

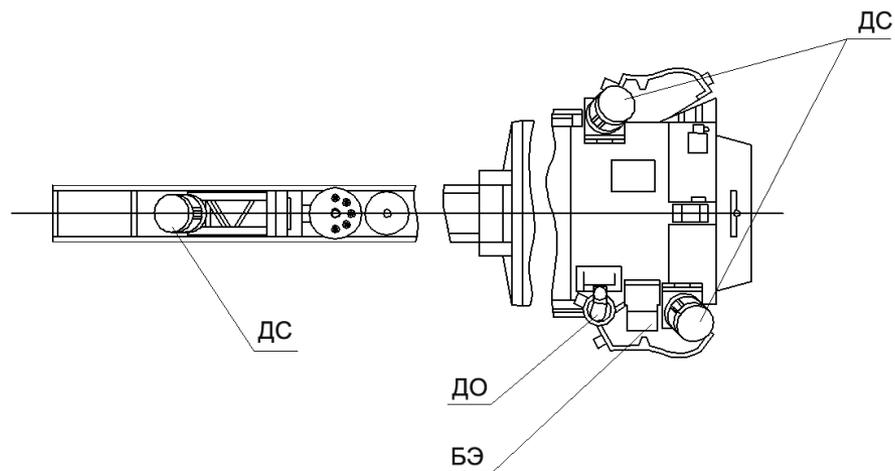
Разработка бортовых блоков управления на базе ПЛИС в стандарте РС-104

ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

Спроектировать блок управления системой активной виброзащиты на базе ПЛИС в архитектуре РС-104.

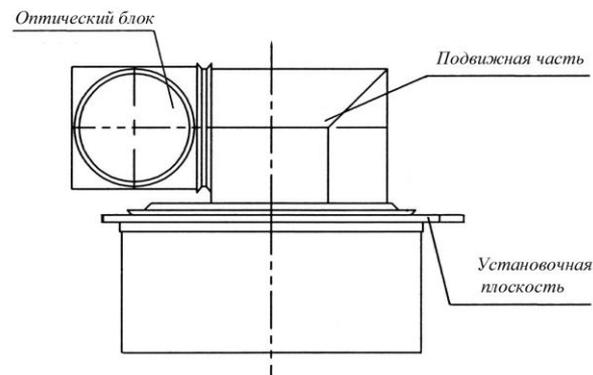
РЕШАЕМЫЕ ЗАДАЧИ:

- Описание объекта исследования, анализ исходных данных
- Формирование структуры системы активной виброзащиты
- Обоснование выбора архитектурного решения блока
- Обоснование выбора элементной базы модуля ЦОС
- математическое моделирование системы без регулирования, САВ с ПИД-регулятором, САВ с нейросетевым блоком управления
- Проектирование IP блоков библиотечных элементов
- Комплексное проектирование системы и функциональное моделирование библиотечных элементов



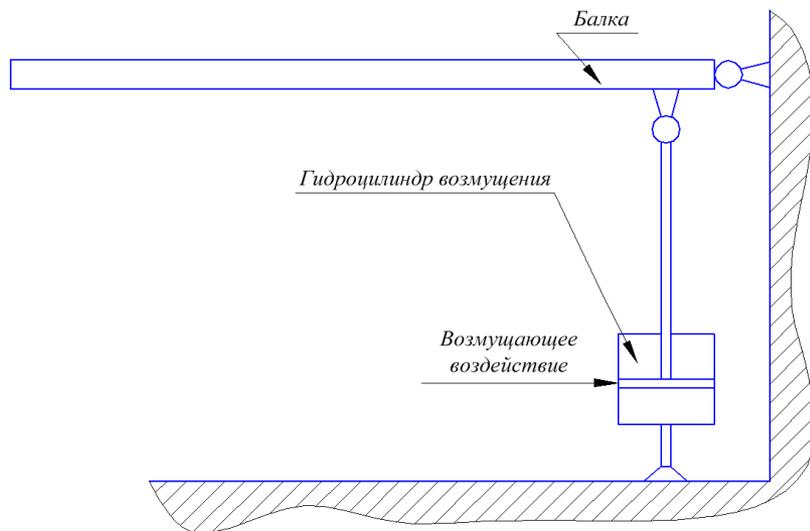
Расположение блоков научной аппаратуры на космическом аппарате типа Е2У

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ:
выносная консоль космических или авиационных систем



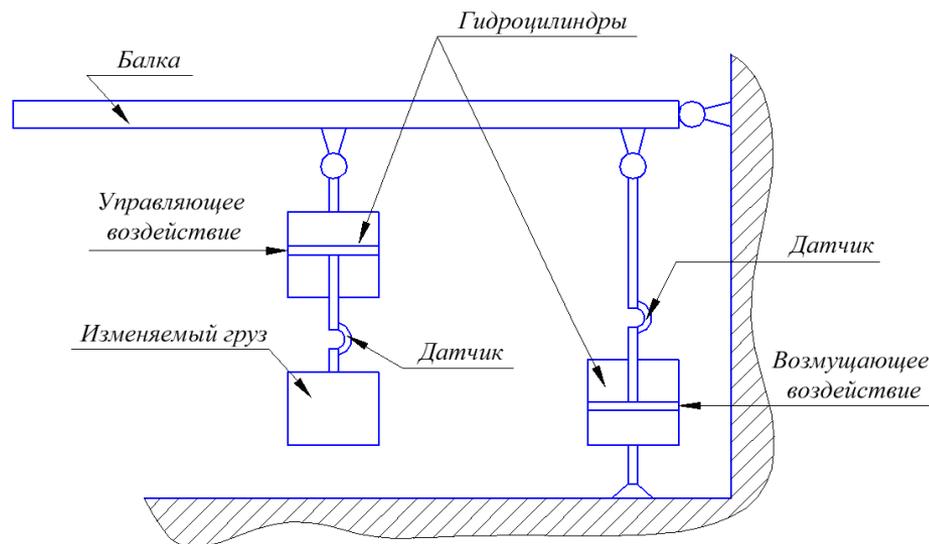
Конструкция малогабаритного телескопа

Конструкция малогабаритного телескопа ДО в составе научной аппаратуры «КОНУС-А» на космическом аппарате типа Е2У, соответствует следующей модели:



Модель объекта исследования

Модель состоит из пластины, жестко закрепленной с одной стороны, и гидроцилиндра возмущения. Моделирование возмущающего воздействия на пластину (вибрации в точке закрепления) производится подачей на гидроцилиндр возмущения определенного сигнала.



Модель системы активной виброзащиты

Постановка задачи:

1. Произвести синтез структуры САВ
2. Произвести выбор архитектурного решения БУ
3. Произвести выбор элементной базы модуля ЦОС
4. Произвести математическое моделирование САВ
5. Разработать IP блоки библиотечных элементов
6. Осуществить комплексное проектирование системы и функциональное моделирование библиотечных элементов

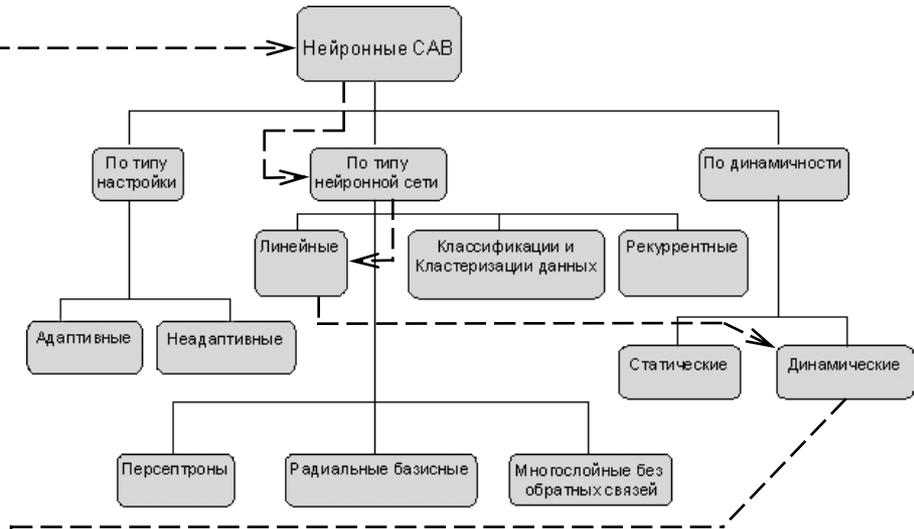
Задачи моделирования:

Произвести моделирование САВ, по следующим требованиям и дать оценку следующим показателям:

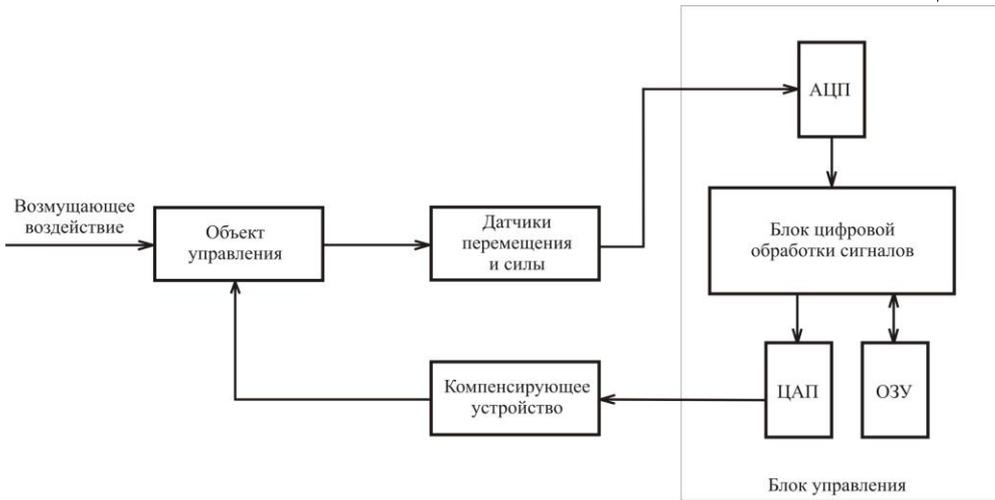
1. Моделирование системы производить на базовой резонансной частоте конструкции 5 Гц;
2. В качестве возмущающего воздействия рассматривать: гармонические воздействия в диапазоне частот 1-5 Гц с фиксированной и плавающей частотой; белый шум по ускорению в диапазоне частот 0,5-10 Гц; ступенчатое воздействие по перемещению (120 мм);
3. Оценить отклик объекта управления на возмущающее воздействие вибрации без регулирования, определить критерий регулирования системы;
4. Оценить отклик объекта управления на возмущающее воздействие с ПИД-регулятором и нейросетевым блоком управления; дать оценку эффективности компенсации вибрационных воздействий для указанных способов управления



Классификация систем активной виброзащиты



Классификация нейросетевых систем активной виброзащиты



Структурная схема системы активной виброзащиты

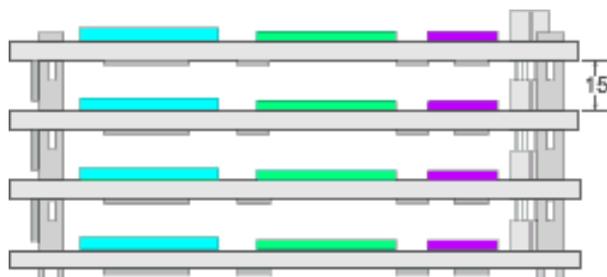
РЕЗУЛЬТАТЫ СИНТЕЗА:

Тип САВ: В качестве системы виброзащиты использована адаптивная поисковая нейроСАВ, построенная на базе динамических линейных нейронных сетей .

Тип БУ: Использовано архитектурное решение в виде системы на кристалле (СНК или System On the Chip).



Общий вид модуля в архитектуре PC-104



Стековая схема стыковки модулей в архитектуре PC-104

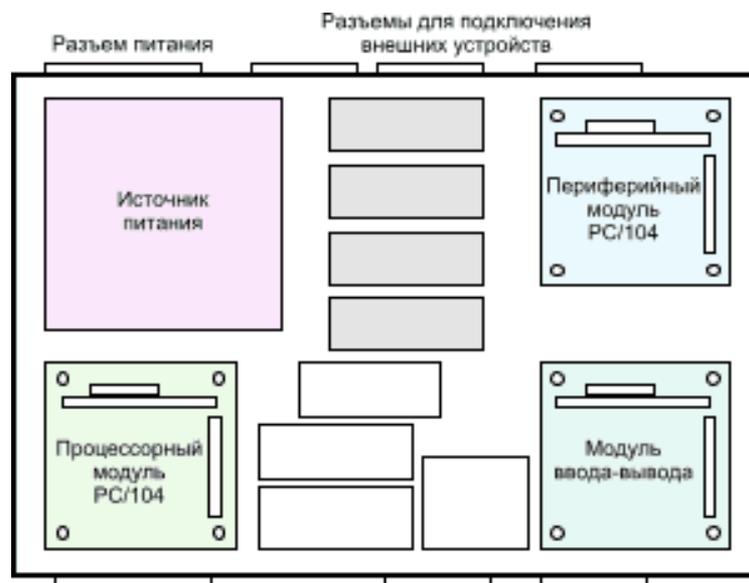
Архитектура	PC/104	PC/104 plus
Базовая процессорная платформа	Intel	Intel
Площадь платы, кв. дюйм	14	14
Макс. Разрядность, бит	16	32
Макс. Скорость передачи данных, Мбайт/сек	8	133
Поддержка многопроцессорного режима	Нет	Да

Основные характеристики архитектурных решений PC-104

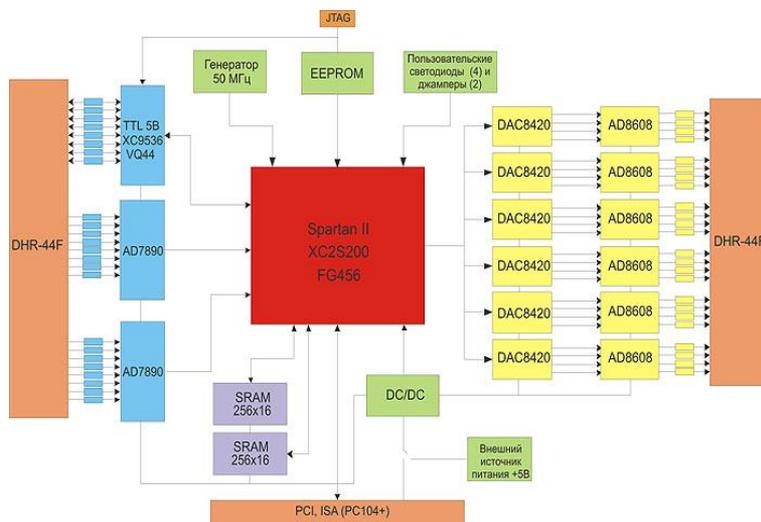
Архитектурное решение блока в стандарте PC-104 (IEEE-P996.1)

Основные преимущества архитектуры PC-104:

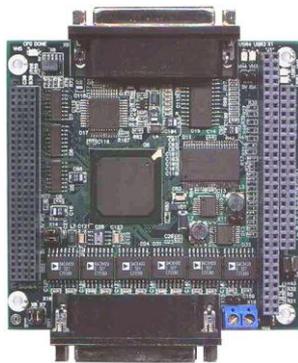
- возможность различной компоновки промышленного PC компьютера
- высокая надежность;
- возможность использование в жестких условиях эксплуатации
- малые габариты;
- низкое энергопотребление;
- возможность использования в закрытых объемах без дополнительного охлаждения
- использование в условиях сверхнизких температур
- низкая стоимость программной и аппаратной поддержки



Базовая плата в системе PC-104



Структурная схема модуля



Внешний вид модуля ЦОС SAD-PC104

Элементная база реализации модуля цифровой обработки сигналов - ПЛИС

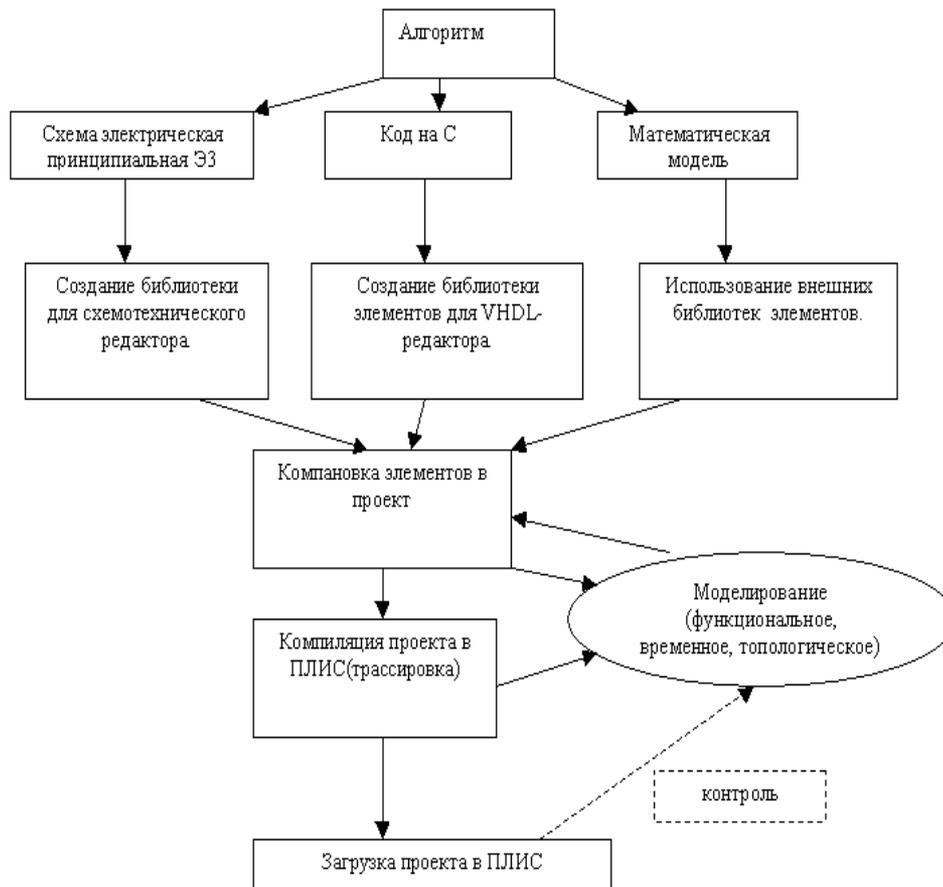
Основные преимущества ПЛИС:

- высокая гибкость архитектуры
- высокое быстродействие;
- наличие средств САПР для моделирования системы;
- возможность программирования непосредственно в системе;

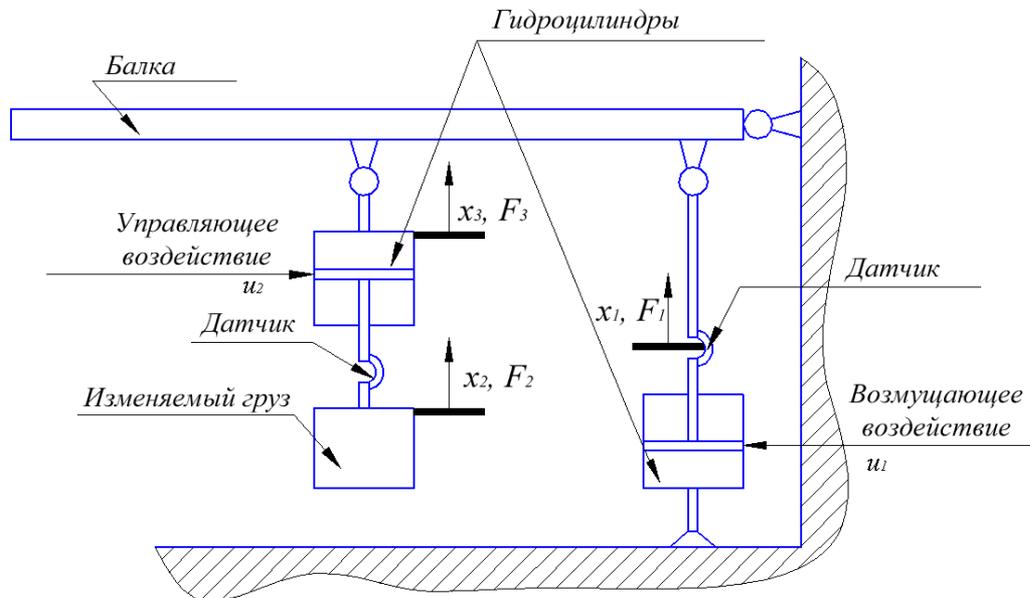
Основные технические характеристики модуля:

- ПЛИС типа FPGA Spartan-II XC2S200-5FG456, системная частота не менее 200 МГц;
- АЦП: два 8-канальных 16-разрядных, время преобразования не более 5.9 мкс, диапазон изменения аналогового сигнала на входе -10В..+10В (AD7890);
- ЦАП: шесть четырехканальных 16-разрядных, время установки не более 8 мкс, диапазон изменения аналогового сигнала на выходе 0..2,5В (DAC8420);
- Память: два независимых банка статической асинхронной памяти с объемом банка до 64Кx16 (SRAM);
- питание модуля: +5В шины PCI или ISA, или от внешнего источника питания +5В±10% через клеммный разъем;
- встроенный контроль напряжений питания ПЛИС
- поддержка JTAG IEEE 1149.1 инициализации ПЛИС
- диапазон рабочих температур от - 60°С до +50°С

№	Наименование этапа	Описание этапа	Регламентирующие документы
Исходные данные:		Описание характера входных данных и логики их обработки.	
1	Алгоритмизация.	Анализ исходных данных. Создание математической модели алгоритма решения задачи (преобразование входных параметров в выходные)	Требования к структуре и описанию алгоритмов, математическим закономерностям
Передаваемые данные:		Алгоритмы, мат. модели.	
2	Логическое моделирование	Разработка и исследование моделей в пакете MatLab или языке Си и т.п.; Оценка погрешностей обработки, отработка алгоритмов функционирования.	Требования к разработке программных моделей (Согласование по разработке моделей в пакете MatLab или Си и т.п.)
Передаваемые данные:		Программные модели	
3	Проектирование библиотечных элементов	Создание библиотек типовых элементов модуля.	Требования к библиотечным элементам
Передаваемые данные:		Состав библиотеки элементов	
4	Комплексное проектирование модуля	Реализация структуры модуля на основе библиотечных элементов. Синтез с структуры модуля	Требования к исходному коду проектировки
Передаваемые данные:		Системный проект модуля	
5	Функциональное моделирование.	Проверка функциональности разработанного модуля.	Регламент моделирования системного проекта
Передаваемые данные:		Системный проект модуля	
6	Синтез прошивки модуля	Создание прошивки	ТУ на синтез
Передаваемые данные:		Прошивка модуля	
7	Временное моделирование.	Проверка логических и временных характеристик разработанной прошивки	Регламент моделирования прошивки
Передаваемые данные:		Прошивка модуля	
8	Загрузка прошивки модуля в ПЛИС	Получение аппаратной реализации модуля	ТУ на загрузку
Передаваемые данные:		Модуль	
9	Отладка VHDL (Verilog) модели на кристалле	Отладка и корректировка модели по результатам отладки. Контроль качества и сертификация.	Регламент контроля
Передаваемые данные:		АКТ о соответствии выходных параметров ПЛИС ТЗ.	



Алгоритм быстрого проектирования вычислителей на ПЛИС



Модель системы активной виброзащиты

Допущения при моделировании: система рассматривается как линейная. Возмущающее воздействие приложено в точке закрепления балки

Обозначение	Наименование параметра.
u_1	напряжение, подаваемое на вход гидроцилиндра возмущения
u_2	напряжение, подаваемое на гидроцилиндр управления
x_1	вертикальное смещение левого края балки
x_2	вертикальное смещение груза
x_3	вертикальное смещение точки подвеса гидроцилиндра управления с грузом;
F_1	сила, действующая на балку со стороны гидроцилиндра возмущения;
F_2	сила, действующая на груз;
F_3	сила, действующая на балку со стороны гидроцилиндра управления с грузом.

Описание сигналов модели системы активной виброзащиты

$$\begin{aligned}
 y_1 &= x_1 & y_4 &= F_2 \\
 y_2 &= F_1 & y_5 &= u_1 \\
 y_3 &= x_2 & y_6 &= u_2
 \end{aligned}$$

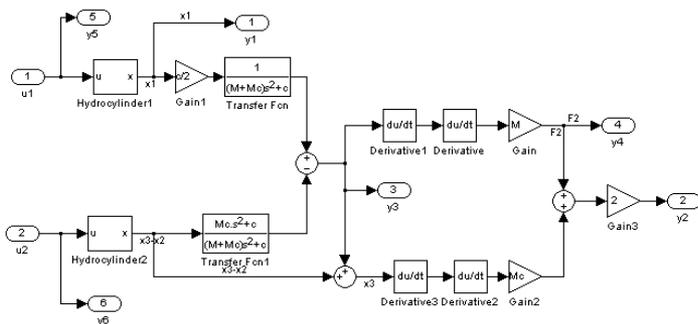
Наблюдаемые параметры

$$\begin{cases}
 F_2 = M \cdot x_2 \cdot s^2 \\
 F_3 = F_2 + M_c \cdot x_3 \cdot s^2 \\
 F_3 = c \left(\frac{x_1}{2} - x_3 \right) \\
 F_1 = 2 \cdot F_3 \\
 x_1 = \frac{1}{k_1 \cdot s + k_2} u_1 \\
 x_3 - x_2 = \frac{1}{k_1 \cdot s + k_2} u_2
 \end{cases}$$

Система ДУ, описывающая модель

$$\begin{cases}
 y_1 = x_1 = \frac{1}{k_1 \cdot s + k_2} u_1 \\
 y_3 = x_2 = \frac{c}{2((M + M_c)s^2 + c)} x_1 - \frac{M_c \cdot s^2 + c}{(M + M_c)s^2 + c} \cdot \frac{1}{k_1 \cdot s + k_2} u_2 \\
 y_4 = F_2 = M \cdot x_2 \cdot s^2 \\
 y_2 = F_1 = 2 \cdot \left(F_2 + M_c \cdot s^2 \cdot \left(x_2 + \frac{1}{k_1 \cdot s + k_2} u_2 \right) \right) \\
 y_5 = u_1 \\
 y_6 = u_2
 \end{cases}$$

Преобразование системы ДУ относительно наблюдаемых параметров



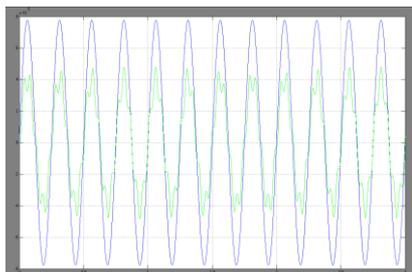
Модель САВ в пакете MatLab

Вид воздействия	Зависимость перемещения от времени	Зависимость управляющего сигнала от времени	Примечание
Гармоническое воздействие с постоянной частотой	$\frac{W}{(2 \cdot \pi \cdot f)^2} \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t)$	$\frac{W}{(2 \cdot \pi \cdot f)^2} [2 \cdot \pi \cdot f \cdot k_1 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t) + k_2 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t)]$	f – частота гармонизма; W – амплитуда по ускорению
Гармоническое воздействие с плавающей частотой	$\frac{W}{(2 \cdot \pi \cdot (f_1 + \frac{t}{T} (f_2 - f_1)))^2} \sin(2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot t + \frac{t^2}{2T} (f_2 - f_1))$	$\frac{W}{(2 \cdot \pi \cdot (f_1 + \frac{t}{T} (f_2 - f_1)))} \left[k_1 (2 \cdot \pi \cdot (f_1 + \frac{t}{T} (f_2 - f_1)) \cos(2 \cdot \pi \cdot (f_1 + \frac{t}{T} (f_2 - f_1)) \cdot t) + k_2 \cdot \frac{2 \cdot k}{2 \cdot \pi \cdot (f_1 + \frac{t}{T} (f_2 - f_1))} \sin(2 \cdot \pi \cdot (f_1 + \frac{t}{T} (f_2 - f_1)) \cdot t) \right]$	f ₁ – начальная частота, f ₂ – конечная частота, W – амплитуда по ускорению, T – время развертки
Белый шум по ускорению	$2 \cdot t^2 \cdot e \cdot rand$	$\frac{2}{k_2} \cdot t^2 \cdot e \cdot rand$	f – постоянная времени гидроцилиндра, e – среднеквадратическое значение ускорения
Ступенчатое воздействие	$A \cdot (1 - e^{-t/\tau})$	$A \left(k_2 + \left(\frac{1}{\tau} \cdot k_1 - k_2 \right) \cdot e^{-t/\tau} \right)$	A – величина «ступеньки»; τ – постоянная времени ступенчатого воздействия

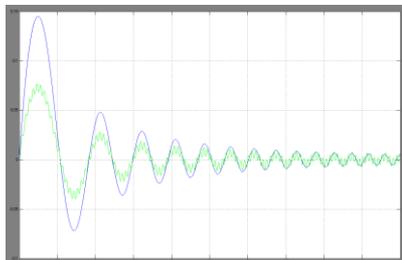
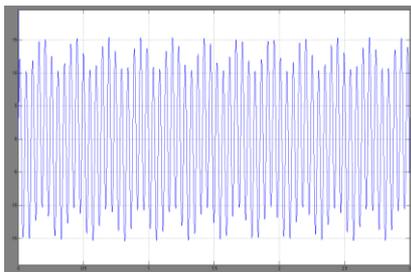
Аналитическое представление сигналов возмущений

Отклик объекта управления на различные возмущения представлен ниже:

(перемещения левого края балки - синим цветом, груза - зеленым цветом; на рис. слева - перемещение, на рис. справа - ускорение):



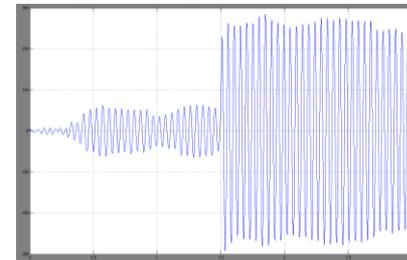
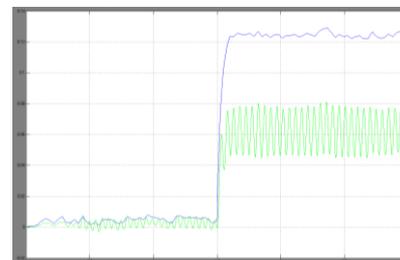
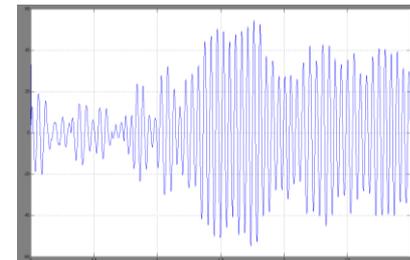
Гармоническое возмущение: частота 4.0 Гц, амплитуда 0.5 g



Гармонические возмущения с плавающей частотой
Частота 0.7 → 5Гц, Амплитуда 0.5 g , время развертки 5 c



Белый шум по ускорению: Диапазон частот 0.5-10 Гц,
Среднеквадратическое значение ускорения 0.5g



Ступенчатое воздействие по перемещению и белый шум по ускорению: Перемещение 120 мм СКЗУ 0.5g

ВЫВОД: значение ускорения достигает 10 g, следовательно регулирование по критерию минимизации ускорения

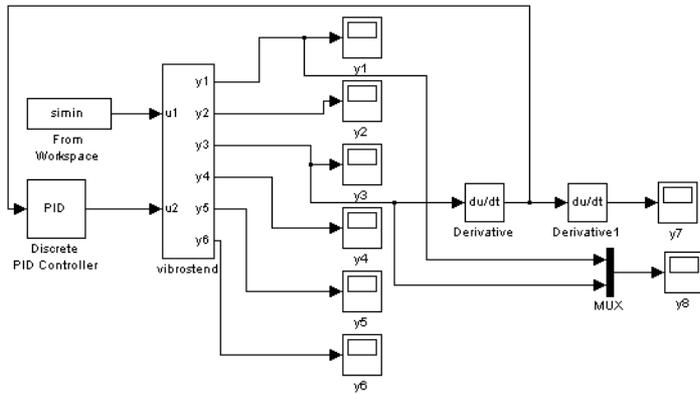
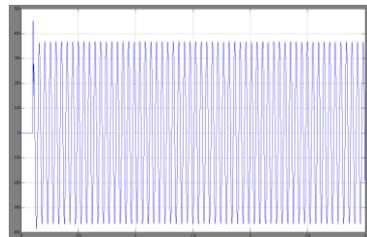
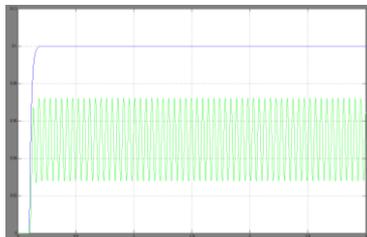


Схема включения ПИД-регулятора в контур управления САУ

поведение системы при ступенчатом входном воздействии и нулевых коэффициентах, управляющее воздействие представлено ниже:



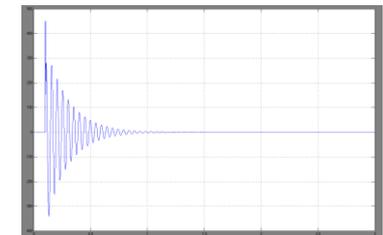
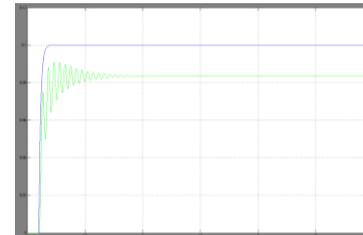
синим цветом изображено перемещение левого конца балки, зеленым – перемещение груза (на рис. слева - перемещение, на рис. справа - ускорение)



ВЫВОД: Введение ПИД-регулятора обеспечивает снижение ускорения в 20 раз до уровня 0,5 g. Эффективность виброкомпесации 0,2 что не соответствует требованиям ТЗ

Настройка коэффициентов ПИД-регулятора (ступенчатое входное воздействие)

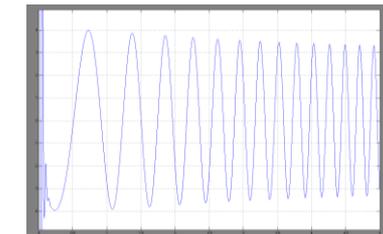
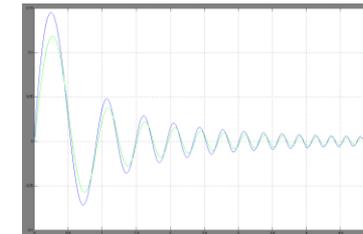
Ki=-40



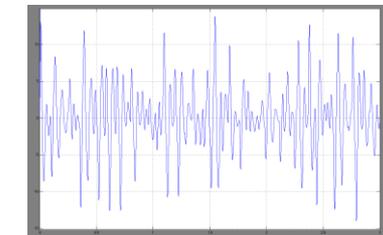
Ki=-40
Kd=15



Отклик объекта управления с контуром управления на базе ПИД регулятора на различные возмущения

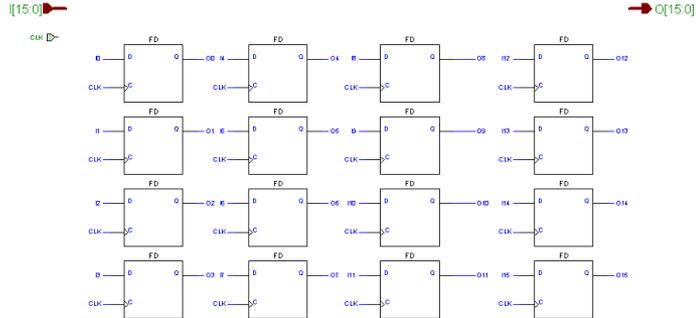
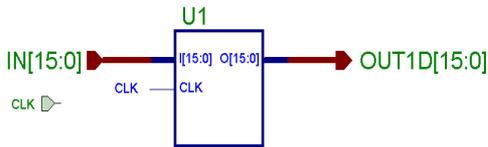


Гармонические возмущения с плавающей частотой
Частота 0.7 → 5Гц, Амплитуда 0.5 g , Время развертки 5 с



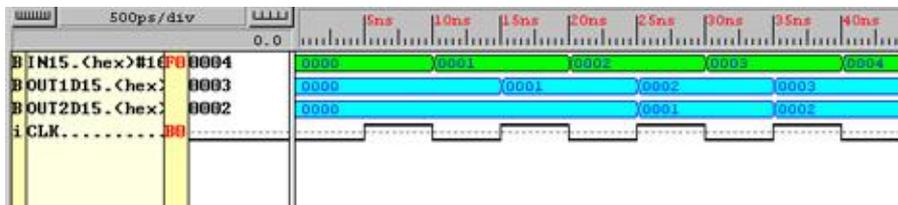
Белый шум по ускорению: Диапазон частот 0.5-10 Гц, Среднеквадратическое значение ускорения 0.5g

Проектирования IP блоков производится в пакете Schematic Editor менеджера проектов Xilinx Foundation 3.1i

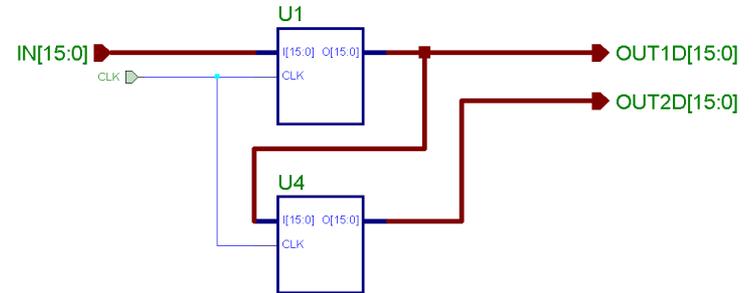
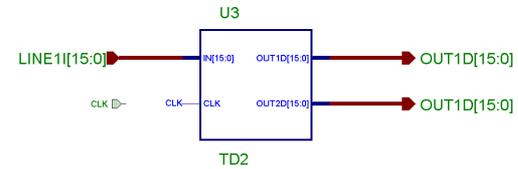


Структурная схема и декомпозиция IP блока линии задержки FD16

FD16 (U1): линия задержки входного сигнала на один такт

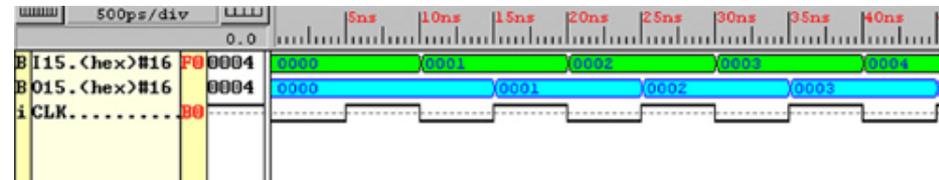


Временные диаграммы работы IP блока линии задержки FD16



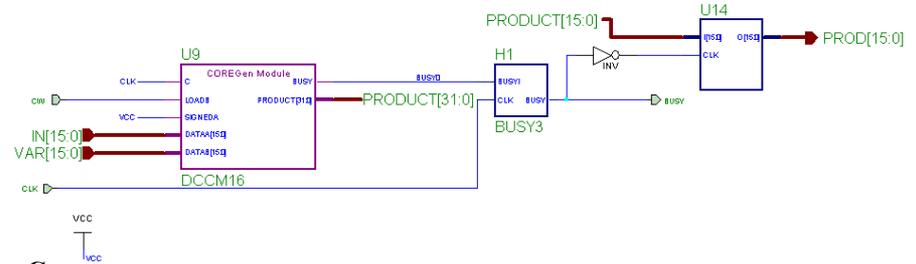
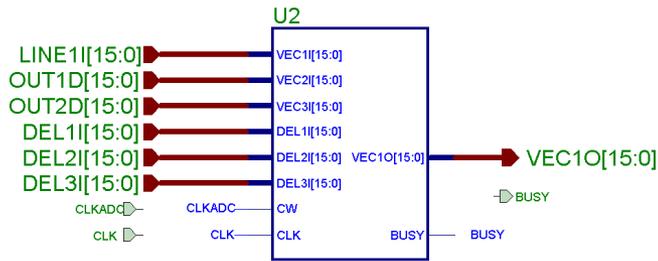
Структурная схема и декомпозиция IP блока линии задержки TD2

TD2 (U3): линия задержки входного сигнала на один такт и два такта

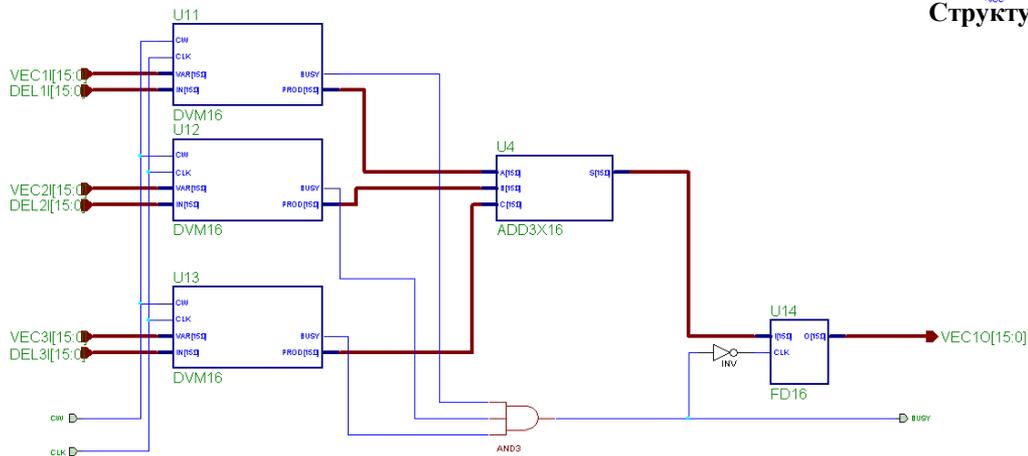


Временные диаграммы работы IP блока линии задержки TD2

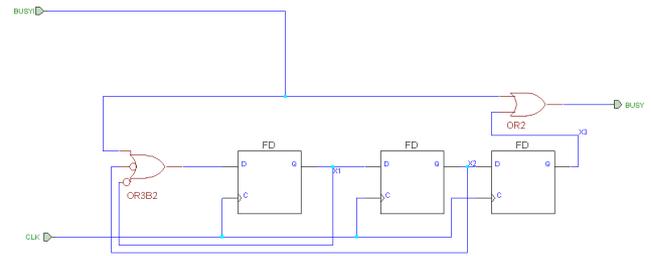
Проектирование IP блока матричного умножителя



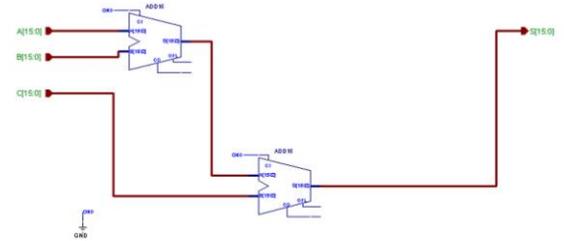
Структурная декомпозиция умножителя на динамическую константу



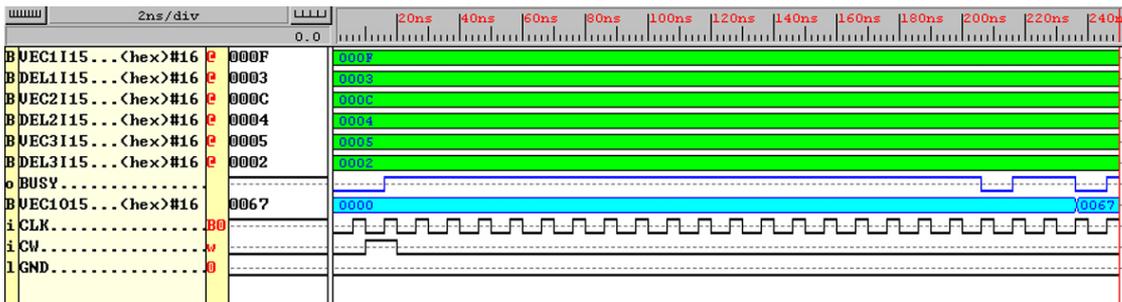
Структурная схема и декомпозиция IP блока матричного умножителя



Структурная декомпозиция блока оповещения о перестроении коэффициентов

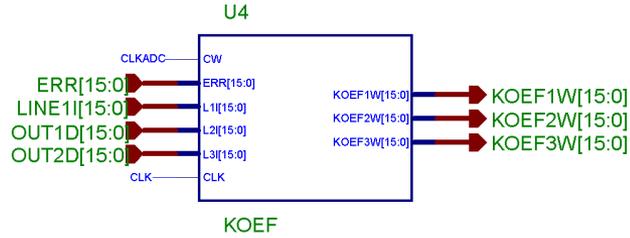


Структурная декомпозиция блока суммирования

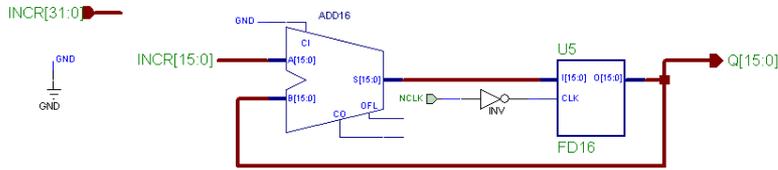


Временные диаграммы работы IP блока матричного умножителя

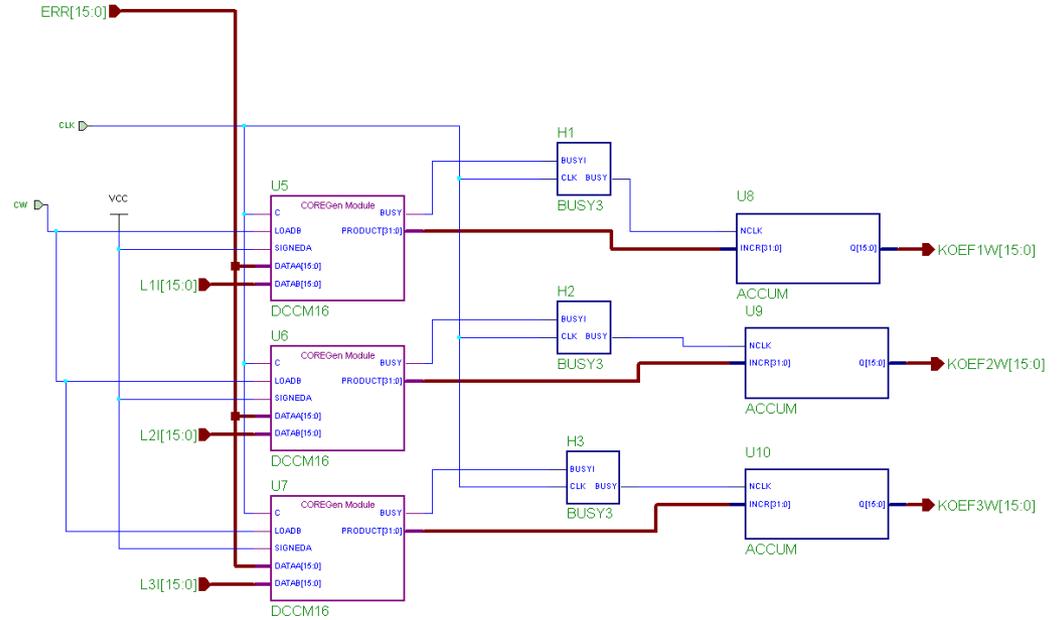
Проектирование IP блока коррекции коэффициентов



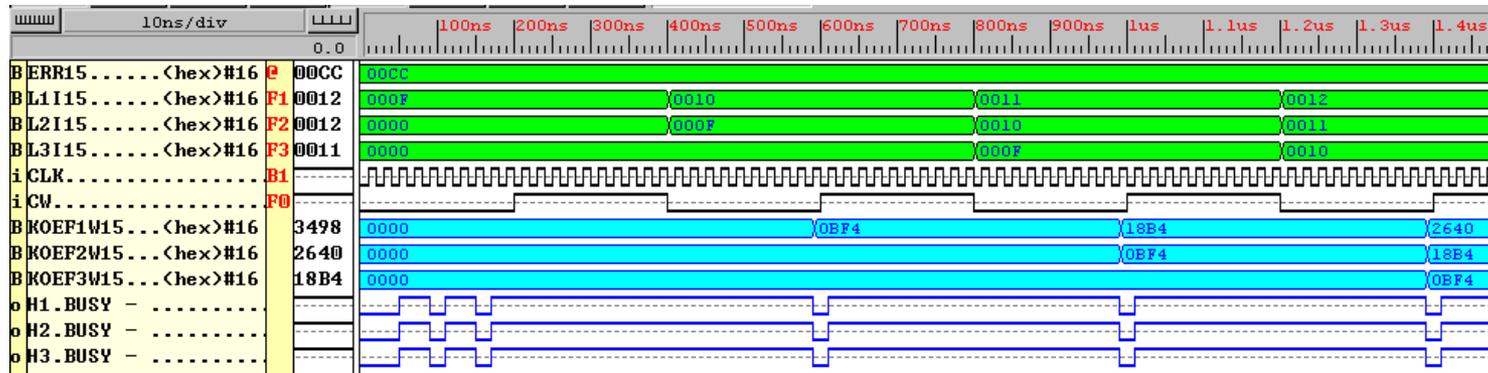
Структурная схема IP блока коррекции коэффициентов



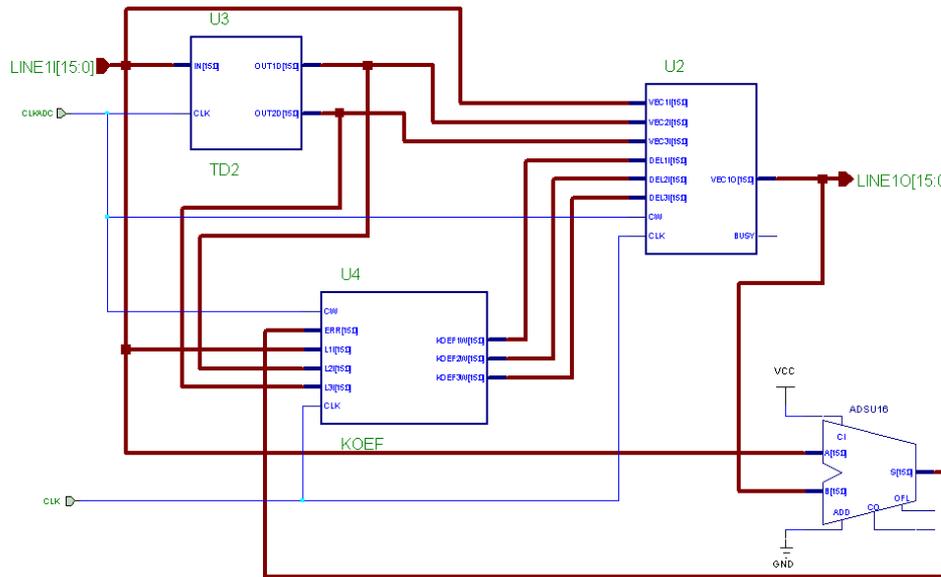
Структурная декомпозиция блока-аккумулятора



Структурная декомпозиция IP блока коррекции коэффициентов

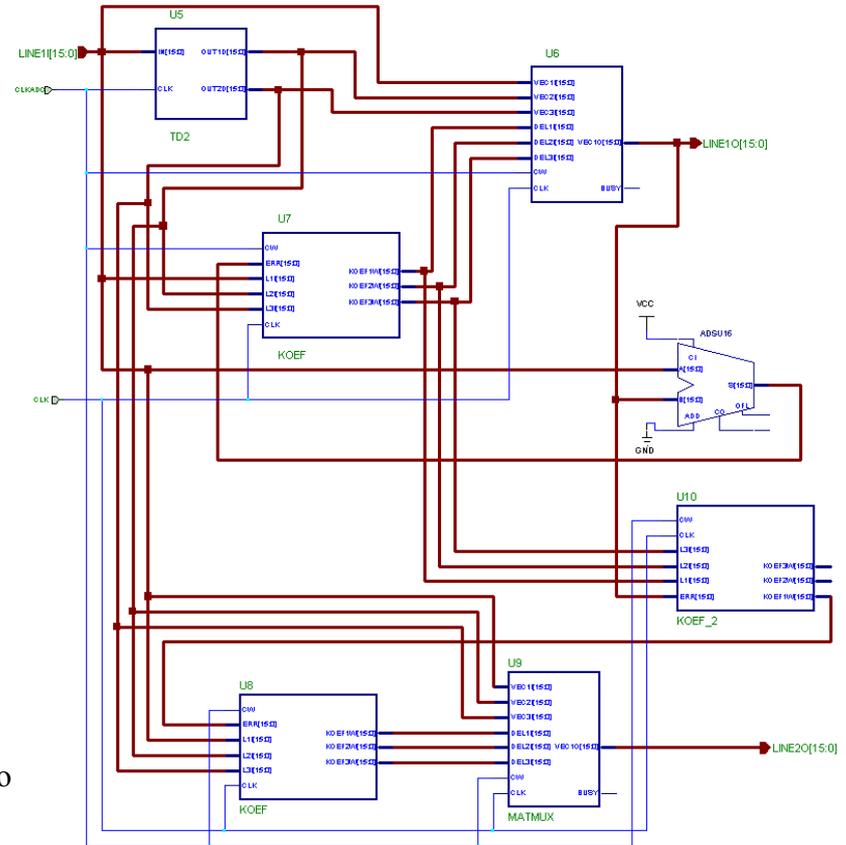


Временные диаграммы работы IP блока коррекции коэффициентов



Структурная схема нейроэмулятора, реализованного с использованием библиотечных элементов (обучение)

Обучение нейроэмулятора производится по алгоритму градиентного спуска в режиме реального времени, на основании ошибки, вычисляемой как разность реального и прогнозируемого входного воздействия. Обучение нейроконтроллера – аналогично, по ошибке нейроэмулятора.



Структурная схема нейроэмулятора и нейроконтроллера, реализованных с использованием библиотечных элементов (обучение и компенсирующий сигнал.)

ВЫВОД: выдача нейроконтроллером адекватного (ненулевого) управляющего сигнала через 114 тактов работы после принятия первого значения с выхода АЦП. Постоянная времени системы 45,6 мс, что соответствует требованиям ТЗ.

Выводы

1. **Объект управления: адаптивная поисковая САВ на основе линейной динамической НС**
2. **Полученное значение отклика объекта управления на возмущающее воздействие с частотой 5 Гц и ускорением 0,5g составляет (регулирование по критерию минимизации ускорения)**
 - **ускорение 10g (система без регулирования);**
 - **ускорение 0,5g (система с ПИД-регулятором);**
 - **ускорение 0,125g (система с нейросетевым блоком управления);**
3. **Дана оценка эффективности компенсации возмущающих воздействий:**
 - **0,2 (для системы с ПИД регулятором);**
 - **0,8 – соответствует требованиям ТЗ (для системы с нейросетевым блоком управления)**
4. **Время получения адекватного управляющего воздействия 45,6 мс;**

Апробация

Результаты исследований и разработок докладывались на студенческой конференции:

Ткачев К.Ю., Капустян В.В. «Математическое моделирование системы активной виброзащиты балочной конструкции».

Сборник трудов V молодежной научно-технической конференции «Наукоемкие технологии и интеллектуальные системы 2003». М: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2003.