

Московский государственный технический университет
им. Н. Э. Баумана

В. Г. Алексеев, Ю. И. Нестеров

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ
КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО
ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ
НА МАКРОУРОВНЕ**

Издательство МГТУ
1993

Московский государственный технический университет
им. Н.Э.Баумана

В.Г.Алексеев, Ю.И.Нестеров

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ
КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ
ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ НА МАКРОУРОВНЕ

Методические указания
к практическим занятиям
и выполнению семестровых заданий



Под редакцией Ю.И.Нестерова

Издательство МИТУ

1993

Рецензент Г.Р.Сагателян

А47 Алексеев В.Г., Нестеров Ю.И. Моделирование технических объектов конструкторско-технологического проектирования электронной аппаратуры на макроуровне: Метод. указания к практ. занятиям и выполнению семестровых заданий / Под ред. Ю.И.Нестерова. - М.: Изд-во МГТУ, 1993. - 38 с., ил.

ISBN 5-7038-0938-X

Рассмотрены задачи моделирования технических объектов на макроуровне; аналогии фазовых переменных и компонент для различных физических систем, компонентных и топологических уровней; типы связей между системами различной физической природы. Для студентов 3-го и 4-го курсов специальности "Конструирование и технология ЭВС и РЭС"

Ил. 21. Табл. 3. Библиогр. 4 назв.

ББК 32.817

Редакция заказной литературы

Виктор Григорьевич Алексеев
Юрий Иванович Нестеров

Моделирование технических объектов
конструкторско-технологического проектирования
электронной аппаратуры на макроуровне

Редактор Н.Г.Ковалевская
Корректор Л.И.Малютина

ISBN 5-7038-0938-X

© МГТУ им.Н.Э.Баумана, 1993.

Подписано в печать 19.10.92 Формат 60x84/16. Бумага тип. № 2.
Печ.л. 2,25. Усл.печ.л. 2,09. Уч.-изд.л. 2,03. Тираж 500 экз.
Изд. № 88. Заказ 748 С 189

Издательство МГТУ, типография МГТУ.
107005, Москва, Б-5, 2-я Бауманская, 5.

В в е д е н и е

Моделирование конструкций электронной аппаратуры и технологических процессов ее производства можно выполнить на микро-, макро- и метазуровнях, различающихся степенью детализации изучения процессов, протекающих в исследуемом техническом объекте (ИТО).

В данном пособии рассматриваются задачи моделирования технических объектов исследуемого класса на макроуровне. Как правило, моделирование на макроуровне применяют в том случае, если в ИТО можно выделить несколько различных по своей природе физических систем, например электрическую, механическую, тепловую (обычно не более пяти). Процессы, протекающие в указанных физических системах, определяют эффективность функционирования ИТО в целом.

Математической моделью (ММ) ИТО на макроуровне является система однородных дифференциальных уравнений. Тогда поведение большинства ИТО можно охарактеризовать с помощью фазовых переменных типа потока и потенциала, которые образуют вектор неизвестных ММ ИТО. В отличие от моделирования на микроуровне здесь непрерывной независимой переменной является только время t .

ММ ИТО на макроуровне получают объединением компонентных и топологических уравнений для рассматриваемой физической системы.

Законы функционирования элементов (компонентов) физической системы определяют с помощью компонентных уравнений, связывающих, как правило, разнородные фазовые переменные, относящиеся к этим компонентам.

Связь между однородными фазовыми переменными, относящимися к различным компонентам физической системы, задается с помощью топологических уравнений, причем процедура получения топологических уравнений выполняется для каждого моделируемого ИТО, так как их структуры различны.

Для построения на макроуровне ММ ИТО, состоящего из нескольких физических систем, необходимо:

- 1) выделить в ИТО однородные физические системы;
- 2) построить эквивалентные схемы для каждой выделенной физической системы;
- 3) установить связи между эквивалентными схемами выделенных физических систем;
- 4) используя компонентные и топологические уравнения, уравнения связи и эквивалентные схемы выделенных физических систем, получить ММ ИТО.

1. Аналогии фазовых переменных и компонент для различных физических систем

Аналогии фазовых переменных на уровне простейших элементов физических систем по отношению к электрической физической системе представлены в табл. I.

2. Аналогии компонентных уравнений

Функционирование каждой из указанных выше физических систем характеризуется своими законами, однако для простейших элементов (компонент) форма выражающих их уравнений оказывается одинаковой [1].

Аналогии компонентных уравнений для физических систем, представленных в табл. I, систематизированы с помощью табл. 2 для трех типов простейших элементов: элемент типа А (компонент R) диссипации энергии, на котором происходит преобразование энергии в тепловую; элемент типа Б (компонент типа C); элемент типа В (компонент типа L). На элементах типа Б и В происходит накопление потенциальной и кинетических энергий.

3. Аналогии топологических уравнений

Связь между однородными фазовыми переменными, относящимися к разным элементам рассматриваемой физической системы, описывается с помощью топологических уравнений на основе сведений о структуре системы.

Для большинства физических систем топологические уравнения основаны на уравнениях равновесия и непрерывности.

Аналогии топологических уравнений для различных физических систем по отношению к электрической представлены в табл. 3.

Таблица I

Физическая система	Фазовые переменные		Компоненты		
	типа потока	типа потенциала	типа R	типа C	типа L
Электрическая	Ток	Напряжение	Сопротивление	Емкость	Индуктивность
Механическая поступательная	Сила	Скорость	Трение	Масса	Упругость
Механическая вращательная	Момент	Угловая скорость	Трение	Момент инерции	Вращательная гибкость
Гидравлическая (пневматическая)	Расход	Давление	Трение	Гидравлическая емкость	Гидравлическая индуктивность
Тепловая	Тепловой поток	Температура	Тепловое сопротивление	Теплоемкость	-

Таблица 2

Физическая система	Фазовые переменные			Компонентные уравнения		
	Типа тока	Типа потенциала	Типа А	Типа Б	Типа Б	Типа Б
I	2	3	4	5	6	
Электрическая	Ток I	Напряжение U	Уравнение сопротивления (закон Ома) $I = U/R$ Уравнение вяз- кого трения $F = V/R_M = V \cdot k$,	Уравнение ем- кости $I = C \left(\frac{dU}{dt} \right)$ Уравнение массы $F = m a = C_M \left(\frac{dV}{dt} \right)$	Уравнение ин- дуктивности $U = L \left(\frac{dI}{dt} \right)$ Уравнение пружины $F = kx$,	
Механическая посту- пательная	Сила F	Скорость V	где R_M - аналог алек- трического сопротивления; k - коэффи- циент вязкого трения	где $C_M = m$ - аналог алек- трической емкости (мас- са элемента)	где x - пере- мещение; k - жесткость пружины. Или $V = L_M \left(\frac{dV}{dt} \right)$ $= \frac{1}{k} \left(\frac{dV}{dt} \right)$,	где L_M - ана- лог электричес- кой индуктивно- сти

1	2	3	4	5	6
Механическая вращательная	Момент силы M	Угловая скорость ω	Уравнение вязкого трения вращения $M = \omega / R_{\text{вр}}$, где $R_{\text{вр}}$ - ана- лог электриче- ского сопротивле- ния; k - коэффи- циент трения вращения	Основное уравнение динамики вращатель- ного движения $M = J \left(\frac{d\omega}{dt} \right)$, где J - аналог электрической ем- кости, момент инерции элемента	Уравнение кручения бруса с круглым по- перечным сечением $\omega = L_{\text{вр}} \left(\frac{dM}{dt} \right)$, где $L_{\text{вр}}$ - аналог электрической индук- тивности, вращатель- ная жесткость
Гидравличе- ская (пневма- тическая)	Массо- вый расход Q_m	Давление P	Уравнение стацио- нарного ламинарно- го течения жидко- сти для участка трубопровода $P = R_r \cdot Q_m$, где R_r - гидрав- лическое сопротив- ление, аналог электрического сопротивления	Уравнение сжимае- мости жидкости в некотором объеме V $Q_m = C_r \left(\frac{dP}{dt} \right)$, где $C_r = \rho V \beta$ - гидравлическая емкость, аналог электрической емкости; ρ - плотность; β - коэффициент сжимаемости жид- кости	Уравнение Эйлера (за- кон движения идеальной жидкости) $P = L_r \left(\frac{dG}{dt} \right)$, где L_r - аналог электрической индук- тивности - гидравли- ческая индуктивность $L_r = \frac{l}{S}$, здесь l - длина участка трубопровода; S - площадь попереч- ного сечения; G - расход

1	2	3	4	5	6
Тепловая	Тепловой поток Φ	Температура T	Уравнение теплового потока $\Phi = T/R_{\text{конд}}$; $\Phi = T/R_{\text{конв}}$, где $R_{\text{конд}}$, $R_{\text{конв}}$ — аналоги электрического сопротивления; $R_{\text{конд}} = l/\lambda s$ — кондукционное сопротивление; λ — коэффициент теплопроводности; l — длина участка с разностью температур T ; s — поперечное сечение участка; $R_{\text{конв}} = \frac{1}{\alpha_{\text{конв}}}$, $\alpha_{\text{конв}}$ — коэффициент теплообмена	Уравнение теплоемкости тела $\Phi = C_T \left(\frac{dT}{dt} \right)$, где $C_T = c \cdot m$ — аналог электрической емкости; c — удельная теплоемкость тела; m — масса тела	-

Физическая система	Фазовые переменные		Топологические уравнения	
	тип потока	тип потенциала	Уравнение равновесия	Уравнение непрерывности
I	2	3	4	5
Электрическая система	Ток I_k	Напряжение U_j	<p>Уравнение первого закона Кирхгофа</p> $\sum_{k \in p} I_k = 0,$ <p>где I_k - ток k-й ветви; p - множество ветвей инцидентных рассматриваемому узлу</p>	<p>Уравнение второго закона Кирхгофа</p> $\sum_{j \in q} U_j = 0,$ <p>где j - номер ветви; U_j - падение напряжений на j ветви; q - множество номеров ветвей, входящих в рассматриваемый контур</p>
Механическая по- ступательная си- стема	Сила F_k	Скорость v_j	<p>Уравнение принципа Даламбера</p> $\sum_{k \in p} F_k = 0,$ <p>где F_k - сила, приложенная к телу</p>	<p>Уравнение принципа сложения скоростей</p> $\sum_{j \in q} v_j = 0$ <p>показывает, что сумма абсолютной, относительной и переносной скоростей v_j тела равна 0</p>

1	2	3	4	5
Механическая вращательная система	Момент сил M_k	Угловая скорость ω_j	Уравнение принципа Даламбера для вращательной системы $\sum_{k \in P} M_k = 0,$ где M_k - момент силы, действующий относительно оси вращения, включая момент инерции	Уравнение принципа сложения угловых скоростей $\sum \omega_j = 0,$ где ω_j - угловая скорость относительно оси вращения тела
Гидравлическая (пневматическая) система	Поток Q_m	Давление P	Уравнение равновесия в узлах системы $\sum_{k \in P} Q_{m_k} = 0,$ где Q_{m_k} - поток жидкости (газа), подтекающий или оттекающий от узла	Уравнение неразрывности системы $\sum_{j \in Q} P_j = 0,$ где P_j - падение давления на j ветви, входящей в контур
Тепловая система	Поток тепла Φ_k	Температура T_j	Уравнение равновесия в узлах тепловой системы $\sum \Phi_k = 0,$ где Φ_k - тепловой поток, подтекающий или оттекающий от узла	Уравнение непрерывности для тепловой системы $\sum T_j = 0,$ где T_j - разность температур на участке, входящем в контур

4. Построение эквивалентных схем технических объектов

При получении ММ достаточно сложного технического объекта, состоящего из нескольких физических систем, необходимо [I] :

- 1) выделить в объекте однородные физические системы, например тепловую, электрическую, пневматическую и т.д.;
- 2) получить эквивалентные схемы каждой из указанных физических систем;
- 3) установить связи между физическими системами;
- 4) получить ММ исследуемого технического объекта.

При построении эквивалентной схемы рассматриваемой физической системы исследователь отражает в схеме те элементы и свойства технического объекта, которые, по его мнению, оказывают существенное влияние на функционирование этого объекта.

При построении эквивалентных схем используют обозначения ветвей, приведенные на рис. Ia-и.

При построении эквивалентной схемы механической поступательной системы сначала выделяют элементы, массу которых необходимо учесть. Такие элементы изображают в виде двухполюсников рис. Iж. Первый полюс этого двухполюсника соединяется с базовым узлом, отражающим инерциальную систему отсчета, а второй полюс представляет собой собственно саму массу m .

Элемент трения (рис. Iз) включается между контактируемыми телами, элемент (рис. Iи) - между телами, соединяемыми упругой связью.

Внешние усилия, прикладываемые к механической системе, отображают включением источника силы (рис. Iб) между базовым узлом и тем узлом, к которому подключен элемент массы, подвергающийся усилию; элемент упругости (рис. Iи) подключают между телами, соединенными упругой связью.

При построении эквивалентной схемы вращательной механической системы нужно помнить, что базовый узел соответствует неподвижной части объекта. Ветвь, изображающая момент инерции, включается между базовым узлом и узлом, через который осуществляется взаимодействие тела с данным моментом инерции с телами, находящимися с ним на одной оси вращения.

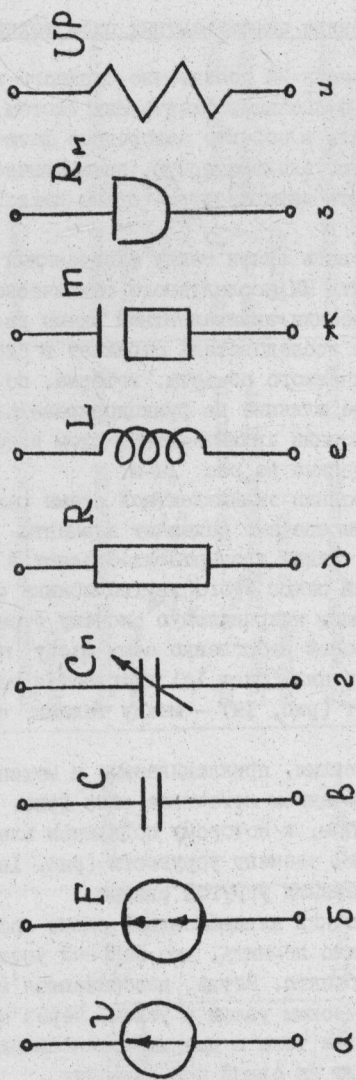


Рис. 1. Обозначения ветвей, используемые при построении эквивалентных схем для различных физических систем ИУ: а - источник типа потенциала; б - источник типа потока; в - емкость (электрическая, гидравлическая); г - C_n - переменная емкость; д - компонент типа R ; е - компонент типа L ; ж - элемент массы; з - элемент трения; и - элемент упругости

При построении эквивалентной схемы гидравлической (пневматической) системы за базовый узел принимается давление внешней среды. Резервуары изображаются на эквивалентных схемах гидравлических систем емкостями (рис. 1в), которые одним полюсом подключены к базовому узлу, через другой полюс осуществляется взаимодействие этой емкости с трубопроводами и другими гидравлическими элементами.

Трубопровод на эквивалентной схеме изображается гидравлическим сопротивлением и индуктивностью, включенными последовательно, но может быть отображен и только ветвью (рис. 1д), если пренебречь инерционностью жидкости [I] .

При построении эквивалентной схемы тепловой системы нужно помнить, если в ММ элементов используются значения температур, то за базовый узел можно принять условное тело с температурой 0 К или 0 °С, если в ММ используются только разности температур, то — произвольная точка системы.

Необходимо отметить, что при анализе теплового режима ЭВА и РЭА учитываются наиболее существенные черты конструкций электронных модулей и протекающих в них физических процессов, а всеми второстепенными для изучаемого объекта явлениями пренебрегают [I] . Такой идеализированный объект называют обычно тепловой моделью, а математическое описание процессов теплообмена с помощью системы уравнений тепловых эквивалентных схем и т.п. — математической моделью.

Основное требование к тепловой модели может быть сформулировано следующим образом: тепловая модель должна быть адекватна изучаемому явлению и реализуема математически.

На рис. 2а схематично показана одна из простейших конструкций блока питания, состоящая из корпуса, шасси и элементов, а также указаны значения температур, измеренных в разных точках корпуса, шасси и деталей. В первом приближении блок можно рассматривать как систему двух тел — корпуса и нагретой зоны (шасси с деталями). На рис. 2б представлена еще более грубая схематизация блока питания, в котором сложная по форме нагретая зона заменена параллелепипедом; поверхности нагретой зоны и корпуса рассматриваются как изотермические.

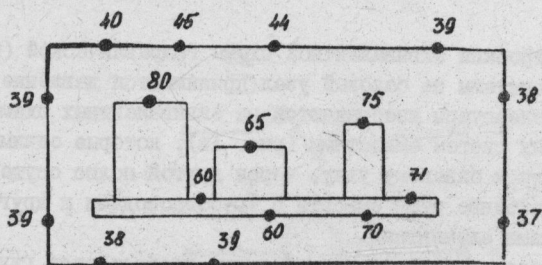


Рис. 2а. Схематичное представление конструкции блока питания с точками замера температур

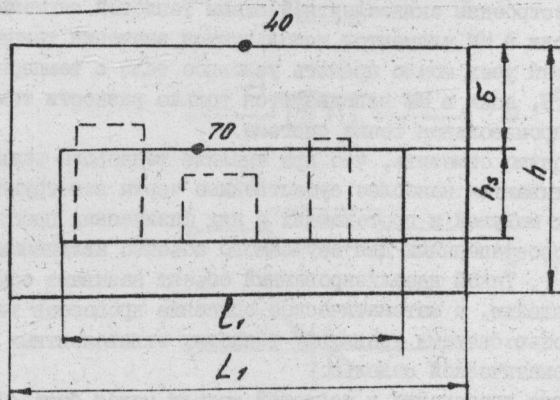


Рис. 2б. Схема распределения средних температур в конструкции блока питания

Первая тепловая модель (см. рис. 2а) позволяет получить более подробную информацию о температурном поле системы, вторая (см. рис. 2б) — только значения среднеповерхностных температур. Если потребуется знать температурное поле какого-то элемента нагретой зоны, то для него можно составить свою тепловую модель, средняя поверхностная температура которой будет уже известна из анализа предыдущих, более грубых моделей.

5. Типы связей между системами различной физической природы

Как правило, ИТО представляет собой совокупность разнородных физических систем. Поэтому после составления эквивалентных схем однородных физических систем следует установить связи между ними. Можно выделить три типа связей [1, 3]: трансформаторная, гириаторная, через зависимые параметры элементов.

Трансформаторная связь. В этом случае в одной физической системе включается зависимый источник разности потенциалов. Этот источник определяется разностью потенциалов на зависимом источнике потока, установленном в другой подсистеме, который в свою очередь зависит от потока через первый источник.

Трансформаторный тип связи характерен для разнородных физических систем, например при электромеханическом взаимодействии.

Гириаторная связь. В этом случае в двух физических системах включаются зависимые источники одного вида: либо типа разности потенциалов, либо типа потока. Источники типа разности потенциалов в одной системе зависят от потока через источник в другой системе, источники типа потока которой зависят от разности потенциалов на источнике в следующей системе. Такой вид связи характерен, например, при взаимодействии механической и гидравлической или пневматической систем.

Связь через зависимые параметры. Этот тип связи характерен при взаимодействии с тепловой физической системой. В зависимости от значений температуры меняются параметры элементов взаимодействующей физической системы, например значение сопротивления резистора. Обратное влияние на тепловую систему учитывается введением в эквивалентную схему тепловой системы зависимых источников теплового потока.

6. Примеры моделирования технических объектов на макроуровне

Механические вращательные и поступательные физические системы. Составить эквивалентные схемы технических объектов, представленных на рис. 3-6.

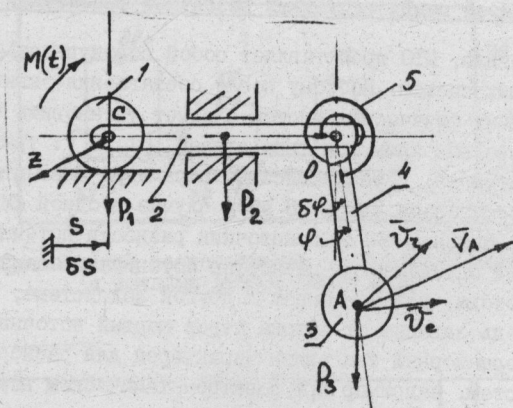


Рис. 3. Схема поступательно-вращательного механизма

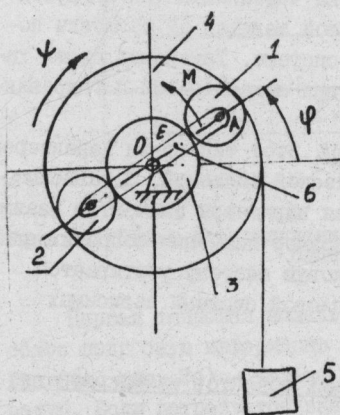


Рис. 4. Схема шестеренчатого механизма

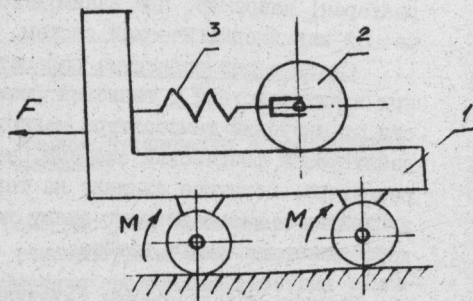


Рис. 5. Схема четырехколесной тележки

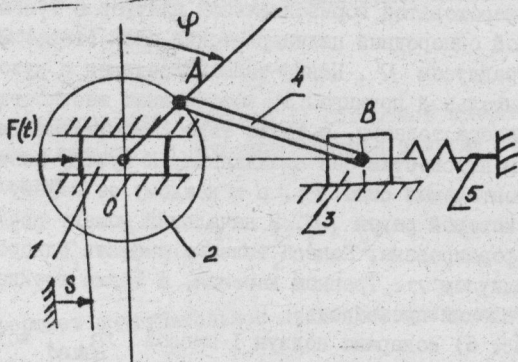


Рис. 6. Кривошипно-шатунный механизм

ИТО (рис. 3) содержит однородный круглый цилиндр I массой m_1 и радиусом R , который катится без скольжения по горизонтальной плоскости. К нему приложена пара сил с моментом $M(t)$. К оси цилиндра шарнирно прикреплен горизонтальный шток 2 массой m_2 , движущийся в горизонтальных направлениях. К штоку в точке O шарнирно прикреплен стержень 4 длиной l с грузом 3 массой m_3 на конце. Концы спиральной пружины 5, коэффициент жесткости которой равен C , прикреплены к штоку 2 и к стержню 4. При нижнем вертикальном положении стержня 4 пружина не деформирована.

ИТО (рис. 4) содержит водило 6 массой m_2 , которое вращается в вертикальной плоскости вокруг неподвижной оси, проходящей через точку O под действием пары сил с моментом $M(t)$. Оно приводит в движение две одинаковые шестерни I и 2 массой m_1 каждая. Шестерни I и 2 находятся в зацеплении с шестернями 3 и 4, свободно насаженными на общую ось. Ось вращения шестерен 3 и 4 совпадает с осью вращения водила. На шестерню 4 намотан нерастяжимый тросик, на свободном конце которого подвешен груз 5 массой m_5 . Шестерни 3 и 4 имеют массы m_3 и m_4 соответственно. Радиусы шестерен I и 2 равны r_1 , радиус шестерни 3 равен r_2 .

ИТО (рис. 5) содержит четырехколесную тележку I, которая движется поступательно прямолинейно по шероховатой горизонтальной плоскости. Масса кузова тележки m_1 , масса каждого коле-

са m . На шероховатой горизонтальной платформе тележки находится сплошной однородный цилиндрический блок (тело) 2 массой m_2 и радиусом R . Центр тела 2 соединен с кузовом тележки горизонтальной пружиной 3, коэффициент жесткости которой равен C . Колеса тележки, а также тело 2 могут катиться по своим опорным плоскостям без скольжения. К кузову тележки приложена горизонтальная сила F , а к каждому ее колесу — пара сил, момент которой равен M . В начальный момент времени пружина 3 не деформирована. Колеса тележки считать однородными дисками с радиусом r . Трением качения, а также трением на осях колес тележки пренебречь.

ИТО (рис. 6) содержит ползун 1 массой m_1 , который движется в горизонтальных направлениях, к нему шарнирно прикреплён однородный диск 2 массой m_2 и радиусом r . Диск 2 через шатун 4 приводит в движение ползун 3 массой m_3 . Длина шатуна 4 равна радиусу диска 2. К ползуну 3 прикреплен левый конец горизонтальной пружины 5. Правый конец этой пружины закреплён неподвижно. Коэффициент жесткости пружины C . К ползуну 1 приложена горизонтальная сила $F(t)$. Трением между ползунами 1, 3 и их направляющими, трением в шарнирах, а также массами шатуна 4 и пружины 5 пренебречь. В качестве обобщенных координат выбрать: φ — угол поворота диска 2 и s — перемещение ползуна 1. Полагать, что при $s = 0$ и $\varphi = 0$ пружина 5 не деформируется.

Рассмотрим построение ММ ИТО на макроуровне и соответствующую ей эквивалентную схему для технического объекта, представленного на рис. 3. Число степеней свободы ИТО $n = 2$, поэтому вводим в рассмотрение две обобщенные координаты

$$q_1 = s; \quad q_2 = \varphi.$$

ММ ИТО на макроуровне представляет собой уравнения Лагранжа II рода [2]:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{s}} - \frac{\partial T}{\partial s} = Q_s; \\ \frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}} - \frac{\partial T}{\partial \varphi} = Q_\varphi, \end{cases}$$

где Q_s и Q_φ — обобщенные силы.

Кинетическая энергия ИГО T равна сумме кинетических энергий трех тел:

$$T = T_1 + T_2 + T_3.$$

Причем первое тело (цилиндр I) совершает вращательно-поступательное движение, и его кинетическая энергия T_1 может быть определена

$$T_1 = \frac{1}{2} m_1 v_c^2 + \frac{1}{2} J_{cz} \omega_1^2.$$

Шток 2 совершает поступательное движение, и его кинетическая энергия T_2 равна

$$T_2 = \frac{1}{2} m_2 v_c^2.$$

Кинетическая энергия груза 3 T_3 составляет

$$T_3 = \frac{1}{2} m_3 v_A^2,$$

где

$$v_c = \dot{s}; \quad \omega_1 = \frac{\dot{s}}{R}; \quad J_{cz} = \frac{1}{2} m_1 R^2;$$

$$\bar{V}_A = \bar{V}_e + \bar{V}_r;$$

$$v_e = v_c = \dot{s}; \quad v_r = \omega_1 l = \dot{\phi} l;$$

$$\begin{aligned} v_A^2 &= v_e^2 + v_r^2 - 2 v_e v_r \cos\left(\frac{\pi}{2} + \varphi\right) = \\ &= \dot{s}^2 + l^2 \dot{\phi}^2 + 2 \dot{s} l \dot{\phi} \sin \varphi. \end{aligned}$$

Тогда кинетическую энергию ИГО можно записать в следующем виде:

$$T = T_1 + T_2 + T_3 = \frac{1}{2} m_1 \dot{s}^2 + \frac{1}{2} \frac{m R^2}{2} \frac{\dot{s}^2}{l^2} + \frac{1}{2} m_2 \dot{s}^2 +$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{1}{2} m_3 (\dot{s}^2 + l^2 \dot{\varphi}^2 + 2l\dot{s}\dot{\varphi} \sin \varphi) = \frac{1}{2} \left[\left(m_1 + \frac{m_2}{2} \frac{R^2}{l^2} + m_2 + \right. \right. \\
& \left. \left. + m_3 \right) \dot{s}^2 + 2m_3 l \dot{s} \dot{\varphi} \sin \varphi + m_3 l^2 \dot{\varphi}^2 \right] = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{m_1 (2l^2 + R^2) + (m_2 + m_3) 2l^2}{2} \right) \dot{s}^2 + 2m_3 l \dot{s} \dot{\varphi} \sin \varphi + \right. \\
& \left. + m_3 l^2 \dot{\varphi}^2 \right] = \\
& = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{m_1 (2l^2 + R^2) + (m_2 + m_3) 2l^2}{2} \right) \dot{s}^2 + 2m_3 l \dot{s} \dot{\varphi} \sin \varphi + \right. \\
& \left. + m_3 l^2 \dot{\varphi}^2 \right].
\end{aligned}$$

Определим производные $\frac{\partial T}{\partial s}$; $\frac{\partial T}{\partial \varphi}$; $\frac{\partial T}{\partial \dot{s}}$; $\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{s}}$; $\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}}$:

$$\frac{\partial T}{\partial s} = 0; \quad \frac{\partial T}{\partial \varphi} = m_3 l \dot{s} \dot{\varphi} \cos \varphi;$$

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{s}} = \frac{m_1 (2l^2 + R^2) + (m_2 + m_3) 2l^2}{2} \dot{s} + 2m_3 l \dot{\varphi} \sin \varphi;$$

$$\begin{aligned}
\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{s}} &= \frac{m_1 (2l^2 + R^2) + (m_2 + m_3) 2l^2}{2} \ddot{s} + 2m_3 l \dot{\varphi} \sin \varphi + \\
&+ 2m_3 l \dot{\varphi}^2 \cos \varphi;
\end{aligned}$$

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}} = m_3 l \dot{s} \sin \varphi + m_3 l^2 \dot{\varphi};$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}} = m_3 l \ddot{s} \sin \varphi + m_3 l \dot{s} \dot{\varphi} \cos \varphi + m_3 l^2 \ddot{\varphi}.$$

Определим обобщенные силы Q_s и Q_φ

$$Q_i = \frac{(\sum \delta A_k)_i}{\partial q_i},$$

где $(\sum \delta A_k)_i$ - сумма элементарных работ по обобщенной координате q_i .

Если $\delta_s \neq 0$; $\delta_\varphi = 0$; $(\sum \delta A_k)_s = M(t) \cdot \partial \varphi$;

$$\omega_1 = \frac{\dot{s}}{R} \rightarrow \varphi_1 = \frac{s}{R} \rightarrow \partial \varphi = \frac{\partial s}{\partial R} \rightarrow$$

$$\rightarrow (\sum \delta A_k)_s = M(t) \frac{\partial s}{R},$$

то

$$Q_s = \frac{M(t)}{R}.$$

Если $\delta_s = 0$; $\delta_\varphi \neq 0$; $(\sum \delta A_k)_\varphi = -P_3 l \sin \varphi \delta \varphi -$
 $-M_{np} \delta \varphi$; $P_3 = m g$; $M_{np} = c \varphi \rightarrow (\sum \delta A_k)_\varphi =$
 $= -(m g l \sin \varphi + c \varphi) \delta \varphi,$

то $Q_\varphi = -(m g l \sin \varphi + c \varphi).$

Тогда окончательно ММ ИГО на макроуровне будет иметь следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{m(2l^2 + R^2) + (m_2 + m_3)2l^2}{2} \ddot{s} + 2m_3 l \ddot{\varphi} \sin \varphi + \\ + 2m_3 l \dot{\varphi}^2 \cos \varphi = \frac{M(t)}{R}; \\ m_3 l \ddot{s} \sin \varphi + m_3 l \cdot \dot{s} \dot{\varphi} \cos \varphi + m_3 l \ddot{s} \ddot{\varphi} - \\ - m_3 l \dot{s} \dot{\varphi} \cos \varphi = -m g l \sin \varphi - c \varphi, \end{array} \right.$$

а общая эквивалентная схема ИГО представлена на рис. 7.

Тепловая физическая система. Составить эквивалентные схемы технических объектов, представленных на рис. 8-II.

ИГО (рис. 8) представляет фрагмент печатной платы, который разбит на четыре участка. Микросхемы являются источниками теплового потока Φ_1 и Φ_2 .

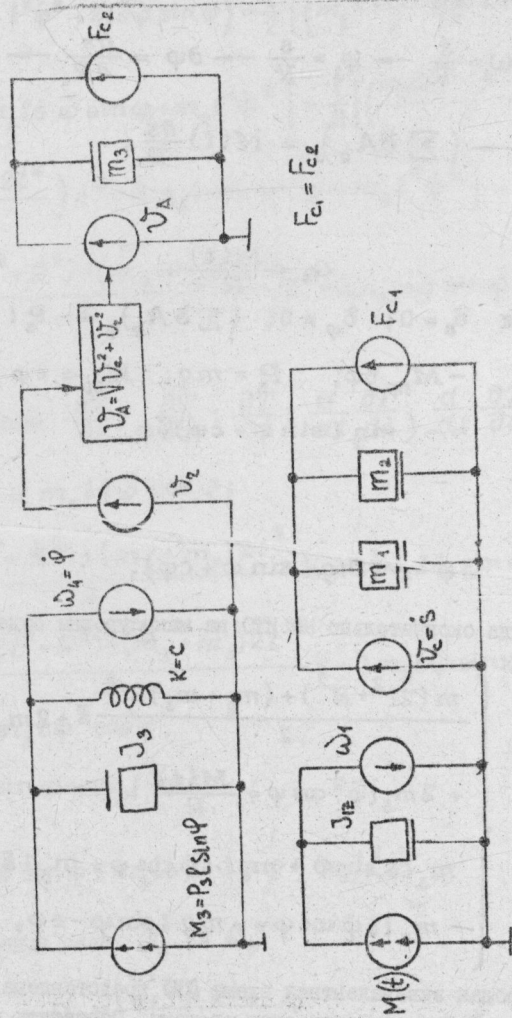


Рис. 7. Эквивалентная схема для ИТО

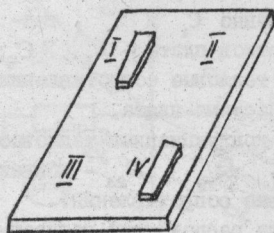


Рис. 8. Фрагмент конструкции печатной платы с микросхемами

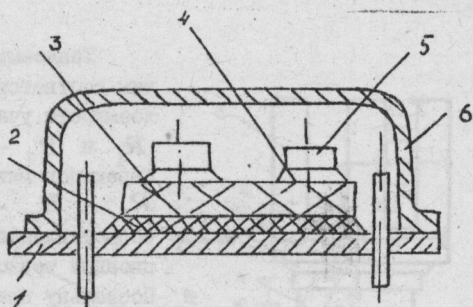


Рис. 9. Конструкция микросборки

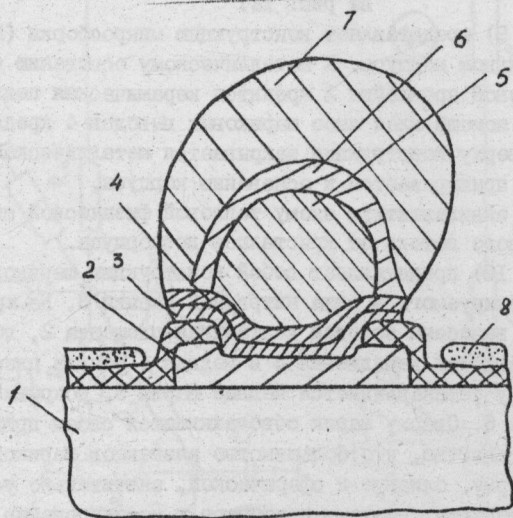


Рис. 10. Конструкция шарикового вывода микросборки

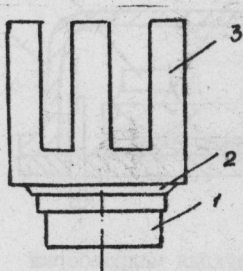


Рис. II. Узел мощного диода с ребристым радиатором

Теплоемкости микросхем обозначим соответственно C_1 и C_2 , теплоемкости участков платы — $C_3 \dots C_6$; R_1 и R_2 — тепловые сопротивления переходов микросхема-плата, $R_3 \dots R_{18}$ — кондукционные тепловые сопротивления, $R_{19} \dots R_{23}$ — конвекционные тепловые сопротивления. Поскольку плата расположена горизонтально, то при построении эквивалентной схемы ИТО теплоотдачей от платы во внешнюю среду можно пренебречь. Эквивалентная схема ИТО представлена на рис. I2.

ИТО (рис. 9) представляет конструкцию микросборки (МСБ) в металлостеклянном корпусе. К металлическому основанию (дну) I при помощи клеевой прослойки 2 крепится керамическая подложка 3. К подложке при помощи клея либо шариковых выводов 4 крепятся кристаллы 5. Сверху конструкция закрывается металлической крышкой 6, которая приваривается к основанию корпуса.

Построить эквивалентную схему тепловой физической системы для пути теплового потока от кристаллов до корпуса.

ИТО (рис. 10) представляет собой конструкцию шарикового вывода МСБ, формируемого в окне нитридной пленки 8. На кремниевую пластину I нанесена золотая контактная площадка 2, поверх которой располагаются ванадиевая 3 и медная 4 тонкие пленки. На медную пленку устанавливается медный шарик 5, покрытый пленкой серебра 6. Сверху шарик обволакивается слоем припоя 7.

То обстоятельство, что большинство элементов шарикового вывода имеет форму, близкую к сферической, значительно усложняет тепловые расчеты, поэтому прибегают к моделированию на макроуровне путем замены тел, форма которых близка к сферической, эквивалентными телами цилиндрической формы. С учетом этого построить эквивалентную схему тепловой физической системы для теплового потока от кристалла к подложке.

ИТО (рис. II) представляет собой конструкцию, включающую мощный диод I, прокладку 2 и ребристый радиатор 3.

Построить эквивалентную схему для тепловой физической системы рассматриваемой конструкции (конвекцией теплового потока под диодом можно пренебречь).

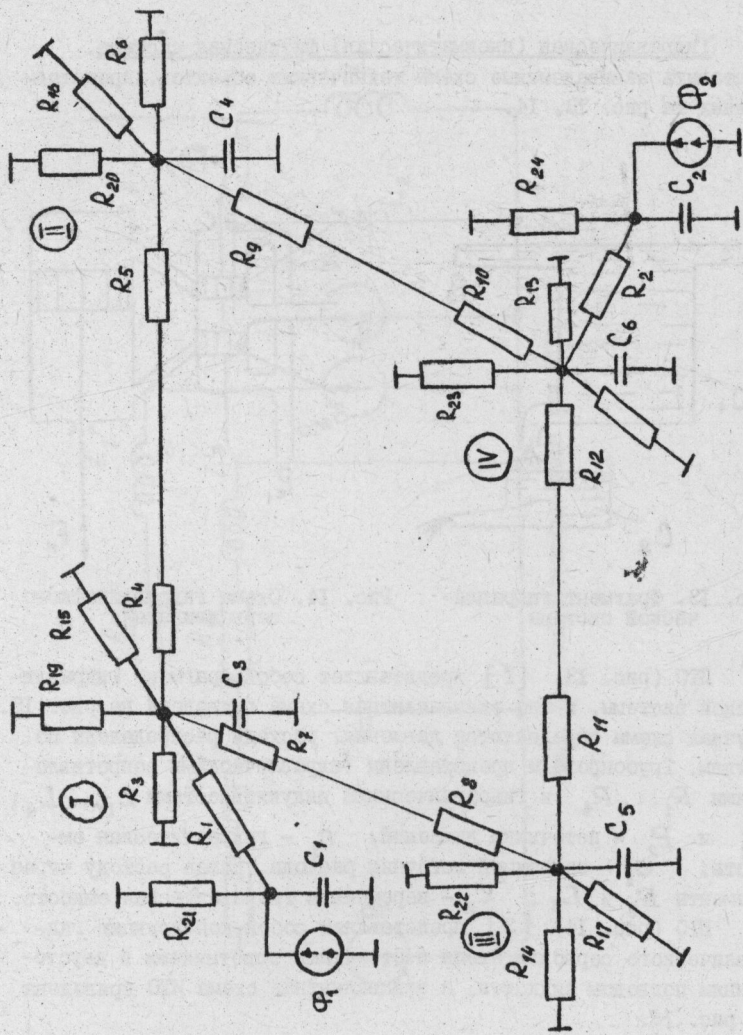


Рис. 12. Эквивалентная схема для ИТО

Гидравлическая (пневматическая) физическая система.

Составить эквивалентные схемы технических объектов, представленных на рис. 13, 14.

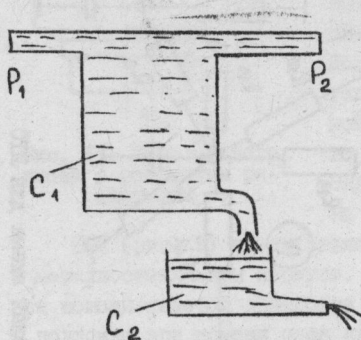


Рис. 13. Фрагмент гидравлической системы

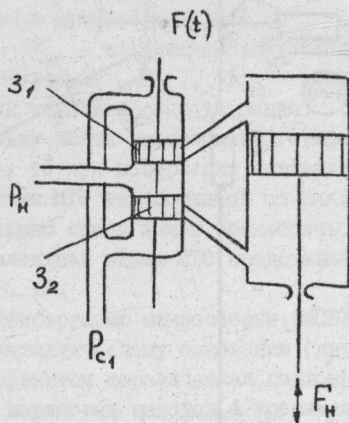


Рис. 14. Схема гидравлического серводвигателя

ИТО (рис. 13) [1] представляет собой фрагмент гидравлической системы, а его эквивалентная схема приведена на рис. 15. В узлах схемы определяются давления, расходы распределены по ветвям. Трубопроводы представлены гидравлическими сопротивлениями $R_1 \dots R_4$ и гидравлическими индуктивностями $L_1 \dots L_4$; P_1 и P_2 - источники давлений; C_1 - гидравлическая емкость; G_1 - зависимый источник расхода, равен расходу через элементы R_3 и L_3 ; C_2 - переменная гидравлическая емкость.

ИТО (рис. 14) [3] представляет собой конструкцию гидравлического серводвигателя с отсечными золотниками и двусторонним подводом жидкости, а эквивалентная схема ИТО приведена на рис. 16.

Серводвигатель - это достаточно сложный технический объект, в котором можно выделить три физические системы: одну гидравлическую и две механические.

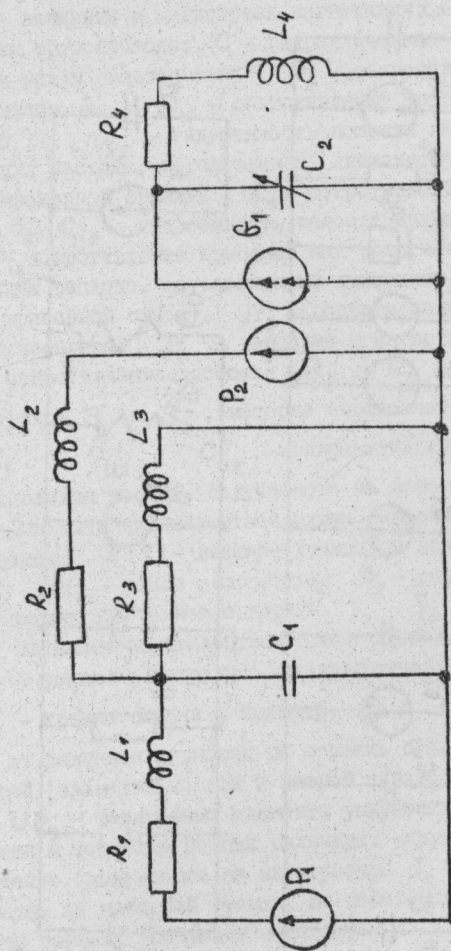


Рис. 15. Эквивалентная схема для ИТО

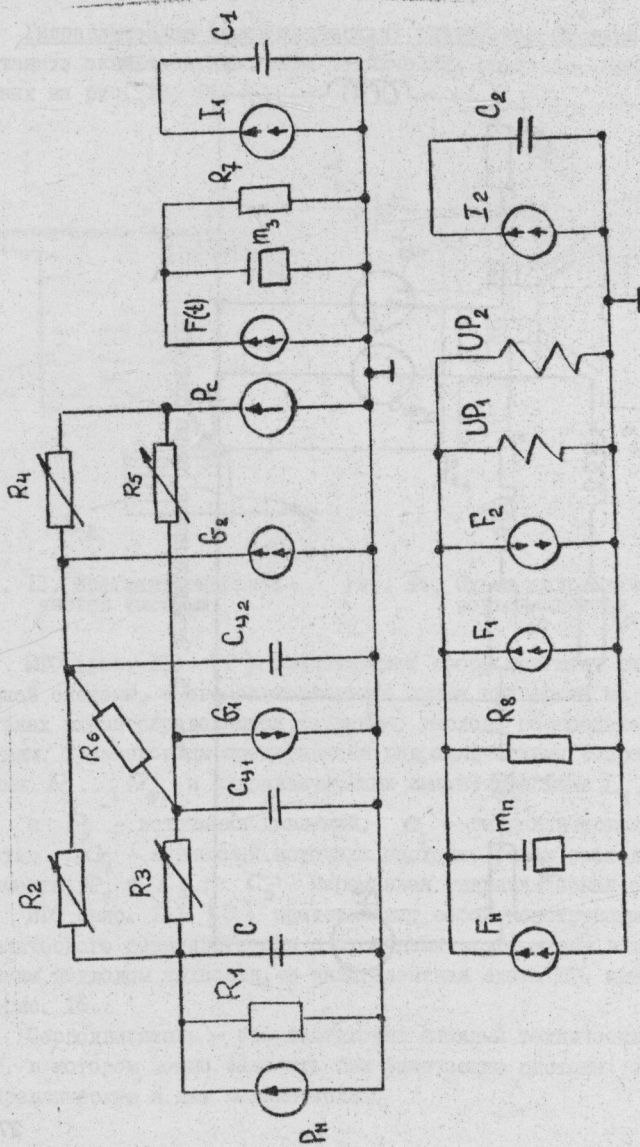


Рис. 16. Эквивалентная схема для ИТО

Элементы эквивалентной схемы гидравлической системы:

P_H - давление в магистрали нагнетания; R_1 - потери в подводящем трубопроводе; C - гидравлическая емкость полости цилиндра между золотниками; R_2 - сопротивление дросселя над золотником Z_1 ; R_3 - сопротивление дросселя под золотником Z_1 ; $C_{ц1}$ - гидроемкость полости над поршнем; G_1 - источник расхода, обусловленный движением поршня (элемент первой гираторной связи); R_4 - сопротивление дросселя под золотником Z_2 ; $C_{ц2}$ - гидроемкость полости цилиндра Ц под поршнем; R_5 - сопротивление дросселя над золотником Z_2 ; G_2 - источник расхода, обусловленный движением поршня (элемент второй гираторной связи); R_6 - сопротивление утечки между поршнем и корпусом; P_C - давление в магистрали слива.

Сопротивление дросселя $R_2 \dots R_5$ зависит от положения золотников Z_1 и Z_2 , которое определяется на интеграторе $I_1 C_1$; $C_{ц1}$, $C_{ц2}$ - гидравлические емкости, зависящие от положения поршня, получаемого на интеграторе $I_2 C_2$.

Элементы эквивалентной схемы первой механической системы следующие: $F(t)$ - внешнее усилие на золотники - функция времени; m_3 - масса золотников; R_7 - сопротивление, учитывающее трение золотников о корпус.

Элементы эквивалентной схемы второй механической системы: F_H - усилие в нагрузке серводвигателя; m_n - масса поршня; R_8 - трение поршня о цилиндр; F_1 и F_2 - усилия, возникающие от давления жидкости на поршень с одной его стороны и с другой (элементы первой и второй гираторных связей); UP_1 и UP_2 - нелинейные элементы упругости, отображающие упоры поршня в торцевые стенки цилиндра; упругость изменяет свое значение (получаемое на интеграторе $I_2 C_2$) от нуля, когда поршень не касается стенок, до некоторого конечного значения, когда поршень упирается в стенку.

В первой механической системе никак не учтено взаимодействие с гидравлической системой, поскольку это взаимодействие постоянно и не изменяется от режима работы (его можно учесть добавлением к массе золотников массы перемещаемой жидкости при перемещении золотников).

Построить общие эквивалентные схемы для технических объектов, представленных на рис. 17-21.

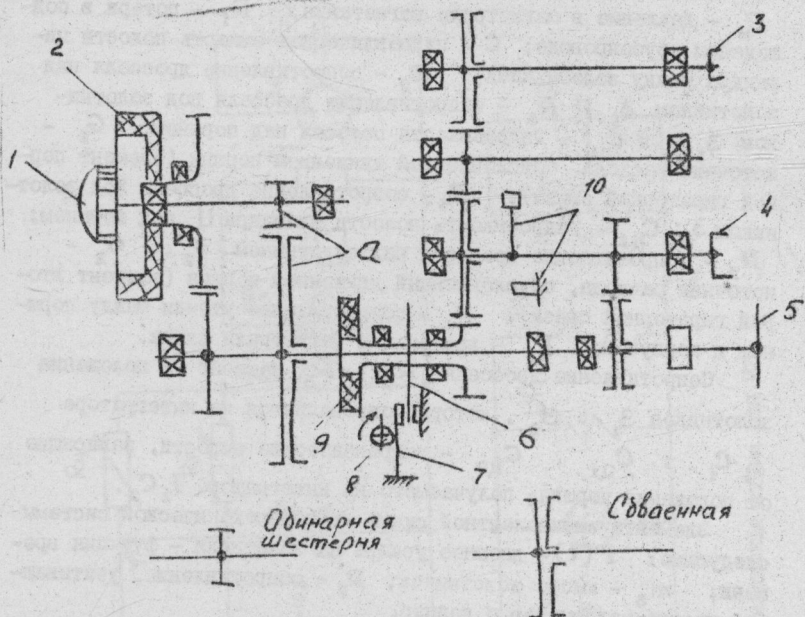
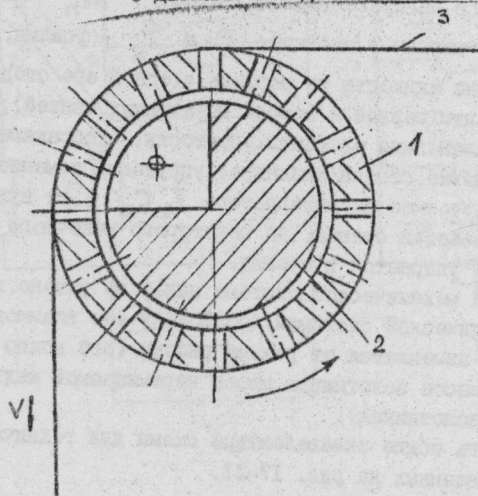


Рис. 17. Схема конструкции верньерно-шкального устройства с двойным замедлением



30 Рис. 18. Конструкция вакуумного ведущего вала ЛПМ

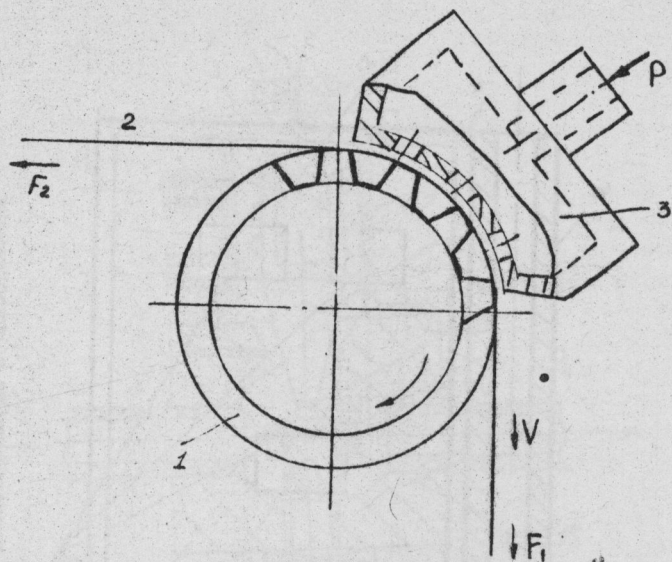


Рис. 19. Конструкция пневматического привода ЛММ

ИТО (рис. 17) представляет собой конструкцию верньерно-шкального устройства с двойным замедлением.

Верньерное устройство является неременной частью большинства связанных профессиональных приемников и предназначается для преобразования простейших движений руки оператора в необходимые перемещения подвижных частей элементов настройки колебательных контуров. Если в механизм устройства включена отсчетная шкала, то она называется верньерно-шкальным устройством. Коэффициент замедления верньера в радиоприемниках составляет от 20 до 80 при сопротивлении вращению, ощущаемому рукой оператора в пределах $5 \cdot 10^{-3} \dots 30 \cdot 10^{-3}$ Н·м. Тяговый момент вращения находится в пределах 5...30 Н·м, при этом верньер должен иметь минимальный люфт (мертвый ход). Верньеры, имеющие отсчетные шкалы, выполняются с применением зубчатых передач, люфты в которых устраняются с помощью сдвоенных шестерен. Вращая ручку 2 грубой настройки, можно быстро перестраиваться с одного участка диапазона на другой.

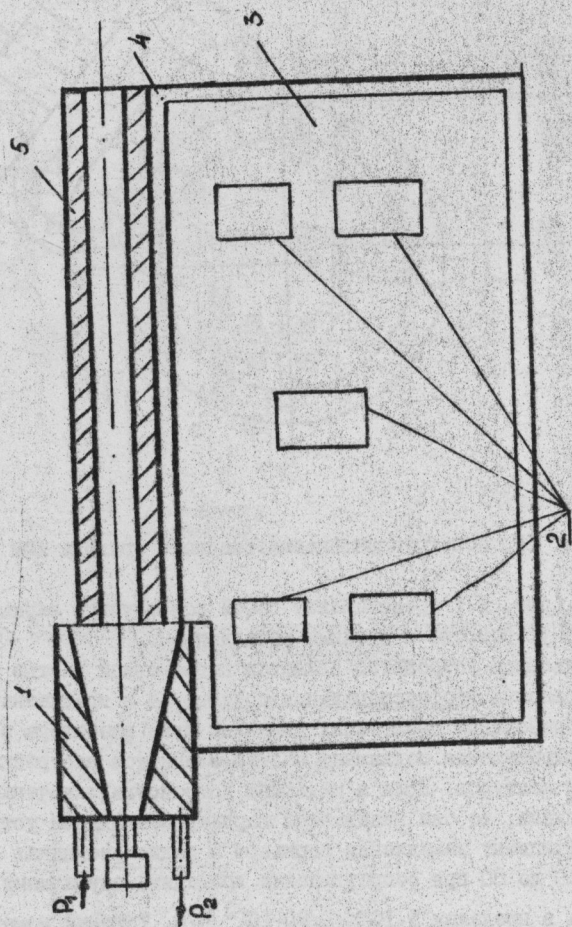


Рис. 20. Конструкция печатной платы с микроэлементами, охлаждаемой с помощью тепловой трубки

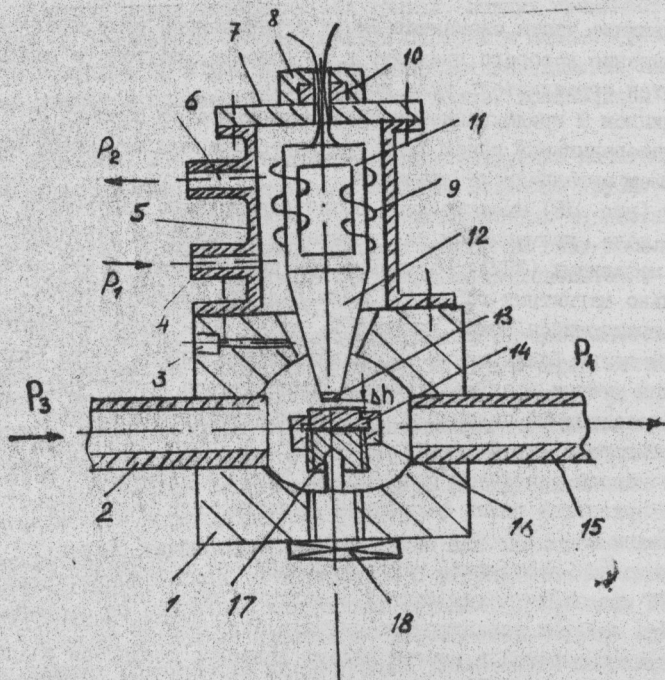


Рис. 21. Конструкция установки для ультразвуковой гидроабразивной обработки детали

При вращении ручки I точной настройки дополнительное замедление обеспечивается парой шестерен α . Вращение ручек передается на муфты сцепления. Муфта 4 передает вращение на блок первого гетеродина, а муфта 3 - на блок УВЧ. Вал шкалы настройки 5 соединен с валом муфты 4 через замедляющую безмуфтную передачу, поэтому угол поворота шкалы больше угла поворота муфты, что дает возможность уменьшить плотность настройки.

Для предотвращения самопроизвольного проворачивания механизма верньера при приеме предусмотрено стопорное устройство, состоящее из фрикционного диска 6, пружины 7 и кулачка 8.

Для застопоривания поворачивает кулачок 8 в направлении стрелки; он давит на пружину 7, которая в свою очередь прижимает край диска 6 к упору.

Подвижные части элементов имеют ограниченный угол поворота, превышение которого приводит к их поломке, поэтому в верньере имеется ограничитель угла поворота IO.

Фрикцион 9 предохраняет механизм верньера от поломки в случае поворачивания ручек I, 2 при застопоренном механизме или сработавшем ограничителе вращения.

ИГО (рис. 18) представляет собой конструкцию вакуумного ведущего вала, применяется для повышения надежности лентопротяжного механизма (ЛПМ), поскольку при протягивании лента касается только магнитных головок. Здесь ведущим является тонкостенный вращающийся полый цилиндр I, вдоль образующих которого прорезаны щели. Длина щелей несколько меньше ширины ленты (для уменьшения утечки воздуха). Внутри вращающегося полого цилиндра помещен неподвижный цилиндр 2, снабженный воздушной камерой в виде сектора с дугой схвата около 90° . В камере с помощью вакуумного насоса создается разрежение. Лента 3 охватывает нерабочей поверхностью полый цилиндр на участке, где расположена полая камера.

В исходном состоянии, когда в камере нет разрежения из-за воздушной прослойки между лентой и ведущим валом, лента не движется. При наличии управляющего сигнала открывается пневмоклапан вакуумного насоса и внутри полого цилиндра создается разрежение, а снаружи — избыточное давление, под действием которого лента прижимается к ведущему валу и приводится в движение.

Существуют приводные механизмы ленты с одним или двумя вакуумными валами. При двух вращающихся в разные стороны вакуумных валах изменение направления движения ленты происходит, как и в механизме с двумя прижимными роликами, при торможении ленты и при возбуждении пневмоклапаном другого вакуумного вала.

Привод с вакуумным ведущим валом является быстродействующим, однако требует большой точности изготовления, сложен, чувствителен к загрязнению и шумит при работе.

ИГО (рис. 19) представляет собой конструкцию пневматического привода ленты с ее поджатием путем наддува воздуха над лентой. Этот привод состоит из монолитного ведущего вала I и цилиндра с большим числом борозд вдоль образующих. При отсутствии наддува между валом и лентой имеется воздушная прослойка. Для приведения ленты 2 в движение в камеру 3, имеющую множество мелких отверстий над лентой, подается воздух под давлением:

Проходя через отверстие над лентой, воздух прижимает ее к валу. В результате обеспечивается быстрый и плавный разгон ленты примерно за 2 мс. Изменение направления движения ленты осуществляется применением двух таких валов, вращающихся в разные стороны.

ИТО (рис. 20) представляет собой конструкцию печатной платы с микросхемами, охлаждаемой с помощью тепловой трубы. Тепловая труба (ТТ) — устройство, предназначенное для переноса теплового потока с одного конца трубы в другой за счет использования открытой теплоты фазового превращения теплоносителя, помещенного внутри герметичной ТТ.

Отвод теплоты от платы с микросхемами осуществляется следующим образом: от микросхем 2 тепловой поток через монтажную плату 3 передается к металлической рамке 4, в часть которой встроена тепловая труба 5. Зона конденсации выполнена в виде конуса, плотно вставленного в конусное отверстие теплообменника I. Такое решение позволяет избежать непосредственного омывания жидкостью конструкций ЭВА (РЗА).

Тепловые трубы используются также для охлаждения целых радиоэлектронных блоков, в аппаратуре с упорядоченной структурой элементов, во вторичных источниках питания. Применение ТТ в таких системах позволяет эффективно использовать корпус прибора как внешнюю поверхность теплообмена, увеличивать компактность прибора, а также исключать контакт охлаждающей среды с элементами.

ИТО (рис. 21) представляет собой технологическую установку для ультразвуковой гидроабразивной обработки заготовок из труднообрабатываемых металлов и сплавов, в которой ввод ультразвуковых колебаний частотой 18...22 кГц в абразивный поток жидкости осуществляется с помощью магнитострикционного вибратора (пакет II и концентратор I2), вставленного в рабочую камеру I. Вибратор посредством фланца крепится к кожуху, прикрепленному к верху рабочей камеры. Рабочая камера имеет два плексигласовых окна для наблюдения за обрабатываемой заготовкой I4. Снизу, напротив концентратора, в камеру ввернут держатель I8 заготовки с подставкой I7, поддерживающей заготовку I4. Заготовка I4, имеющая форму ступенчатого цилиндрика, крепится накидной гайкой I6.

В данном случае обрабатываемая заготовка I4 неподвижна,

что имеет принципиальное значение, так как в этом случае поверхность заготовки не подвергается существенному прямому ударному действию жидкости, которое возникает при креплении заготовки к концентратору. На рис. 21: 2 - подводящий трубопровод абразивной жидкости; 3 - штуцер манометра; 4 - подвод охлаждающей воды; 5 - охлаждающий кожух; 6 - отвод воды; 7 - крышка; 8 - гайка; 9 - обмотка; 10 - сальники; 13 - вставка; 15 - отводящий абразивную суспензию трубопровод.

Л и т е р а т у р а

1. Системы автоматизированного проектирования: Учеб. пособие для вузов: В 9 кн. М.: Высшая школа, 1986. Кн. 4: В.А.Трудоношин, Н.В.Пивоварова. Математические модели технических объектов / Под ред. И.П.Норенкова. 166 с.

2. Дронг В.И., Максимов Г.М., Огурцов А.И. Уравнения Лагранжа II рода: Метод. указания к курсовой работе по динамике. М.: МВТУ, 1985. С. 3-14.

3. Системы автоматизированного проектирования: Учеб. пособие для вузов: В 9 кн. М.: Высшая школа, 1986. Кн. 8: Сборник примеров и задач. Д.М.Жук, Н.М.Капустин, С.С.Камалов и др.; Под ред. И.П.Норенкова. 143 с.

4. Дульнев Г.Н. Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре: Учебник для вузов по спец. "Конструирование и производство радиоаппаратуры". М.: Высшая школа, 1984. 247 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. Аналогии фазовых переменных и компонент для различных физических систем	4
2. Аналогии компонентных уравнений	4
3. Аналогии топологических уравнений	4
4. Построение эквивалентных схем технических объектов	11
5. Типы связей между системами различной физической природы	15
6. Примеры моделирования технических объектов на макроуровне	15
Литература	36

