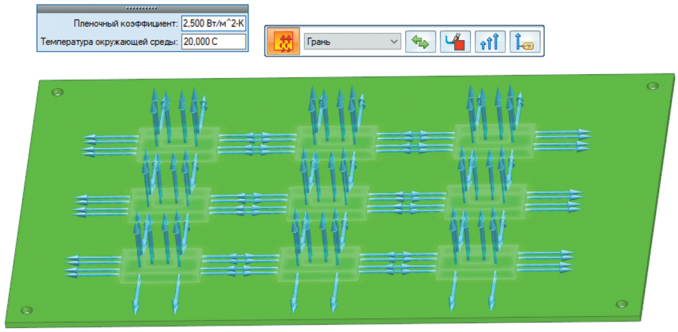


Рис. 2.278. Задание нагрузки «Конвекция 1» для всех ИМС

– «Конвекция 2»: пленочный коэффициент 4,5 Вт/(м^2·К); температура окружающей среды 20 °С — к верхней поверхности ПП, за исключением проекций корпусов ИМС (рис. 2.279);

– «Излучение 1»: замкнутый объем; применяется ко всем внешним плоскостям, за исключением нижней, у всех ИМС; параметры черноты поверхности, ZTOL (допуск на нулевые значения), экранирования см. на рис. 2.280.

– «Излучение 2»: замкнутый объем; применяется к верхней плоскости ПП; параметры черноты поверхности, ZTOL (допуск на нулевые значения), экранирования см. на рис. 2.281.

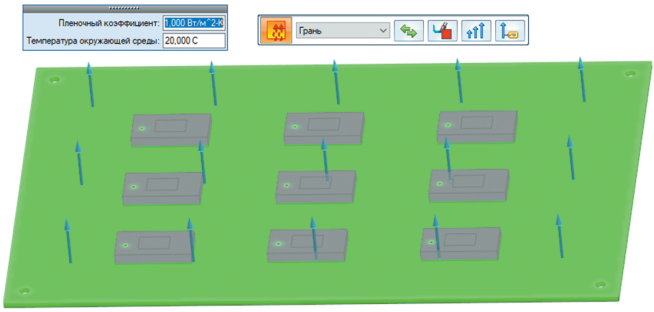


Рис. 2.279. Задание нагрузки «Конвекция 2» для ПП

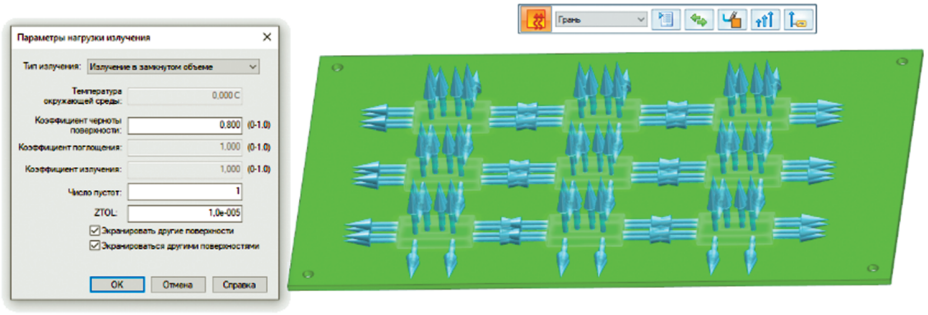


Рис. 2.280. Задание нагрузки «Излучение 1» для ИМС

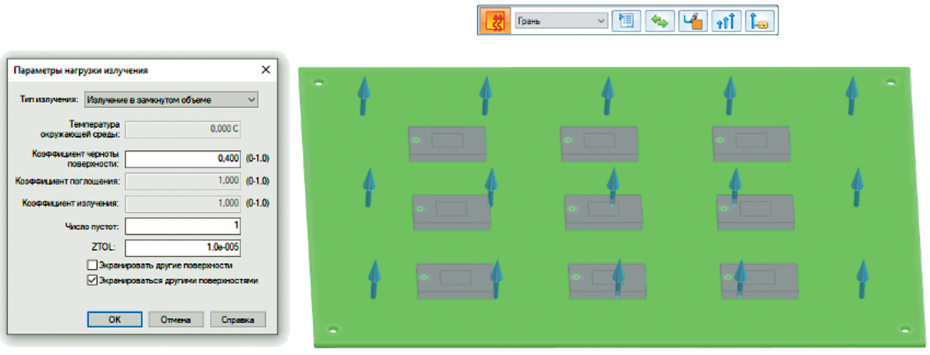


Рис. 2.281. Задание нагрузки «Излучение 2» для ПП

Контакты: тип «Склейка» / «Термическая склейка», команда «Автоматически», выбрать все компоненты.

Настройки сетки: размер сетки — 3, не включать опцию «Один размер сетки для компонентов». Коэффициент роста в параметрах сетки равен 5,0.

Перед выполнением анализа надо скрыть все нагрузки и контакты в графическом окне в целях удобства последующей визуализации результатов.

Далее следует выполнить анализ. По результатам анализа необходимо:

– вывести тепловое модели, дополнительно отметив в графической части маркер максимального значения и значения в узлах, соответствующих центрам центральной ИМС и одной–двух краевых ИМС;

– сгенерировать отчет в формате html с параметрами по умолчанию;

– проанализировать результаты, сделать выводы.

В отчет необходимо включить:

– готовую модель;

– сгенерированный отчет по модели в формате html;

– скриншот графического окна по указанному выше виду результатов;

– выводы по результатам анализа (в текстовом файле).

2. Оптимизация конструкции

Проектный параметр: температура, текущее значение — максимум, цель — значение температуры 90° С.

Проектное ограничение: 0,05 кг ≥ Масса ≥0,03 кг (фиктивное ограничение, вводится для корректности задания модели оптимизации).

Проектные переменные: переменные элемента сборки — ПП, значения см. на рис. 2.282.

Прочие параметры оптимизации — по умолчанию.

Далее следует выполнить оптимизацию. По результатам оптимизации для итоговой итерации необходимо:

– вывести тепловое модели, дополнительно отметив в графической части маркер максимального значения и значения в узлах, соответствующих центрам центральной ИМС и одной–двух краевых ИМС;

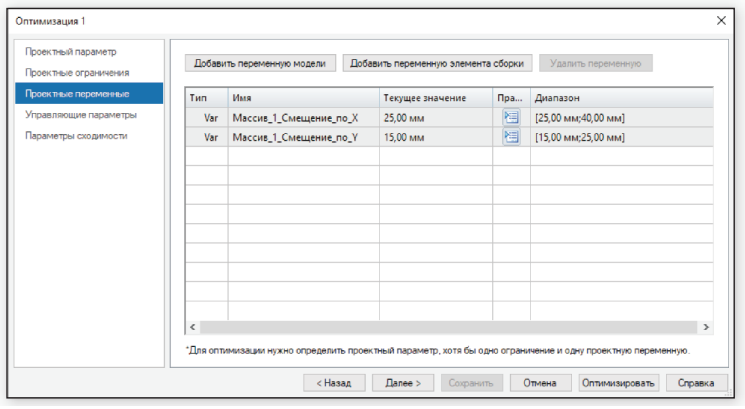


Рис. 2.282. Проектные переменные для оптимизации конструкции

– сгенерировать отчет в формате html с параметрами по умолчанию;
– проанализировать результаты, сделать выводы.

В отчет необходимо включить:
– готовую модель;
– численные результаты оптимизации в виде файла Excel с таблицей данных и графиком изменения проектного параметра по итерациям;
– скриншоты графического окна по трем указанным выше видам результатов;
– выводы по результатам оптимизации (в текстовом файле).

РУБЕЖНЫЙ КОНТРОЛЬ № 3

Дискретное имитационное моделирование технологической сборочной линии

Формулировка задания

Дано:
– 3D-модель изделия приборостроения в электронном виде;
– маршрутный техпроцесс сборки;
– 3D-модели оборудования в составе технологической линии в электронном виде.

В среде САПР АСТПП необходимо:
– разработать операционный техпроцесс;
– декомпозировать оборудование на отдельные узлы;
– создать имитационную модель техпроцесса сборки;
– смоделировать техпроцесс на прилагаемом изделии;
– построить диаграммы коэффициента загрузки оборудования;
– достичь требуемой производительности, шт./ч, изменяя состав/параметры технологической линии;
– сделать выводы;
– составить отчет.

Варианты заданий к рубежному контролю № 3

Номер варианта	Требуемая производительность технологической линии, шт./ч	Номер варианта	Требуемая производительность технологической линии, шт./ч
1	25	6	34
2	28	7	40
3	32	8	48
4	20	9	37
5	17	10	20

Методические указания по выполнению см. в лекциях 1.25–1.30 и практических работах № 29–34.

3. НОРМАТИВНАЯ ДОКУМЕНТАЦИЯ

3.1. ПРИМЕРНАЯ БАЗОВАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Московский государственный технический
университет имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)»
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

Утверждаю
Первый проректор —
проректор по учебной работе
МГТУ им. Н.Э. Баумана
_____ Б.В. Падалкин
«___» _____ 20__ г.

Факультет «Информатика и системы управления»
Кафедра ИУ4 «Проектирование и технология производства
электронной аппаратуры»

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

«Сквозная поддержка жизненного цикла изделий приборостроения»

для направления подготовки (уровень магистратуры):
12.03.01 «Приборостроение»

Авторы программы:
Курносенко А.Е., доцент
Захаржевский С.Б., доцент

Москва, 2024

Настоящая рабочая программа дисциплины устанавливает требования к знаниям и умениям студента, а также определяет содержание и виды учебных занятий и отчетности.

Программа разработана в соответствии с основной профессиональной образовательной программой (ОПОП) и учебным планом МГТУ им. Н.Э. Баумана, составленными на основе самостоятельно устанавливаемого образовательного стандарта (СУОС 3++) по направлению подготовки 12.03.01 «Приборостроение».

При освоении дисциплины планируется формирование компетенций, предусмотренных ОПОП на основе СУОС 3++ по направлению подготовки 12.03.01 «Приборостроение» (уровень магистратуры).

Для категорий «знать», «уметь», «владеть» планируется достижение результатов обучения (РО), вносящих на соответствующих уровнях вклад в формирование компетенций, предусмотренных основной профессиональной образовательной программой.

Раздел 1. Цели и задачи дисциплины

Цель дисциплины: изучение моделей, методов и средств автоматизированной поддержки жизненного цикла изделий приборостроения на этапах конструкторского и технологического проектирования. Предметом изучения являются математические модели, методы и программные средства, используемые для автоматизации поддержки жизненного цикла изделий приборостроения. Материал курса является основой для выполнения выпускной квалификационной работы магистра.

Задачами дисциплины являются:

– изучение концепции цифровой трансформации промышленности Индустрия 5.0;

– изучение и освоение концепции цифрового двойника;

– освоение программных средств поддержки жизненного цикла электронных средств на этапах конструкторского и технологического проектирования;

– освоение подходов к инженерному анализу конструкций на этапе конструкторского проектирования;

– получение навыков выполнения автоматизированной технологической подготовки производства.

Примечание. Изучение данной дисциплины базируется на следующих курсах (разделах курсов):

– «Начертательная геометрия»;

– «Инженерная и компьютерная графика»;

– «Материаловедение и материалы электронных средств»;

– «Физика»;

– «Основы конструирования приборов»;

– «Конструкторское проектирование электронных средств»;

– «Автоматизация проектирования электронных средств»;

– «Теоретические основы конструирования и надежности электронных средств». После освоения данной дисциплины студент подготовлен к изучению следующих курсов учебного плана;

– «Подготовка и защита ВКРМ».

Раздел 2. Знания, умения и навыки, получаемые после освоения дисциплины

2.1. Студент должен знать:

– методики выполнения расчета и проектирования электронных приборов, схем и устройств различного функционального назначения;

– методы создания проектной и технической документации;

– методы разработки и управления проектами;

– понятие жизненного цикла изделия, а также задачи управления жизненным циклом изделия на различных этапах;

– архитектуру систем поддержки жизненного цикла изделия, состав программных средств, принципы их работы;

– принципы хранения, учета, изменения и обращения электронных документов по изделию при коллективной работе над проектом;

– методы и средства инженерного анализа деталей и сборок изделий приборостроения;

– методы и средства автоматизации технологической подготовки производства.

2.2. Студент должен уметь:

– выполнять расчет и проектирование электронных приборов, схем и устройств различного функционального назначения в соответствии с техническим заданием с использованием средств автоматизации;

– разрабатывать проектную и техническую документацию в соответствии со стандартами ЕСКД и ЕСТД;

– разрабатывать комплекты научно-технической документации согласно требованиям стандартов и регламентов с использованием систем поддержки жизненного цикла изделия;

– осуществлять электронный документооборот в системе поддержки жизненного цикла изделия;

– создавать модели, пригодные для проведения инженерного анализа конструкций, анализировать и визуализировать результаты;

– осуществлять автоматизированную технологическую подготовку производства нового изделия и разработку цифровых моделей вновь создаваемых производств.

2.3. Студент должен владеть:

– инструментарием прикладной САПР по созданию и редактированию моделей и конструкторской/технологической документации на разрабатываемое изделие приборостроения;

– методами управления проектом изделия приборостроения;

– способами взаимодействия с различными САПР и другими источниками данных;

– навыками проведения инженерного анализа в среде САПР, оптимизации конструкций по результатам анализа;

– навыками выполнения работ по технологической подготовке производства с применением средств автоматизации.

Раздел 3. Объем дисциплины по видам учебных занятий

Вид учебной работы	Объем по семестрам, ч		
	Всего	1-й семестр	2-й семестр
Объем дисциплины (всего)	252	144	108
1. Аудиторная работа (всего):	136	34	68
лекции (Л)	34	17	17
семинары (С)	68	34	34
2. Самостоятельная работа (СР) обучающихся (всего):	150	93	57
проработка учебного материала лекций	8	4	4
подготовка к семинарам	16	8	8
подготовка к рубежным контролям	9	3	6
выполнение домашнего задания	9	9	–
подготовка к экзамену	36	–	36
другие виды самостоятельной работы	72	69	3
Вид промежуточной аттестации обучающегося	–	Зачет	Экзамен

Раздел 4. Содержание дисциплины по модулям

№ п/п	Тема (название) модуля	Вид занятий, ч		
		Л	С	СР
1-й семестр				
1	Поддержка жизненного цикла электронных средств на предварительных этапах и этапе конструирования	9	17	51
2	Поддержка жизненного цикла электронных средств на этапе инженерного анализа	8	17	42
2-й семестр				
3	Поддержка жизненного цикла электронных средств на этапе подготовки производства. Анализ и синтез цифровых производств	8	17	10

Окончание таблицы

№ п/п	Тема (название) модуля	Вид занятий, ч		
		Л	С	СР
4	Поддержка жизненного цикла электронных средств на этапе подготовки производства. Дискретное имитационное моделирование производств	9	17	11
5	Экзамен	–	–	36
	ИТОГО:	34	68	150

Раздел 5. Содержание дисциплины по разделам

№ п/п	Наименование модуля, содержание	Часы
	1-й семестр	
1	«Поддержка жизненного цикла электронных средств на предварительных этапах и этапе конструирования»	
	Лекции	9
1.1	Введение в концепцию сквозной поддержки жизненного цикла изделий приборостроения	1
1.2	Основы традиционного подхода к поддержке жизненного цикла электронных изделий на примере PLM-системы Teamcenter	1
1.3	Генеративное проектирование	1
1.4	Обратный инжиниринг и объединенное моделирование	1
1.5	Моделирование свободных форм	1
1.6	Бесчертежная технология подготовки конструкторской документации	1
1.7	Методы совместной работы в ECAD- и MCAD-системах	1
1.8	Совместная работа в ECAD- и MCAD-системах. Коммутационные структуры	1
1.9	Управление проектными данными	1
	Семинары	17
С1.1	Практическая работа в компьютерном классе № 1 (Генеративное проектирование: топологическое моделирование)	2
С1.2	Практическая работа в компьютерном классе № 2 (Обратный инжиниринг и объединенное моделирование: восстановление аналитической геометрии и моделирование с использованием фасетных моделей)	2
С1.3	Практическая работа в компьютерном классе № 3 (Моделирование свободных форм: создание корпусных деталей по дизайнерским эскизам)	2

Продолжение таблицы

№ п/п	Наименование модуля, содержание	Часы
С1.4	Практическая работа в компьютерном классе № 4 (Бесчертежная технология подготовки конструкторской документации: создание видов модели с PMI)	2
С1.5	Практическая работа в компьютерном классе № 5 (Совместная работа в ECAD- и MCAD-модулях. Электропроводка: параллельная работа конструкторов электрической и механической составляющих изделия)	1
С1.6	Практическая работа в компьютерном классе № 6 (Совместная работа в ECAD- и MCAD-системах. Печатные платы: параллельная работа конструкторов электронной и механической составляющих изделия)	2
С1.7	Практическая работа в компьютерном классе № 7 (Управление проектными данными: задание параметров хранилища документов и дополнительных атрибутов)	1
С1.8	Практическая работа в компьютерном классе № 8 (Управление проектными данными: задание правил именования документа и правил управления жизненным циклом документов)	1
С1.9	Практическая работа в компьютерном классе № 9 (Управление проектными данными: организация и выполнение поиска)	1
С1.10	Практическая работа в компьютерном классе № 10 (Управление проектными данными: работа с ревизиями)	1
С1.11	Практическая работа в компьютерном классе № 11 (Управление проектными данными: выполнение групповых операций над данными проекта)	1
С1.12	Практическая работа в компьютерном классе № 12 (Управление проектными данными: создание полного пакета проекта)	1
	Самостоятельная работа	42
СР1.1	Проработка учебного материала лекций	2
СР1.2	Подготовка к семинарам	4
СР1.3	Подготовка к рубежному контролю	3
СР1.4	Другие виды самостоятельной работы	33
2	«Поддержка жизненного цикла электронных средств на этапе инженерного анализа»	
	Лекции	8
2.1	Концепция систем инженерного анализа изделий приборостроения в рамках поддержи жизненного цикла	1
2.2	Создание расчетной модели	1
2.3	Проведение статического и модального анализов	1

Продолжение таблицы

№ п/п	Наименование модуля, содержание	Часы
2.4	Расчет на воздействие ударов и вибраций	1
2.5	Анализы тепловых режимов	1
2.6	Основы расчета тепловых режимов изделий приборостроения с применением методов вычислительной гидро- и газодинамики	1
2.7	Методика CFD-анализа модели	1
2.8	Анализ результатов	1
	Семинары	17
С2.1	Практическая работа в компьютерном классе № 13 (Модели идеализированных компонентов: 2R-модели)	1
С2.2	Практическая работа в компьютерном классе № 14 (Модели идеализированных и реальных компонентов: принудительное охлаждение с помощью вентиляторов)	1
С2.3	Практическая работа в компьютерном классе № 15 (Модели идеализированных компонентов: тепловые трубки)	1
С2.4	Практическая работа в компьютерном классе № 16 (Модели идеализированных компонентов: элементы Пельтье)	1
С2.5	Практическая работа в компьютерном классе № 17 (Модели идеализированных компонентов: печатные платы)	1
С2.6	Практическая работа в компьютерном классе № 18 (Модель Джоулева нагрева)	1
С2.7	Практическая работа в компьютерном классе № 19 (Модель конвективного теплообмена)	1
С2.8	Практическая работа в компьютерном классе № 20 (Модель тепловой шины)	1
С2.9	Практическая работа в компьютерном классе № 21 (Модель параметрического анализа)	1
С2.10	Практическая работа в компьютерном классе № 22 (Создание проекта и задание параметров CFD-анализа)	1
С2.11	Практическая работа в компьютерном классе № 23 (Назначение граничных условий и источников для элементов. Назначение целей и настройка сетки)	1
С2.12	Практическая работа в компьютерном классе № 24 (Исследование результатов CFD-анализа)	1
С2.13	Практическая работа в компьютерном классе № 25 (Моделирование биметаллических пластин)	1
С2.14	Практическая работа в компьютерном классе № 26 (Анализ теплового режима модуля с естественным охлаждением в конструкторской САПР)	1

Продолжение таблицы

№ п/п	Наименование модуля, содержание	Часы
С2.15	Практическая работа в компьютерном классе № 27 (Анализ теплового режима блока с естественным охлаждением в САПР гидрогазодинамического анализа)	1
С2.16	Практическая работа в компьютерном классе № 28 (Анализ теплового режима блока с принудительным охлаждением в САПР гидрогазодинамического анализа)	2
	Самостоятельная работа	51
СР2.1	Проработка учебного материала лекций	2
СР2.2	Подготовка к семинарам	4
СР2.3	Выполнение домашнего задания	9
СР2.4	Другие виды самостоятельной работы	36
	2-й семестр	
3	«Поддержка жизненного цикла электронных средств на этапе подготовки производства. Анализ и синтез цифровых производств»	
	Лекции	8
3.1	Введение в современную концепцию автоматизированной подготовки производства	1
3.2	Подготовка запуска нового изделия в производство	1
3.3	Обеспечение прослеживаемости в процессе производства	1
3.4	Описание модулей программных средств автоматизированной подготовки производства	1
3.5	Комплексная методика синтеза производственных систем	2
3.6	Методика моделирования и анализа цифрового производства	2
	Семинары	17
С3.1	Практическая работа в компьютерном классе № 29.1 (Создание 3D-модели сборочного оборудования: автомат установки компонентов)	4
С3.2	Практическая работа в компьютерном классе № 29.2 (Создание 3D-модели сборочного оборудования: автомат трафаретной печати)	3
С3.3	Практическая работа в компьютерном классе № 29.3 (Создание 3D-модели сборочного оборудования: печь пайки оплавлением)	3
С3.4	Практическая работа в компьютерном классе № 29.4 (Создание 3D-модели сборочного оборудования: конвейеры и вспомогательное оборудование)	3

Продолжение таблицы

№ п/п	Наименование модуля, содержание	Часы
С3.5	Практическая работа в компьютерном классе № 29.5 (Создание 3D-модели сборочного оборудования: ручной установщик компонентов)	4
	Самостоятельная работа	10
СР3.1	Проработка учебного материала лекций	2
СР3.2	Подготовка к семинарам	4
СР3.3	Подготовка к рубежному контролю № 1	3
СР3.4	Другие виды самостоятельной работы	1
4	«Поддержка жизненного цикла электронных средств на этапе подготовки производства. Дискретное имитационное моделирование производств»	
	Лекции	9
4.1	Моделирование типового изделия приборостроения и технологического процесса сборки	1
4.2	Моделирование автоматизированного технологического оборудования и оснащения	1
4.3	Автоматизация моделирования ручных сборочных операций	2
4.4	Наполнение базы данных объектов имитационного моделирования	1
4.5	Создание анимации и групповые операции	1
4.6	Настройка имитационного моделирования	1
4.7	Имитационная модель технологической сборочной линии	2
	Семинары	17
С4.1	Практическая работа в компьютерном классе № 30 (Декомпозиция и построение 3D-модели производственных объектов для ручных операций сборки)	3
С4.2	Практическая работа в компьютерном классе № 31 (Импорт модели оборудования для ручных операций в модуль Plant Simulation и настройка первоначальной кинематики и подвижного объекта)	4
С4.3	Практическая работа в компьютерном классе № 32 (Импорт модели в модуль Jack и настройка манекенов)	4
С4.4	Практическая работа в компьютерном классе № 33 (Анализ результатов имитационного моделирования технологической линии)	3
С4.5	Практическая работа в компьютерном классе № 34 (Анализ результатов имитационного моделирования ручных операций сборки)	3

Окончание таблицы

№ п/п	Наименование модуля, содержание	Часы
	Самостоятельная работа	11
СР4.1	Проработка учебного материала лекций	2
СР4.2	Подготовка к семинарам	4
СР4.3	Подготовка к рубежному контролю № 2	3
СР4.4	Другие виды самостоятельной работы	2
5	*Экзамен*	36
СР5.1	Подготовка к экзамену	36

Самостоятельная проработка курса лекций. Самостоятельная проработка курса лекций проводится по литературе, приведенной в разделе 7.

Домашнее задание

1-й семестр. Выдача — 7-я неделя, сдача — 15-я неделя. Построение 3D-моделей деталей/сборочных единиц с оформлением КД в бесчертежном формате: виды моделей с PMI.

Рубежные контроли (РК)

РК1 (1-й семестр, 8-я неделя). Модификация конструкции изделия и комплекта КД на него с обеспечением целостности проектных данных.

РК2 (2-й семестр, 8-я неделя). Инженерный анализ тепловых режимов конструкций.

РК3 (2-й семестр, 16-я неделя). Дискретное имитационное моделирование технологической сборочной линии.

Раздел 6. Учебно-методические материалы

Для обеспечения самостоятельной работы студентов по дисциплине сформирован методический комплекс, включающий следующие учебно-методические материалы:

– программу курса;

– учебники и учебные пособия, в том числе в электронном виде;

– комплект электронных презентаций для проведения лекционных занятий;

– комплект заданий для семинарских занятий и указаний по их выполнению в печатном и электронном виде;

– комплект индивидуальных домашних заданий по дисциплине;

– набор вопросов и заданий для самоконтроля усвоения материала дисциплины, текущего и промежуточного контроля;

– дополнительные учебные материалы в виде статей по теме дисциплины (на русском и английском языках);

– список адресов сайтов сети Интернет (на русском и английском языках), содержащих актуальную информацию по теме дисциплины;

– видеоресурсы по дисциплине (видеопособия, записи вебинаров, учебные видеофильмы).

Раздел 7. Литература

1. Конструкторско-технологическое проектирование электронной аппаратуры: учебник для вузов / под ред. В.А. Шахнова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2002. 527 с.

2. *Захаржевский С.Б.*, *Курносенко А.Е.* Расчет изделий электроники на механические и тепловые воздействия в САПР Creo: учеб. пособие для студентов по направлению «Конструирование и технология электронных средств». М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. 56 с.

3. Основы конструирования в Solid Edge. Пособие по проектированию изделий в приборостроении / В.А. Шахнов, Л.А. Зинченко, В.А. Соловьев, А.Е. Курносенко. М.: ДМК Пресс, 2014. 272 с.

4. *Норенков И.П.*, *Кузьмик П.К.* Информационная поддержка наукоемких изделий. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 320 с.

5. *Хохленков Р.В.* Solid Edge с синхронной технологией. М.: ДМК Пресс, 2010. 376 с.

6. *Данилов Ю.В.*, *Артамонов И.А.* Практическое использование NX. М.: ДМК Пресс, 2011. 332 с.

7. *Тороп Д.Н.*, *Терликов В.В.* Teamcenter. Начало работы. М.: ДМК Пресс, 2011. 280 с.

8. *Буланов А.В.*, *Шевченко О.*, *Гусаров С.А.* Wildfire 3.0. Первые шаги. М.: Поматур, 2008. 240 с.

9. *Минеев М.А.* Pro/Engineer Wildfire 2.0/3.0/4.0. Самоучитель. М.: Наука и Техника, 2008. 352 с.

10. *Шимкович Д.Г.* Femap & Nastran. Инженерный анализ методом конечных элементов. М.: ДМК Пресс, 2012. 702 с. (Серия «Проектирование»).

11. *Рычков С.П.* Моделирование конструкций в среде Femap with NX Nastran. М.: ДМК Пресс, 2013. 784 с.

12. *Чемоданова Т.В.* Pro/Engineer: Деталь. Сборка. Чертеж. СПб.: БХВ-Петербург, 2003. 560 с.

13. NX Advanced Simulation. Инженерный анализ / П.С. Гончаров, И.А. Артамонов, Т.Ф. Халитов и др. М.: ДМК Пресс, 2012. 504 с.

14. NX Advanced Simulation. Практическое пособие / И.А. Артамонов, П.С. Гончаров, С.В. Денисихин и др. М.: ДМК Пресс, 2014. 112 с.

15. *Prof. Sham Tickoo*. Solid Edge ST6 for Designers. CADCIM Technologies, 2014. 752 p.

16. *Prof. Sham Tickoo*. NX10.0 for Designers. 9th ed. CADCIM Technologies, 2016. 800 p.

17. *Pazul Wyndorps*. 3D-Konstruktion mit Creo Parametric. Verlag Europa-Lehrmittel Nourney, Vollmer Gmbh & Co. KG, 2013. 331 p.

3.2. СТРУКТУРА И СОСТАВ ФОНДОВ ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

Фонды оценочных средств по дисциплине представляют собой варианты экзаменационных билетов, перечень вопросов для рейтинговых и контрольных мероприятий.

Перечень вопросов к зачету (1-й семестр)

1. Концепции Industry 4.0 и цифрового двойника.
2. Понятие жизненного цикла изделия. Этапы цикла. Постановка задачи управления информацией об изделии в жизненном цикле. Задачи управления, решаемые на каждом из этапов.
3. Управление компонентами жизненного цикла.
4. Техническое задание.
5. Управление требованиями.
6. Управление проектами.
7. Управление процессами проектирования.
8. Концепция мастер-модели. Представление и управление данными по составу и структуре изделия. Менеджер структуры.
9. Управление соответствием стандартам. Документирование и задание нормативных требований. Интеграция в принятые на предприятии процессы проектирования.
10. Отслеживание соответствия требованиям. Управление взаимоотношениями с поставщиками.
11. Управление данными по электрической и электронной составляющим изделия. Решения по интеграции с ECAD-системами. Информация о встроенном программном обеспечении и физико-геометрических характеристиках изделия.
12. Моделирование и разработка процессов изготовления изделий. Управление расчетными данными.
13. Эксплуатация, сервисное обслуживание и ремонт.
14. Представление выходной информации. Отчеты и аналитика.
15. Понятие документооборота. Понятие проекта в САПР.
16. Состав программных средств системы управления проектными данными (PDM).
17. Взаимосвязи между различными программными продуктами и их интеграция в PDM.
18. Управление документами и контентом. Выпуск технической документации. Описания, руководства, каталоги, инструкции.

19. Управление данными и доступом к ним. Сборка документа. Синхронизация данных.

20. Хранение, учет, изменение документов.

21. Обращение документов.

22. Задачи администрирования систем PDM.

23. Работа с импортированной геометрией. Методы и средства работы со сторонними данными.

24. Внутренние компоненты, сборка в одном файле.

25. Обратный инжиниринг. Применение для моделей электронных средств.

26. Объединенное (конвергентное) моделирование. Применение для моделей электронных средств.

27. SubD-моделирование. Применение для моделей электронных средств.

28. Понятие “Model Based Definition” — модель как единое представление данных об изделии.

29. Бесчертежная технология подготовки конструкторской документации.

30. PMI (Product Manufacturing Information) как замена данных на конструкторских чертежах.

31. Поддержка PMI в ЕСКД.

32. Параллельная работа MCAD-системы с модулем создания проводных, кабельных и жгутовых соединений Wiring & Harness Design.

33. Создание электрических принципиальных схем.

34. Двунаправленная передача данных.

35. Редактирование и автоматическое обновление моделей.

36. Оформление плоских разверток кабелей и жгутов.

37. Параллельная работа MCAD-системы с модулем ECAD.

38. Инкрементный формат IDX. Двунаправленная передача данных. Обновление моделей.

39. Разрешение коллизий при размещении электронных компонентов.

40. Создание полных и упрощенных моделей сборок на печатных платах в MCAD-системах.

Комплект билетов к экзамену (2-й семестр)

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 1

по курсу «Сквозная поддержка жизненного цикла электронных средств»

1. Задачи инженерного анализа конструкций в целом и применительно к конструированию изделий электроники.
2. Моделирование объектов производства электронных средств.

Утверждаю В. А. Шахнов

Билет рассмотрен и утвержден на заседании кафедры «10» декабря 2023 г.

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 2

по курсу «Сквозная поддержка жизненного цикла электронных средств»

1. Программные средства САПР для решения задач инженерного анализа. Классификация видов анализов, проводимых с использованием современных САПР. Необходимые расчеты ЭС на механические и тепловые воздействия и их реализация в САПР.
2. Концепция цифрового двойника применительно к технологическому моделированию.

Утверждаю В.А. Шахнов

Билет рассмотрен и утвержден на заседании кафедры «10» декабря 2023 г.

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 3

по курсу «Сквозная поддержка жизненного цикла электронных средств»

1. Метод конечных элементов как основной способ изучения поведения конструкций. Основные положения и расчетные уравнения метода конечных элементов. Расчеты простых конструкций: балка, пластина.
2. Постановка задачи создания цифрового производства электронных средств.

Утверждаю В.А. Шахнов

Билет рассмотрен и утвержден на заседании кафедры «10» декабря 2023 г.

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 4

по курсу «Сквозная поддержка жизненного цикла электронных средств»

1. Типовая процедура подготовки анализа. Последовательность создания модели: материал — конечные элементы — граничные условия (закрепления) — нагрузки.
2. Связь модели производства и модели изделия.

Утверждаю В.А. Шахнов

Билет рассмотрен и утвержден на заседании кафедры «10» декабря 2023 г.

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 5

по курсу «Сквозная поддержка жизненного цикла электронных средств»

1. Типовая процедура подготовки анализа. Основные типы и параметры конечных элементов (линейные, плоские, пространственные). Создание сетки ручными и автоматическими методами. Редактирование сетки. Классификация нагрузок. Способы их приложения к конструкции. Граничные условия. Наложение и проверка закреплений. Задание свойств материалов.
2. Физические и имитационные модели технологических объектов.

Утверждаю В.А. Шахнов

Билет рассмотрен и утвержден на заседании кафедры «10» декабря 2023 г.

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 6

по курсу «Сквозная поддержка жизненного цикла электронных средств»

1. Задание расчетной модели изделия. Абстрагирование от реальной конструкции изделия, идеализация модели. САПР инженерного анализа.
2. Набор подзадач создания цифрового производства, специфичных для сборочного производства электронных средств.

Утверждаю В.А. Шахнов

Билет рассмотрен и утвержден на заседании кафедры «10» декабря 2023 г.

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 7

по курсу «Сквозная поддержка жизненного цикла электронных средств»

1. Анализ на механические воздействия. Анализы статического нагружения — напряжения, деформации, прогиб пластин; собственных частот и форм колебаний; устойчивости конструкции. Критерии разрушения. Учет различных видов закрепления объектов. Назначение анализов, исходные данные, получаемые результаты.
2. Декомпозиция производственных объектов на отдельные узлы.

Утверждаю В.А. Шахнов

Билет рассмотрен и утвержден на заседании кафедры «10» декабря 2023 г.

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 8

по курсу «Сквозная поддержка жизненного цикла электронных средств»

1. Анализ на механические воздействия. Динамический анализ в частотной и временной областях: АЧХ модели, отклик на вибрационные и ударные воздействия при различной форме импульса воздействия, анализ переходных колебательных процессов. Критерии разрушения. Учет различных видов закрепления объектов. Назначение анализов, исходные данные, получаемые результаты.
2. Реализация кинематических схем сборочного оборудования.

Утверждаю В.А. Шахнов

Билет рассмотрен и утвержден на заседании кафедры «10» декабря 2023 г.

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 9

по курсу «Сквозная поддержка жизненного цикла электронных средств»

1. Анализ тепловых режимов. Анализ стационарного теплообмена. Задание тепловых нагрузок и ограничений. Тепловой поток, тепловыделение, свободная конвекция, стационарная температура. Выбор значений коэффициента конвективного теплообмена для задания в САПР.
2. Информационное наполнение БД САПР моделями изделий, оборудования, техпроцессов, оснащения.

Утверждаю В.А. Шахнов

Билет рассмотрен и утвержден на заседании кафедры «10» декабря 2023 г.

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 10

по курсу «Сквозная поддержка жизненного цикла электронных средств»

1. Анализ тепловых режимов. Основы гидро- и газодинамического анализа при проектировании ЭС. Анализ теплового поля модели, температуры и перегрева критичного модуля. Учет передачи тепла конвекцией, теплопроводностью, изучением. Назначение анализов, исходные данные, получаемые результаты.
2. Автоматизированная разработка маршрутного/операционного техпроцесса сборки. Методы и средства.

Утверждаю В.А. Шахнов

Билет рассмотрен и утвержден на заседании кафедры «10» декабря 2023 г.

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 11

по курсу «Сквозная поддержка жизненного цикла электронных средств»

1. Естественная и принудительная конвекция. Определение требуемого потока воздуха при принудительном охлаждении. Расчет жидкостного охлаждения. Назначение анализов, исходные данные, получаемые результаты.
2. Компоновка производственного участка. Методы и средства.

Утверждаю В.А. Шахнов

Билет рассмотрен и утвержден на заседании кафедры «10» декабря 2023 г.

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 12

по курсу «Сквозная поддержка жизненного цикла электронных средств»

1. Анализ тепловых режимов. Анализ стационарного теплообмена. Нагрузки излучения. Излучение в пространстве и в замкнутом объеме. Параметры.
2. Подготовка управляющих технологических программ. Методы и средства.

Утверждаю В.А. Шахнов

Билет рассмотрен и утвержден на заседании кафедры «10» декабря 2023 г.

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 13

по курсу «Сквозная поддержка жизненного цикла электронных средств»

1. Постпроцессинг. Визуализация результатов анализа. Управление отображением контура, деформации, граней, ребер, легенды и пр.
2. Задание и оптимизация материально-логистических потоков. Методы и средства.

Утверждаю В.А. Шахнов

Билет рассмотрен и утвержден на заседании кафедры «10» декабря 2023 г.

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 14

по курсу «Сквозная поддержка жизненного цикла электронных средств»

1. Постпроцессинг. Анимация и результаты. Отчеты о проведенном анализе.
2. Дискретное имитационное моделирование работы участка сборки электронных средств. Автоматизированные операции сборки.

Утверждаю В.А. Шахнов

Билет рассмотрен и утвержден на заседании кафедры «10» декабря 2023 г.

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 15

по курсу «Сквозная поддержка жизненного цикла электронных средств»

1. Работа со сборками в задачах инженерного анализа. Задание контактов. Виды контактов, области их применения. Контакты вида склейка, без проникновения, ребро, болт.
2. Дискретное имитационное моделирование работы участка сборки электронных средств. Ручные операции сборки.

Утверждаю В.А. Шахнов

Билет рассмотрен и утвержден на заседании кафедры «10» декабря 2023 г.

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 16

по курсу «Сквозная поддержка жизненного цикла электронных средств»

1. Работа со сборками в задачах инженерного анализа. Создание контактов автоматически и вручную. Конечная и исходная области контакта. Направление контакта.
2. Дискретное имитационное моделирование работы участка сборки электронных средств. Модели персонала.

Утверждаю В.А. Шахнов

Билет рассмотрен и утвержден на заседании кафедры «10» декабря 2023 г.

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 17

по курсу «Сквозная поддержка жизненного цикла электронных средств»

1. Оптимизация конструкций. Постановка задачи оптимизации. Проектные параметры, ограничения и переменные. Задание параметров оптимизации. Параметры и условия сходимости. Визуализация результатов оптимизации конструкции.
2. Определение и устранение «узких мест» в производстве на модели.

Утверждаю В.А. Шахнов

Билет рассмотрен и утвержден на заседании кафедры «10» декабря 2023 г.

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 18

по курсу «Сквозная поддержка жизненного цикла электронных средств»

1. Тепловые нагрузки, используемые как ограничения. Определение механизма рассеяния тепла. Тепловые контакты. Свойства материалов для теплового анализа.
2. Визуализация результатов моделирования. Подготовка отчетов, статистической информации.

Утверждаю В.А. Шахнов

Билет рассмотрен и утвержден на заседании кафедры «10» декабря 2023 г.

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 19

по курсу «Сквозная поддержка жизненного цикла электронных средств»

1. Параметры и настройка сетки в инженерном анализе методом конечных элементов. Параметры размера сетки. Параметры твердотельной и поверхностной сеток.
2. Моделирование объектов производства электронных средств.

Утверждаю В.А. Шахнов

Билет рассмотрен и утвержден на заседании кафедры «10» декабря 2023 г.

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 20

по курсу «Сквозная поддержка жизненного цикла электронных средств»

1. Параметры и настройка сетки в инженерном анализе методом конечных элементов. Оценка качества сетки. Определение областей с сеткой плохого качества. Методы улучшения сетки. Размеры сетки для тела, грани, ребра.
2. Концепция цифрового двойника применительно к технологическому моделированию.

Утверждаю В.А. Шахнов

Билет рассмотрен и утвержден на заседании кафедры «10» декабря 2023 г.

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 21

по курсу «Сквозная поддержка жизненного цикла электронных средств»

1. Понятие жизненного цикла изделия. Этапы цикла. Постановка задачи управления информацией об изделии в жизненном цикле. Задачи управления, решаемые на каждом из этапов.
2. Постановка задачи создания цифрового производства электронных средств.

Утверждаю В.А. Шахнов

Билет рассмотрен и утвержден на заседании кафедры «10» декабря 2023 г.

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 22

по курсу «Сквозная поддержка жизненного цикла электронных средств»

1. Управление компонентами жизненного цикла. Техническое задание. Управление требованиями. Управление проектами. Управление процессами проектирования. Решаемые задачи. Концепция мастер-модели. Представление и управление данными по составу и структуре изделия. Менеджер структуры.
2. Связь модели производства и модели изделия.

Утверждаю В.А. Шахнов

Билет рассмотрен и утвержден на заседании кафедры «10» декабря 2023 г.

Макет оформления экзаменационного билета (2-й семестр)

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 1

по курсу «Сквозная поддержка жизненного цикла электронных средств»

1. Задачи инженерного анализа конструкций в целом и применительно к конструированию изделий электроники.
2. Моделирование объектов производства электронных средств.

Утверждаю В.А. Шахнов

Билет рассмотрен и утвержден на заседании кафедры «10» декабря 2023 г.

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 2

по курсу «Сквозная поддержка жизненного цикла электронных средств»

1. Программные средства САПР для решения задач инженерного анализа. Классификация видов анализов, проводимых с использованием современных САПР. Необходимые расчеты ЭС на механические и тепловые воздействия и их реализация в САПР.
2. Концепция цифрового двойника применительно к технологическому моделированию.

Утверждаю В.А. Шахнов

Билет рассмотрен и утвержден на заседании кафедры «10» декабря 2023 г.

3.3. СПЕЦИФИКАЦИЯ УЧЕБНЫХ ВИДЕО- И АУДИОМАТЕРИАЛОВ, СЛАЙДОВ, ЭСКИЗОВ, ПЛАКАТОВ И ДРУГИХ ДИДАКТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

В данном разделе приведены примеры оформления слайдов к лекциям по курсу «Сквозная поддержка жизненного цикла изделий приборостроения». На первой лекции необходимо ознакомить студентов с целью и задачами курса, а также дать краткую информацию о структуре курса.

Рекомендуемая схема оформления слайда приведена на рис. 3.1.

Примеры оформления слайдов к лекциям показаны на рис. 3.2–3.5.

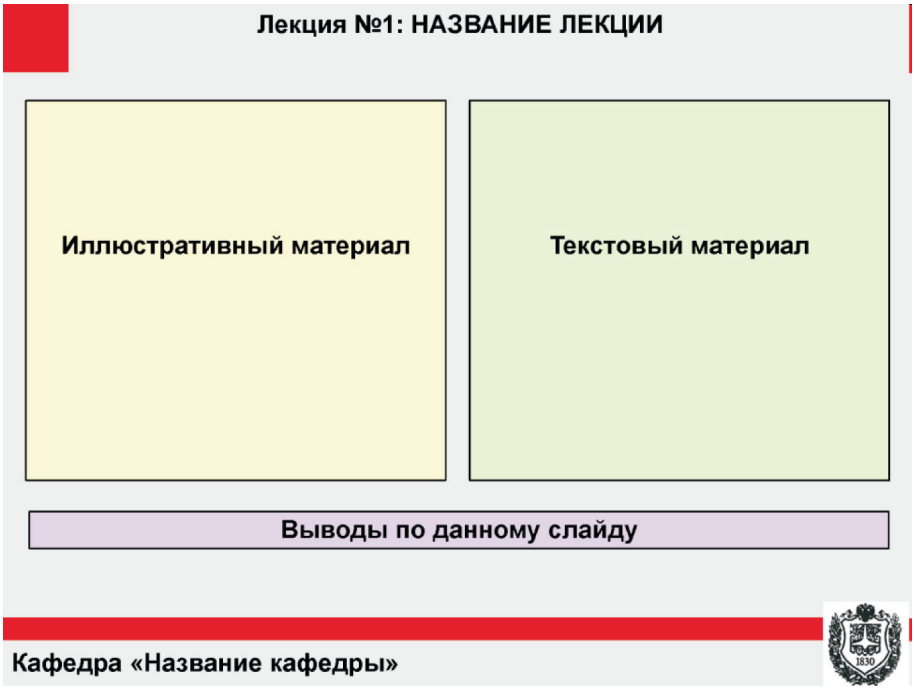


Рис. 3.1. Концептуальная схема слайда к лекции

Рис. 3.2. Пример слайда к лекции «Понятие жизненного цикла изделия приборостроения»

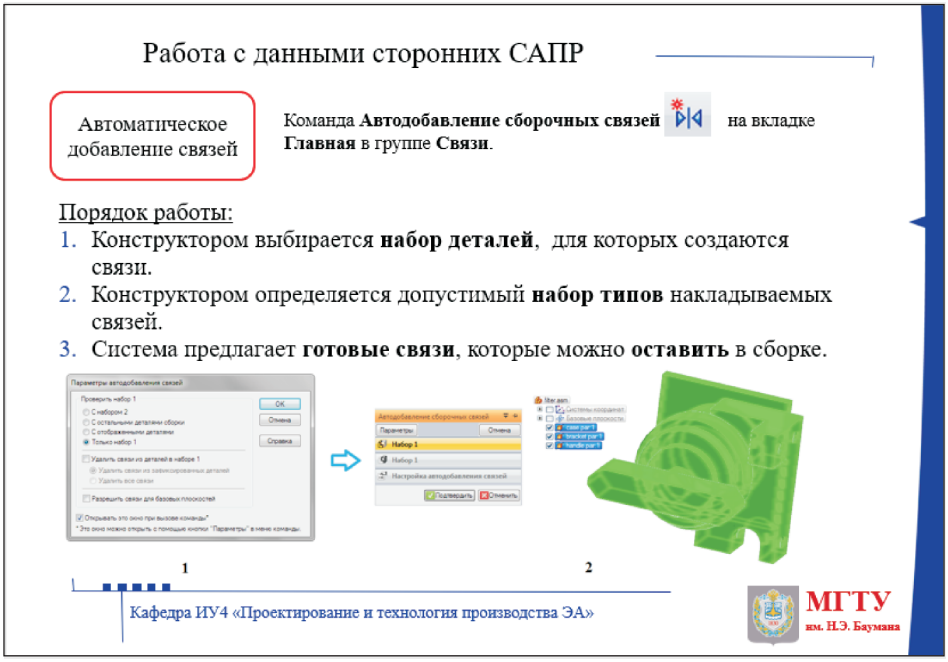


Рис. 3.3. Пример слайда к лекции «Работа с данными сторонних САПР»

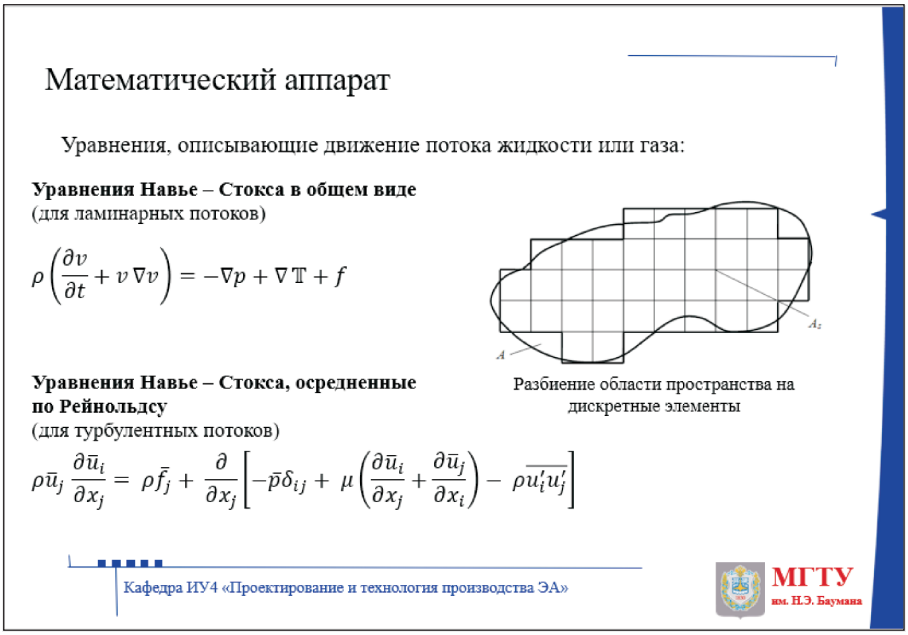


Рис. 3.4. Пример слайда к лекции «Введение в расчет тепловых режимов изделий приборостроения с применением методов вычислительной гидро- и газодинамики»

Рис. 3.5. Пример слайда к лекции «Моделирование автоматизированного оборудования и оснащения»

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Комплект учебно-методического обеспечения по дисциплине «Поддержка жизненного цикла объектов приборостроения» подготовлен на основе единой концепции создания учебных пособий и методических материалов, входит в комплекс дисциплин подготовки бакалавров и магистров по программам высшего профессионального образования по направлению подготовки 12.03.01 «Приборостроение» (уровень бакалавриата).

Конспект лекций по дисциплине содержит рекомендации по организации и проведению лекционных и семинарских занятий, перечень слайдов, типовых плакатов и другие дидактические материалы, необходимые профессорско-преподавательскому составу для ее преподавания.

Структура и состав учебно-методического обеспечения соответствуют требованиям федеральных законов от 10.07.1992 г. № 3266-1-ФЗ «Об образовании» (с изменениями и дополнениями) и от 22.08.1996 г. № 125-ФЗ «О высшем и послевузовском профессиональном образовании» (с изменениями и дополнениями), Типового положения об образовательном учреждении высшего профессионального образования (высшем учебном заведении), утвержденного постановлением Правительства РФ от 14 февраля 2008 г. № 71.

В заключение авторы выражают надежду на то, что представленные материалы будут полезны при подготовке к лекционным и семинарским занятиям как тем представителям профессорско-преподавательского состава высших учебных заведений, которые уже освоили преподавание указанной дисциплины, так и тем его представителям, которым еще предстоит это сделать.

Данный УМК разработан сотрудниками кафедры ИУ4 «Проектирование и технология производства электронной аппаратуры» и кафедры ИУК1 «Проектирование и технология производства электронных приборов» Калужского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана в соответствии с самостоятельно устанавливаемым образовательным стандартом (СУОС), основной профессиональной образовательной программой и учебным планом МГТУ им. Н.Э. Баумана по направлению подготовки 12.03.01 «Приборостроение» (уровень бакалавриата).

ЛИТЕРАТУРА

Буланов А.В., Шевченко О., Гусаров С.А. Wildfire 3.0. Первые шаги. М.: Поматур, 2008. 240 с.

Гончаров П.С., Артамонов И.А., Халитов Т.Ф. и др. NX Advanced Simulation. Инженерный анализ. М.: ДМК Пресс, 2012. 504 с.

Группа компаний «ПЛМ Урал». Требования к оформлению технологических эскизов при бесчертежной технологии проектирования, 2019. https://www.plm-ural.ru/sites/default/files/2021-11/standart-dlya-tekhnologov-pmi.pdf

Группа компаний «ПЛМ Урал». Требования к электронным моделям изделия при работе по бесчертежной технологии, 2017. https://www.plm-ural.ru/sites/default/files/2021-11/standart-po-rabote-s-em.pdf

Данилов Ю.В., Артамонов И.А. Практическое использование NX. М.: ДМК Пресс, 2011. 332 с.

Захаржевский С.Б., Курносенко А.Е. Расчет изделий электроники на механические и тепловые воздействия в САПР Creo: учеб. пособие для студентов по направлению «Конструирование и технология электронных средств». М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. 56 с.

Иванов Ю.В., Курносенко А.Е. Специальное программное обеспечение автоматизированной разработки структур ГАСК многономенклатурного производства электронной аппаратуры. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002.

Конструкторско-технологическое проектирование электронной аппаратуры: учебник для вузов / под ред. В.А. Шахнова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 527 с.

Минеев М.А. Pro/Engineer Wildfire 2.0/3.0/4.0. Самоучитель. М.: Наука и Техника, 2008. 352 с.

Норенков И.П., Кузьмик П.К. Информационная поддержка наукоемких изделий. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 320 с.

Рычков С.П. Моделирование конструкций в среде Femap with NX Nastran. М.: ДМК Пресс, 2013. 784 с.

Тороп Д.Н., Терликов В.В. Teamcenter. Начало работы. М.: ДМК Пресс, 2011. 280 с.

Хохленков Р.В. Solid Edge с синхронной технологией. М.: ДМК Пресс, 2010. 376 с.

Шахнов В.А., Зинченко Л.А., Соловьев В.А., Курносенко А.Е. Основы конструирования в Solid Edge. Пособие по проектированию изделий в приборостроении. М.: ДМК Пресс, 2014. 272 с.

Шимкович Д.Г. Femap & Nastran. Инженерный анализ методом конечных элементов. М.: ДМК Пресс, 2012. 702 с. (Серия «Проектирование»).

NX Advanced Simulation: практ. пособие / И.А. Артамонов, П.С. Гончаров, С.В. Денисихин [и др.]. М.: ДМК Пресс, 2014. 112 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие 5
Список сокращений 7
Термины и определения 10

1. КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ 14
1.1. Введение в концепцию поддержки жизненного цикла изделий приборостроения 15
1.1.1. Современные подходы к построению систем поддержки жизненного цикла 15
1.1.2. Спецификация конструкторской САПР как основа построения системы поддержки жизненного цикла 17
Тесты к лекции 1.1 19
1.2. Основы традиционного подхода к поддержке жизненного цикла электронных изделий на примере PLM-системы Teamcenter 20
1.2.1. Краткое описание назначения системы Teamcenter 20
1.2.2. Краткое описание отдельных модулей системы Teamcenter 23
1.2.3. Типовой алгоритм проектирования электронного устройства с применением системы Teamcenter 27
Тесты к лекции 1.2 28
1.3. Генеративное проектирование 30
Тесты к лекции 1.3 38
1.4. Обратный инжиниринг и объединенное моделирование 39
Тесты к лекции 1.4 51
1.5. Моделирование свободных форм 53
Тесты к лекции 1.5 61
1.6. Бесчертежная технология подготовки конструкторской документации 63
Тесты к лекции 1.6 80
1.7. Методы совместной работы в ECAD- и MCAD-системах 81
Тесты к лекции 1.7 86
1.8. Совместная работа в ECAD- и MCAD-системах. Коммутационные структуры 87
Тесты к лекции 1.8 95
1.9. Управление проектными данными 97
Тесты к лекции 1.9 108
1.10. Концепция систем инженерного анализа изделий приборостроения в рамках поддержки жизненного цикла 110
1.10.1. Анализ модели функционирования препроцессора и постпроцессора 112
1.10.2. Описание подхода к процессу моделирования изделий приборостроения 117

Тесты к лекции 1.10 118
1.11. Создание расчетной модели 119
1.11.1. Анализ и улучшение сборочного состава 119
1.11.2. Упрощение геометрии 121
1.11.3. Задание материалов 125
1.11.4. Идеализация взаимосвязей 127
1.11.5. Задание граничных условий 130
1.11.6. Обозначение масс изделий 131
Тесты к лекции 1.11 132
1.12. Проведение статического и модального анализов 133
1.12.1. Анализ статического нагружения 133
1.12.2. Модальный анализ 136
Тесты к лекции 1.12 137
1.13. Расчет на воздействие ударов и вибраций 138
1.13.1. Расчет на воздействие ударного импульса 138
1.13.2. Расчет на воздействие гармонических вибраций 144
1.13.3. Расчет на воздействие случайных вибраций 146
Тесты к лекции 1.13 147
1.14. Анализ тепловых режимов 148
1.14.1. Анализ установившегося теплового состояния 148
1.14.2. Использование результатов теплового анализа для расчета температурных деформаций 151
Тесты к лекции 1.14 152
1.15. Основы расчета тепловых режимов изделий приборостроения с применением методов вычислительной гидро- и газодинамики 153
1.15.1. Введение в проблематику 153
1.15.2. Математический аппарат 154
1.15.3. Возможности модуля CFD 157
Тесты к лекции 1.15 157
1.16. Методика CFD-анализа модели 159
1.16.1. Подготовка 3D-модели 159
1.16.2. Создание проекта расчета 160
1.16.3. Проведение вычислений 168
Тесты к лекции 1.16 169
1.17. Анализ результатов 171
Тесты к лекции 1.17 174
1.18. Введение в современную концепцию автоматизированной подготовки производства 175
1.18.1. Понятие цифрового двойника 175
1.18.2. Подходы к моделированию производственных процессов 179
Тесты к лекции 1.18 181
1.19. Подготовка запуска нового изделия в производство 183
Тесты к лекции 1.19 188
1.20. Обеспечение прослеживаемости в процессе производства 190
Тесты к лекции 1.20 193
1.21. Описание модулей программных средств автоматизированной подготовки производства 195

Тесты к лекции 1.21 205
1.22. Комплексная методика синтеза производственных систем 206
Тесты к лекции 1.22 211
1.23. Методика моделирования и анализа цифрового производства 212
Тесты к лекции 1.23 215
1.24. Моделирование типового изделия приборостроения и технологического процесса сборки 216
Тесты к лекции 1.24 221
1.25. Моделирование автоматизированного технологического оборудования и оснащения 223
Тесты к лекции 1.25 232
1.26. Автоматизация моделирования ручных сборочных операций 233
Тесты к лекции 1.26 235
1.27. Наполнение базы данных объектов имитационного моделирования 236
1.27.1. Состав объектов 236
1.27.2. Подвижные объекты 236
1.27.3. Объекты материалопотока 240
1.27.4. Пользовательские объекты 243
Тесты к лекции 1.27 247
1.28. Создание анимации и групповые операции 248
1.28.1. Анимация объектов 248
1.28.2. Буфер и групповые операции 250
Тесты к лекции 1.28 252
1.29. Настройка имитационного моделирования 254
1.29.1. Рабочий персонал 254
1.29.2. Источник 256
Тесты к лекции 1.29 257
1.30. Имитационная модель технологической сборочной линии 258
Тесты к лекции 1.30 260

2. МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ 261

2.1. Методические указания по выполнению практических работ 261
Практическая работа № 1. Генеративное проектирование: топологическое моделирование 261
Практическая работа № 2. Обратный инжиниринг и объединенное моделирование: восстановление аналитической геометрии и моделирование с использованием фасетных моделей 263
Практическая работа № 3. Моделирование свободных форм: создание корпусных деталей по дизайнерским эскизам 268
Практическая работа № 4. Бесчертежная технология подготовки конструкторской документации: создание видов модели с PMI 271
Практическая работа № 5. Совместная работа в ECAD- и MCAD-модулях. Электропроводка: параллельная работа конструкторов электрической и механической составляющих изделия 276
Практическая работа № 6. Совместная работа в ECAD- и MCAD-системах. Печатные платы: параллельная работа конструкторов электронной и механической составляющих изделия 281

Практическая работа № 7. Управление проектными данными: задание параметров хранилища документов и дополнительных атрибутов 290
Практическая работа № 8. Управление проектными данными: задание правил именования документа и правил управления жизненным циклом документов 292
Практическая работа № 9. Управление проектными данными: организация и выполнение поиска 295
Практическая работа № 10. Управление проектными данными: работа с ревизиями 298
Практическая работа № 11. Управление проектными данными: выполнение групповых операций над данными проекта 305
Практическая работа № 12. Управление проектными данными: создание полного пакета проекта 310
Практическая работа № 13. Модели идеализированных компонентов: 2R-модели 312
Практическая работа № 14. Модели идеализированных и реальных компонентов: принудительное охлаждение с помощью вентиляторов 318
Практическая работа № 15. Модели идеализированных компонентов: тепловые трубки 328
Практическая работа № 16. Модели идеализированных компонентов: элементы Пельтье 333
Практическая работа № 17. Модели идеализированных компонентов: печатные платы 335
Практическая работа № 18. Модель Джоулева нагрева 344
Практическая работа № 19. Модель конвективного теплообмена 348
Практическая работа № 20. Модель тепловой шины 355
Практическая работа № 21. Модель параметрического анализа 357
Практическая работа № 22. Создание проекта и задание параметров CFD-анализа 361
Практическая работа № 23. Назначение граничных условий и источников для элементов. Назначение целей и настройка сетки 367
Практическая работа № 24. Исследование результатов CFD-анализа 373
Практическая работа № 25. Моделирование биметаллических пластин ... 376
Практическая работа № 26. Анализ теплового режима модуля с естественным охлаждением в конструкторской САПР 383
Практическая работа № 27. Анализ теплового режима блока с естественным охлаждением в САПР гидрогазодинамического анализа ... 385
Практическая работа № 28. Анализ теплового режима блока с принудительным охлаждением в САПР гидрогазодинамического анализа ... 389
Практическая работа № 29. Декомпозиция и построение 3D-модели производственных объектов для автоматизированных операций сборки ... 391
Практическая работа № 30. Декомпозиция и построение 3D-модели производственных объектов для ручных операций сборки 395
Практическая работа № 31. Импорт модели оборудования для ручных операций в модуль Plant Simulation и настройка первоначальной кинематики и подвижного объекта 400
Практическая работа № 32. Импорт модели в модуль Jack и настройка манекенов 406

Практическая работа № 33. Анализ результатов имитационного моделирования технологической линии 428
Практическая работа № 34. Анализ результатов имитационного моделирования ручных операций сборки 435
2.2. Методические указания по выполнению домашнего задания 441
Построение 3D-моделей деталей и сборочных единиц с оформлением КД в формате видов модели с PMI 441
2.3. Методические указания по выполнению рубежного контроля 444
Рубежный контроль № 1 444
Рубежный контроль № 2 452
Рубежный контроль № 3 465

3. НОРМАТИВНАЯ ДОКУМЕНТАЦИЯ 466

3.1. Примерная базовая программа дисциплины 466
Раздел 1. Цели и задачи дисциплины 467
Раздел 2. Знания, умения и навыки, получаемые после освоения дисциплины 468
Раздел 3. Объем дисциплины по видам учебных занятий 469
Раздел 4. Содержание дисциплины по модулям 469
Раздел 5. Содержание дисциплины по разделам 470
Раздел 6. Учебно-методические материалы 475
Раздел 7. Литература 476
3.2. Структура и состав фондов оценочных средств по дисциплине 477
Перечень вопросов к зачету (1-й семестр) 477
Комплект билетов к экзамену (2-й семестр) 479
Макет оформления экзаменационного билета (2-й семестр) 490
3.3. Спецификация учебных видео- и аудиоматериалов, слайдов, эскизов, плакатов и других дидактических материалов 491
Заключение 494
Литература 495

Учебное издание

Курносенко Алексей Евгеньевич

Поддержка жизненного цикла объектов приборостроения

Редактор *Т.Ю. Пинталь*
Художник *Я.М. Асинкритова*
Корректор *Н.И. Карнута*
Компьютерная графика *О.В. Левашовой*
Компьютерная верстка *Т.В. Батраковой*

Оригинал-макет подготовлен в Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана.

В оформлении использованы шрифты Студии Артемия Лебедева.

Подписано в печать 28.11.2024. Формат 70×100/16.
Усл. печ. л. 40,625. Тираж 100 экз.

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана.
105005, г. Москва, улица 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1.
press@bmstu.ru https://press.bmstu.ru
Отпечатано в типографии МГТУ им. Н.Э. Баумана.
105005, г. Москва, улица 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1.