



МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

имени Н.Э. БАУМАНА

# Учебное пособие

Курс лекций

**«Теоретические основы конструирования и надежности ЭС»**

МГТУ имени Н.Э. Баумана

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

имени Н.Э. БАУМАНА

Курс лекций

**«Теоретические основы конструирования и надежности ЭС»**

Москва  
МГТУ имени Н.Э. Баумана

2012

УДК 681.3.06(075.8)

ББК 32.973-018

И201

Курс лекций «Теоретические основы конструирования и надежности ЭС» /  
Коллектив авторов –

М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. – 70 с.: ил.

В курсе лекций были рассмотрены основные этапы курса «Теоретические основы конструирования и надежности ЭС».

Ил. 39. Табл. 5. Библиогр. 7 назв.

УДК 681.3.06(075.8)

## АННОТАЦИЯ

В курсе лекций рассмотрены основные темы курса «Теоретические основы конструирования и надежности ЭС» такие как: реализация логических схем на транзисторно-транзисторной логике, основные параметры биполярных транзисторов, потенциалы напряжений, соответствующих логической единице и логическому нулю, основные характеристики полевых и биполярных транзисторов и сравнения их по базовым параметрам, изучения понятия «ключ» и его реализации в электрических принципиальных схемах.

## ANNOTATION

The course of lectures addressed the main themes of the course "Teoretical basos construction of safity EM" such as the implementation of logic circuits on the transistor-transistor logic, the main parameters of bipolar transistors, voltage potentials which correspond to logical one and logical zero, the main characteristics of bipolar transistors and field and compare them basic parameters, the study of the concept of "key" and its implementation in the electrical schematic.

Теоретические основы конструирования и надежности ЭС

15.02.10.

Лада (Григорьев), Зубов (Зинцов), З Кр.

Шахнев Вагиз Анатольевич.

Лит-ра:

1. Конструкторско-технологическое проектирование электрической аппаратуры (Шахнев и др., МГТУ, 2008).
2. Проектирование конструкций радиоэлектронной аппаратуры (Парафенов, Калининград, 1984).
3. Основы конструирования и надежности ЭЭС (Чернышев, 19...)

Структура курса

Введение

1. Обеспечение главных режимов работы } кр 1
2. механич. прочность
3. эл-мех. совместимость → кр 2.
4. надежность ЭС → кр 3.

Конструктивная иерархия эл-тов, узлов и устройств ЭС.

Уровни (микроэлемент, резистор, конденсатор)  
 первый (модуль, ТЭЗ - тепловой, эл-но тепловой)  
 второй (блок, суб-блок)  
 третий (шкаф, стойка)

Эксплуатационные уровни, когда применяются безразличные элементы.

Рабочие пути унификации, экономии труда отдельные уровни и.б. учитывать как рабочие "стандартизации".

что следует быть контроля параметров уровня.

Индикатор: низкий коэф. использования физич. объема (плохо э/б. бортовая аппаратура).

Факторы, влияющие на работоспособность ЭС.

Климатические

- t среды, среда
- тепловой удар (кратковременное увеличение t в больших перепадах)
- влажность
- атмосферные явления
- пыль, песок (влияние на изоляцию)
- вибрация, шум
- активные вещества в атмосфере
- солнечное облучение

Механические

- вибрация
- удар
- мех. ускорение
- акустич. шум
- надежность

Радиационные

- космич. радиация
- ядерные установки
- α, β, γ, нейтроны и др.

Условия эксплуатации ЭС.

Круги аппаратуры (по ГОСТу)  
 стационарная → работающ. в помещении  
 → на открытом воздухе

важная на транспорте → авто, пассажирское, т/д.

судовая → большие суда, малые суда

Самолетная и вертолетная

высокая и приземная на открыт. воздухе

" " " " в помещениях.

Техническая документация

ЕСКД, ЕСРД, ЕСЭРД, ЕСТДП, ЕСЗК и др. программ.

Виды КД (конструкторской документации)

по форме представления

- Графич. КД
- чертежи
  - спецификации
  - схемы

Текстовый КД

- ТЗ
- ТУ
- паспорт
- инструкции и т.д.

по способу выполнения и характеру использования

- оригинал
- подлинник
- дубликат
- копии
- проектные КД
- рабочие КД

Схемная документация

Схема - графическая КД, на кот. е помещены условные графич. изображения или обозначения элементов составные части ЭС

изделия и связи между ними.

Виды схем:

- эл-ие (Э)
- управленческие (У)
- механические (М)
- гидравл. (Х)
- химические (К)
- вакуумные (В)
- оптические (О)
- электрические (Р)

Типы схем

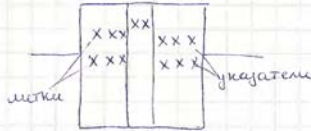
- структурная (1)
- функциональная (2)
- принципиальная (3)
- соединительная (исполнительная) (4)
- подсистемная (5)
- общие (6)
- разностепенные (7)
- объединительные (8)

Э1 - определяет состав частей ЭА и их функциональные задачи, их назначения, взаимосвязь.

Э2 - определяет процессы, происходящие в отдельных функциональных частях и узлах ЭА

Э3 - определяет полный состав эл-тов схемы между ними и дает полную информацию о принципе работы отдельных узлов и устройств ЭА.

УГО логического эл-та



Требования, предъявляемые к конструкции Э

- Тактико-технические
- Конструктивно-технологические
- Эксплуатационные
- Требования по надежности
- Экономические

Показатели конструкции Э

1. Стоимость конструкции Э

$$C_{Э} = K_1 (K_2 N_{Э} + K_3 M_{Э})$$

$K_i$  - коэффициенты.

2. Число элементов Э

$$N_{Э} = \sum_{j=1}^{N_1} \sum_{i=1}^{K_j} n_{ij}$$

$n_{ij}$  - кол-во эл-тов  $i$ -ого типа в  $j$ -ой ...

3. Объем Э,  $V = V_N + V_C + V_K + V_{\text{ит. в ст. вкл. в теле}}$

4. Коэф. интеграции

$$q_n = \frac{V_N}{V} = \frac{\text{объем, занимаемый э-тами}}{\text{общий объем}}$$

5. Общая масса Э,

$$m = m_N + m_C + m_K + m_{\text{ит. в ст. вкл. в теле}}$$

6. Мощность потребления Э.

$$P = \sum_{j=1}^{N_1} P_j$$

7. Индекс, занимаемая Э

$$S = \sum_{j=1}^{N_1} S_j$$

8. Собственная частота колебаний конструкции

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$

$k$  - коэф. жесткости,  $m$  - масса.

9. Степень герметичности конструкции аппарата.

$$D = \frac{V_0}{\tau_{01}} \cdot \Delta P$$

$V_0$  - приток воздуха,  $\tau_{01}$  - время за кот  $\Delta P \Rightarrow 0$ .

10. Показатели надежности Э,

- время жизни безотказной работы  $\rho(t)$
- ср. время наработки на отказ  $T_{cp}$

11. Коэф. унификации

$$K_{ун} = \frac{N_{ун}}{N_{Э}} = \frac{\text{унифич. дет.}}{\text{общ. число}}$$

12. Коэф. автоматизации

$$K_a = \frac{M_a}{M} = \frac{\text{число работ. автоматов}}{\text{общ. число работ.}}$$

Объемные нормальные тепловые режимы работы Э.

Ранние: 0,03...0,05 Вт/см<sup>2</sup>

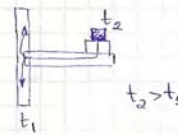
В настоящее время: 0,6...10 Вт/см<sup>2</sup>

Температура после Э - безопасность  $t_p^o$  внутри и снаружи Э

Поли м.д. стационарные (const) и нестационарные (изменяется во времени)

Механизм отвода тепла от нагревателя

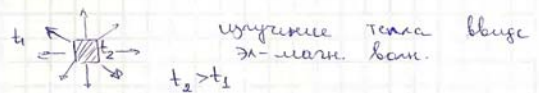
1. Теплопроводность (теплопроводящие материалы)



2. Конвекция



3. Излучение

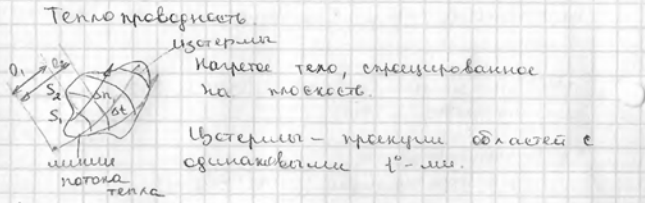


Обычно 2 или все 3. Расчет - по тривалентности.

Все виды излучения описаны законом Фурье:

$$Q = \alpha S \Delta t$$

$\alpha$  - коэф. теплоотдачи  
 $S$  - площадь пов-ти теплоотдачи  
 $\Delta t$  - разность  $t^o$



Теплопроводность  
 Поток тепла, сформированный на поверхности.  
 Потери - процесс обмена с окружающей средой  $t^\circ$ -ми.  
 $\Delta n$  - расстояние между соседними изотермами.  
 $\Delta t$  - разность  $t^\circ$  между соседними изотермами.  
 Градиент  $t^\circ$ :  $\lim_{\Delta n \rightarrow 0} \frac{\Delta t}{\Delta n} = \vec{n} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta n} = \text{grad } t$

мм, 1-мм изотермы, хар-тер мм потока тепла - тепло дифф по ним принимается

Тепловой поток - изменение кол-ва тепла  $dQ$  за время  $dt$

Плотность теплового потока - тепловой поток, отнесенный к  $1 \text{ м}^2$   $S$ :  
 $q = \frac{dQ}{dS dt}$

Закон Фурье:  $q = -\lambda \text{grad } t = -\lambda \nabla t = -\lambda n \frac{dt}{dn}$

$\lambda$  - коэф. теплопроводности

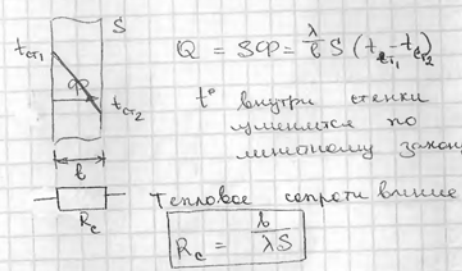
$$\frac{dt}{dx} = \frac{t_2 - t_1}{x_2 - x_1} = \text{const} \Rightarrow \lambda = q \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} \left[ \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}} \right]$$

В 3-х мерном поле:

$$\frac{d^2 t}{dx^2} + \frac{d^2 t}{dy^2} + \frac{d^2 t}{dz^2} + \frac{Q}{\lambda} = \frac{1}{c \rho} \frac{dt}{dt}$$

$\rho$  - плотность материала  
 $c$  - теплоемкость

Пусть есть стенка из  $l_0$ :



$$Q = \Delta Q = \frac{\lambda}{l} S (t_{c1} - t_{c2})$$

$t^\circ$  внутри стенки изменяется по линейному закону

Тепловое сопротивление:  
 $R_c = \frac{l}{\lambda S}$

Тепловое сопротивление плоской стенки:  $R_{cp} = \frac{l}{\lambda S}$

- цилиндрической стенки:  $R_{c,c} = \frac{1}{2\pi \lambda l} \ln \frac{r_2}{r_1}$  - внутр. радиус,  $r_2$  - внутр. радиус,  $r_1$  - внутр. радиус

- сферической стенки:  $R_{c,c} = \frac{1}{2\pi \lambda} \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) = \frac{l}{2\pi \lambda l r}$

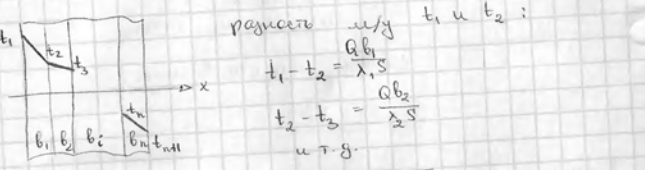
Тепловая емкость (цену)

Тепловая емкость  $R_c \equiv R$   
 Электрическая емкость  $\Delta U \equiv I R$   
 $t_{c1} - t_{c2} = \Delta t \equiv \Delta U$   
 $Q = \frac{\Delta t}{R_c} \equiv I = \frac{\Delta U}{R}$

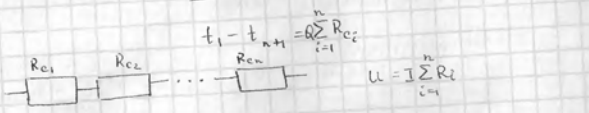
символика тепловых цепей:



2 закона Кирхгофа:

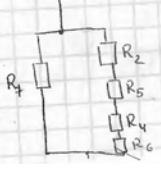
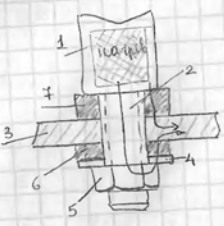


разность  $t_1$  и  $t_2$ :  
 $t_1 - t_2 = \frac{Q b_1}{\lambda_1 S}$   
 $t_2 - t_3 = \frac{Q b_2}{\lambda_2 S}$   
 и т.д.



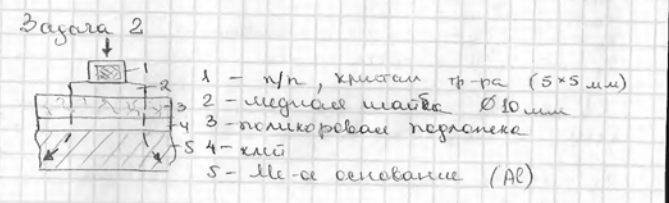
Задача 1. КР

- 1 - магнитный н/н прибор
- 2 - штифт
- 3 - основание
- 4 - шайба
- 5 - гайка
- 6 - винт
- 7 - верхняя крышка

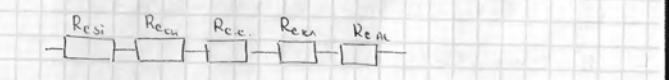


$$R' = R_4 = \frac{b_{npt}}{\lambda_{npt} S_{npt}}$$

$$R'' = \frac{b_0}{\lambda_0 S_0} + \frac{b_L}{\lambda_L S_L} + \frac{b_{cu}}{\lambda_{cu} S_{cu}} + \frac{b_{np.c}}{\lambda_{np.c} S_{np.c}}$$



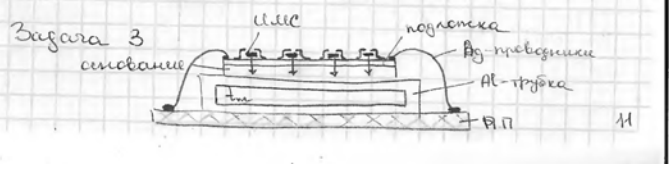
материал	$\delta, \text{мм}$	$\lambda, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$
Si	0,3	83
Cu	0,3	390
Ситан	0,5	1,4
Кварц	0,2	0,27
Al	0,5	208



Нагрев  $t^\circ$ :  
 $\Delta t_{Si} = \frac{Q \delta_{Si}}{\lambda_{Si} S_{Si}} \approx 0,2^\circ \text{C}$

$$\Delta t_{cu + Al} = \frac{Q}{S_{cu}} \left( \frac{\delta_{cu}}{\lambda_{cu}} + \frac{\delta_c}{\lambda_c} + \frac{\delta_{cu}}{\lambda_{cu}} + \frac{\delta_{Al}}{\lambda_{Al}} \right) \approx 20,8^\circ \text{C}$$

Общая средняя:  $20,83 + 0,2 = 21,03^\circ \text{C}$ .  
 при  $t_{к.оп} = 20^\circ \text{C}$   $t_{Si} = 101,03^\circ \text{C}$ .



$n = 40$   
 $n_0 = 16$   
 $Q_0 = 0,6 \text{ Вт}$  - мощность ИС  
 $l_0 = 2 \text{ мм}$  - длина ваттоса  
 $S_0 = 35 \text{ мм} \times 200 \text{ мм}$  - площадь ваттоса  
 $S_n = 2,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$  - площадь ИС  
 $l_n = 0,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}$  - толщина ИС  
 $l_k = 0,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$  - клей  
 $l_0 = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$  - толщина основания  
 $l_T = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$  - толщина трубки

$t^\circ$  нагрева кристалла,  
 если  $t^\circ$  микросети внутри трубки  $20^\circ\text{C}$

$R_{00}$  - тепловое сопротивление базовых ваттосов  
 кристалла ИС  
 $R_{0n}$  - " " " - полимеровая подложка  
 $R_{0c}$  - " " - клеювое соединение  
 $R_{0s}$  - " " - основание (И)  
 $R_{0T}$  - " " - стенки охлаждающей трубки

$t_{\text{ИС}} = Q_0 R_{00} + Q (R_{0n} + R_{0c} + R_{0s} + R_{0T}) + t_{\text{ж}}$

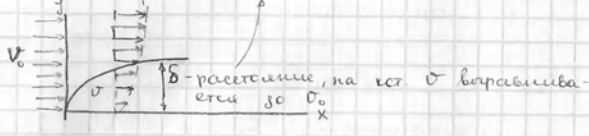
$Q = Q_0 n = 24 \text{ Вт}$   
 $R_{00} = \frac{l_0}{\lambda_{\text{ИС}} S_0 n_0} = 90 \frac{^\circ\text{C}}{\text{Вт}}$   
 $R_{0n} = \frac{l_n}{\lambda_n S} = 1,1 \cdot 10^{-2} \frac{^\circ\text{C}}{\text{Вт}}$   
 $R_{0c} = 0,14 \frac{^\circ\text{C}}{\text{Вт}}$   
 $R_{0s} = 1,05 \cdot 10^{-3} \frac{^\circ\text{C}}{\text{Вт}}$   
 $R_{0T} = 1,67 \cdot 10^{-3} \frac{^\circ\text{C}}{\text{Вт}}$   
 $t_{\text{ИС}} = 77,6^\circ\text{C}$

Контакты

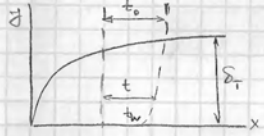
Закон Ньютона-Рихмана:  $dQ = \alpha dt S$   
 $\alpha$  - коэф. конвективного теплообмена

интегр. закон  $\Rightarrow [dQ = \alpha S dt]$

Углубина температурного пограничного слоя



Тепловой пограничный слой



$\delta \neq \delta_T$

$\exists$  2 типа движения жидкости или газа:

- ламинарное - отделившийся слой перемещается по трубе.
  - турбулентное - хаотически
- Характер движения жидкости зависит от:
- вязкости
  - мощности
  - скорости

Внутр. трение зависит от геометрии, вязкости  $\mu$  и линейной скорости  $v = \frac{dM}{dt}$

Спектральная функция:  $M_\lambda = \frac{dM}{d\lambda}$

Зак. Стефана-Больцмана:

$M_0 = n^2 \sigma_0 T^4$ ,  $\sigma_0 = 5,668 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}^4}$   
 $M = \epsilon n^2 \sigma_0 T^4$

$\epsilon$  - коэф. серости, хар-ет функцию способности тела

18.02.10.

Общая теплообмен

$Q_{1,2m} = \frac{t_1 - t_2}{R_{1,2m}} = \sigma_{1,2m} (t_1 - t_2)$

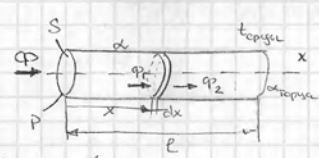
$\sigma$  - тепловая проводимость.

Теплопроводность  $R_{1,2T} = R_c$       Конвективный  $R_{1,2K} = (\alpha \cdot S)^{-1}$       Углубление  $R_{1,2d} = (\alpha \cdot S)^{-1}$

$Q_{1,2} = Q_{1,2T} + Q_{1,2K} + Q_{1,2d} = (\sigma_{1,2T} + \sigma_{1,2K} + \sigma_{1,2d}) (t_1 - t_2)$

Общие тепловое сопротивление:  $\frac{1}{R_{1,2}} = \frac{1}{R_{1,2T}} + \frac{1}{R_{1,2K}} + \frac{1}{R_{1,2d}}$  и общая тепловая проводимость  $\sigma_{1,2} = (\sigma_{1,2T} + \sigma_{1,2K} + \sigma_{1,2d})$

Температурное поле стержней и пластин



$R$  - радиус  
 $S$  - площадь торца  
 $\alpha$  - коэф. конвективного теплообмена

Число Рейнольдса определяет переход из одного типа движения в другой.

$Re = \frac{V \cdot d}{\nu}$

$d$  - диаметр,  $\nu$  - вязк. коэф. перемещается по

$Re > 5 \cdot 10^5$  - турбулентное  
 $<$  - ламинарное

Тепловое излучение

монохроматическое: спектр от  $\lambda$  до  $\lambda + d\lambda$   
 сплошное излучение:  $0 < \lambda < \infty$

$Q = Q_a + Q_z + Q_d$ ,  $\frac{Q_a}{Q} + \frac{Q_z}{Q} + \frac{Q_d}{Q} = 1$ .  
 тепловой поток, проходящий через тело

$a = \frac{Q_a}{Q}$  - коэф. поглощения

$z = \frac{Q_z}{Q}$  - отражение

$d = \frac{Q_d}{Q}$  - пропускание

$a + z + d = 1$

- 1)  $a = 1, z = d = 0$  - АЧТ
- 2)  $z = 1, a = d = 0$  абс. зеркальное тело
- 3)  $d = 1, z = a = 0$  абс. прозрачное тело

Параметры теплового излучения

Лучевой поток:  $q_p = \frac{Q}{F}$

Излучательность:  $M = \frac{q_p}{S}$



$$\Phi_1 - \Phi_2 = \alpha P dx (t - t_c)$$

$$\Phi_1 - \Phi_2 = (q_1 - q_2) S, \quad \text{где } q \text{ — удельная тепло.}$$

$$q_1 - q_2 = \frac{\partial q}{\partial x} dx = \lambda \frac{\partial^2 \Theta}{\partial x^2}, \quad \text{где } \Theta = t - t_c$$

$$\frac{d^2 \Theta}{dx^2} = \beta^2 \Theta = 0, \quad \beta^2 = \frac{dP}{dS} \quad (1)$$

→ стационарные пр-е теплопроводности

Граничные условия:

- на л. торце:  $\alpha_1 = -\lambda \frac{dt}{dx} \Big|_{x=0} = 0$

- на п. торце:  $\left| \frac{dt}{dx} + \frac{\alpha_2}{\lambda} \Theta \right|_{x=l} = 0$

Решим пр-е (1) методом вариации:

$$\Theta(x) = C_1 \operatorname{ch} \beta x - C_2 \operatorname{sh} \beta x$$

С учетом граничных условий:

$$\Theta = \frac{\alpha_1}{\lambda \beta S} (f \operatorname{ch}(\beta x) - \operatorname{sh}(\beta x))$$

$$f = \frac{(1 + \frac{\alpha_m}{\lambda \beta} \operatorname{th} \beta l)}{(\frac{\alpha_m}{\lambda \beta} + \operatorname{th} \beta l)}$$

Т.к.  $Pl \gg S$ ,  $\alpha_2 = 0$  (м.о.), то

$$f = \operatorname{ch} \beta l \quad \text{и} \quad \Theta = \frac{\alpha_1}{\lambda \beta S} \frac{\operatorname{ch} \beta(l-x)}{\operatorname{sh} \beta l}, \quad \beta' = l + \frac{S}{P}$$

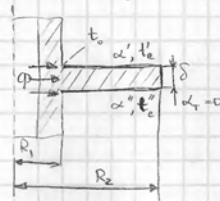
$$\Rightarrow \Theta = \frac{\alpha_1}{\lambda \beta S} \frac{\operatorname{ch} \beta(l'-x)}{\operatorname{sh} \beta l} \quad \text{если вынести торца}$$

$$\Theta = \frac{\alpha_1}{\lambda \beta S} \operatorname{ch} \beta l' \Rightarrow \alpha_1 = \Theta_0 \lambda \beta S \operatorname{th} \beta l' \rightarrow \beta (2)$$

$$\Theta = \Theta_0 \frac{\operatorname{ch} \beta(l'-x)}{\operatorname{ch} \beta l} \quad \text{— решение для торца}$$

16

Решение граничных



При  $R_2 \rightarrow \infty$   $\Theta = \frac{\alpha_1 B}{2 + 4 \lambda \delta \beta}$

где  $B = \frac{k_0(b, z)}{k_1(b, z)}$ ,  $\beta_1^2 = \frac{\alpha}{\lambda \delta}$

$k_0, k_1$  — ср. Бесселя

Теория погоды в парниках

Кэф. конвекции. Таблица:

$$\alpha = f(t, t_c, \beta, \lambda, \rho, \gamma, \rho, g, h, q, \nu, a) \quad (1)$$

$t$  —  $t^\circ$  тела

$t$  —  $t^\circ$  среды

$\rho$  — кэф. термич. расширения среды

$\lambda$  — кэф. теплопроводности

$\rho$  — плотность среды

$\gamma$  — вязкость (динамическая)

$\rho$  — плотность среды

$g$  —  $9,81 \text{ м/с}^2$

$h$  — характеристический размер

$q$  — удельн. тепловой поток

$\nu$  — скорость гравит. среды

$a$  — кэф. температуропроводности среды

$$a = \frac{\lambda}{\rho \gamma} \quad \text{числитель — вязкость} \quad \nu = \frac{\mu}{\rho}$$

17

$$Pr = \frac{c_p \rho \lambda}{\alpha}$$

Прангтл хар-ет ср-е св-ва среды.

$Gr = \rho g \frac{l^3}{\nu^2} (t - t_c)$  — гравитационная сила при перемещении жидкости

$Nu = \frac{\alpha l}{\lambda}$  — число хар-ет отношение интенсивности конвективного т/о и теплопроводности

$$Nu = F(Gr, Pr)$$

$Re = \frac{v l}{\nu}$  — Рейнольдса соотношение сил инерции и тр. в потоке жидкости

$Pe = \frac{v l}{\alpha}$  — Пекле мера отношения конвективного и молекуляр. переноса тепла в потоке среды

$Fo = \frac{\alpha t}{L^2}$  — Фурье скорость изменения  $t^\circ$  по толщине тела во времени

$Bi = \frac{\alpha l}{k}$  — Био м-р между  $t^\circ$  в ср-е и условиями т/о на ее пов-ти.

$$Nu = c Re^q Gr^m Pr^n k_{ж}$$

$c, q, m, n$  — кэф-ты (от св-в среды, геометрии тела)

$k_{ж}$  — кэф. (от деп. факторов)

Свободная конвекция в неограниченном пр-ве.

18

$$Nu_m = c (Gr Pr)_m^n$$

$c, m, n$  — кэф-ты.

$\lambda, \alpha, \nu, \beta$  выбираются от  $t_m = \frac{t + t_c}{2}$

$(Gr Pr)_m$	$c$	$n$	режим т/о
$1 \cdot 10^3$	0,5	0,00	натуральный
$(1 \cdot 10^3 \dots 5 \cdot 10^8)$	1,13	1/3	натуральный
$5 \cdot 10^2 \dots 2 \cdot 10^7$	0,54	1/4	переходный
$2 \cdot 10^7 \dots 1 \cdot 10^{13}$	0,135	1/3	турбулентный

На значение  $\alpha_k$  влияет ориентация поверхности  $L$  и ориентация пов-ти в пр-ве (кэф.  $N$ )

Горизонт, вертикал.  
квадрат и цилиндр  $N = 1,0$

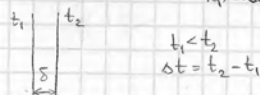
Горизонтальная пов-ть при теплообмене  
- вверх  $N = 1,3$   
- вниз  $N = 0,7$

Если  $(t - t_c) \leq 1840 / (L \cdot 10^{-3})^1$ ,

$$\alpha_k = (1,42 + 1,4 \cdot 10^{-3} t_m) N [(t - t_c) / L]^{\frac{1}{4}}$$

$$\alpha_k = (1,67 + 3,6 \cdot 10^{-3} t_m) N [(t - t_c) / L]^{\frac{1}{3}}$$

Свободная конвекция в ограниченном пр-ве.



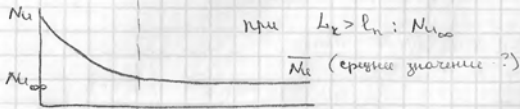
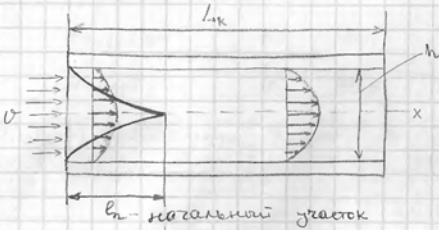
19

Конвективные нагрузки газ

$\delta > 10$  мм при  $\Delta t = 0,5^\circ\text{C}$   
 $\delta = 5 \dots 10$  мм при  $\Delta t > 5^\circ\text{C}$   
 $\delta < 5$  мм при  $\Delta t > 100^\circ\text{C}$

$\lambda_3 = k_n \lambda$ , где  $k_n = f(GzPr)$   
 эквивалентная теплопроводность среза

при  $GzPr \leq 10^3$   $k_n = 1$   
 если  $GzPr > 10^3$   $k_n = 0,15 (GzPr)^{0,25}$



при ламинарном течении воздуха  
 $(Re < 2200)$   
 $l_n = 0,04 Re$   
 $Nu_\infty = 4,12$

Δ/канала малой длины ( $L_k < l_n$ )

$$\bar{Nu} = 1,5 Nu_\infty \sqrt{\frac{l_n}{L_k}}$$

Δ/канала большой длины ( $L_k > l_n$ )

$$\bar{Nu} = Nu_\infty (1 + 0,5 \frac{l_n}{L_k})$$

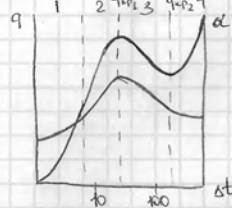
при турбулентном тече. воздуха  
 $L_k > l_n$   $Nu_\infty = 0,19 Re^{0,8}$

при  $L_k \leq l_n$   $\bar{Nu} = 1,165 Nu_\infty (\frac{l_n}{L_k})^{0,164}$

при  $L_k > l_n$   $\bar{Nu} = Nu_\infty (1 + 0,165 \frac{l_n}{L_k})$

25.02.10.

Температурный процесс при кипении жидкости.



$q$  - удельный тепловой поток, -  
 $d$  - диаметр теплообменника, -  
 $t_w$  -  $t^\circ\text{ра}$  W  
 $t_k$  -  $t^\circ\text{ра}$  охлаждающей жидкости  
 $\Delta t = t_w - t_k$

- 1-слабый нагрев поверхности. Перемешивание катехолх слоев с холодными
- 2-пузырьковое кипение

$q_{кр1}$  - max значение  $q$  - line кризиса точка

3-переходный участок

$$q_{кр2} < q_{кр1}$$

4-участок бурного кипения

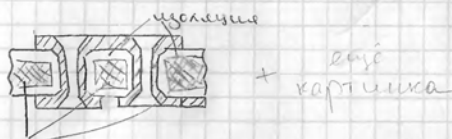
Δ/H<sub>2</sub>O:  $q_{кр1} = 900 \text{ кВт/м}^2$ ;  
 $\alpha_{кр} = 30 \text{ кВт/м}^2\text{К}$

$$\alpha = C \cdot q^{2/3}$$

для H<sub>2</sub>O:  $\alpha = \frac{0,43 q^{0,15} \cdot q^{2/3}}{1 - 4,5 \cdot 10^{-8} \cdot p}$

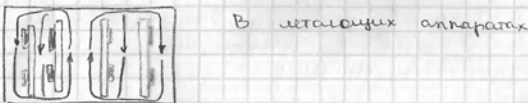
Метод охлаждения ЭА.

- Кондуктивные средства охлаждения.

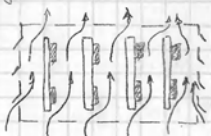


(конвекция, излучение тепла, теплопроводность)

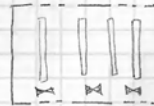
- Естественная воздушная охлаждение в герметизированном корпусе



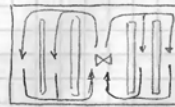
- естеств. - " - " в герметизированном корпусе (часто используется)



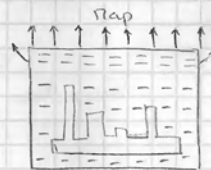
Принудительная система охлаждения в герметизированном корпусе



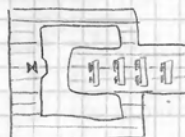
Принудит. система охлажд. в герметизированном корпусе



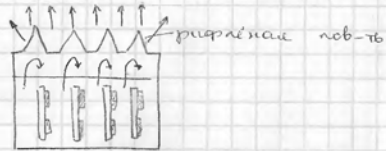
Жидкостная система охлаждения (естественная)



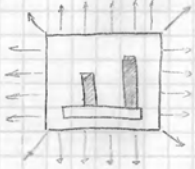
Принудительная жидкостная охлаждение



Испарительная система охлаждения



Охлаждение излучением



Выбор способа охлаждения ЭА

$K_3 = \frac{\sum_{i=1}^n V_i}{V}$ ;  $Q$ ;  $t_{\text{сmax}}$ ;  $t_{\text{сmin}}$ ;  $P_{\text{max}}$ ;  $P_{\text{min}}$ ;  $\alpha_i$ ;  $t$   
 коэф. заполнения аппарата

q-тепловой поток

$S_n$  - геометрическая тра нагретой э-та

t - время

$S_n$  - площадь теплообменника.

$q = K_p \cdot \frac{Q}{S_n}$ ;  $S_n = 2[L_1 L_2 + (L_1 + L_2)L_3 K_3]$

Сравнение способов охлаждения

естественная воздушная, излучением

коэф. теплообмена Вт/м<sup>2</sup>·°C

принудит. воздушная

2...10

естественная жидкостная

10...150

принудит. жидкостная

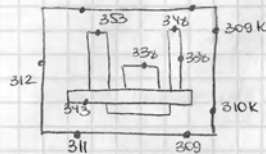
200...600

испарительная

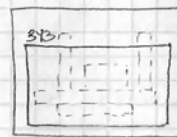
300...3000

500...120000

Анализ теплового режима блока ЭА при естественной конвективной теплообмене.



Тепловая модель



- явно нагретая зона  
 температурная тра нагретой поверхности корпуса

1 этап: определение среднесплошной  $t_{\text{пр}}$  при корпусе  $t_{\text{к}}$ .

2 : среднесплошная тра нагретой зоны  $t_{\text{кз}}$

3 : тра пов-ти радиоз-та, кот. наиболее подвержена к  $t_{\text{пр}}$ .

24.02.10.

①: Определим  $q_{\text{к}}$ ,  $q_{\text{к}} = \frac{P_0}{S_{\text{к}}}$

$S_{\text{к}} = 2(L_1 L_2 + L_1 L_3 + L_2 L_3)$

2. Задаемся  $\Delta t_{\text{к}}$

3. Определим  $\alpha_{\text{нi}}$

$$\alpha_{\text{нi}} = \frac{\epsilon_i \cdot 5,67 \left[ \left( \frac{t_0 + \Delta t_{\text{к}} + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{t_0 + 273}{100} \right)^4 \right]}{\Delta t_{\text{к}}}$$

4.  $\Delta / t_{\text{м}} = t_0 + 0,5 \Delta t_{\text{к}}$  рассчитываем коэф. Прандтля.

$Gr_{\text{мi}} = Pr_{\text{м}} g$

5. Определим число Прандтля

6. Определим число Рейнольдса газа (плотности) по условиям:

7. Определим коэф. теплообмена  $\alpha_{\text{нi}}$  с каждой пов-ти корпуса.

8. Определим тепловую проводимость в слое-ме корпус-среда.

9. Определим прогрев корпуса блока в первом приближении.

10. Определим процент ошибки расчета. (если  $> 10\%$  → задаемся новыми значениями перегрева корпуса и производим новый расчет).

$t_{\text{к}} = t_0 + \Delta t_{\text{к}}$

②: Определим среднесплошную температуру нагретой зоны  $t_{\text{кз}}$ .

1. Определим  $q_{\text{кз}}$

2. Задаемся  $\Delta t_{\text{з}}$

3. Определим  $\alpha_{\text{нi}}$

4.  $\Delta / t_{\text{м}} = t_{\text{к}} + t_0 + 0,5 \Delta t_{\text{з}}$  и определителем радиуса  $h_0$  рассчитываем коэф. Прандтля

5. Определим число Прандтля

6. Определим коэф. конвективного теплообмена м/у нагретой зоной и корпусом  $\alpha /$  каждой пов-ти.

9. Определим ошибку расчета

10. Определим  $t_{\text{пр}}$  нагретой ...

③: Определим  $t_{\text{пр}}$  перегрева корпуса э-та (микроэлемента)

1. Определим эквивалентный коэф. теплопроводности воздуха

2. Определим эквивалентный радиус ...

5. Определим  $t_{\text{пр}}$  пов-ти корпуса э-та (микроэлемента)

$t_{\text{вс}} = t_0 + \Delta t_{\text{вс}}$

Стационарный тепловой режим аппарата при принудительном воздушном охлаждении.

Исп. исходные данные:  $Q_D$ ,  $\eta$  и  $c$  (м/с)

Шаг 1: Расчет коэф-ов теплоотдачи.

1. Определение площади свободной сечения канала между модулями.
2. Расчеты эквивалентного диаметра канала.
3. Определение режима течения воздуха в сечении х канала.
4. Определение  $t_{\text{ж}}$  воздуха в сечении х канала.
5. Расчеты коэф-ов теплоотдачи.

Шаг 2: Расчет  $t_{\text{ж}}$  при пав-ти ЭЭ.

см. всё в м-ре [2].

1.03.10.

Тепловая решетка моделируется стойки с принудительной вентиляцией



28

Возможны вытесная и проточно-вытесная вентиляция.

Определяется размер сечения вертикального канала.

Задача: определить требуемый расход воздуха обеспечения нормативного режима.

Вертик. канал:  $L_x = 2L_z + b_z$

$$\Delta t_{\text{ген}} = t_{\text{ж}} - t_0$$

$$V_{\text{возд}} = V_x - \frac{V_{\text{ген}}}{L_z L_y}, \quad \alpha_{\text{ик}} = \frac{Q_D}{\Delta t_{\text{ген}} S_x}$$

(м-ра [2]).

Расчитывается температура Куттеса, Рейнольдса.

Термоэ-ое охлаждение.

Эффект Пельтье:

$$Q_n = \pm \Pi I$$

Если через спай 2х э-тов, то он будет нагреваться или охлаждаться - при течения - или тока, (туда или обратно)

$\Pi$  - коэф. Пельтье.  
I - ток.

Эффект Зеебека:

$$E = \pm \mu \Delta T, \quad \Delta T = T - T_0$$

Если спай 2х разнородных материалов нагревать/охлаждать  $\rightarrow \pm \Delta T$  на концах

29

Эффект Томпсона

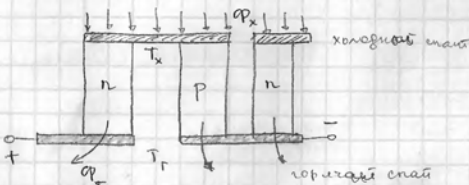
$$Q_T = \pm k_T I \Delta T$$

Если в однородном материале Э градиент  $t^{\circ}$ , то на сторонах материала, I-ток градиенту  $t^{\circ}$  величина теплового потока (при направлении тока через материал)

Тер. связь между коэф-ми:

$$\Pi = \mu T, \quad \mu = \mu_T - \mu_0$$

Термоэ. батареи:



$$Q_n = Q_x + Q_p + Q_0$$

наблюдается в нагретом спайе (ток через R)

$$Q_T = \sigma_T (T_T - T_x) = \sigma_T \Delta T$$

$$\sigma_T = (\lambda_p A_p + \lambda_n A_n) / l$$

При  $A_p = A_n = A$  и  $\lambda_p \approx \lambda_n = \lambda$ ,  $\sigma_T = 2\lambda A / l$

$$Q_0 = 0.5 I^2 R \quad R = 2l\rho/A \quad Q_p = \mu I T_x$$

$$Q_x = \mu I T_x - 0.5 I^2 R - \sigma_T \Delta T$$

$$Z = \mu^2 \sigma_T / \lambda$$

- добротность

$$\eta = \frac{Q_x}{Q} = \frac{Q_x}{\mu I} = \frac{Q_x}{(I R + \mu \sigma_T) I}$$

30

Фотоника:

- вытеснительная структура
- отсутствие механических контактов
- бесшумность
- надежность
- миниатюрность.

Недостатки:

- низкий КПД
- высокие токи питания при малых напряжениях.

Тепловые трубки



в космической аппаратуре

Эффективность зависит от св-в рабочей жидкости:  $t^{\circ}$  испарения, пав-ного напряжения, плотности, вязкости.

низкость материал. стенок трубы

низкая амплитуда

металлическая спай

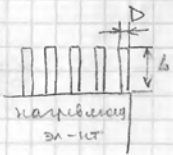
вода

31

Классификация тепловых труб.

- По назначению: прямые и изогнутые; трансформационные тепловых потоков; термомониторинг; термостатирование.
- По геометрии:
  - хризотимы (0...200K), микроТМ (200...550K), среднеконтурные (550...750K), высококонтурные (свыше 750K), сверхвысокоТМ (свыше 1000K)
- По составу теплоносителя: однокомпонентный, многокомпонентный, газодинамический.
- По типу работ: непрерывные, с пуском и выключением.
- По конструкции:
  - вакуумные, с пуском и выключением.

Задача 1: КПД



Дано:  $n$ ;  $D = 1,2 \text{ мм}$ ;  $L = 1 \text{ м}$   
 $S_0 = 110 \text{ см}^2$ ;  $\alpha = \alpha_0 = 20 \text{ Вт/м}^2\text{К}$   
 $\lambda = 400 \text{ Вт/мК}$

Определить: число преобразователей  $Q_n$  - мощность, рассеиваемая на входе преобразователя.

$Q_0$  - мощность, рассеиваемая на входе  $S_0$

$Q_1$  - мощность, рассеиваемая на выходе  $S_1$ , с обеих сторон и преобразователя.

$$S_1 = S_0 - n\pi \frac{D^2}{4}$$

$$\Delta t = t_0 - t_c, \quad Q_0 = \alpha_0 \Delta t S_0$$

$$Q_1 = \alpha \Delta t (S_0 - n\pi \frac{D^2}{4})$$

$$Q_n = n \Delta t \lambda S_n \frac{thbl'}{l}, \quad l' = \text{длина преобразователя с учетом выноса торца.}$$

$$l = \frac{L}{n}, \quad l' = L + \frac{S_n}{P}$$

$$\frac{Q_n + Q_1}{Q_0} = 1 + n \left( \frac{\lambda S_n}{\alpha_0 S_0} \frac{thbl'}{l} - \frac{\pi D^2}{4 S_0} \right) \Rightarrow n = ?$$

Задача 2:

Дано: конструктивная РЭА:  $\Delta T_{3, \text{кон}} = 20 \text{ К}$ ;  
 размеры нагревательной зоны  
 $L_1 \times L_2 \times L_3 = 0,3 \times 0,35 \times 0,22 \text{ м}$ ,  $k_{\text{кан}} = 0,4$   
 $Q = 350 \text{ Вт}$ ;  $t_0 = 60^\circ \text{C}$ ,  $t_{\text{ex}} = 60^\circ \text{C}$

Определить: V-образный канал воздуха конструктивной РЭА;

1. Определить коэффициент теплоотдачи РЭА и его переоборудование.

$$k_0 = H \cdot V^{1/3} = 0,22 (23 \cdot 10^{-3})^{1/3} = 0,77$$

$$k_{\text{кан}} = L_1/L_2 = 0,857$$

2. Рассчитываем  $S$  ребра КЗ:

$$S_3 = V^{2/3} \left( \frac{2}{k_0} + 4k_{\text{кан}} k_0^{0,5} \right) = 0,323 \text{ м}^2$$

3. Определить удельную тепловую нагрузку с ребра КЗ:

$$q_3 = Q/S_3 = 1083 \text{ Вт/м}^2$$

4. Задача 2: Визуально-тепловые характеристики

V-образный канал воздуха  $q_{v_i}$ ;

$$q_{v_1} = 23 \text{ Вт/м}^2$$

$$q_{v_2} = 46 \text{ Вт/м}^2$$

$$q_{v_3} = 100 \text{ Вт/м}^2$$

5. Рассчитываем удельную V-образную нагрузку на квадрат поверхности в РЭА мощностью при известных значениях  $q_{v_i}$  по  $q_{v_i} = Q_{v_i}/Q$ :

$$q_{v_1} = 62,8 \text{ Вт/кВт}^2$$

$$q_{v_2} = 131,4 \text{ Вт/кВт}^2$$

$$q_{v_3} = 285,7 \text{ Вт/кВт}^2$$

6. По графику  $\delta$   $\Delta T_{\text{ex}} = 0$  и  $q_3 = 1083 \text{ Вт/м}^2$  находим:  $\Delta T_{S_1} = 36 \text{ К}$ ;  $\Delta T_{S_2} = 21 \text{ К}$ ;  $\Delta T_{S_3} = 12 \text{ К}$

7. Определить поправку, учитывающую форму аппарата

$$P_3^k = \frac{0,86 + 14 k_{\text{кан}}}{0,98} = 0,98$$

$$P_3 = \frac{0,98 \cdot 36 = 35,3 \text{ К}}{\Delta T_3}$$

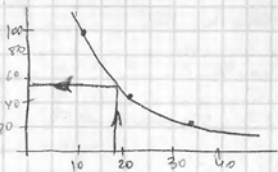
8. С учетом поправки вычислим значения:

$$\Delta T_{S_1} = 0,98 \cdot 36 = 35,3 \text{ К};$$

$$\Delta T_{S_2} = 0,98 \cdot 21 = 20,6 \text{ К}$$

$$\Delta T_{S_3} = 0,98 \cdot 12 = 11,8 \text{ К}.$$

9. Строим график  $q_{v_i} = f(\Delta T_3)$



10. По графику с учетом поправки  $\delta$  значения  $\Delta T_3 = 0,9 T_{\text{кон}} = 0,9 \cdot 20 = 18 \text{ К}$   
 $\Rightarrow$  искомый расход воздуха:  $q_v = 55 \text{ Вт/м}^2$

Задача 3.

Применяется для РЭА расположенная в интермодульном отсеке самолета. Тепловая мощность в условиях конвекции на стороне  $Q_{\text{кв}} = 200 \text{ Вт}$ . Какова будет эта мощность на поверхности при снижении давления в 1,2 раза?

1. Известно, что  $\delta$  уст. режим:

$$\alpha_{\text{кр}} = \alpha_{\text{кв}} \left( \frac{P}{P_0} \right)^2$$

2. В уст. режим теплоотдачи  $n = 1/4 \Rightarrow$ :

$$\alpha_{\text{кр}} = \alpha_{\text{кв}} \left( \frac{P}{1,2 \cdot P} \right)^2$$

3. Т.к.  $Q_{\text{кв}} = \alpha_{\text{кв}} \Delta T S$  и  $Q_{\text{кр}} = \alpha_{\text{кр}} \Delta T S$ , то эквивалентно:

$$Q_{\text{кр}} = 0,91 Q_{\text{кв}} = 0,91 \cdot 200 = 182 \text{ Вт}$$

Задача 4.

Дано: блок из 10 труб. На каждой трубе 240 мм (число ребер  $i = 8$ , шаг  $l = 15 \text{ мм}$ ); диаметр  $l_{\text{кр}} = 9,8 \text{ мм}$ ;  $l_{\text{ж}} = 6,5 \text{ мм}$ ;  $l_{\text{ж}} = 2,2 \text{ мм}$ ; шаг  $\Delta n = 5 \text{ мм}$ .

Давление воздуха  $l_{\text{ж}} = 174 \text{ мм}$  и шаг  $l_{\text{ж}} = 210 \text{ мм}$ ; температура  $t_0 = 20^\circ \text{C}$ ;

Давление воздуха блока:

$$L_{\text{кр}} = 174 \text{ мм}; \quad L_{\text{ж}} = 210 \text{ мм}; \quad l_{\text{ж}} = 210 \text{ мм};$$

$$k_{\text{кан}} = 0,25; \quad k_{\text{ж}} = 0,18; \quad l_{\text{кр}} = 174 \text{ мм};$$

$$l_{\text{ж}} = 210 \text{ мм}; \quad l_{\text{ж}} = 195 \text{ мм};$$

$$\text{мощность } Q_{\text{ж}} \text{ в трубе } Q_{\text{ж}} = 40 \text{ Вт}$$

Мощность одной УЛ:  $Q_{uc} = 16,7 \cdot 10^{-3}$  Вт  
 Плата из стеклотекстолита  $\gamma = 1,2$  мм,  $t_{uc, \text{гор}} < 50^\circ\text{C}$ ,  
 $S_{uc} = 17,2 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>.

Произведем приближен. расчет тепловой резистивности диода.

4.03.30.

1. Ср. скорость движения воздуха.

$$v_a = \frac{Q}{\rho L_{\text{кор}} (1 - k_{\text{кан}})} = 0,288 \text{ м/с} \quad (\rho = 1,099)$$

2. Удельная тепловая потоки с корпуса УЛ:

$$q_{uc} = \frac{Q_{uc}}{S_{uc}} = 97 \text{ Вт/м}^2$$

3. Перепад воздуха в зоне i-ой УЛ:

$$\Delta t_{ei} = \frac{\sum Q_{uc}}{C_{\text{в}} v_a} = 0,125^\circ\text{C}$$

$C_{\text{в}}$  — удельная теплоемкость воздуха при  $t = 50^\circ\text{C}$ .

$\sum Q_{uc} = 5(16,7 \cdot 10^{-3})$  — раскладываем мощность в количестве параллельных путей УЛ

4. Перепад тем-ты УЛ:  $\Delta t_{uei} = \Delta t_{ei} + \frac{q_{uc}}{\alpha} = 13,8^\circ\text{C}$   
 $\alpha = 7 \text{ Вт/(м}^2\text{К)}$  — ср. кэф. теплообмена

5. Средний перепад воздуха в диоде

$$\Delta t_0 = \frac{q_{uc}}{2\alpha C_{\text{в}}} \approx 2^\circ\text{C}$$

6. Ср. тем-та воздуха в диоде:  $t_{cp} = t_0 + \Delta t_0 = 22^\circ\text{C}$

7. Тем-та воздуха на входе у диода:

$$t_{\text{вх}} = t_0 + 2\Delta t_0 = 24^\circ\text{C}$$

8. Тем-та тем-ты УЛ:  $t_{uei} = t_0 + \Delta t_{uei} = 33,8^\circ\text{C}$

9. Тем-та воздуха в зоне расположения УЛ:

$$t_{ei} = t_0 + \Delta t_{ei} = 20,125^\circ\text{C}$$

10. Макс-ая тем-та воздуха в диоде.

$$t_{0 \text{ max}} = t_0 + \frac{q_{uc}}{C_{\text{в}}} = 20 + \frac{40}{0,01 \cdot 1099} \approx 20 + 3,64 = 24^\circ\text{C}$$

Рассчитанная тем-та тем-ты УЛ  $33,8^\circ\text{C}$ , что не превышает макс-а заданного значения  $50^\circ\text{C}$ .

Вопрос: заданная влажность воздуха  $G = 0,014$  обеспечит нормальный тем-т тепловой резистивности диода.

Задача:

Дано: шкаф ЭВМ с размерами  $K = 2000$  мм,  $B = 650$  мм,  $H = 600$  мм и с тепловой мощностью  $Q = 700$  Вт.  $t_0 = 35^\circ\text{C}$ ,  $t_{\text{вх, гор}} = 50^\circ\text{C}$ . Вентилятор в шкафу размещен вертикально.

Определить: достаточно ли естеств. охлаждение в шкафу? Или — рассчитать ест-ную скорость (для расчета скорости воздуха, мощность вентилятора). Принять при этом среднюю скорость потерь вентиляцией — установив  $P = 800$  Па (Н/м<sup>2</sup>) скорость воздуха в воздухопроводе

1. С охлаждающей тем-ты шкафа:

$$S_{\text{ш}} = 2AB + 2(A+B)K = 5,77 \text{ м}^2$$

2. Удельная тепловая потоки

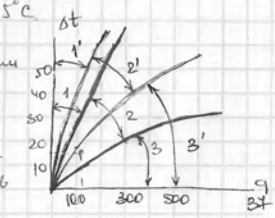
$$q = \frac{Q}{S_{\text{ш}}} = 120 \text{ Вт/м}^2$$

3. Перепад тем-ты:

$$\Delta t = t_3 + t_0 = 50 - 35 = 15^\circ\text{C}$$

4. По графику устанавливаем необходимость вентиляции принудит. вентиляцией

— вертикальные разности тем-ты в шкафу  
 — горизонтальные разности тем-ты в шкафу



1 и 1' — охлаждение непосредственно  
 2 и 2' — необходимость естеств. вентиляции  
 3 и 3' — необходимость использовать принудит. вентиляцию.

5. Выбираем ориентир — влажность вентиляцией.

6. Тем-та воздухопроводе у шкафа воздуха (шкафной)

$$t_{\text{вх}} = 0,5(t_p + t_0) = 31,5 \text{ К}$$

7. Объемный расход воздуха  $Q_{\text{вх}}$  охлаждения.

$$Q_{\text{вх}} = \frac{0,26 Q}{C_{\text{в}} \rho_{\text{в}} (t_{\text{вх}} - t_0)} = 287 \text{ м}^3/\text{с}$$

8. Площадь сечения воздухопровода:

$$S_0 = \frac{Q_{\text{вх}}}{V \cdot 3600} = 0,006643 \text{ м}^2$$

9. Эквивалентная длина воздухопровода:

$$d_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{4 S_0}{\pi}} = 9,2 \text{ см}$$

10. Мощность электродвигателя:

$$N = \frac{Q_{\text{вх}} P_{\text{вх}}}{3600 \cdot 1020} = 1,1 \text{ кВт}$$

11. Выбираем тип вентилятора по каталогу.

Защита конструкции ЭВМ от механических воздействий.

Увеличь требования к ЭВМ

Возрастная группа	1960	1965	1970	1975
Выборочная нагрузка, Гц	5 ÷ 60	5 ÷ 1000	5 ÷ 2500	5 ÷ 5000
Ускорение, g	7,5	10	15	40

элементы воздействия: вибрация, удар, ин. ускорение, акустич. шум, влажность

характеристики:

$F(t)$  амплитудные воздействия

$\bar{z}(t)$  вибрационные

$\dot{V}(t) = d\bar{z}/dt$  скорость

$\ddot{w}(t) = d^2\bar{z}/dt^2$  ускорение

$\bar{v}(t) = F(t)/S$  удельное давление

$\bar{H}(t)$  мощность

$N(t)$  мощность

Все эти параметры хар-се: амплитудой, видом ф-е времени зависимости, напр  $P(t) = P_m \sin(\omega t + \varphi)$ , спектром, напр, расщеп. формул:  $P(t) = \sum_{n=0}^{\infty} c_n P_n(t)$ , векторами.

### Вибрация

это явление т. или механич. колебаний, при кот. происходит колебание хар-ки или ее скалярных величин.

$$w(t) = \frac{dV(t)}{dt} = \frac{d^2z(t)}{dt^2}$$

вибрация - ускорение - скорость перемещения

$$z(t) = z_m \sin \omega t = z_m \sin 2\pi f t$$

амплитудное значение

тогда  $v(t) = dz(t)/dt = z_m \omega \cos \omega t = z_m 2\pi f \cos 2\pi f t$

$$v_m = z_m 2\pi f$$

амплитудное значение скорости

$$w(t) = d^2z/dt^2 = -z_m \omega^2 \sin \omega t = -z_m (2\pi f)^2 \sin 2\pi f t$$

$$w_m = z_m \omega^2 = z_m (2\pi f)^2$$

$$g = 9,8 \text{ м/с}^2$$

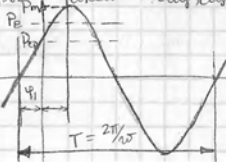
$$j = w_m/g = z_m (2\pi f)^2 / 9,8 \approx 4z_m f^2$$

— перегрузка

Сурьезная, — вибрация, — детерминированные — гармонич. (можно описать)

$$P(t) = P_m \sin(\omega t + \varphi)$$

В связи сурьезной вибрации (по параметрам) параметрами: 1.  $P_m$  — амплитуда 2.  $f$  — частота 3.  $\varphi$  — фаза 4.  $P_c$  — ср. квадратич. значение колебаний.



$$P_c = \left[ \frac{1}{T} \int_0^T P^2(t) dt \right]^{1/2}$$

5.  $P_{cp}$  — среднее значение

$$P_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T |P(t)| dt$$

6. фаза вибрации  $\varphi$

7. коэф. гармонич.:  $k_f = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n P_i^2}}{P_m}$

8. полсе разлет ( $f_c - f_n$ )

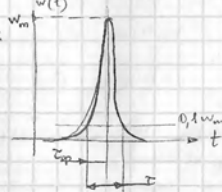
9/ гармонич. (чисто) гармонич:

$$P_c = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} P_{cp} = \frac{1}{\sqrt{2}} P_m$$

Удар.

одно- или многократное механич. воздействие.

описывается:



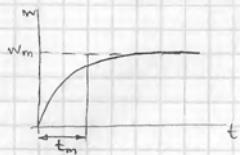
Параметры:

1. Пиковые значения ускорения  $w_m$ , скорость  $v_m$ , перемещение  $z_m$ , деформация  $\epsilon_m$
2. Длительность ударного воздействия  $\tau$
3. Длительность фронта  $\tau_{фр}$  (или  $\sigma$  10% до 90%  $w_m$ )

### 4. Увеличение ударного ускорения

$$I_w = \int_0^T w(t) dt$$

элементарное ускорение.



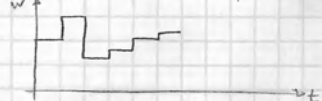
Параметры: максимальное знач. ускорения  $w_m$ , время действия макс. ускорения или время разгона  $t_m$ .

При движении о поверхности R, от-та контактирующей с ней, ускорение  $w = \frac{v^2}{Rz}$

При этом на тело действует сила тяжести и сила инерции  $P = mw(t)$ .

$$G = mg \text{ и сила инерции } P = mw(t)$$

В ТУ на аппаратуру задается закон увеличения  $w(t)$ , кривые:



Алгоритм. нулев.

Параметры:

42 ударное значение  $P_m$ . ф/гармонич. зв. коэф.

$$P_m = \omega c_0 z_m A_m \text{ [Па]}, \quad c_0 = 342 \text{ м/с} \text{ при норм. атм. давлении и } z_m = 1,22 \text{ м/м}^2$$

$A_m$  — амплитуда колеб. части.

2. Усиливатель звука

$$I = \frac{w_a}{g_{cp}}$$

Поровое мин. звуковое давление  $P_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Па}$

3. Уровень усиления звукового давления

$$L = 20 \lg \frac{P}{P_0} = 20 \lg \frac{P}{2 \cdot 10^{-5}} \text{ дБ}$$

Максимальное зв. давление:

$$P_{max} = 2 \cdot 10^5 \text{ Па или } 200 \text{ дБ.}$$

механические (несущая) контактные ЭА.

Параметры:

масса:  $m = \int \rho dV$ ,  $m = \rho V$  — однородный материал

$$m_e = \frac{m}{l} = \frac{\rho V}{l} = \rho S$$

масса, равномерно распределенная вдоль стержня (он однороден)

$$m_g = \frac{m}{S} = \frac{\rho V}{S} = \rho h$$

масса, — — — — — вдоль пластины

жёсткость конструкции определяется его формой с-ва.

Относительная деформация стержня при растяжении - сжатии:

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l}$$

$\Delta l$  - изменение длины стержня при его деформации.

Упругость - с-во тела восстанавливать свою форму.

Остаточная деформация - величина изменения  $l$  конструктивного эл-та.

Механическое напряжение:  $\sigma = \frac{F}{S}$

Закон Гука: в пределах упругих деформаций:  $\sigma = E\epsilon$ ,  
 $E$  - модуль Юнга, модуль упругости 1-го рода.

$$\Delta l = \frac{Fl}{ES}$$

$F$  - сила

$l$  - длина

$S$   $\Delta l$  - изменение размера  $l$ .

$ES$  - жесткость стержня при растяжении / сжатии.

$$k_{p.e} = \frac{F}{\Delta l} = \frac{ES}{l}$$

коэф. жесткости при растяжении / сжатии

$c = \frac{1}{k}$  - податливость ( $k$  - коэф. жесткости)

Коэф. Пуассона:  $\mu = \frac{\Delta b/b}{\Delta l/l}$

44

$\Delta b$  - изменение поперечного размера

$\Delta l$  - изменение длины

$\mu$  / коэффициент материала  $\mu: 0,25 \dots 0,35$ .

Кроме деформаций растяжения - сжатия в конструкциях эл  $\exists$  деформации сдвига, кручения, изгиба.

$$R = \frac{EI}{l} \rightarrow \text{момент изгибающий}$$

$l$  - длина стержня

$I$  - момент инерции поперечного сечения

$EI$  - жесткость конструкции при изгибе

У стержней круглого сечения:  $I = \frac{\pi d^4}{64}$

прямоугольного:  $I = \frac{bh^3}{12}$

(изгиб по размеру  $h$ )

$k = \frac{F}{z}$  - коэф. податкости

$F$  - сила

$z$  - смещение конструкции эл-та при  $V$  буре деформации.

Внутреннее трение упругого эл-та (противостоит внешней силе)

$$F = kz + jz\dot{z}$$

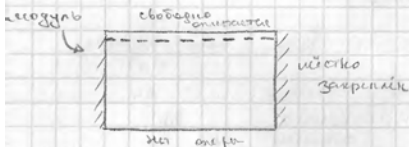
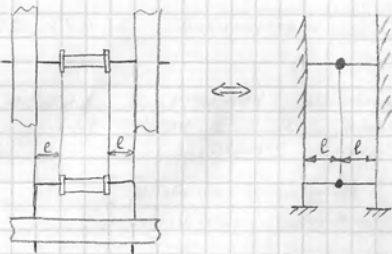
$k$  - коэф., зависящий от жесткой опоры.

$z$  - смещение

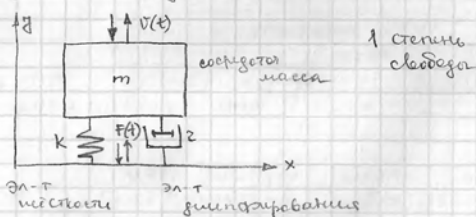
$j$  - угол между векторами действующей силы и направлением смещения конструкции.

45

Модели эл-ов конструкции ЭС



Модель с сосредоточенными параметрами

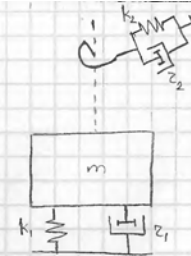


Модель с распределенными параметрами

Целое число степеней свободы - число координат, однозначно определяющих положение тела в пр-ва

46

2 степени свободы



Виды возмущающей деформации конструкции:

растяжение - сжатие  $\rightleftharpoons$

изгиб  $\updownarrow$

кручение  $\curvearrowright \curvearrowleft$

Виды заделки концов:  
 Абсолютно жесткая заделка  
 Шарнирное опирание  
 Плавкий шарнир

Методика расчета и анализа вибраций.

Принцип Даламбера:  $\Sigma$  внешних сил, действующих на элемент, находясь в равновесии, равно  $\Sigma$  реакций его эл-тов.

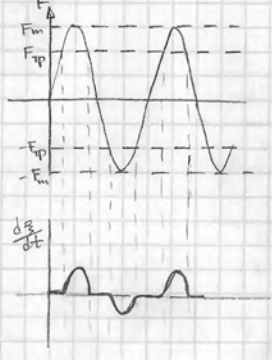
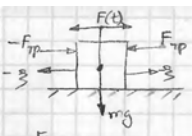
(сила) Ширину  $(\mu)$  массы:  $F_m = m\omega = m \frac{d^2 z}{dt^2}$

Реакция упругих эл-ов:  $F_j = k_j z_j = \frac{z_j}{c}$

Трение: сухое, вязкое и внутреннее.

Сухое трение возникает при контакте взаимодействующих элементов эл-та и основания  $\updownarrow$





Выше трение возникает при движении ш-та в подшипр. или муфтах сцеп.

$$F_{тр} = z\dot{v} = z \frac{dz}{dt}, \quad z - \text{коэф. тр.}$$

Внутр. тр. возникает из-за потерь в материале механ. элеме, протертости напале ш.

$$F_m + F_f + F_{тр} = F(t)$$

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} + z \frac{dz}{dt} + k z = F(t) \quad (*)$$

А. Свободные колебания системы,  $F(t) = 0$ . (еще только нар. муфта).

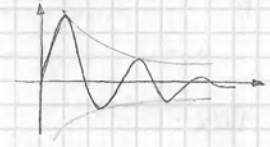
$$m \frac{d^2 z}{dt^2} + z \frac{dz}{dt} + k z = 0 \quad (1)$$

гimme на m и вбросим землю.

$$\frac{k}{m} = \omega_0^2 \Rightarrow \omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \text{собственная частота колебания}$$

$$\frac{z}{m} = z\delta \Rightarrow \delta = \frac{z}{2m} \quad \text{коэф. демпфирования}$$

Затухающие колеб. рыхее. механ. эле-мент гистерезисная



В. Вынужденные колебания сис-ем.

$$F(t) = F_m \sin(\omega t + \varphi)$$

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} + k z \frac{dz}{dt} + k z = F_m \sin(\omega t + \varphi) \quad (2)$$

$$z = \underbrace{A_0 e^{-\delta t}}_a \sin(\omega_0 t + \varphi_0) + \underbrace{A_0 \sin(\omega t + \varphi)}_{\text{колебания с частотой силы}}$$

при  $t \rightarrow \infty$  (a)  $\rightarrow 0$

$$A_0(\omega) = \frac{F_m}{k \sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right)^2 + 4\left(\frac{\delta}{\omega_0}\right)^2 \frac{\omega^2}{\omega_0^2}}}$$

$$\frac{F_m}{k} = A_{ст}, \quad F_m - \text{амплитуда внешней силы.}$$

$$\frac{\omega}{\omega_0} = j; \quad \beta = \frac{\delta}{\omega_0} \Rightarrow A_0(j) = \frac{A_{ст}}{\sqrt{(1-j^2)^2 + 4\beta^2 j^2}}$$

$$K_{г.г.} = \frac{A_0}{A_{ст}} = \frac{1}{\sqrt{(1-j^2)^2 + 4\beta^2 j^2}} \quad \text{коэф. густоты резонанса сис-ем.}$$

$$\text{Резонанс: } \omega = \omega_0$$

В этом случае  $\beta = 1$  и  $K_{г.г.} = Q$  - добротность механ. сис-ем.

$$K_{г.г.}|_{\beta=1} = \frac{1}{2\beta} = Q$$

$$\beta = \frac{\delta}{\omega_0} = \frac{z}{2\sqrt{mk}} = \frac{1}{2Q}; \quad z = \frac{\sqrt{mk}}{Q}, \quad Q = \frac{k}{\omega_0 z} =$$

$$= \frac{\omega_0 m}{z}; \quad \delta = \frac{\omega_0}{2Q}$$

$$\varphi = \arctg \frac{2\beta j}{1-j^2}$$

15.03.10.

Если в (\*) ввести замену:  $\frac{d^2 z}{dt^2}$  на  $\frac{dv}{dt}$ ,  $\frac{dz}{dt}$  на  $v$ ,  $z$  на  $\int v dt$ , то

$$m \frac{dv}{dt} + z v + \frac{1}{\omega_0} \int v dt = F(t) \quad \int \delta / \text{конда. контура}$$

г.е. будем иметь дифференциальное уравнение механ. сис-ем:

$$m \equiv L, \quad z \equiv R; \quad c \equiv C, \quad v \equiv i, \quad F(t) = U(t)$$

д/конда. контура имеет эквивалентные  $\frac{U(t)}{i} = z_{\Sigma} e^{j\varphi}$

модуль полного эквивалентного

$$z_{\Sigma} = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}$$

$$\text{tg } \varphi = \frac{X}{R} = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}, \quad X_2 - \text{реактивное эквив.}$$

НЗ=0 аналогично резонанс механ. сис-ем: (механ. элемент) колеб. сис-ем:

$$Z_m = \frac{F(t)}{V} = z + j x_m = z + j \left(\omega m - \frac{1}{\omega c}\right) = Z_m e^{j\varphi}$$

$$Z_m \text{ tg } \varphi = \frac{\omega m - \frac{1}{\omega c}}{z} = \frac{x_m}{z}$$

$$Z_m = \left| \frac{F(t)}{V} \right| = \sqrt{z^2 + x_m^2} = \sqrt{z^2 + \left(\omega m - \frac{1}{\omega c}\right)^2}$$

при  $\omega = \omega_0$ , тогда  $\omega m = \frac{1}{\omega_0 c}$ , реактив. зато  $\rightarrow 0$ ,  $Z_m = z$ .

Ан. индуктив.  $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L C}}$  да  $\omega_0 = \frac{1}{2\pi LC}$

$$\text{механ. индуктив: } \omega_m = V_a^2 z, \quad V_a = \frac{v_m}{\sqrt{2}}$$

Конструктивные ш-ты - размеры

$$\text{Полная масса: } m_0 = \frac{m}{c} = \frac{dV}{c} = \rho \frac{V}{c} = \rho S$$

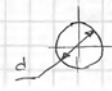
$$\text{Угловая жесткость: } k = \frac{EI}{\rho L^3}$$

- $\rho$  - коэф. зависящий от вида металла
- $c$  - длина
- $E$  - модуль упругости
- $I$  - момент инерции поперек сечения

$$\text{Критическая частота: } k_c = \frac{EI}{\rho L^3} \cdot \frac{1}{c}, \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} = \alpha \sqrt{\frac{EI}{\rho^2 m_0}} = \frac{\alpha}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho}}$$


еще размеры:

$$S = \frac{\pi d^2}{4}; \quad I = \frac{\pi d^4}{64}; \quad m_0 = \rho S = \rho \frac{\pi d^2}{4} L$$



своб. заезда хребтами

$$\omega_0 = \alpha \sqrt{\frac{EI}{\rho^2 m_0}} = \alpha \sqrt{\frac{EI}{\rho^2 \frac{\pi d^4}{64} \rho}} = \alpha \sqrt{\frac{E}{\rho}} \cdot \frac{d}{\rho^2}$$



$$\omega_0 = \alpha \sqrt{\frac{EI}{\rho^2 m_0}} = \alpha \sqrt{\frac{EI}{\rho^2 \frac{E b h^3}{12 \rho b h}}} = \alpha \sqrt{\frac{E}{\rho}} \cdot \frac{h}{\rho^2}$$

Конструктивная эк-нт- масса.

Минимум жесткости:  $D = \frac{E k^3}{12(1-\mu^2)}$

$\mu$  - коэффициент Пуассона  
 $k$  - толщина  
 $E$  - модуль упругости.

распредел. масса:  $m_s = \frac{m}{S} = \frac{\rho V}{S} = \rho \frac{abh}{ab} = \rho h$

своб. заезда хребтами:  $f_0 = \frac{k_x}{2\pi} \sqrt{\frac{D}{m_s}} = \frac{k_x}{2\pi} \sqrt{\frac{E k^3}{12(1-\mu^2) \rho h}}$

$$= \frac{k_x h}{4\sqrt{3}\pi} \sqrt{\frac{E}{(1-\mu^2)\rho}}$$

$k_x$  зависит от способа заделки краев пластины

При этом учитываю:

- 1) Если прогиб  $\leq$  поворота на краю пластины жестко зафиксирован, то край жестко зафиксирован.
- 2) Если прогиб и изгибающий момент на краю пластины = 0, то край свободен.

52

3) Если прогиб, момент и поворачивающ. сила на краю пластины = 0, то край свободный.

Прим. ортогональные коэф:  $k_x = k \sqrt{\alpha^2 + \beta \frac{\alpha^2}{\rho^2} + \gamma \frac{\alpha^4}{\rho^4}}$

$$f_0 = \frac{k_x}{2\pi a^2} \sqrt{\frac{Dab}{m}}$$

$$f_0 = \frac{\pi}{2a^2} [n^2 b^2 + m^2 a^2] \sqrt{\frac{Dab}{m}}$$

если пластина закреплена со всех сторон  $\rightarrow$  допустиме формулы как со свобод. заездом.

мин. значение своб. заезда:

$$f_{01} = \frac{\pi}{2} \left(\frac{b}{a}\right)^2 \sqrt{\frac{Dab}{m}}$$

Формула Шенкельса.

$$\frac{1}{F^2} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{f_{0i}^2}$$

F - своб. заезда хребт. всего диска

$f_{0i}$  - i-ого эк-та  
 $n$  - число эк-тов диска.

Приведение расчетной конструкции к расчетной.

- 1) Выбор сопрягаемых эк-тов (корпус с ЭПЭ - втулка - монтажная плата).
- 2) Выбор способа скл. эк-тов на стыках (корпус ЭПЭ - втулка: газосварка, СЗ

втулка - монтажная плата: пайка.

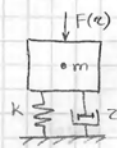
- 3) Выбор и параметры сопрягаемых материалов ( $\rho, E, \mu, \sigma_B; \sigma_T, \text{ТКР}$  и др)
- 4) Предварительный расчет массы и жесткости всех эк-тов.
- 5) Оценка уровня жесткости связей м/у эк-тов.
- 6) Определение жесткости системы введения конструктивных эк-тов.
- 7) Построение расчетных моделей с учетом пунктов 2, 4-6.
- 8) Определение динам. хар-к эк-тов, входных в динам. систему.
- 9) Оценка влияния изменений параметров конструкции, уровня деформации, мех. напряжений.
- 10) Составление расчетных схем с контрольными заделками.
- 11) Проверка об адекватности расчетной модели реальной конструкции.
- 12) При необходимости уточнить расчетную модель.

Определение коэф. динамичности конструкции.

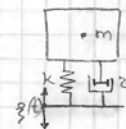
(г/взвешки механо. процесс)

54

Система безинерционности



Кинемат. безинерционности



коэф. динамичности:  $f_k = \frac{S_B}{z_{\sigma}} = \frac{S_B}{z_{\sigma}} = \frac{1}{\sqrt{(1-\mu^2)^2 + e^2 \mu^2}}$

$z_{\sigma} = \frac{F_0}{k}$

это динамич. система при безинерционности или инерционности груза.

$$f_k = \frac{S_B}{z_{\sigma}} \sqrt{\frac{1 + e^2 \mu^2}{(1-\mu^2)^2 + e^2 \mu^2}}$$

$z$  - амплитуда смещения основания

$\mu$  - коэф. демпфирования:  $\mu = \frac{f}{f_0}$  ← внеш. заезда заезда

$e$  - показатель затухания.

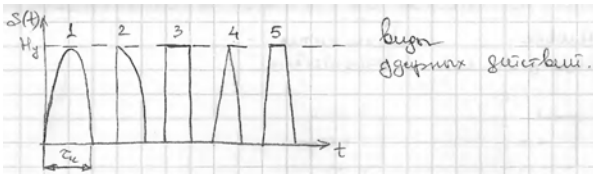
Длинные затухание:  $\Lambda = \frac{\pi z}{\sqrt{k m}}$

коэф. затухания:  $\delta = \frac{z}{2m}$

$$e = \frac{\Lambda}{\pi} = \frac{z}{\sqrt{k m}}$$

Расчет на гистерезис груза.

55



Виды  
электрических воздействий.

1. Длительная задержка электрического импульса  
 $\omega = \frac{\pi}{\tau}$

2. Косая нагрузка при ударе

г/прямоугол. импульса:  $f_y = 2 \sin \frac{\pi}{2j}$

г/треугол. :  $f_y = \frac{2j}{j^2-1} \cos \frac{\pi}{2j}$

3. Электрическое ускорение:  $w_y = H_y M_y$

4. Макс.-ое относительное перемещение

$Z_{max} = \frac{f_y H_y}{\omega_0}$

г/прямоугол. и импульса:  $Z_{max} = \frac{2 H_y}{\omega_0} \sin \frac{\pi}{2j}$

г/треугол. импульса:  $Z_{max} = \frac{H_y}{\omega_0} \frac{2j}{j^2-1} \cos \frac{\pi}{2j}$

5. Проверка условий ударостойкости.

г/ЭДЭ:  $w_y < w_{гон}$

г/максим.:  $Z_{max} < \delta_{гон} l^2$

г/ПП с ЭДЭ:  $Z_{max} < 0,0036$

г/амортизирова. энер.:  $Z_{max} < Z_{св}$

5б Частный случай: падение груза на тв.

нов-ть. Определить перегрузки.

1. Относительн. скорость падения осуждения.

$V_0 = V_y + V_{ст}$

$V_y = \sqrt{2gh}$

$V_{ст} = V_y k_0$ ,  $k_0$  зависит от природы осужд. материала.

2. Действующее ускорение:  $w_n = 2\pi V_0 f_0$

18.03.10.

Защита от резонанса

1. Увеличение амплитуды перегрузки за счёт введения демпфирования

2. Свободная работа подвижной системы заканчивается в более высокой частоте (только за счёт ↑ жесткости)

3. Введение амортизаторов - уменьшение собственной частоты системы. сис-ма амортизаторов - сис-ма упругих опор.

В связи с введ. амортизир. сис-ма - сис-ма с 6 степенями свободы.

стал определяются стат. перегрузки амортизирова. сис-ма

57

Правило размещения амортизаторов: центр тяжести и центр жесткости (т. вращения или регуляризов. амортизир. ш.) на одной вертикали

Свойства жесткие структура (статического):

$R_0$

$x_0$

$y_0$

$N$

$f, f_0$

$w$  - ускорение

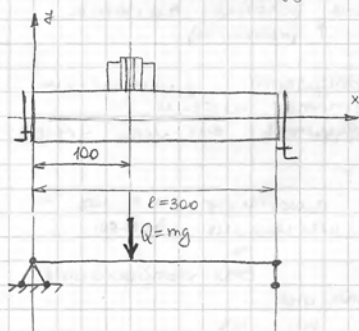
$M$  - коэф. динамичности

$z_0$  - относительное смещение блока при вибрации

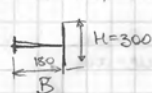
Если  $k \ll m(2\pi f)^2$ ,  $z = 0,25 \frac{w}{f^2}$ ,  $\lambda = (1-\mu) 100\%$   
и т.д.

Задача №1:

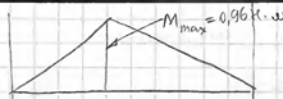
Дано: масса, масса блока питания  $m = 1,5$  кг. материал массы - стальной лист толщиной  $d = 1,0 \pm 0,2$  мм с  $E = 2,1 \cdot 10^{11}$  Па,  $\sigma_T = 350$  МПа. Крайовременная вибрационная нагрузка 40... 520 Гц с перегрузкой  $j = 10 \pm 3g$ .



Определить: границы диапазона рабочей частоты и напряжения в массе



58



1.  $I_0 = \frac{B\delta^3 + 2H^3\delta}{12} = 4,5 \cdot 10^9 \text{ м}^4$

2.  $W_0 = \frac{B\delta^3 + 2H^3\delta}{6H} = 0,3H^2\delta \text{ м}^3 = 3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$

3. Масса имеет закрепленную матрицу. А/этого случая закрепление свобод. частоты массы:

$\omega_0 = \frac{4,73^2}{l^2} \sqrt{\frac{EI}{q}}$

$q'$  - эквивал. распредел. нагрузка, учитывающ. влияние массы блока питания на свобод. частоту массы

$q' = \frac{\alpha}{l} p^2(x) m$

$\alpha$  - коэф. учитывающий жестким закрепление,  $\alpha = 0,75$

$p(x)$  - параметр, определяющий влияние положения центра тяжести массы на эквив. распредел. нагрузку. Далее, определяем координ.  $x_0$  на свобод. частоту массы. Здесь  $p(x) = 1$ .

$q' = 3,95 \text{ кг/м}$ ;  $\omega_0 = 3,82 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$ ,  $f_0 = 602 \text{ Гц}$ .

4.  $M = \frac{j_0}{f_0 - f_0} = 6,9$

5. Амплитуда смещ.  $Mg = j_{ulmax} j = 6,9 \cdot 0,96 \cdot 10 = 66,2 \text{ кг.м}$

59

6. Ср. значение сигнала напряжения:

$$\bar{S}_g = \frac{U_g}{W_c} = 230 \text{ мПа}$$

$$7. \frac{\partial S_g}{\partial S} = \frac{\mu U_{max} j}{3 \cdot 10^{-4} S^2}$$

$$8. \frac{\partial S_g}{\partial j} = \frac{\partial}{\partial j} \left[ \frac{\mu U_{max} j}{3 \cdot 10^{-4} S^2} \right]$$

9. СКО по d и j:

$$S_g(d) = \mu U_{max} j \frac{\Delta d}{3} = 0,014 \text{ мПа}$$

$$S_g(j) = 22,08$$

10. Полное значение СКО

$$S_g = \sqrt{S_g^2(d) + S_g^2(j)} = 22,1$$

11. Допустим. диапазон разброса сигнала напряжения

$$S_{dmax} = 230 + 22,1 = 252,1 \text{ мПа}$$

$$S_{dmin} = 230 - 22,1 = 207,9 \text{ мПа}$$

Проблема: выработка коэффициентов транзистор. сигнал. напряжения маня

Задача 10.

Дано: блок РДЖ  $\mu = 16 \text{ кВ}$ ,  $j = 1,2 \text{ г}$   
 $f = 15 \text{ Гц}$ ,  $k_z = 486 \text{ Н/мм}$ ;  $l_{\Sigma \text{ан}} = 2 \text{ мм}$

? : гидростатический блок

Для жесткого соединения  $k_z \ll 10^2 \text{ м} (2\pi f)^2$

$$\text{минимум: } \xi_{\Sigma \text{ан}}^{\max} = \frac{0,25 j}{f^2}$$

60

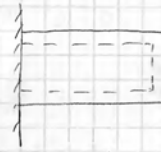
$$486 \ll 14496 \text{ Н/мм} \rightarrow$$

$$\xi_{\Sigma \text{ан}}^{\max} = 1,308 \text{ мм} < 2 \text{ мм (узелов)}$$

$\int \xi_{\Sigma \text{ан}} > \xi_{\Sigma \text{ан}}^{\max} \Rightarrow$  Проблем: блок работает нормально

Задача 11.

Дано: пластина толщиной  $e = 150 \times 140 \times 1,5 \text{ мм}$ .  
 имеет равномерную нагрузку  $80 \text{ Г}$



? : расчет сдв. жест. пластины.

$$f_0 = \frac{k_m k_n B h \cdot 10^4}{a^2}$$

$B$  - сдвига жесткость  
 $a$  - диаметр

гидростатическая  $k_m = 0,54$   
 г. жесткость:  $B = 56$

$$\text{т.к. } a/b \approx 1,0 \text{ , то } k_n = \sqrt{1 + \frac{Q_2}{Q_1}}$$

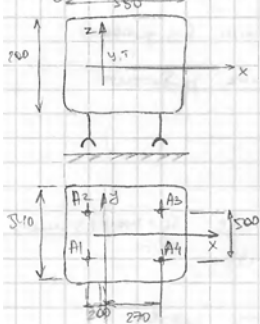
$$Q_2 = 80 \text{ Г}$$

$$Q_1 = 44 \text{ Г}$$

$$\therefore f_0 = 121 \text{ Гц}$$

61

Задача 12.



Дано: блок  $\Sigma \text{Вн}$  с  $\mu = 40 \text{ кВ}$  и  $540 \times 200 \times 580 \text{ мм}$   
 гидростатическая  $f \dots 50 \text{ Гц}$ .  
 ? : надо рассчитать и подобрать амортизатор.

1 Определ. стат. нагрузки на амортизатор.  $P_i$

$$P_1 + P_2 + P_3 + P_4 = 392$$

$$(P_3 + P_4) 0,27 - (P_1 + P_2) 0,2 = 0$$

$$(P_2 + P_3) 0,25 - (P_1 + P_4) 0,25 = 0$$

$$\text{т.к. симметрично, } P_1 = P_2 = 112,6 \text{ Н}$$

$$\text{то) } P_3 = P_4 = 23,4 \text{ Н}$$

2. Выбор типа амортизатор

тип АД-10 (номинал. напр. 70...100 к, кол-во пестов  $k_{ам} = 117,7 \text{ Н/мм}$ ) - с/ А3 и А4  
 АД-15 (номинал. стат. нагрузка 100...150  $\text{Н/мм}$ ,  $k_{ам} = 186,4 \text{ Н/мм}$ ) - с/ А1 и А2  
 Показат. затухание  $\epsilon = 0,5$

3. Определ. стат. сдвиги:

$$\delta_{ст,1,2} = \frac{112,6}{186,4} = 0,6 \text{ см}$$

$$\delta_{ст,3,4} = \frac{23,4}{117,7} = 0,2 \text{ см} \rightarrow \text{пренеб}$$

4. Толщина миним. пружины с/ А3 и А4  
 $d_{3,4} \approx 0,72 - 0,6 = 0,11 \text{ см}$

5.  $\Sigma$ -ая жесткость амортизатор:

$$k_z = \sum_{i=1}^4 k_{ам, i} = 608,2 \text{ Н/см}$$

6. Собств. частота  $k_{св}$  с/  $\text{мм}$   
 $f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_z}{m}} = 6,2 \text{ Гц}$

2

7. Коэф. динамизации  $\delta$  призматич. расчет

$$\mu(f) = \frac{\sqrt{1 + e^2/f^2}}{\sqrt{(1 - f^2/f_0^2)^2 + e^2}} ; f = \frac{f}{f_0}$$

гидростатический:  $a_0(f) = a_0(f) \mu(f)$

гидростатический:  $S_0(f) = \xi_0(f) \mu(f)$

статист.  $\mu$   $\delta_{ст, i}$   
 динамический:  $\delta_{ст, i} = S(t) - \xi_0(f)$

8. Все данные в таблице:

$a_0, g_1$	1
$\xi_0, \text{ мм}$	0,1
$\mu$	1,82
$\delta_{ст, i}, g$	1,82
$\delta_{ст, i}, \text{ мм}$	4,18

63

Особенности помехоустойчивости при проектировании ЭВМ.

Помеха  $\delta$  величина. угроза - внешние или внутренние воздействия, приводящие к неадекватной передаче информации во времени ее хранения, преобразовании, обработке или передаче.

Т.к. информацион. сигналы в ЭВМ имеют Эл. структуру, то при проектировании нужно учитывать помехи той же природы, как наиболее вероятные источники помехи сигнала.

Борьба с помехами актуальна всегда:

- 1) строгий. уп. внешних помех критично  $\uparrow$ , что объективно растет этровосприимчивости параз. худ. ва.
- 2) Увеличение взаимного влияния эл-тов.
- 3) Увеличение эм-ии -  $\uparrow$  уровень помех
- 4) Увеличение ЭВМ на объектах с высоким уровнем помех: заводы, склады и т.д.

Виды помех:

характер проявления	источник помехи	пути распространения
- перенапряжения (в цепи)	- эл-магн.	- цепи сигналов
- синхронизация	- электр.	- земля
- помехи в цепи связи	- индуктив. связь	- линии связи
- импульсные помехи в цепях связи	- емкостная связь	- цепи экранирования
- небаланс напряжений в цепи const тока	- кабельная связь	- цепи заземления.
- нестабильность в цепях питания		

Основные причины, вызывающие помехи сигнала при прохождении их по цепям ЭВМ:

1. отражение от неидеальной нагрузки и от различных неоднородностей в линиях  $\delta$  связи
2. затухание сигналов при прохождении сигнала их по цепям попут-но соседн. эл-тов,
3. увеличение трения и задержки, лет. возникают при включении нагрузок с плавкой составной частью.
4. задержки в линиях, вызван. конечной скоростью разности потенциалов сигнала
5. перекрестные помехи
6. паразитная связь м/у эл-ми через цепь питания и заземления
7. наводки внешних источников эл, магн. и эл-магн. полей

Связи м/у эл-ми в ЭВМ

б/о взаимно-индуктив. и емкостн. связи паразитных или наведенных токов.

В цепях с повышенной скоростью работы - паразитные ползковые линии, «световые паразиты» (паразиты)

Эл-ки «короткая» линии связи - линии, длина которых меньше длины волны в волн. линии, имеющие фронтальный фронт, передаваемого по линии сигнала.

Сигнал, отражен. от неидеальной нагрузки в такой линии связи воспринимается повторно, тем самым эл-ки изменяются взаимно индуктив.

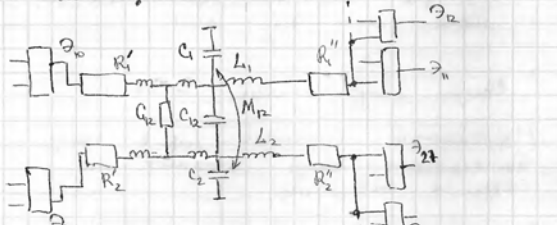
Св-ва такой линии м/о описать с помощью  $R, C$  и  $L$ .

Эл-ки «длинная» линии хар-си фронтальной распространения сигнала, много больше фронта сигнала

Отражения от конца линии сигнал приходит к ее началу после окончания фронта и инвертирует его фронт.

Мы рассматриваем линию м/о рассматривать как линию с распределен. параметрами.

При определении уровня помех, наводимых в лин. связи, нужно учитывать эл. параметры линии:



источники  $\delta_1$  - для лин. связи  $\delta_2$  - нагрузка

г/ «короткая»:

- $L_i$  - индуктивность, Гн
- $C_i$  - емкость линии
- $R_i$  - сопротивление линии
- $C_{ij}$  - взаимная емкость соседних линий
- $M_{ij}$  - " " индуктивность " " "
- $C'_{ij}$  - проводимость изоляции м/у соседними линиями, Ом<sup>-1</sup>

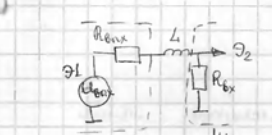
г) «длинная»

$L_{ij}, C_{ij}, C'_{ij}, M_{ij}, C'_{ij}$  - те же параметры, распределенные на единицу длины.

$$\tau_0 = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} - \text{волновое сопротивление (интеграл линии)}$$

Помехи при единичном эл-тов «короткая» связями.

Импульсный хар-р Эл-ки короткой связи



$$U_{0x} + \frac{L_1}{R_{0x} + R_{0x}} \frac{dI_{0x}}{dt} = U_{0x}$$

решение: 
$$U_{0x} = \frac{R_{0x}}{R_{0x} + R_{0x}} U_{0x} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$$

$$\tau = \frac{L_1}{R_{0x} + R_{0x}}$$

Т.к. в микроэ-тах как правило  $R_{0x} \ll R_{0x}$ , то

$$U_{0x} \approx U_{0x} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad \tau = \frac{L_1}{R_{0x}}$$

Если принять  $U_{0x} = U_n = 0,5 U_{0x}$ , то

$$\tau_3 = 0,7 \tau = 0,7 \frac{L_1}{R_{0x}}$$

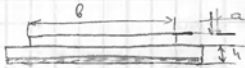
Собств.  $L_1$  вычисл. как эл-кт задержки сигнала



$$l < \frac{l_c \cdot l_u}{l_c + l_u}$$

Пример 1.

Дано:  $a < b$ ,  $U_n = U_{0ex}$ ,  $R_{0ex} = 100 \text{ Ом}$ ,  
 $\frac{h}{b} = 1$ ,  $\mu_2 = 1$ ,  $\tau_3 \leq 0,5 \text{ нс}$ .  $l = ?$



$$\tau_3 = \frac{L_0 l}{R_{0ex}} = \frac{377 h l}{3 \cdot 10^8 R_{0ex}} \Rightarrow l \leq \approx 4 \text{ см.}$$

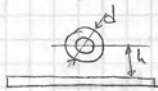
Пример 2.  $\tau_3 \leq 1,0 \text{ нс}$  (из экв. С),  
 $U_n = 1 \text{ В}$ ,  $I_2 = 0,02 \text{ А}$ ,  $E_2 = 3$ ,  $h/b = 2$ .

$l = ?$

$$l \leq \frac{\tau_3 I_n}{U_n C}; \quad C = \epsilon_1 \epsilon_2 l \left\{ \frac{2b}{h} + \frac{1}{\pi} [1 + \ln(1 + \frac{2b}{h})] \right\} 10^{-12} \Rightarrow l \leq 7,5 \text{ см.}$$

Пример 3.

Дано:  $h = 2 \text{ мм}$ ,  $\mu_{ПП} = 0,07$ ,  $C_{0ex} = 1,5 \text{ пФ}$ ,  
 $R_{0ex} = 1,5 \text{ кОм}$ ;  $\epsilon_0 = 1,5 \text{ пФ}$ ,  $n = 3$ ,  
 $l_{np} = 500 \text{ мм}$ ;  $\epsilon_2 = 2$ .



$\tau_3$  (из экв. С) - ?

$$C_{0ex} = C_n + C_{0ex} + n C_{ex}$$

2

$$C_n = \frac{2\pi \epsilon_2 \epsilon_0 l_{np}}{\ln \frac{4b}{d}} = 0,09 \text{ пФ}$$

$$\tau_3 = 0,7 \cdot 1,5 \cdot 10^9 (\delta + 1,5 + 3 \cdot 1) \cdot 10^{-12} = 12 \cdot 10^{-9} \text{ с.}$$

Пример 4

где миним. напряжения. сд. с конформацией макс на н.

$b = 0,5 \text{ см}$ ,  $d = 0,3 \text{ см}$ ,  $a = 0,5 \text{ см}$ ,  
 $\tau_0 = 10 \text{ нс}$ ,  $k_{ном} = 0,5$ ,  $R_{0ex} = 200 \text{ Ом}$ ,  
 $\epsilon_2 = 1$ ,  $I = 10,2 \text{ мА}$ ,  $U = 1 \text{ В}$ .

max генерации.  $l = ?$

$$l_c = \frac{\tau_0 k_{ном} \lg \frac{2d}{a+b}}{1,12 \epsilon_2 R_{0ex}} \cdot 10^8; \quad l_c = 414 \text{ см.}$$

$$U_{1,2} = 2U \left( 23 \lg \frac{2b}{d+b} + \frac{d+b}{l} + 1 \right) 10^{-8}$$

$$U_{1,2} < \frac{U_n \tau_0}{I} \Rightarrow l_u < 1,66 \text{ см.}$$

$$l < \frac{l_c l_u}{l_c + l_u} = 117 \text{ см.}$$

$$\frac{414 \cdot 166}{414 + 166}$$

Переходные процессы в э-ли  
 линейных, миним. цепи.

Зависит от  $U_{0ex}(t)$ ;  $Z_0$ ;  $Z_n$ ;  $Z_k$ .  
 (соединение сеп, нагрузка)

$$K_u(p) = \frac{U_{0ex}(p)}{U_{ex}(p)} = \frac{Z_k(p) - Z_0}{Z_k(p) + Z_0}$$

коэф. отраж.

43

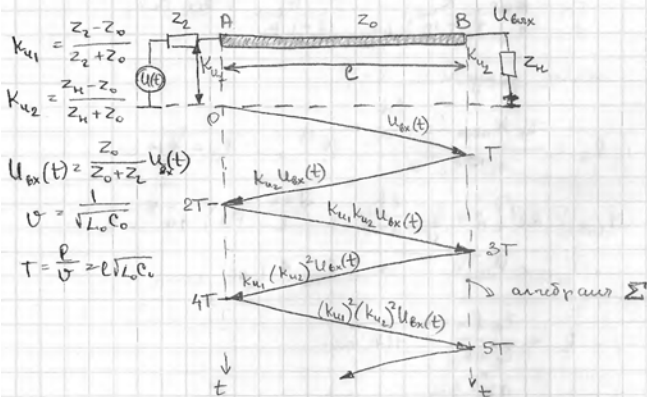
$p$ -оператор Лапласа

$$Z_n = Z_0, \quad K_u(p) = 0$$

$Z_n \neq Z_0$ ,  $K_u(p) \neq 0$ .  
 если  $K_u < 0 \rightarrow$  в преобразовании  
 отраженная и падающая  
 если  $K_u > 0 \rightarrow$  синфазно.

$$Z_0 \neq Z_2, \quad Z_n \neq Z_0$$

КД



$$K_{u1} = \frac{Z_2 - Z_0}{Z_2 + Z_0}$$

$$K_{u2} = \frac{Z_n - Z_0}{Z_n + Z_0}$$

$$U_{ex}(t) = \frac{Z_0}{Z_0 + Z_2} U_2(t)$$

$$v = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}}$$

$$T = \frac{l}{v} = l \sqrt{L_0 C_0}$$

сравниваем волны, это для разных  $U$  в  
 разные моменты времени.

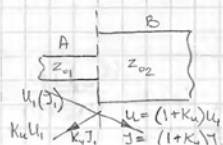
волна тока в преобразовании с той же самой  
 направлением.

$$K_T(p) = -K_U(p)$$

1.04.30.

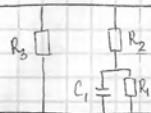
Отражение от  
 неоднородности в  
 линии связи

$$K_U = -K_T = \frac{Z_02 - Z_01}{Z_02 + Z_01}$$



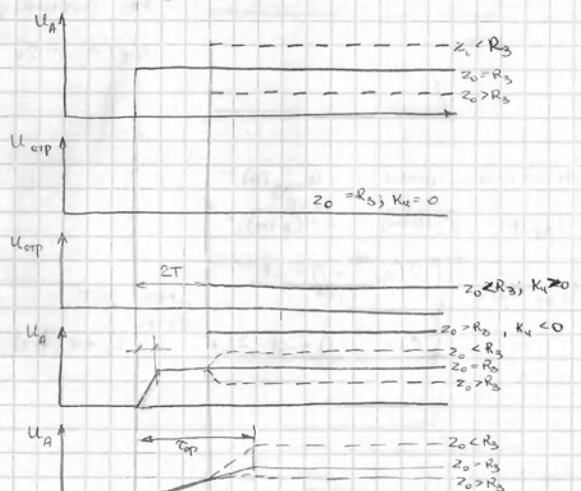
Переходные процессы в э-ли  
 линейных цепи при разрывных  
 нагрузках.

Эквивалентная  
 схема нагрузки



А.  $R_2 = \infty$  - zero разрывная нагрузка  
 $Z_n = R_3$ ,  $Z_0 = Z_2$  (соединение в  
 парам линии цепи)

- а)  $Z_0 = R_3$   $\Rightarrow K_U = 0$
- б)  $Z_0 < R_3$   $\Rightarrow K_U > 0$
- в)  $Z_0 > R_3$   $\Rightarrow K_U < 0$ .



45



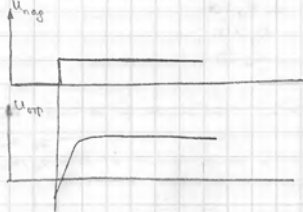
В.  $R_1 = \infty, R_2 = 0, R_3 = \infty$  - ёмкостной характер нагрузки

$$Z_n = \frac{1}{Cp}$$

$$K_u(p) = \frac{\frac{1}{Cp} - z_0}{\frac{1}{Cp} + z_0} = \frac{\frac{1}{z_0 C} - p}{\frac{1}{z_0 C} + p}$$

Замена:  $\frac{1}{z_0 C} = \alpha \Rightarrow K_u(p) = \frac{\alpha - p}{\alpha + p}$

а)  $U_{nag}(p) = \frac{1}{p}$  - ступенчатая е-функция



$$U_{exp}(p) = \frac{\alpha - p}{p(\alpha + p)}$$

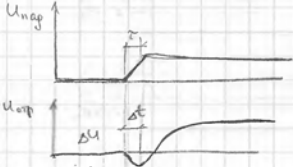
к-е ординату:

$$U_{exp}(t) = 1 - 2e^{-\alpha t}$$

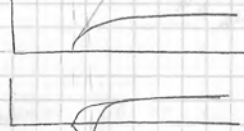
б) линейный фронт:  $U_{nag}(p) = \frac{1 - e^{-pt}}{p^2 \tau}$

$$U_{exp}(p) = \frac{\alpha - p}{p^2 \tau (p + \alpha)} = \frac{\alpha - p}{p^2 \tau (p + \alpha)} e^{-pt}$$

$$U_{exp}(p) = \begin{cases} \frac{2(e^{-\alpha t} - 1) + \alpha t}{\alpha t} & \text{при } t < \tau \\ \alpha(e^{-\alpha t} - 1) + \alpha t - 2[e^{-\alpha(t-\tau)} - 1] + \alpha(t-\tau) & , t \geq \tau \end{cases}$$



б)  $U_{nag}(t) = t - e^{-\beta t}$ ;  $U_{nag}(p) = \frac{1}{p} - \frac{1}{p + \beta}$ ,  $\beta = \frac{1}{\tau}$



$$U_{exp} = \frac{(\alpha - p)\beta}{p(\alpha + p)(\beta + p)}$$

В. резистивно-ёмкостная нагрузка.

Г. Разомноживание э-ки линии

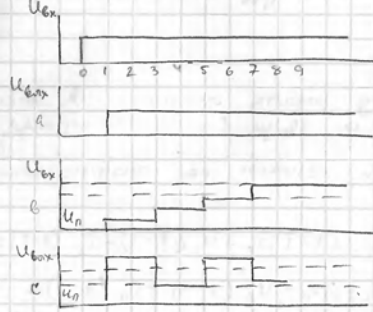
связи на обеих концах.

$$Z_1 = R_3, R_2 = \infty; Z_2 = R_2$$

$$R_2 = z_0 \text{ или } R_n = z_0 \text{ } \left. \vphantom{\begin{matrix} R_2 = z_0 \\ R_n = z_0 \end{matrix}} \right\} \text{ а}$$

$$R_2, R_n \gg z_0 \text{ или } R_2, R_n \gg z_0 \text{ } \left. \vphantom{\begin{matrix} R_2, R_n \gg z_0 \\ R_2, R_n \gg z_0 \end{matrix}} \right\} \text{ б}$$

$$R_n \gg z_0, R_2 < z_0 \text{ или } R_n < z_0, R_2 \gg z_0 \text{ } \left. \vphantom{\begin{matrix} R_n \gg z_0, R_2 < z_0 \\ R_n < z_0, R_2 \gg z_0 \end{matrix}} \right\} \text{ в}$$



Время задержки, вносимой линией связи

$$R_2 = 0; K_2 = -1; U_{exp} = U_{ex} k^{1/2}$$

$$K_n = \frac{R_3 - Z_0}{R_3 + Z_0} = k$$

где  $U_{exp} = \alpha U_{ex} = U_{ex} k^{1/2}$ , n - число отражений,

$$n = \frac{2 \lg \alpha}{\lg k} = \frac{2 \lg \alpha}{\lg \frac{R_n + z_0}{R_n - z_0}}$$

$$\tau_2 = T(1+n) = T \left( 1 + \frac{2 \lg \alpha}{\lg \frac{R_n + z_0}{R_n - z_0}} \right)$$

$$\text{при } \alpha = 0,5 \quad \frac{R_3}{Z_0} = 2 + 4 \quad n = 2 + 10$$

чем больше разномножение, тем больше задержка  $\Rightarrow$  нужно стремиться к полному согласованию линии с...

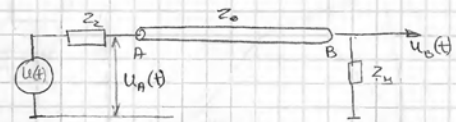
$$l_{max} = \frac{\tau_{exp} V}{K_c} = \frac{\tau_{exp} \cdot C_0}{K_c \sqrt{\epsilon_2 \mu_2}} \approx \frac{\tau_{exp}}{\alpha \tau_{exp}}$$

при	$V = 2 \cdot 10^8$ м/с	$K_c = 4$
$\tau_{exp}, \mu\text{с}$	30	$l_{max}, \text{м}$
5	0,25	
1	0,05	

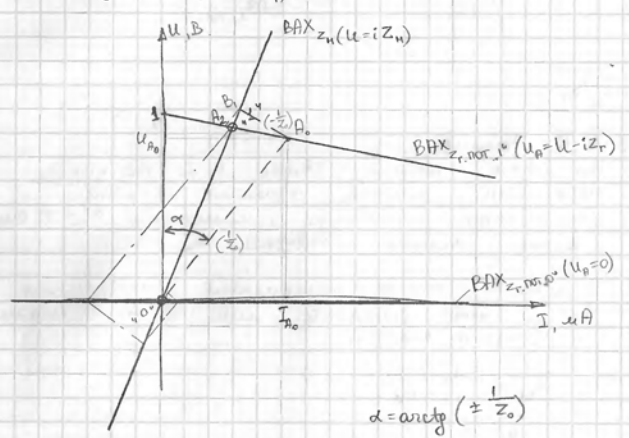
Прямой метод расчёта отражений в э-ки длинных линий связи (метод Бернера)

$$\begin{cases} U_A(t) - i_A(t-T)z_0 = U_B(t-T) - i_B(t-T)z_0 \\ U_B(t) + i_B(t)z_0 = U_A(t-T) + i_A(t-T)z_0 \end{cases}$$

где  $U_A, U_B, i_A, i_B$  - мгновенные значения напряжения и тока в начале и конце линии связи Т-время прохождения сигнала вдоль линии



$$\lg \alpha = \frac{i_A(k) - i_A(k-1)}{U_B(k) - U_A(k-1)} = \pm \frac{1}{Z_0}$$

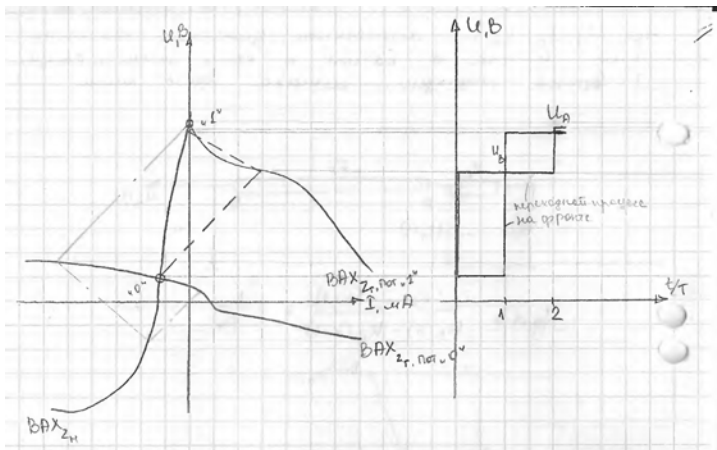


$$\begin{cases} A_0(t=0) \\ B_1(t=T) \\ A_2(t=2T) \end{cases} \text{ и т.д. } \tau, \tau^2, \dots$$

аналогично  $\frac{1}{Z_0}$  - характеристика

Разномножение э-ки линии характеризует...





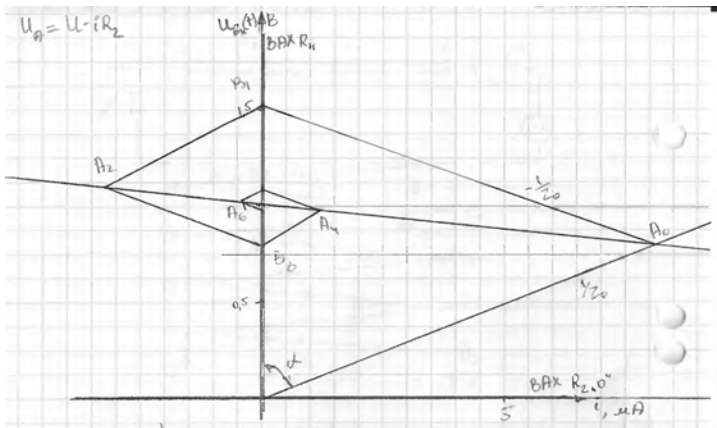
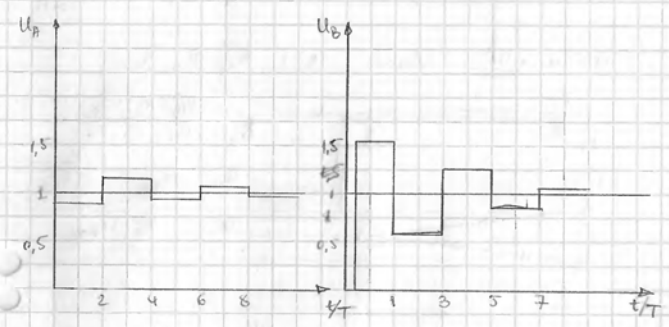
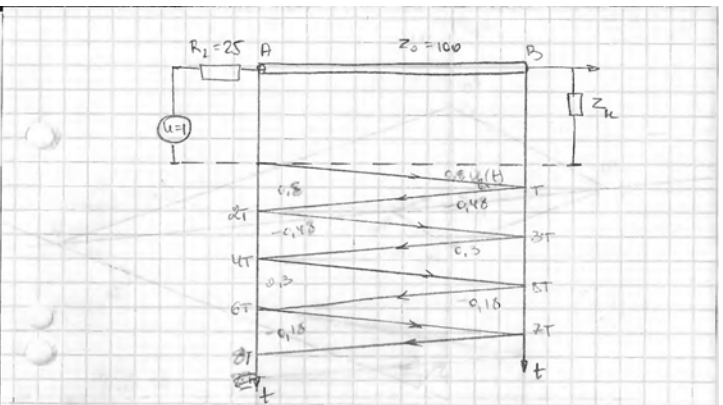
5.01.10 Принцип  
 на входе линии связи с  $Z_0 = 100 \text{ Ом}$   
 регулятор мощности соединяет конденсатор  
 емкостью  $1 \mu\text{Ф}$ , индукцией  $R_2 = 25 \text{ Ом}$ ,  
 выход линии свободной,  $R_n = \infty$

Строится хар-р изменения напряжения на  
 вх. и вых. зашунтой или связи анализ,  
 и график переходов

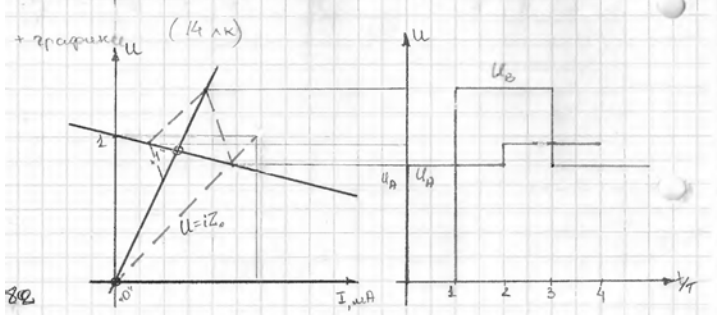
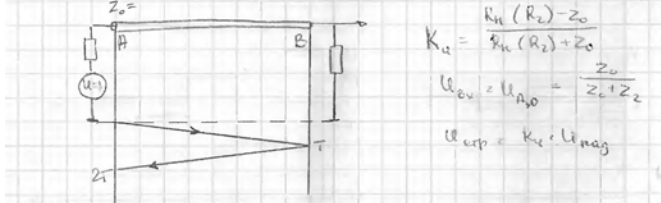
$$K_u = \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0}$$

$$K_u^A = -0,6 \quad K_u^B = 1$$

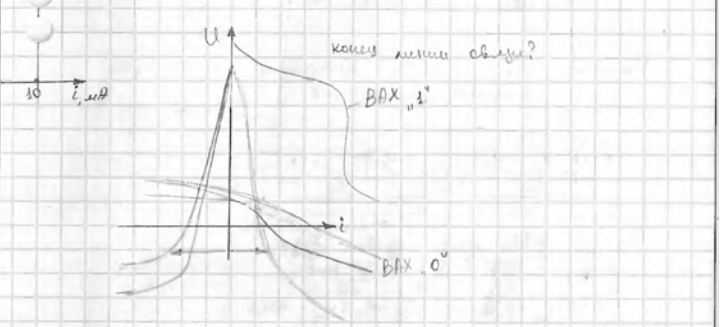
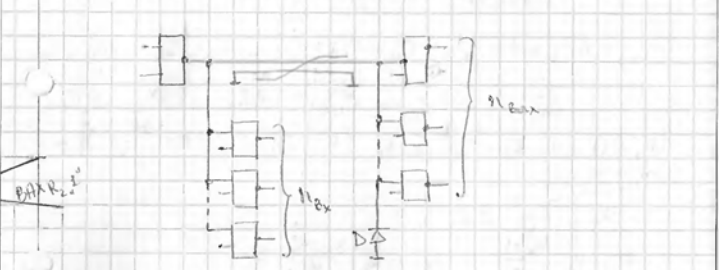
$$U_{ex} = \frac{Z_0}{Z_0 + Z_2} = 0,8$$



Задача о КР: Saw.  $U=1, R_2, R_n, R_0$



В процессе генерации:



Задача состоит в анализе связи

$$U(x,t) = e^{\pm j\omega x} \int (x \pm \frac{t}{\sqrt{LC}})$$

$$I(x,t) = \frac{1}{Z_0} e^{\pm j\omega x} \int (x \pm \frac{t}{\sqrt{LC}})$$

$d = \sqrt{RC}$  - затухание  
 $d_0$  - затухание от потерь в субстрате

$$d = d_m + d_0 = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} + \frac{C}{2} \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{R}{2Z_0} + \frac{GZ_0}{2}$$

$$d = \alpha_m = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} = \frac{R}{2Z_0} \quad ; \quad d_n - \text{близкие} \\ \text{к } Z_0 \text{ - малое}$$

Параметры кабелей в экв-м цепи  
линии связи.

$$L_{01} = L_{02} = L_0; \quad C_{01} = C_{02} = C_0; \quad Z_{01} = Z_{02} = Z_0$$

$$K_1 = \frac{C_{1,2}}{C_0}; \quad K_2 = \frac{M}{L_0} \frac{C_0}{C_{1,2}} = \frac{M}{K_1 L_0}; \quad v = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}}$$

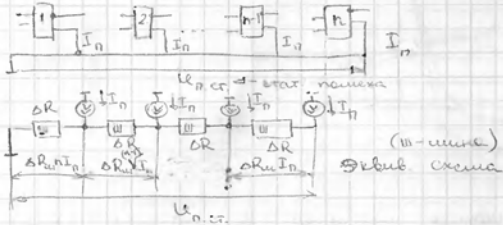
$$U_2(t) = K_1 \frac{K_2 + 1}{4} [U_1(t - \frac{x}{v}) - U_1(t - \frac{2l - x}{v})] -$$

напряж.

$$- K_1 \frac{K_2 - 1}{v} (t - \frac{x}{v});$$

$$P = K_1 \frac{K_2 + 1}{2}; \quad Q = K_1 \frac{K_2 - 1}{v} \frac{1}{Z_{01}}$$

Поиск по цепям питания и метода  
барьер с шумом



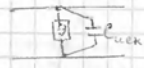
$$U_{шум, эк} = \Delta R_{ш} n I_n + \Delta R_{ш} (n-1) I_n + \dots + \Delta R_{ш} I_n$$

$$\approx \Delta R_{ш} I_n [1 + 2 + \dots + (n-1) + n] = \Delta R_{ш} I_n \frac{n(n+1)}{2}$$

$$\Delta R_{ш эк} \leq \frac{2[U_{шум, эк}]}{I_n n(n+1)} \quad \Delta L_{ш} \leq \frac{2[U_{шум, эк}]}{\Delta I_n n(n+1)}$$

Применение индивидуальных сравнительно-  
ных конденсаторов для измерения кабелей  
по шуму → эквивалентности

84



индивидуальны  
сравниваются, конденсатор (и с.к.)  
нагружается шумом, шум  
двигает экран -

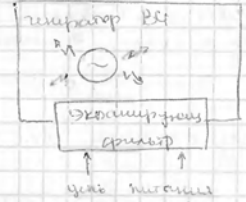
$$C_{с.к.к} \geq \frac{\Delta I_n \cdot Z_{01}}{2[U_{шум, эк}]}$$

$$\Delta I_n = K I_n$$

$$\Delta C_{ш} \geq 4 \frac{I_{шум}}{R_{ш эк}^2}$$

- функции слага  
конденсатор

### Экранирование в ЭВМ



Экранирующая конура



шум  
затухает!

### Экраны

- |   |  |  |
|---|--|--|
| но шум<br>экранируется<br>лучи                  | но конденсатор<br>форме  | но материалу<br>и конструкции<br>стенки экрана |
| - материал<br>$\epsilon > \frac{\lambda}{2\pi}$ | - проводимость<br>$R_3 = \sqrt{\frac{3}{4\pi}} \sqrt{\epsilon \mu} \sqrt{f}$ | - материал<br>$\mu \gg 1$                      |
| - электролит.                                   |  | - немагн.                                      |

85

- эк-мат  
 $\epsilon > \frac{\lambda}{2\pi}$

- цилиндрич  
 $R_3 = \sqrt{\frac{3}{4\pi}} \sqrt{\epsilon \mu} \sqrt{f}$   
- сфериче  
 $R_3 = 2\sigma$

материал  
 $\mu \gg 1$   
- промывание  
материал  
- инертный  
- сетчатый  
- радиопоглощающ.

Качество экранирования харак-ис  
экранируемостью - отношением U, I, E и H  
в экранируемой среде или на канале  
экранирующей оболочки при отсутствии и  
наличии экрана

$$\beta = \frac{U}{U'} = \frac{I}{I'} = \frac{E}{E'} = \frac{H}{H'}$$

В режиме проводимости экраны экв-м цепи  
минусе рас. в шарах:  
 $B = \mu \beta \approx 0,115 \text{ A [Кл]}$

В радиотехнике экр-ть экранирования задат  
в дБ:  
 $A = 20 \lg \beta = 8,7 \text{ B [дБ]}$

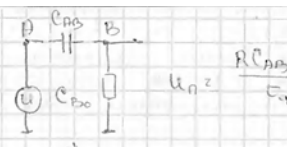
Используются также различные шумные р-ы  
защит экрана, определяющей р-:  
 $f_{рз} \approx \frac{135}{R_3} 10^6 \text{ Гз}$

Снажение  $f_{рз}$  не 8 входить в экв-м  
табл. шумов

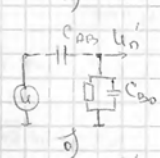
### Эк-мат. Экранирование

Цель: индивидуальное экранирование (или  
всех) наружных элементов на экв-м цепи  
на корпусе.

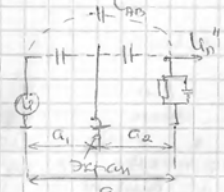
86



$$U_n = \frac{R C_{AB} U}{T_{р}}$$



$$U_n' = R \frac{(C_{AB})^2}{C_{AB} + C_{0B}} \frac{U}{T_{р}} \approx R C_{AB} \frac{C_{0B}}{C_{0B}} = \frac{U}{T_{р}}$$



$$U_n'' = R C_{AB} \frac{C'_{AB}}{C'_{AB} + C_{0B}} \frac{U}{T_{р}}$$

8.04.10

Эк-мат. экранирование определяется:  
материалом-но отношением параметров  
экранирующей среды к А и В экв-м цепи  
экранирующей линии

$$\beta \approx \frac{C_{AB}}{C_{0B}} \quad \beta \approx 20 \lg \frac{\epsilon \mu^3}{\alpha_1 \alpha_2}$$

где  $\epsilon_3 = \sqrt{\frac{S_2}{\pi S_1}}$  - экв-м радиуса экр-ти

$S_2$  - S экрана  
 $\alpha_1, \alpha_2$  - радиусы

Наил. экр-ть экрана при  $\alpha_1 = \alpha_2$   
или  $\alpha_1 \gg \alpha_2$

87

Толщина эр-те экранов не влияет на эр-те экранирование. Однако при больших экранировках могут возникнуть эр-те экранирование экранов.

$$\Theta^* = 20 \lg \left( \frac{60\pi}{R} \right) = 20 \lg (60\pi d\delta)$$

где R - расстояние от источника излучения до экрана  
 $\delta$  - толщина экрана  
 $\delta^*$  - толщина экранирующего экрана

### Матрица экранирования

Основан на принципах макс. поля в точке Э. Это означает миним. потери энергии по сравнению с идеальным экраном. Такой экран одинаково пригоден для защиты от воздействия внешних помех и для защиты от излучения источника помех внутри Э.



Эр-те матрица экранирования:

$$\Theta_{ii} = 1 + \mu_2 D_3$$

$\mu_2$  - матрица проницаемости Э  
 $D_3$  - диаметр эквивалентного экрана сферич. формы, мм

Эр-те поле в точке наблюдения:

$$Z_{0, \text{вход}} = 377 \text{ Ом}$$

$$Z_{0, \text{вых}} = \sqrt{\frac{60\pi}{\delta}}$$

$$\frac{E_{\text{вх}}}{H_{\text{вх}}} = Z_0$$

$$\Theta = \frac{E_{\text{вх}}}{E_2} = \frac{H_{\text{вх}}}{H_2} = e^{-\frac{d}{\delta}} \frac{(Z_{0, \text{вх}} + Z_{0, \text{вых}})^2}{4Z_{0, \text{вх}}Z_{0, \text{вых}}} \approx \frac{e^{-\frac{d}{\delta}} Z_{0, \text{вх}}}{4Z_{0, \text{вых}}}$$

$$d/d_{\text{вх}} < \delta \quad \Theta = \sqrt{1 + \left( \frac{60\pi \delta d_{\text{вх}}}{2m} \right)^2}, \quad m=1,2,3$$

$$d/d_{\text{вх}} > \delta \quad \Theta = e^{-\frac{d_{\text{вх}}}{\delta}} \left( \frac{1}{2} + \frac{D}{2.8 m \mu_2 \delta} \right)$$

$$d/\text{длина волны} > \delta \quad \Theta = \frac{e^{-\frac{d_{\text{вх}}}{\delta}} Z_{0, \text{вход}}}{Z_{0, \text{вых}}}$$

Пример 1: Эр-те?

на частотах 0,1 и 1 ГГц  
 $\delta_{\text{вх}} = 0,8 \text{ мм}$ ;  $D = 80 \text{ мм}$ ; материал Cu

Из справочника:  $\delta_{\text{ср}} = 7 \text{ мм}$ ;  $\delta_1 = 2,1$   
 Из данных расчета:  $\delta_{\text{вх}} < \delta$

$$\Theta = \sqrt{1 + \left( \frac{2\pi \cdot 10^9 \cdot 80 \cdot 0,8}{2m} \right)^2}, \quad \Theta_{0,1} = 1,23; \quad \Theta_{1,0} = 0,21 \text{ Кн}$$

$$\text{В17} \quad A_{0,1} = 1,8 \text{ дБ}$$

$$\Theta_{1,0} = 7,27 \quad B_{1,0} = 2,0 \text{ Кн} \quad A_{1,0} = 17,4 \text{ дБ}$$

Пример 2: Эр-те? на частоте 9 ГГц

$\delta_{\text{вх}} = 0,8 \text{ мм}$ ;  $D = 80 \text{ мм}$ ; Cu

а) Эр-те матрица Э:

$$\Theta_{ii}^a = 20 \lg \left[ 1 + 0,25 \left( 1 - \frac{Z_0^2}{Z_2^2} \right) \left( \mu_2 + \frac{1}{\mu_2} - 2 \right) \right]$$

$$d\delta \geq Z_2 \left[ 1 - \sqrt{\left[ 1 - 10^{\frac{\Theta_{ii}^a/20}{10}} - 1 \right] \left( \mu_2 + \frac{1}{\mu_2} - 2 \right)^{1/2}} \right]$$

б) Эр-те матрица экрана:

$$\Theta_{ii}^b = 20 \lg \left[ 1 + \left( 1 - \frac{Z_0^2}{Z_2^2} \right) \left( \mu_2 + \frac{1}{\mu_2} - 2 \right) \right]$$

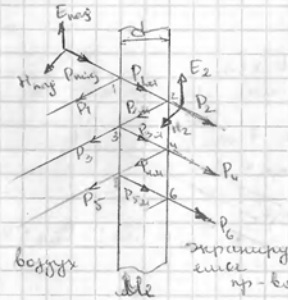
$$d^b \geq 0,5 Z_2 \left[ 1 - \sqrt{\left[ 1 - 10^{\frac{\Theta_{ii}^b/20}{10}} - 1 \right] \left( \mu_2 + \frac{1}{\mu_2} - 2 \right)^{1/2}} \right]$$

в) Эр-те сферического экрана:

$$\Theta_{ii}^c = 20 \lg \left[ 1 + \mu_2 \left( 1 - \frac{Z_0^2}{Z_2^2} \right) \left( \mu_2 + \frac{1}{\mu_2} - 2 \right) \right]$$

$$d^c \geq Z_2 \left[ 1 - \sqrt{\left[ 1 - 4,5 \left( 10^{\frac{\Theta_{ii}^c/20}{10}} - 1 \right) \right] \left( \mu_2 + \frac{1}{\mu_2} - 2 \right)^{1/2}} \right]$$

### Электро-магнитное экранирование



Эквивалентная проницаемость

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu_0 \epsilon_0}} \rightarrow \frac{d}{\delta}$$

$$P_1 > P_2 \quad \delta \approx \frac{d}{\delta}$$

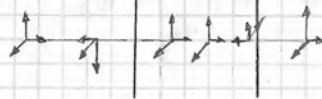
$$P_1 > P_3 \quad \delta \approx \frac{d}{\delta}$$

$$P_2 > P_4 \quad \delta \approx \frac{d}{\delta}$$

$$f > 10^7 \rightarrow d > 0,1 \text{ мм}$$

$$\epsilon \approx 55 \text{ пФ}$$

Уменьшение напряженности E и K при переходе из воздуха в экран



$$\Theta = e^{-\frac{d}{\delta}} \left( \frac{1}{2} + \frac{D}{2.8 \mu_2 m \delta} \right) = 44,7 \cdot 68,5 = 3063$$

$$B = 8 \text{ Кн}, \quad A = 69,7 \text{ дБ}$$

Пример 3: Эр-те? на 30 МГц;  $\delta_{\text{вх}} = 0,8 \text{ мм}$ ;  $D = 80 \text{ мм}$ ; Cu

Из справочника:  $\delta = 0,0275 \text{ мм}$

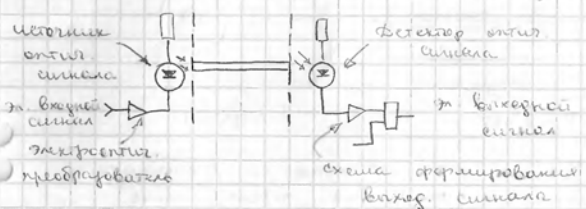
д) Выходной резистор

$$\Theta = \frac{e^{-\frac{d_{\text{вх}}}{\delta}} Z_{0, \text{вх}}}{Z_{0, \text{вых}}}; \quad Z_{0, \text{вх}} = 377 \text{ Ом}$$

$$Z_{0, \text{вых}} = \sqrt{\frac{60\pi}{\delta}} = \sqrt{\frac{2\pi \cdot 10^8 \cdot 1,256 \cdot 10^{-6}}{0,8 \cdot 10^{-3}}} = 1,55 \cdot 10^3 \text{ Ом}$$

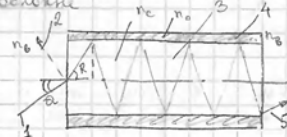
$$\Theta = 2,27 \cdot 10^6 \quad B = 14,7 \text{ Гн} \quad A = 127 \text{ дБ}$$

### Волноводно-оптическое устройство



Рабочая область оптического волновода

Распространение света в оптическом волноводе



- 1 - вход света
- 2 - отражатель от торца волновода
- 3 - дифрагма
- 4 - оболочка
- 5 - выход света на выходе волновода

$$n_c > n_o$$

Длина пути луча света в волокне:

$$P(R) = L \cdot \sec R$$

числовая апертура:  $NA \approx \sqrt{n_c^2 - n_o^2}$

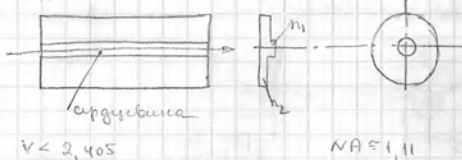
нормированная частота:  $V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_c^2 - n_o^2}$

Критич. угол полного отражения света от торца световода  $\alpha_{кр} = \arcsin(NA)$

Типы оптических волокон

1. Одномодовое волокно со ступенчатым профилем показателя преломления

(мода - затененная возбужденная (линейная))



2. Многомодовое волокно со ступенчатым профилем показателя преломления



3. Многомодовое волокно с радиально-уплощенным профилем показателя преломления



многофункциональное

$M \approx \frac{V^2}{2}$  число мод, распространяющихся по световоду

если  $V \leq 2,405$  - распространяется одна мода

Потери (ослабление сигнала):

- Причины:
- 1) собствен. внутр. потери
  - 2) потери, вызванн. примесями
  - 3) расширение Рэлея
  - 4) из-за неидеальности волокна

Дисперсия ( $\delta$ ):

- Причины:
- 1) материал. дисперсия
  - 2) волнов. дисперсия (хроматич.)
  - 3) поляризационная дисперсия

Опти. разъемы: фактор светового излучения: DIN-протокол

Источники света: светодиоды, лазерные диоды, вакуумные лампы

Мат-ри: фирма "Волокно-опт. системы связи" "Техносерв". 2006 г. 495 стр.

1) 30-дневный курс лекций → лекции пр.	25
2) ? на собеседовании	15
3) экзамен	10