

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
**«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ»**

Кафедра автоматизированного электропривода и электротехники

ЭЛЕКТРОПРИВОД БУММАШИНЫ

Программа, методические указания и
контрольные работы

Факультет – заочный

Санкт-Петербург

2014

В в е д е н и е. Термин "Электропривод". Классификация электроприводов. Значение электропривода и научно-технической революции в создании материально-технической базы коммунизма. Роль электропривода в развитии автоматизированных систем управления производственными процессами. Значение подготовки по электроприводу для инженеров специальности "Машины и аппараты ЦВП". (/I/ с. 5 - 14).

М е х а н и ч е с к и е х а р а к т е р и с т и к и э л е к т р о п р и в о д о в. Механические характеристики производственных машин и электродвигателей. Механические характеристики двигателей постоянного тока независимого, смешанного и последовательного возбуждения, тормозные режимы. Механические характеристики асинхронных двигателей, способы пуска двигателей, тормозные режимы. Механическая и угловая характеристики синхронных двигателей, способы пуска синхронных двигателей. (/I/ с. 48 - 93).

Р е г у л и р о в а н и е с к о р о с т и в р а щ е н и я э л е к т р о п р и в о д о в. Основные показатели регулирования скорости вращения: диапазон, плавность, экономичность, стабильность. Регулирование скорости двигателей постоянного тока независимого возбуждения, система генератор-двигатель. Замкнутые системы регулирования. Системы электропривода с тиристорными преобразователями.

Регулирование скорости асинхронных двигателей: изменением сопротивлений роторной цепи, переключением числа пар полюсов, изменением частоты питающей сети. (/I/ с. 93 - 123, 141 - 165).

П е р е х о д н ы е р е ж и м ы э л е к т р о п р и в о д о в. Общие сведения о переходных режимах. Уравнение динамики электропривода. Приведение статических моментов и моментов инерции к одной оси. Механические переходные режимы электропривода с двигателем постоянного тока. Графическое и графо-аналитическое решение уравнения движения электропривода.

Электромагнитные переходные процессы в цепях обмоток возбуждения. Электромеханические переходные процессы электропривода системы генератор-двигатель, системы тиристорный преобразователь - двигатель.

Механические переходные процессы в приводах с асинхронными двигателями. (/I/ с. 26 - 48, 266 - 298, 301 - 325).

Выбор мощности двигателей. Нагрузочные диаграммы. Общие соображения при выборе мощности двигателя. Нагревание и охлаждение двигателя при длительном режиме. Выбор мощности двигателей при длительном, кратковременном и повторно-кратковременном режимах работы. Методы эквивалентных величин. Выбор мощности двигателей по удельным нагрузкам.

Нагрузочные диаграммы электроприводов, использование их при проверке двигателя на нагрев. (/1/ с. 325 - 365).

Автоматическое управление электроприводами. Принципы автоматического управления пуском и торможением (управление в функции скорости, тока и времени).

Замкнутые системы автоматического управления. Использование электромашинных, магнитных и полупроводниковых усилителей в замкнутых системах управления электроприводами.

Автоматическое управление однодвигательными электроприводами бумагоделательных машин. Управление многодвигательными электроприводами с общим и индивидуальными секционными преобразователями.

(/1/ с. 388 - 424, 425 - 452, 462 - 490),

(/2/ с. 42 - 60, 74 - 92).

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К РАЗДЕЛАМ КУРСА

Введение. Приступая к изучению курса, следует иметь четкое представление о понятии "Электропривод", который является одним из основных узлов рабочих машин. Надежная работа электропривода во многом определяет объем и качество выпускаемой продукции. Современный автоматизированный электропривод и его система управления выполняют достаточно широкие и весьма разнообразные функции, обеспечивая рациональное ведение технологического процесса.

Механические характеристики электроприводов. Механической характеристикой электропривода называют зависимость скорости вращения электродвигателя от момента на его валу. Уравнение механической характеристики двигателей постоянного тока может быть получено из уравнения равновесия напряжений якорной цепи и зависимостей момента от магнитного потока и тока якоря и ЭДС от скорости вращения и магнитного потока. Уравнение механической характеристики справедливо для машин постоянного тока с любым возбуждением.

При неизменном потоке возбуждения, что характерно для двигателей с независимым и параллельным возбуждением, механическая характеристика представляет прямую линию. Наклон ее пропорционален сопротивлению якорной цепи и обратно пропорционален квадрату магнитного потока. Скорость вращения двигателя при отсутствии статического момента на его валу называют скоростью идеального холостого хода. Последняя пропорциональна приложенному напряжению и обратно пропорциональна магнитному потоку.

Двигатели постоянного тока с независимым и параллельным возбуждением могут создавать тормозные режимы: с отдачей энергии в сеть (рекуперативное торможение), динамическое торможение и торможение противовключения. Рекуперативное торможение обеспечивается при вращении двигателя рабочей машиной со скоростью, большей скорости идеального холостого хода. Такое торможение получается, например, когда двигатель получает питание от преобразователя (электромашиного или тиристорного) при резком уменьшении выходного напряжения преобразователя. В режиме динамического торможения (якорь двигателя отключается от сети и замыкается на тормозное сопротивление) запасенная кинетическая энергия превращается двигателем в электрическую и расходуется на нагревание сопротивлений якорной цепи. Тормозной режим противовключения обеспечивает наиболее быстрое торможение при большом токе якорной цепи, величину которого необходимо ограничить до допустимого значения включением дополнительного сопротивления.

Двигатель постоянного тока с последовательной обмоткой возбуждения имеет мягкую механическую характеристику. Это объясняется тем, что поток возбуждения зависит от тока якоря. Так, при малом моменте мал и поток возбуждения и скорость двигателя велика. С увеличением момента увеличивается поток возбуждения и скорость двигателя значительно снижается.

Механические характеристики двигателя смешанного возбуждения занимают промежуточное положение между характеристиками двигателя независимого и последовательного возбуждения. Степень приближения к той или иной характеристике зависит от доли потока, создаваемого обмоткой последовательного возбуждения. В большинстве случаев поток обмотки последовательного возбуждения составляет 15-20 % суммарного потока. В этом случае механическая характеристика близка к характеристике двигателя с независимым возбуждением, но нелинейна ввиду наличия потока обмотки последовательного возбуждения.

Рекуперативное торможение двигателей последовательного возбуждения невозможно, так как его скорость идеального холостого хода равна бесконечности. Для двигателей смешанного возбуждения такое торможение выполняется при отключенной обмотке последовательного возбуждения, так как в генераторном режиме изменяется направление тока якорной цепи и, следовательно, изменяется направление потока, создаваемого последовательной обмоткой возбуждения.

Для двигателей последовательного и смешанного возбуждения наиболее часто используется торможение противовключением. Динамическое торможение выполняется при независимом питании обмотки возбуждения.

Асинхронный двигатель получил широкое распространение благодаря своей простоте конструкции и надежности в эксплуатации. Механическая характеристика двигателя может быть получена на основе анализа упрощенной схемы замещения двигателя. Асинхронный двигатель весьма чувствителен к изменению напряжения, поскольку его момент пропорционален квадрату приложенного напряжения.

Синхронный двигатель характеризуется неизменной скоростью вращения независимо от момента на валу. Он используется для нерегулируемых электроприводов мощностью 100 кВт и более. Развиваемый двигателем момент зависит от напряжения, ЭДС и синуса угла между векторами ЭДС и напряжения сети. Максимальный момент двигателя, соответствующий предельному углу 90° , является критическим (по аналогии с моментом асинхронного двигателя). Для обеспечения необходимой перегрузочной способности, синхронный двигатель в номинальном режиме работает с углом нагрузки 20° – 30° . Наличие пусковой короткозамкнутой обмотки двигателя позволяет проводить его пуск как асинхронного — непосредственным включением на номинальное или пониженное напряжение.

Регулирование скорости вращения электроприводов. Регулированием скорости называется преднамеренное изменение скорости посредством устройств или приспособлений в зависимости от требований технологического процесса. Это понятие не следует смешивать с изменением скорости, вызываемым изменением статического момента.

В регулируемых электроприводах постоянного тока обычно используется двигатель с независимым возбуждением, благодаря его хорошим регулировочным свойствам. В электроприводах бумагоделательных машин (БМ) используется регулирование скорости как изменением напряжения якорных цепей, так и изменением магнитного потока. Широкое распространение получила система согласно-встречного включения, имеющая несколько больший диапазон, чем система Г-Д, но имеющая "мертвую" зону на половинной скорости.

В последние годы преимущественное применение в регулируемых приводах получила система тиристорный преобразователь — двигатель (ТП-Д), обладающая лучшими технико-экономическими показателями и малой инерционностью.

Увеличение диапазона регулирования и обеспечение большей жесткости механических характеристик двигателей достигается применением замкнутых систем. Как правило, в системах электропривода БМ используются обратные связи по току и скорости.

Разработка и освоение выпуска промышленностью силовых полупроводниковых приборов позволили создать тиристорные преобразователи частоты (ТПЧ) для регулирования скорости вращения асинхронных двигателей. Электротехнической промышленностью выпускаются ТПЧ с регулируемой частотой от 5 до 60 Гц.

Переходные режимы электроприводов. Переходным режимом называют режим при переходе от одного установившегося состояния к другому, вызванному изменением сопротивлений электрических цепей, напряжения питающей сети, момента нагрузки и т.п.

На переходные процессы влияет механическая инерция вращающихся и поступательно движущихся частей системы электропривода и электромагнитная инерция электрических цепей. Степень влияния каждой инерционности характеризуется постоянной времени: электромеханической и электромагнитной.

Иначе говоря, при рассмотрении переходных процессов должны учитываться обе инерционности, т.е. рассматриваться электромеханические процессы. Однако, в некоторых случаях, когда электромагнитная постоянная во много раз меньше электромеханической, можно учитывать только одну механическую инерцию. В этом случае такие переходные процессы называют механическими. Так, в электроприводах с асинхронными двигателями, за исключением питания их от ТПЧ, рассматривают механические переходные процессы. В электроприводах постоянного тока необходимо учитывать обе инерционности, в этом случае переходные процессы называют электромеханическими.

Выбор мощности двигателя. Длительная и надежная работа электропривода возможна при правильном выборе мощности двигателя. Его мощность должна быть выбрана в строгом соответствии с режимом работы, возможными изменениями нагрузки и допустимой перегрузкой.

При выборе мощности двигателя руководствуются допустимой температурой нагрева изоляции двигателя и его перегрузочной способностью. Последняя определяется условиями коммутации в машинах постоянного тока и критическим моментом в машинах переменного тока. Меньшая

мощность двигателя, чем требуется по условиям нагрева, приводит к недопустимому нагреву изоляции машины и, следовательно, к сокращению срока службы или к выходу из строя. Установка двигателя большей мощности приводит к увеличению габаритов установки и ее стоимости и ухудшению энергетических показателей.

Расчет мощности приводных секций БМ. Мощность, необходимая для вращения секций БМ, затрачивается на трение в различных элементах машины и на натяжение вырабатываемого полотна. Численное значение мощности зависит от ширины машины, ее скорости, вакуума в сосудах ящиках и валах, натяжения полотна и сукон, массы полотна, смазки подшипников, интенсивности отвода конденсата из сушильных цилиндров и т.п. Некоторые из этих факторов трудно учесть при расчете и поэтому на практике отдают предпочтение методам, основанным на статистических экспериментальных данных.

На практике используется: поэлементный метод, когда расчет необходимой мощности производится отдельно для каждого элемента секции с последующим суммированием результатов расчета; расчет по кривым "идеального момента" для отдельных секций, полученных с учетом результатов испытаний ряда машин и многолетнего опыта конструирования БМ; расчет по значениям удельных мощностей, полученным в результате обследования большого числа БМ.

В настоящее время при расчете мощности и выборе двигателя отдают предпочтение методу удельных мощностей, иногда называемому методом Таппи, разработанному позднее других и учитывающему особенности конструкции современных БМ.

В табл. I для БМ с шириной сети $B_c \geq 2285$ мм, кроме "Янки - машин" и машин, вырабатывающих целлюлозные листы, приведено два значения удельной мощности, используемые при расчетах по методу удельных мощностей - нормальная эксплуатационная удельная мощность $P_{н.э.}$, выраженная в киловаттах на метр ширины сетки машины при скорости машины $U = 100$ м/мин, и рекомендуемая удельная мощность $P_{р.д.}$, выражаемая в тех же единицах.

Мощность секции определяется по формуле

$$P_{н.э.} = n_{н.э.} \cdot B_c \cdot U \cdot 10^{-2}, \text{ кВт} \quad (I)$$

Номинальная нагрузка БМ определяется как сумма мощностей отдельных секций, полученных по формуле (I). При выборе двигателя для трансмиссионного привода используется значение этой мощности с добавлением 15 % на потери в трансмиссии.

Таблица I

Наименование секции или элемента секции	Удельная мощность (при $U = 100$ м/мин) кВт/м		Примечание
	$P_{н.э.}$	$P_{р.д.}$	
I	2	3	4
Плоскосеточные машины ($B_c \geq 2285$ мм)			
Сеточная часть (вся) для выработки: салфеточной и легкой оберточной бумаги пергамина и документной бумаги	4,1 6,2	4,8 7,2	средний вакуум 2 Н/см суммарная ширина отсасывающих ящиков $V_{сос} = 1,2$ м
Сеточная часть с валом Мильспо для выработки: газетной, крафт-бумаги и печатной бумаги при скорости: $U < 366$ м/мин $U = 366-610$ м/мин $U > 610$ м/мин крафт-картона	6,2 8,3 8,3 8,7	7,7-9,6 9,6 10,6 14,5	$V_{сос} = 0,9$ м $V_{сос} = 1,6$ м $V_{сос} = 2,0$ м $V_{сос} = 2,1$ м
Приводные валы сеточной части (машины с вакуум-пересасывающим устройством): подсеточный валик отжимной вал на гауч-вале	0,116 0,096	* *	значение $P_{р.д.}$ входит составной частью в $P_{н.э.}$ сеточной части. Обладано на требуемой мощности для ускорения вала до рабочей скорости за определенное время (~ 15 с)
Равнитель	-	0,135	необходимо принять во внимание ускорение и взять большее значение
Основной пресс (простой или отсасывающий): пара отсасывающих валов	2,3	2,9	прижим валов $f_{пр} \leq 530$ Н/см
только верхний вал для выработки любой бумаги и картона пара отсасывающих валов для выработки листовой целлюлозы	- 4,8	0,96 -	$f_{пр} = 1570$ Н/см $P_{н.э.} = 0,024 + 1,53 \cdot 10^{-5} f_{пр}$
только верхний вал для выработки листовой целлюлозы	1,5	-	

Окончание табл. I

I	2	3	4
Каждый боковой вал сдвоенного пресса	1,9 2,3	2,4 2,9	$f_{пр} = \begin{cases} f_{пр} \leq 300 \text{ Н/см} \\ 300 - 530 \text{ Н/см} \end{cases}$
Вакуум-пересасывающее устройство:			
пикап-вал	0,48	0,96	
отсасывающий отжимной вал	-	1,45 1,73	$f_{пр} \leq 177 \text{ Н/см}$ $f_{пр} > 177 \text{ Н/см}$
приемное (отсасывающее) сукно	-	9,6 2,9	
передающий пресс	-	-	
Сглаживающий пресс, марши- ровочный пресс, пара валов	0,67	1,15	$f_{пр} \leq 345 \text{ Н/см}$
Клеильный пресс:			
пара валов	1,93	2,4	$f_{пр} \leq 300 \text{ Н/см}$
только верхний вал	-	0,96	
только нижний вал	-	1,45	
Бумаго- и сукносушильные цилиндры (один цилиндр) диаметром:			для секций с числом цилиндров менее 6 тре- буется дополнительная мощность. Данные не относятся к цилиндрам, заполненным конденсатом и для скоростей менее 60 м/мин
$d_c = 1524 \text{ мм}$	0,173	0,26	
$d_c = 1220 \text{ мм}$	0,135	0,202	
$d_c = 1067 \text{ мм}$	0,125	0,193	
$d_c = 915 \text{ мм}$	0,106	0,164	
Двухвальный каландр, пара валов	0,87	1,15	
Каландр 8- и 9-вольтный для бумаги с массой:			увлажнение бумаги уве- личивает нагрузку при- близительно на 50 %.
$q \leq 115 \text{ г/м}^2$	3,4	4,8	Для 5-6-вальных каланд- ров при отделке тяжелой бумаги практически тре- буется $P_{р.д.} = 7,7 \text{ кВт/м}$ при $U_{р.д.} = 100 \text{ м/мин}$
$q = 115-146 \text{ г/м}^2$	5,4	5,8	
$q = 146-210 \text{ г/м}^2$	5,4	7,7	
$q > 210 \text{ г/м}^2$	5,4	9,6	
Накат для бумаги с массой			
$q \leq 200 \text{ г/м}^2$, кроме крафт-бумаги	0,77	1,15	$P_{р.д.} = 1,15$ обеспечива- ет натяжение полотна 5,3 Н/см, а $P_{р.д.} = 1,93$ - 10,5 Н/см.
$q > 200 \text{ г/м}^2$ и вся крафт-бумага	0,77	1,93	Если требуется большее натяжение, то мощность рассчитывается по фор- мулам (4), (5) и (6)
Шаберы:			
металлический	0,96	-	прижим лезвием
из слоистых пластиков	0,145	-	$f_{пр} = 1,75 \text{ Н/см}$
из стеклопластиков	0,165	-	

Удельная мощность $P_{р.д.}$ соответствует максимальной ожидаемой нагрузке и обеспечивает необходимый запас сверх $P_{н.э.}$, но не учиты-
ывает пусковых условий данной секции. Мощность секции определяется
по формуле

$$P_{р.д.} = \eta_{р.д.} \cdot B_c \cdot U \cdot 10^{-2}, \text{ кВт} \quad (2)$$

Выбранный по $P_{р.д.}$ секционный двигатель должен быть проверен на
способность развивать необходимый пусковой момент для данной секции
по формуле

$$\frac{K_T P_{н.э.}}{\omega_{д макс} \cdot \eta_p} \leq K_{доп} \cdot \eta_d \cdot K \cdot \Phi_d \cdot I_n, \quad (3)$$

где $K = M_{тр}/M_{нэ}$ - кратность момента трогания по отношению к моменту,
соответствующему $P_{н.э.}$; $\omega_{д макс}$ - угловая скорость двигателя, соответ-
ствующая максимальной рабочей скорости БМ; η_p - КПД редуктора;
 $K_{доп}$ - кратность допустимого момента двигателя; η_d - КПД двигателя;
 K - конструктивная постоянная двигателя; Φ_d - магнитный поток двига-
теля; I_n - номинальный ток двигателя.

Значения K_T сеточной части плоскосеточных машин не превышает 2,
а у цилиндрических машин главного пресса $K_T \approx 3$. Для прессовых секций
с отсасывающими валами $K_T < 2,5$, для грузовых прессов с подшипника-
ми скольжения - 3 + 3,5; с подшипниками качения - 2 или менее. У су-
шильных секций с подшипниками скольжения $K_T = 4,5$; с подшипниками
качения - 3.

Для 8 - 9-вальных каландров момент трогания соответствует
 $P_{р.д.} = 14,5$. Для наката $K_T = 0,5 + 1,5$.

Так как $P_{н.э.} < P_{р.д.}$ и $K_{доп} = 2 - 2,5$, то практически проверку
выбранного двигателя на способность развивать требуемый пусковой
момент необходимо делать для секций при $K_T > 2 - 2,5$.

Для сушильных секций с подшипниками скольжения при скоростях
менее 60 м/мин значения $P_{н.э.}$ и $P_{р.д.}$ необходимо умножить на коэффи-
циент K (табл. 2).

Таблица 2

U , м/мин	60	50	40	30	20	10
K	1,0	1,1	1,35	1,64	2,43	3,28

Для осевого наката с регулируемым двигателем постоянного тока
мощность подсчитывается по формуле:

$$P = 1,67 \cdot 10^{-3} \cdot f_{д} \cdot B_d \cdot U \cdot \eta^{-1}, \text{ кВт} \quad (4)$$

где f_{δ} - требуемое натяжение, Н/см; B_{δ} - ширина полотна, м;
 V - скорость машины, м/мин; $\eta = 0,9$ - КПД наката.

Для осевого наката при использовании привода с проскальзывающим ремнем или муфтой

$$P = 1,67 \cdot 10^{-3} f_{\delta} B_{\delta} V \eta^{-1} D_p D_T^{-1}, \text{ кВт} \quad (5)$$

где D_p - диаметр наматываемого рулона; D_T - диаметр тамбура наката.

Для периферического наката

$$P = 1,67 \cdot 10^{-3} (f_{\delta} + K_{тр}) B_{\delta} \cdot V, \text{ кВт}, \quad (6)$$

где $K_{тр}$ - постоянная, учитывающая трение ($K_{тр} = 1$), при охлаждении наката водой $K_{тр} = 2$.

На широких и быстроходных машинах для привода сеточной части часто применяют не один, а несколько двигателей, например, для привода гауч-вала, сеткоповоротного вала и одного или двух подсеточных валиков. При этом необходимо правильно распределить между приводными валами мощность, требуемую в соответствии с табл. I для привода сеточной части.

Максимальная мощность, которая может быть передана сетке без проскальзывания, определяется по формуле:

$$P_{нб} = P_{гукс} = 1,67 \cdot 10^{-3} (f_{нб} - f_{сб}) B_c \cdot V, \text{ кВт}, \quad (7)$$

где $f_{нб}$, $f_{сб}$ - натяжение в набегающей и сбегавшей ветвях сетки, Н/см:

$$f_{нб} = f_{сб} e^{\mu \alpha}, \quad (8)$$

где μ - коэффициент трения сетки по валу (для металла по металлу $\mu = 0,25$); α - угол охвата вала сеткой, рад.

Для отсасывающего гауч-вала, если учитывать только вакуум, натяжение сетки определяется формулой:

$$f_{\delta} = \mu P_{ск} B_{ск}, \quad \text{Н/см} \quad (9)$$

где $P_{ск}$ - среднее значение вакуума в сосущей камере, Н/см²;

$B_{ск}$ - ширина сосущей камеры, см.

Мощность, идущая на преодоление трения сетки о вал, создаваемого наличием вакуума в сосущей камере:

$$P_{\delta} = 1,67 \cdot 10^{-3} B_c V \mu P_{ск} B_{ск}, \quad \text{кВт}. \quad (10)$$

Эта мощность добавляется к мощности, которая может быть передана сетке в соответствии с (7). Таким образом, для сосущего вала получаем мощность:

$$P_{\text{макс}} = P_{нб} + P_{\delta} = 1,67 \cdot 10^{-3} B_c V (f_{нб} + f_{\delta} - f_{сб}), \text{ кВт}. \quad (11)$$

Пример расчета. На рис. I приведена схема примерного расположения возможных приводных валов сеточной части, где гауч-вал имеет отсасывающую вакуумную камеру.

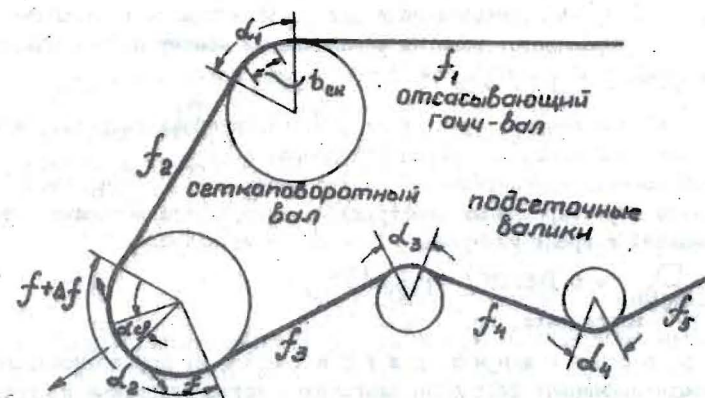


Рис. I

Дано: $B_c = 6,35$ м; $V = 457$ м/мин

$\alpha_1 = 0,68$ рад; $\alpha_2 = 2,8$ рад; $\alpha_3 = \alpha_4 = 0,87$ рад;

$B_{ск} = 25,4$ см; $P_{ск} = 6,78$ Н/см²; $f_{\delta} = 34,5$ Н/см.

Натяжение в ветвях сетки определяется по формулам (8) и (9).

$$f_{\text{гукс}} = f_{\delta} e^{\mu \alpha_4} = 34,5 \cdot 0,25 \cdot 0,87 = 42,2 \text{ Н/см};$$

$$f_{3 \text{ макс}} = f_4 e^{\mu \alpha_3} = 42,2 \cdot 0,25 \cdot 0,87 = 52,45 \text{ Н/см};$$

$$f_{2 \text{ макс}} = f_3 e^{\mu \alpha_2} = 52,45 \cdot 0,25 \cdot 2,8 = 105,6 \text{ Н/см};$$

$$f_{1 \text{ макс}} = f_2 e^{\mu \alpha_1} = 105,6 \cdot 0,25 \cdot 0,68 = 125,2 \text{ Н/см};$$

$$f_{31 \text{ макс}} = \mu P_{ск} B_{ск} = 0,25 \cdot 6,78 \cdot 25,4 = 43 \text{ Н/см}.$$

Максимальные мощности, которые валы могут передать сетке

$$\begin{aligned} P_{\text{макс}} &= V \cdot B_c (f_{нб \text{ макс}} + f_{31 \text{ макс}} - f_{2 \text{ макс}}) = 1,67 \cdot 10^{-3} \cdot \\ &= 457 \cdot 6,35 \cdot (125,2 + 43 - 105,6) = 300 \text{ кВт} \\ &= 457 \cdot 6,35 \cdot (52,45 - 42,2) \cdot 1,67 \cdot 10^{-3} = 50 \text{ кВт}. \end{aligned}$$

$$P_{\text{атоме}} = U \cdot B_c (f_{2\text{атоме}} - f_{3\text{атоме}}) \cdot 1,67 \cdot 10^{-3} = 457 \cdot 6,35 \cdot (105,2 - 52,45) \cdot 1,67 \cdot 10^{-3} = 255 \text{ кВт}$$

$$= 457 \cdot 6,35 \cdot (52,45 - 42,2) \cdot 1,67 \cdot 10^{-3} = 50 \text{ кВт}$$

$$= 457 \cdot 6,35 \cdot (42,2 - 34,5) \cdot 1,67 \cdot 10^{-3} = 37 \text{ кВт}$$

Мощность $P_{\text{дин}}$, необходимая для ускорения вала в заданное время, можно определить, полагая динамический момент постоянным.

$$P_{\text{дин}} = 2,78 \cdot 10^{-7} \gamma U^2 R_B \cdot t^{-1} \quad \text{кВт} \quad (12)$$

где γ - момент инерции вала, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$; U - линейная скорость, м/мин ; R - радиус вала, м ; t - время ускорения, с .

Если принять приблизительно радиус инерции $R_i = R_B$ (что справедливо для современных конструкций валов, изготавливаемых с тонкой рубашкой) и время ускорения $t = 15 \text{ с}$, то получим

$$P_{\text{дин}} = 0,185 \cdot 10^{-7} m_B \cdot U^2, \quad (13)$$

где m_B - масса вала, кг .

Выбор приводных двигателей. При трансмиссионном приводе применяют либо один двигатель, устанавливаемый в середине вала, или два двигателя, устанавливаемых на концах вала. При этом мощность двигателя или суммарная мощность двигателей определяется по значению суммы $P_{\text{н.э.}}$ всех секций БМ с учетом потерь в трансмиссии (обычно 15 %).

Приводные двигатели секций при многодвигательном приводе БМ работают с моментом сопротивления M_c , практически не зависящим от уровня скорости машины. Момент сопротивления может изменяться в зависимости от конкретных секций в пределах $\gamma = M_{\text{смин}}/M_{\text{смакс}} = 0,7 - 0,5$.

Диапазон индивидуального управления скоростью секционного привода для ручного изменения соотношения скоростей для мокрой части составляет $\beta = \Delta\omega/\omega = \pm 0,07$, для сухой части - $\pm 0,03$.

Для приводов с индивидуальными секционными преобразователями (ИП) выбор секционных двигателей производится по мощности, подсчитанной для данной секции по формуле (2) в соответствии со значениями $P_{\text{р.д.}}$ из табл. I так, чтобы соблюдалось условие

$$P_n \geq P_{\text{р.д.}}, \quad (14)$$

где P_n - номинальная (паспортная) мощность двигателя.

Проверка выбранного таким образом двигателя на пусковые условия производится по формуле (3).

Для многодвигательных приводов с общим преобразователем (ОП), где управление уровнем скорости производится изменением напряжения

якорной цепи, а управление и автоматическое регулирование соотношений скоростей секций - воздействием на магнитные потоки двигателей, выбор секционных двигателей осложняется тем, что способность их изменять свою скорость при изменении магнитного потока определяется как напряжением якорной цепи, так и зависимостью вращающего момента от магнитного потока.

Рассмотрим условия работы секционного двигателя в приводе с общим преобразователем.

Уравнение механической характеристики двигателя с независимым возбуждением в относительных единицах можно записать в виде

$$D = \frac{1}{1 - \delta_n} \left(\frac{\mathcal{L}}{\mathcal{U}} - \delta_n \frac{M}{\mathcal{U}^2} \right), \quad (15)$$

где $D = \frac{\omega}{\omega_n}$; $\mathcal{L} = \frac{U_a}{U_{an}}$; $\mathcal{U} = \frac{\Phi_a}{\Phi_{an}}$; $M = \frac{M}{M_n}$ - текущие значения скорости, напряжения якоря, магнитного потока и момента, отнесенные к их номинальным значениям; $\delta_n = \frac{\Delta\omega_{сн}}{\omega_{an}}$ - относительное падение скорости двигателя при изменении момента от нуля до номинального значения при номинальном напряжении якоря и номинальном потоке двигателя.

Уменьшение $\mathcal{L}$ в этом приводе ограничено. Минимально возможное значение $\mathcal{L}$ для данного двигателя определяется, исходя из того, что момент сопротивления может изменяться от $M_{\text{мин}}$ до $M_{\text{макс}}$ и при этом должно обеспечиваться поддержание постоянства скорости двигателя с помощью автоматического секционного регулятора, воздействующего на поток возбуждения, и ручное управление скоростью двигателя в пределах $\pm \beta$ во всех режимах работы без превышения током якоря и магнитным потоком их номинальных значений. На рис. 2 эти условия изображены графически с указанием предельных точек "а" и "б".

Постоянство скорости при изменении момента поддерживается автоматически секционным регулятором, а изменение скорости на величину $\beta = \frac{U_B - U_{cp}}{U_{cp}} = \frac{U_{cp} - U_a}{U_{cp}}$ может производиться вручную изменением задания секционному регулятору.

Очевидно, что при любом $\mathcal{L}$ в точке "а" поток возбуждения будет максимальным, а ток якоря минимальным; в точке "б" поток будет минимальным, а ток якоря максимальным. При $\mathcal{L} = \mathcal{L}_{\text{мин}}$ поставленные условия можно записать для:

$$\left. \begin{array}{l} \text{точки "а"} \quad M = M_{\text{мин}}; \mathcal{U} = 1 \\ \text{точки "б"} \quad M = M_{\text{макс}}; \mathcal{U} = \mathcal{U}_{\text{мин}} = \frac{M_{\text{макс}}}{\mathcal{L}_a} \end{array} \right\} \quad (16)$$

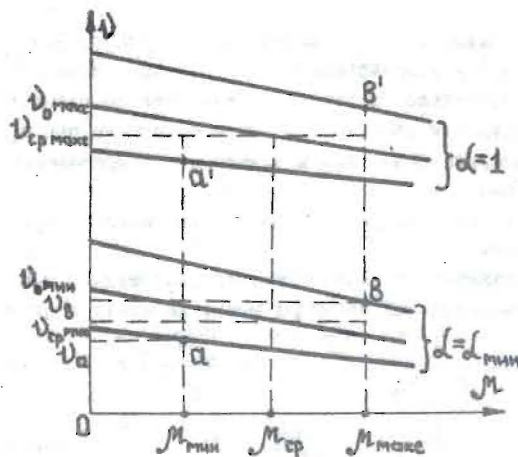


Рис. 2

При этом минимально возможное значение α , при котором соблюдается условие (16)

$$\alpha_{\min} = \frac{1 - \delta \sigma M_{\max}^2}{1 - \sigma M_{\max}^2} \cdot \delta_H, \quad (17)$$

где

$$\delta = \frac{M_{\min}}{M_{\max}}; \quad \sigma = \frac{1 + \beta}{1 - \beta}.$$

Минимальная средняя скорость двигателя будет [при $\alpha = \alpha_{\min}$,

$$M = M_{\text{ср}}] \quad v_{\text{ср мин}} = \frac{\delta_H (1 - \delta M_{\max})}{(1 - \delta_H) [1 - \beta + (1 + \beta) M_{\max}]} \quad (18)$$

При $\alpha = 1$ и $M = M_{\text{ср}} = 0,5 \cdot (1 + \delta) M_{\max}$ средняя максимальная скорость может быть определена по формуле

$$v_{\text{ср макс}} = \frac{1 - \delta_H \delta M_{\max}}{(1 - \delta_H) (1 - \beta)}, \quad (19)$$

в которую нужно подставить δ_H наименьшего по габариту двигателя многодвигательного привода.

Максимально возможный диапазон регулирования определяется по отношению средних значений максимальной и минимальной скоростей. Для упрощения расчетов, связанных с выбором секционных двигателей многодвигательного привода с общим преобразователем, можно воспользоваться номограммами, построенными для двигателей, используемых в электроприводах бумагоделательных машин. Эти номограммы представляют собой ряд кривых, определяющих зависимость допустимой мощности двигателей при заданных значениях β и δ и диапазоном скоростей, получаемым изменением напряжения якоря.

На рис. 3 приведена такая диаграмма для двигателей серии П номинальной мощностью $P_H = 32 - 320$ кВт.

На номограмме рис. 3 сплошными линиями изображены кривые, относящиеся к $\beta = 0,06$ и $\delta = 0,5$; штриховыми и штрихпунктирными линиями показаны кривые при $\beta = 0,1$; $\delta = 0,7$ и при $\beta = 0,1$; $\delta = 0,5$. Номинальные значения мощности и двигателей отмечены цифрами над относящимися к ним кривыми и показаны также линии равных значений $M_{\max}$. При этом для двигателей мощностью 32 кВт и 42 кВт учтены возможные отклонения параметров от каталожных и, кроме того, расчетные мощности приняты равными $0,7 P_H$ и $0,75 P_H$ соответственно.

Для выбора секционных двигателей при $\beta = 0,06$ и $\delta = 0,5$ на номограмме проводится горизонтальная прямая на высоте требуемого диапазона регулирования $D_{\text{тр}}$. Далее по оси абсцисс откладывается значение $P_{\text{р.д.}}$, подсчитанное по формуле (2), и проводится вертикальная прямая до пересечения с кривыми $P_{\max}^* = f(P_{\text{р.д.}})$ так, чтобы точка пересечения не лежала ниже горизонтальной прямой требуемого диапазона скоростей.

Выбор преобразователя И. В качестве преобразователей переменного тока в постоянный в электроприводах БМ в настоящее время, как правило, применяют тиристорные преобразователи (ТП). Последние весьма чувствительны к перегрузкам по току, и поэтому при их выборе необходимо учитывать величины таких перегрузок, возникающих, главным образом, при пуске и торможении. В трансмиссионном приводе, как правило, пуск осуществляется вхолостую при статическом моменте примерно равном 15 % номинального значения. Поэтому можно допустить, что пусковой ток ТП не превысит 175 %; такую нагрузку ТП допускают в течение достаточно длительного времени, чтобы закончился пуск трансмиссионного привода. Мощность ТП для трансмиссионного привода можно определить по формуле:

$$P_{\text{тп,тр}} = n_1 n_2 \sum P_{\text{нз}} \eta_{\text{ср}}^{-1}, \quad \text{кВт} \quad (20)$$

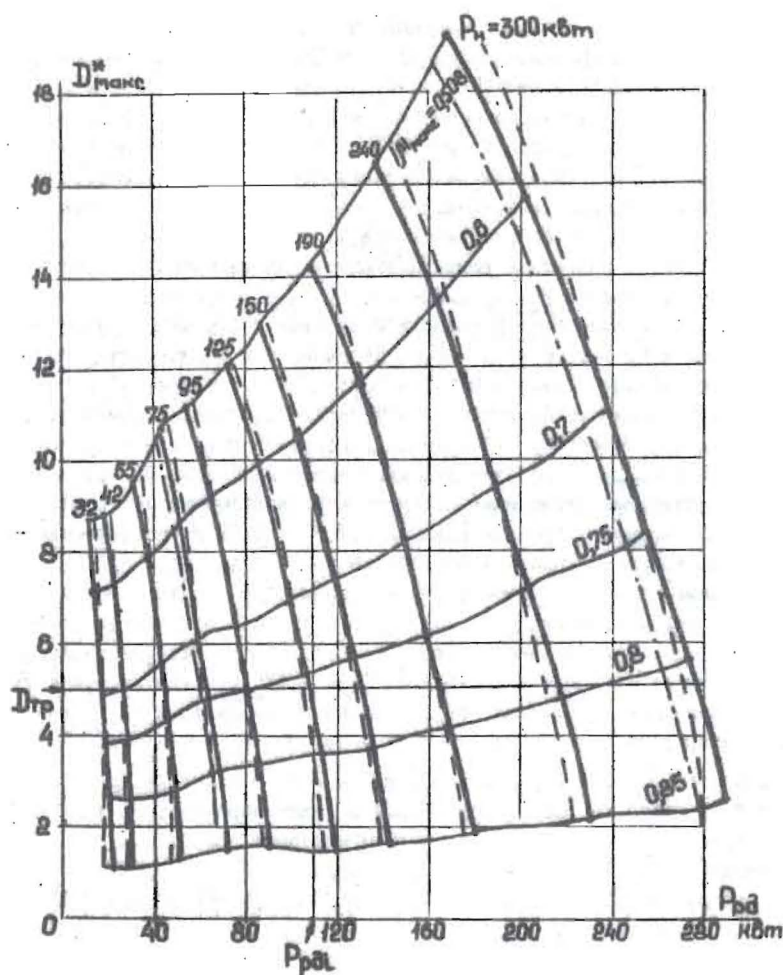


Рис. 3

где $K_1 = K_2 = 1,15$ - коэффициенты, учитывающие потери в трансмиссии и возможное повышение нагрузки сверх нормальной эксплуатационной;
 $P_{н.э.}$ - суммарная мощность привода, соответствующая $P_{н.э.}$ по табл. I; $\eta_{ср}$ - средний КПД двигателей.

При выборе ПП для многодвигательного привода с общим преобразователем (ОП) нужно учитывать, что возможно переключение на ОП привода самой тяжелой секции, когда все остальные двигатели уже работают от ОП с нагрузкой, близкой к номинальной. Мощность самой тяжелой секции чаще всего составляет примерно 15 % от общей мощности всех секций. Считая, что при переключении секционного привода с пускового преобразователя на рабочий возможен бросок тока, равный двойному номинальному току привода тяжелой секции, мощность ОП определяется по формуле, аналогичной (20):

$$P_{пп.оп} = K_2 K_3 \sum P_{н.э.} \eta_{ср}^{-1}, \text{ кВт}, \quad (21)$$

где $K_2 = K_3 = 1,15$ - коэффициенты, учитывающие возможное повышение нагрузки сверх нормальной эксплуатационной и возможное превышение нормального эксплуатационного тока преобразователя при переключении секционных приводов с пускового преобразователя на рабочий.

При выборе секционного ПП для привода с индивидуальными преобразователями (ИП) необходимо также учитывать пусковые условия. Исходя из этого, номинальную мощность ПП можно определить по формуле:

$$P_{пп.ип} = K_4 U_{дн} I_n \cdot 10^{-3} K_{доп}^{-1}, \text{ кВт}, \quad (22)$$

где $K_4 = 1,1$ - коэффициент запаса; $U_{дн}$ - номинальное напряжение двигателя; I_n - пусковой ток двигателя; $K_{доп}$ - кратность допустимого тока преобразователя.

Пусковой (управляемый) преобразователь (ПП) в приводе с ОП выбирается на такое же напряжение, как и рабочий преобразователь, а по току - исходя из условий пуска самой тяжелой секции с учетом того, что пусковой ток ограничивается значением $(2 - 2,5) I_n$. В случае, если ПП используется и для обеспечения вспомогательной скорости, то по мощности он должен обеспечивать длительную работу на этой скорости всей сушильной или сеточной части вместе с одной из секций прессовой части машины.

Силовые трансформаторы. К трансформаторам, от которых питается ПП, обычно не предъявляется особых требований. Но поскольку эти трансформаторы обычно устанавливаются в помещениях цумфабрик, то по условиям пожарной безопасности необходимо исполь-

$$P_T = 2,12 \cdot 10^{-3} U_2 I_{d\pi}, \quad (23)$$

где U_2 - вторичное напряжение трансформатора; $I_{d\pi}$ - постоянный ток на выходе выпрямителя, соответствующий мощности $P_{T.п.ип}$ или суммарный ток, соответствующий мощности $P_{T.п.он}$.

На рис. 4 показана принципиальная схема автоматизированного электропривода с индивидуальными секционными тиристорными преобразователями (ИП). Каждая секция приводится одним (или несколькими) двигателем М, который питается от отдельного секционного преобразователя. Все секционные ТП построены по 3-фазной мостовой схеме и подключены к шинам переменного тока вторично. обмотки силового трансформатора ТС.

Голь подчиненного контура регулирования тока состоит в быстрой отработке возмущений, идущих со стороны питающей сети переменного тока так, чтобы они не влияли на скорость секции, а также

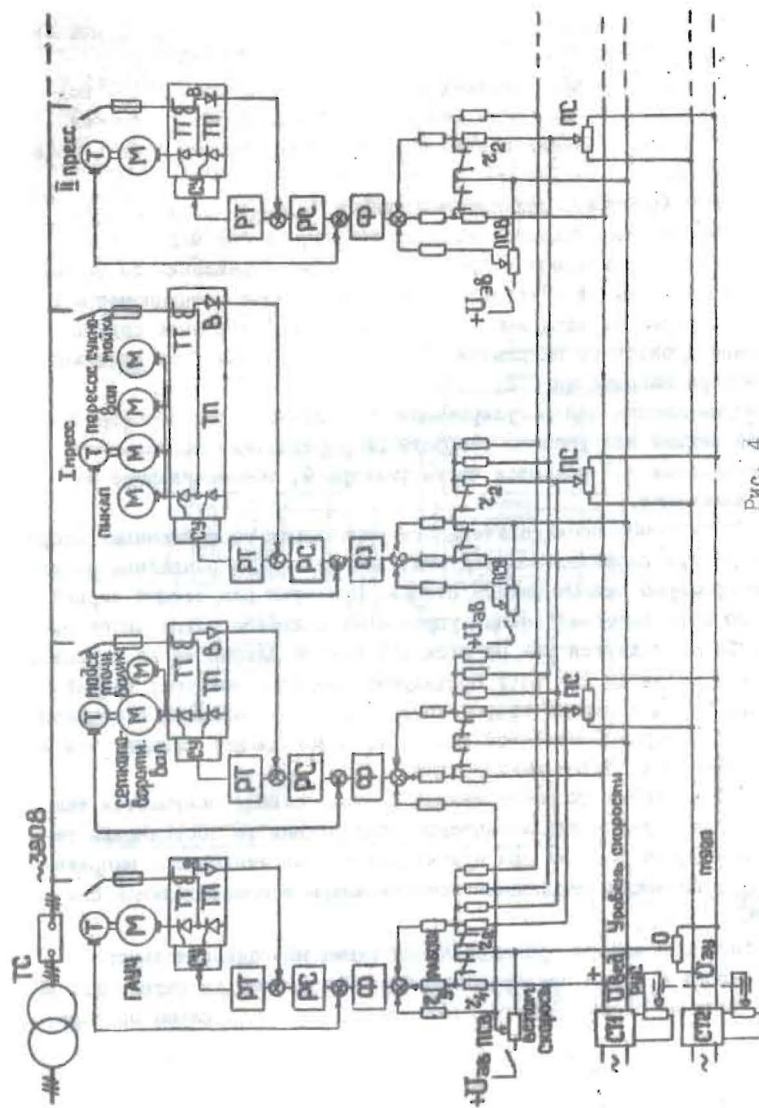


Рис. 4

в ограничении максимального тока ТП, который определяется величиной выходного напряжения РС.

Контур скорости обеспечивает основное назначение АСРСС – поддерживать постоянство скорости секции, а следовательно, и постоянство как заданных значений соотношений скоростей секций, так и уровня скорости БМ.

Основное (рабочее) ведущее напряжение $U_{вэд}$, определяющее уровень скорости БМ, подается на вход секционной АСР через резисторы R_4 и R_5 от стабилизатора напряжения СТ1. Для управления соотношениями скоростей секций ("тягой") служат секционные потенциометры ПС, с помощью которых на вход любой секционной АСР может быть подано необходимое добавочное напряжение того или иного знака от отдельного стабилизатора напряжения СТ2.

Для уменьшения перерегулирования при управлении соотношениями скоростей секций или уровнем скорости БМ управляющие сигналы на входы секционных АСР подаются через фильтры Ф, обеспечивающие их плавное изменение.

Для обеспечения последовательного управления соотношениями скоростей секций при параллельном ведении, все секции БМ разделены на две группы с примерно равным числом секций. При этом для секций первой группы (по ходу полотна) сигнал управления с любого секционного потенциометра ПС подается как на вход АСР данной секции через резистор R_2 , так и на входы АСР всех предыдущих (по ходу полотна) секций данной группы. Для секций второй группы сигнал управления с секционного потенциометра ПС подается как на вход АСР данной секции, так и на входы АСР всех последующих секций.

Вспомогательная скорость секций в этом приводе получается так же, как и рабочая при автоматическом поддержании ее постоянства теми же секционными АСР, но при других источниках эталонного напряжения $U_{эв}$, питающих секционные потенциометры вспомогательной скорости ПВС.

На рис. 5 показана принципиальная схема многодвигательного электропривода с общим преобразователем. Секционные двигатели М1, М2 получают питание от шин общего преобразователя $U_{пр}$ (схема преобра-

зователя не показана). Уровень скорости машины задается напряжением общего преобразователя, т.е. напряжением, подаваемым на все секционные двигатели. Соотношение скоростей секций поддерживается регуляторами соотношений скоростей РС1, РС2, воздействующими на возбуждение секционных двигателей. На вход каждого из регуляторов соотношения скоростей поступают сигналы ведущего напряжения $U_{вэд}$ и напряжения тахогенератора, пропорционального скорости вращения секции. Изменение соотношения скоростей секций осуществляется делителями напряжения РСС1, РСС2.

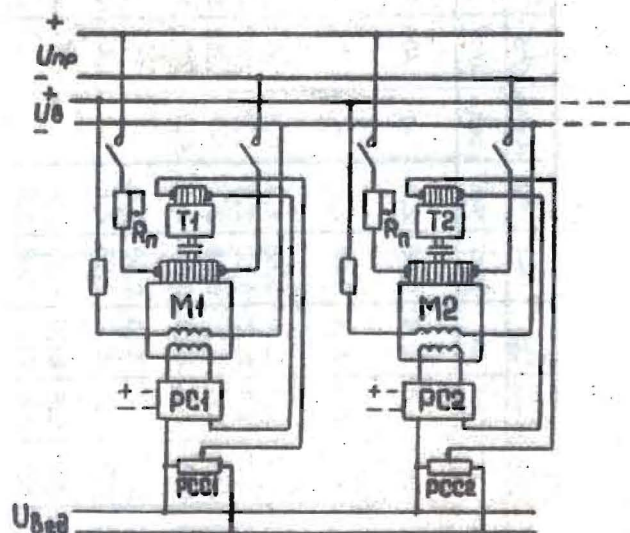


Рис. 5

КОНТРОЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ

В соответствии с индивидуальным заданием (см. табл. 3, 4, 8) согласно шифру необходимо:

1. Сделать расчет и выбор мощности приводных двигателей БМ.
2. Сделать расчет и выбор мощности преобразовательных устройств и трансформаторов.
3. Составить принципиальную схему электропривода и дать ее краткое описание.
4. Составить структурную схему заданного секционного электропривода.

Таблица 3

Последняя цифра шифра	Вид бумаги	Q	U	B _c	B _{сес}	B _{ск}	L ₁	L ₂	L _{3=L₄}	f ₅	Q _p	Q _T	Тип многодвигательного привода
		г/м ²	м/мин	мм	м	см	рад.	рад.	рад.	Гц/см	м	м	
1	Писчая и печатная №1	100	330	4800	2,8	25,4	0,68	2,8	-	40	2,0	0,4	Тиристорный с ОП
2	Писчая №2, типографская №2, 3	60	600	4800	2,8	25,4	0,68	2,8	-	5	2,5	0,5	Тиристорный с ИП
3	Писчая №2, типографская №2, 3	60	500	6800	3,0	26,0	0,68	2,8	0,87	80	2,5	0,5	Тиристорный с ИП
4	Газетная	51	760	6770	3,0	26,0	0,68	2,8	0,87	100	2,5	0,5	Тиристорный с ИП
5	Мешочная	70	530	4600	2,8	25,5	0,68	2,8	-	50	2,0	0,4	Тиристорный с ОП
6	Мешочная	70	550	6800	3,0	26,0	0,68	2,8	0,87	100	2,5	0,5	Тиристорный с ИП
7	Оберточнo-упаковочная	90	800	5000	2,8	25,0	0,68	2,8	-	50	2,0	0,4	Тиристорный с ИП
8	Газетная	51	760	7000	3,0	26,0	0,68	2,8	-	100	2,5	0,5	Тиристорный с ИП
9	Писчая №1 марки А	100	355	4700	2,8	25,0	0,68	2,8	-	40	2,0	0,4	Тиристорный с ОП
10	Папиросная	16	250	3000	2,8	24,5	0,68	2,8	-	40	2,0	0,4	Тиристорный с ОП

Таблица 4

Последняя цифра шифра	Переходный процесс выполнить для секции	Постоянные времени				Настройка регуляторов			Рекомендуемая формула переходного процесса
		Т _{д.т.}	Т _т	Т _{т.п.}	Т _{э.м.}	привод с ИП		привод с ОП	
		с	с	с	с	тока	скорости		
1	Пресс	0,003	0,020	0,005	2,0	-	-	Ск0	(35)
2	Сушильная группа	0,002	0,025	0,005	3,5	СО	ОМ	-	(27)
3	Сушильная группа	0,003	0,030	0,005	8,0	Ск0	СО	-	(25)
4	Каландр	0,002	0,025	0,005	4,5	ОМ	ОМ	-	(29)
5	Сушильная группа	0,003	0,020	0,005	4,0	-	-	Ск0	(35)
6	Каландр	0,002	0,030	0,005	4,2	СО	ОМ	-	(27)
7	Пресс	0,003	0,025	0,005	2,5	Ск0	СО	-	(25)
8	Сушильная группа	0,002	0,020	0,005	10,0	ОМ	ОМ	-	(29)
9	Сушильная группа	0,003	0,025	0,005	6,5	-	-	ОМ	(31)
0	Каландр	0,002	0,030	0,005	3,0	-	-	СО	(33)

5. Выполнить расчет переходных процессов секционного электропривода.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К КОНТРОЛЬНОМУ ЗАДАНИЮ

Расчет мощности двигателей приводится по методике, изложенной в разделе "Методические указания к программе". Там же показана проверка двигателя на пусковые условия. Номинальные данные двигателей приведены в каталогах и частично в табл. 5.

Таблица 5

Тип	Мощность P_n , кВт	Ток $I_n=440$ В, А	Скорость вращения, n_n об/мин	δ_c	I_b , А	T_b , с	T_a , с
П91	32	85	1000	0,08	5,6	0,20	0,069
П92	42	110	1000	0,075	3,4	0,37	0,071
П101	55	143	1000	0,060	5,3	0,25	0,093
П102	75	192	1000	0,0525	6,1	0,28	0,109
П111	95	240	1000	0,051	7,2	0,50	0,110
П112	125	316	1000	0,046	8,35	0,60	0,134
П131-4К	150	366	900	0,0445	12,8	0,70	0,190
П131-6К	190	462	1100	0,0415	11,6	0,70	0,185
П133-6К	240	580	900	0,035	12,5	0,57	0,221
П133-8К	300	745	1100	0,030	12,3	1,05	0,245
П142-8К	400	980	1200	0,020	18,3	0,73	0,20

В табл. 6, 7 приведены технические данные тиристорных преобразователей и силовых трансформаторов, расчет их параметров и выбор номинальных величин дан в методических указаниях к программе.

Таблица 6

№ п/п	Тип агрегата	Номинальная сила выпрям- ления тока, А	Напряжение, В		КПД, %
			номиналь- ное	питающей сети	
1	АТ-100/460-2	100	460	380	91
2	АТ-200/460-2	200	460	380	92
3	АТ-320/460-2	320	460	380	93
4	АТ-500/460-2	500	460	380	95
5	АТ-800/460-2	820	460	380	94
6	АТ-1000/460-2	1000	460	380	94
7	АТР-100/460-2р, с	100	460	380	89
8	АТР-200/460-2р, с	200	460	380	93
9	АТР-320/460-2р, с	320	460	380	95
10	АТР-500/460-2р, с	500	460	380	96
11	АТР-800/460-2р, с	800	460	380	94
12	АТР-1000/460-2р, с	1000	460	380	94
13	БУ 3509	5, 10, 25, 50	230	380	-

Составление структурной схемы секционного электропривода и расчетные зависимости для построения переходного процесса показаны ниже.

Таблица 7

№ п/п	Тип трансформатора	Мощность ВА	Напряжение сетевой обмотки, кВ	Номинальные па- раметры преобразо- вателя	
				В	А
1	ТСЗП-160/0,7	160	0,38	460	250
2	ТСЗП-250/0,7	250	0,38	460	400
3	ТСЗП-400/10	400	6; 10	460	630
4	ТСЗП-630/10	630	6; 10	460	1000
5	ТСЗП-1000/10	1000	6; 10	460	1600
6	ТСЗП-1600/10	1600	6; 10	460	2500

Многодвигательный электропривод с ИП. На рис. 6а показана функциональная схема тиристорного электропривода секции с ИП, на которой: М - двигатель, Т - тахогенератор, ПИ - тиристорный преобразователь, РС, РТ - регуляторы скорости и тока, ДТ - датчик тока.

Структурная схема привода показана на рис. 6б, где β_1, β_2 - динамические коэффициенты регуляторов скорости и тока; T_1, T_2 - постоянные времени регуляторов; $L_{тп} = \frac{U_{bed}}{E_{тпс}}$, $L_{дт} = \frac{I_{яc}}{U_{bed.c}}$ - согласующие коэффициенты; $K_{тп}$ - передаточный коэффициент ПИ; $K_{я} = \frac{(1+\delta_c)}{\delta_c}$, $T_{тп}$, $T_{я}$, $T_{эм}$, $T_{дт}$, T_t - постоянные времени тиристорного преобразователя, якоря двигателя, электрохимическая, датчика тока и тахогенератора.

Рассмотрим несколько вариантов выбора параметров регуляторов тока и скорости.

а). Настройка регулятора тока на скорректированный оптимум (СКО) и регулятора скорости на симметричный оптимум (СО).

Динамический коэффициент усиления регулятора тока принимается равным $\beta_2 = \frac{I_{я}}{n_{тр} T_{\Sigma 2}}$; его постоянная времени $T_2 = T_{я}$; $K_{тр} = L_{\Sigma 2} \cdot K_{тп} \cdot L_{дт} \cdot K_{я} \cdot K_{дт}$ - коэффициент разомкнутого контура тока; $T_{\Sigma 2} = T_{тп} + T_{дт}$ - некомпенсируемая малая постоянная времени контура тока. Полагая $(1 + T_{тп}p)(1 + T_{дт}p) \approx (1 + T_{\Sigma 2}p)$, уравнение разомкнутого контура тока будет

$$\Delta U_{дт}(p) = \frac{1}{T_{\Sigma 2} p (1 + T_{\Sigma 2} p)} \cdot \Delta U_1(p)$$

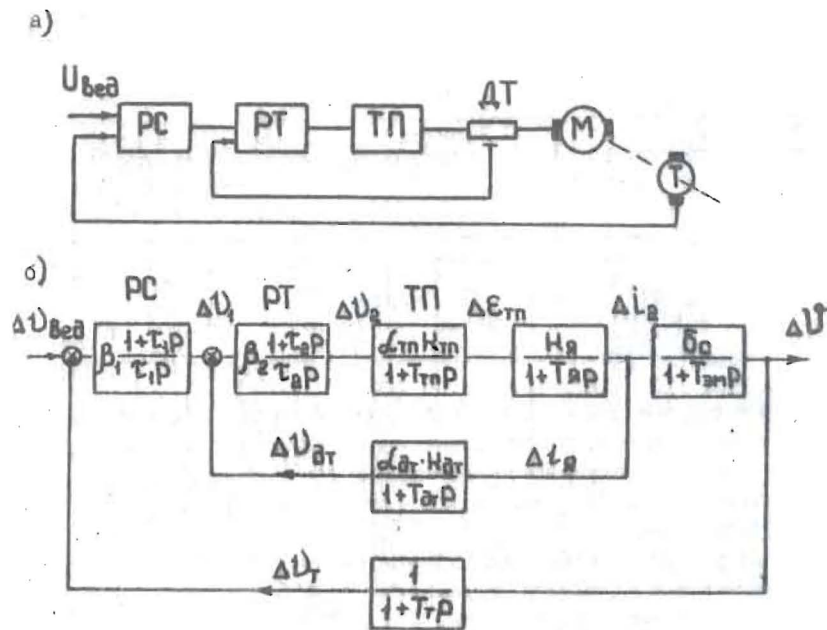


Рис. 6

Для замкнутого контура тока получаем

$$\Delta I_a(p) = \frac{1 + T_{\delta T} p}{L_{\delta T} K_{\delta T} (1 + T_{\Sigma 2} p + T_{\Sigma 2}^2 p^2)} \cdot \Delta U(p).$$

Динамический коэффициент регулятора скорости

$$\beta_1 = \frac{L_{\delta T} K_{\delta T} T_{эм}}{2 \delta_0 T_{\Sigma 1}}, \quad \tau_1 = 4 T_{\Sigma 1}, \\ T_{\Sigma 1} = T_T + T_{\Sigma 2}.$$

Полагая $1 + T_{эм} p \approx T_{эм} p$, для разомкнутого контура скорости получаем

$$\Delta U(p) = \frac{(1 + 4 T_{\Sigma 1} p)(1 + T_{\delta T} p)}{8 T_{\Sigma 1}^2 p^2 (1 + T_{\Sigma 2} p + T_{\Sigma 2}^2 p^2)(1 + T_T p)} \cdot \Delta U_T(p).$$

Так как $T_{\delta T}$, $T_{\Sigma 2}$ и T_T малы по сравнению с другими постоянными времени, то можно положить $1 + T_{\delta T} p \approx 1$, $(1 + T_T p)(1 + T_{\Sigma 1} p + T_{\Sigma 1}^2 p^2) \approx (1 + T_{\Sigma 1} p)$ и предыдущее выражение можно записать

$$\Delta U(p) = \frac{1 + 4 T_{\Sigma 1} p}{8 T_{\Sigma 1}^2 p^2 (1 + T_{\Sigma 1} p)} \Delta U_T(p).$$

Для замкнутого контура скорости можно записать

$$\Delta U_{\delta}(p) = \frac{(1 + 4 T_{\Sigma 1} p)(1 + T_T p)}{(1 + 2 T_{\Sigma 1} p)(1 + 2 T_{\Sigma 1} p + 4 T_{\Sigma 1}^2 p^2)} \cdot \Delta U_{везд}(p). \quad (24)$$

При достаточно малом скачкообразном входном сигнале, когда регулятор скорости в течение переходного процесса не входит в зону ограничения, решение уравнения (24) при нулевых начальных условиях изменения скорости можно представить в виде:

$$\Delta U(t) = 1 + A e^{-\beta t} + 2 e^{-\alpha t} (B \sin qt - D \cos qt),$$

$$\text{где } A = 1 - \frac{T_T}{2 T_{\Sigma 1}}; B = 0,433 \frac{T_T}{T_{\Sigma 1}}; D = 1 - \frac{T_T}{4 T_{\Sigma 1}}; \quad (25)$$

$$\beta = \frac{1}{2 T_{\Sigma 1}}; \alpha = \frac{1}{4 T_{\Sigma 1}}; q = 0,443 \frac{1}{T_{\Sigma 1}}.$$

б). Настройка регулятора тока на симметричный оптимум (СО) и регулятора скорости на оптимум по модулю (ОМ).

Динамические параметры контура тока принимаются:

$$\beta_2 = \frac{T_{\delta}}{2 H_T T_{\Sigma 2}}, \quad \tau_2 = 4 T_{\Sigma 2}, \quad T_{\Sigma 2} = T_{TP} + T_{\delta T}.$$

Для разомкнутого контура тока уравнение будет:

$$\Delta U_{\text{от}}(p) = \frac{T_{\text{я}}(1+4T_{\Sigma 2}p)}{8T_{\Sigma 2}^2 p(1+T_{\text{я}}p)(1+T_{\text{тп}}p)(1+T_{\text{дт}}p)} \cdot \Delta U_1(p).$$

Если $T_{\text{я}} > (3 - 3,5) \cdot 4T_2$, то можно положить $I + T_{\text{я}}p = T_{\text{я}}p$, принимая также $(I + T_{\text{тп}}p)(I + T_{\text{дт}}p) \approx I + T_{\Sigma 2}p$, получаем

$$\Delta U_{\text{от}}(p) = \frac{1+4T_{\Sigma 2}p}{8T_{\Sigma 2}^2 p^2(1+T_{\Sigma 2}p)} \cdot \Delta U_1(p).$$

Для замкнутого контура тока уравнение будет:

$$\Delta I_{\text{я}}(p) = \frac{(1+4T_{\Sigma 2}p)(1+T_{\text{от}}p)}{L_{\text{от}}K_{\text{от}}(4T_{\Sigma 2}^2 p^2 + 2T_{\Sigma 2}p + 1)(2T_{\Sigma 2}p + 1)} \cdot \Delta U_1(p).$$

Полагая $(4T_{\Sigma 2}^2 p^2 + 2T_{\Sigma 2}p + 1)(2T_{\Sigma 2}p + 1) \approx I + 4T_{\Sigma 2}p$ и $I + T_{\text{дт}}p \approx I$ получаем

$$\Delta I_{\text{я}}(p) = \frac{1}{L_{\text{от}} \cdot K_{\text{от}}} \cdot \Delta U_1(p).$$

Параметры регулятора скорости

$$\beta_1 = \frac{L_{\text{от}} \cdot K_{\text{от}} T_{\Sigma 1}}{2\delta_c T_{\Sigma 1}}, \tau_1 = T_{\Sigma 1}.$$

Для разомкнутого контура скорости будем иметь

$$\Delta U_p(p) = \frac{1}{2T_{\Sigma 1}p(1+T_{\Sigma 1}p)} \Delta U_{\text{вэд}}(p).$$

Если принять $T_{\Sigma 1} = T_T$, то для замкнутого контура получим

$$\Delta U_{\text{ж}}(p) = \frac{1+T_Tp}{1+2T_{\Sigma 1}p+2T_{\Sigma 1}^2 p^2} \cdot \Delta U_{\text{вэд}}(p). \quad (26)$$

При скачкообразном изменении входного сигнала изменение скорости во времени будет описываться следующим выражением

$$\Delta U(t) = 1 - e^{-\frac{t}{2T_{\Sigma 1}}} \cdot \cos \frac{t}{2T_{\Sigma 1}}. \quad (27)$$

в). Настройка регуляторов тока и скорости на оптимум по модулю (ОМ).

Динамический коэффициент усиления контура тока

$$\beta_2 = \frac{T_{\text{я}}}{2K_{\text{тп}} T_{\Sigma 2}}, \tau_2 = T_{\text{я}}; T_{\Sigma 2} = T_{\text{тп}} + T_{\text{дт}}.$$

Уравнение разомкнутого контура тока

$$\Delta U_{\text{от}}(p) = \frac{1}{2T_{\Sigma 2}p(1+T_{\Sigma 2}p)} \cdot \Delta U_1(p).$$

Уравнение замкнутого контура тока при $T_{\text{дт}} = 0$

$$\Delta I_{\text{я}}(p) = \frac{1}{L_{\text{от}}K_{\text{от}}(1+2T_{\Sigma 2}p+2T_{\Sigma 2}^2 p^2)} \cdot \Delta U_1(p).$$

Параметры регулятора скорости

$$\beta_1 = \frac{L_{\text{от}}K_{\text{от}}T_{\Sigma 1}}{2\delta_c T_{\Sigma 1}}; \tau_1 = T_{\Sigma 1}; T_{\Sigma 1} = T_T + 2T_{\Sigma 2}.$$

Уравнение разомкнутого контура скорости

$$\Delta U_p(p) = \frac{1}{2T_{\Sigma 1}p(1+T_{\Sigma 1}p)} \cdot \Delta U_{\text{вэд}}(p).$$

После замыкания скоростного контура будем иметь

$$\Delta U_{\text{ж}}(p) = \frac{(1+T_Tp)}{1+2T_{\Sigma 1}p+2T_{\Sigma 1}^2 p^2} \Delta U_{\text{вэд}}(p). \quad (28)$$

При скачкообразном изменении управляющего воздействия изменение скорости будет описываться следующим выражением:

$$\Delta U(t) = 1 - e^{-\frac{t}{2T_{\Sigma 1}}} \left(\cos \frac{t}{2T_{\Sigma 1}} + \frac{2T_{\Sigma 2}}{T_{\Sigma 1}} \sin \frac{t}{2T_{\Sigma 1}} \right). \quad (29)$$

Многодвигательный электропривод с общим преобразователем

На рис. 7 показаны функциональная и структурная схемы секционного привода с общим преобразователем. На структурной схеме секционный двигатель показан в предположении $T_{\Sigma 1} \gg T_{\text{я}}$ и тогда

$$T_{\text{от}1} = \frac{2T_{\text{я}}}{1 - \sqrt{1 - 4T_{\text{я}}/T_{\Sigma 1}}}, T_{\text{от}2} = \frac{2T_{\text{я}}}{1 + \sqrt{1 - 4T_{\text{я}}/T_{\Sigma 1}}}.$$

$T_{\Sigma 1}$ - из табл. 4, $T_{\text{я}}$ - из табл. 5/.

Дифференциальное уравнение разомкнутого контура будет

$$\Delta U(t) = \beta \frac{(1+T_1p)(1+T_2p)}{T_1p} \cdot \frac{L_{\text{тп}}K_{\text{тп}}K_{\text{д}} \cdot \Delta U_{\text{вэд}}(t)}{(1+T_1p)(1+T_{\text{тп}}p)(1+T_{\text{вп}}p)(1+T_{\text{от}1}p)(1+T_{\text{от}2}p)}$$

$$\text{где } K_{\text{д}} = \frac{1+\delta_c}{\psi_{\text{д}}}.$$

Малые постоянные контура регулирования (T_T , $T_{\text{тп}}$, $T_{\text{д}2}$) можно объединить и положить $(I + T_{\text{тп}}p)(I + T_{\text{д}2}p) \approx I + T_{\Sigma 2}p$.

После этих упрощений получаем

$$\Delta U(t) = \beta \frac{(1+T_1p)(1+T_2p)}{T_1p} \cdot \frac{L_{\text{тп}}K_{\text{тп}}K_{\text{д}} \cdot \Delta U_{\text{вэд}}(t)}{(1+T_{\text{вп}}p)(1+T_{\text{от}1}p)(1+T_{\Sigma 2}p)}.$$

Рассмотрим различные настройки ПИД-регулятора.

а). Настройка на оптимум по модулю (ОМ).

В этом случае $\beta = \frac{T_{d1}}{2\alpha_{\text{тп}} K_{\text{тп}} K_{\text{д}} T_{\Sigma}}; \tau_1 = T_{d1}; \tau_2 = T_{\Sigma}.$

Подставляя принятые параметры регулятора, дифференциальное уравнение разомкнутого контура получим в виде

$$\Delta U(t) = \frac{1}{2T_{\Sigma}p(1+T_{\Sigma}p)} \cdot \Delta U_{\text{вэд}}(t)$$

Для замкнутого контура получим

$$\Delta U(t) = \frac{(1+T_{\Sigma}p)}{1+2T_{\Sigma}p+2T_{\Sigma}^2p^2} \cdot \Delta U_{\text{вэд}}(t). \quad (30)$$

При единичном входном воздействии $\Delta U_{\text{вэд}}(t) = I(t)$ изменение скорости секции можно описать уравнением

$$\Delta U(t) = 1 - e^{-\frac{t}{2T_{\Sigma}}} \left[\cos \frac{t}{2T_{\Sigma}} + \left(1 - \frac{T_{\Sigma}}{T_{\Sigma}}\right) \sin \frac{t}{2T_{\Sigma}} \right]. \quad (31)$$

б). Настройка на симметричный оптимум (СО)

$$\beta = \frac{T_{d1}}{2\alpha_{\text{тп}} K_{\text{тп}} K_{\text{д}} T_{\Sigma}}; \tau_1 = 4T_{\Sigma}; \tau_2 = T_{\Sigma}.$$

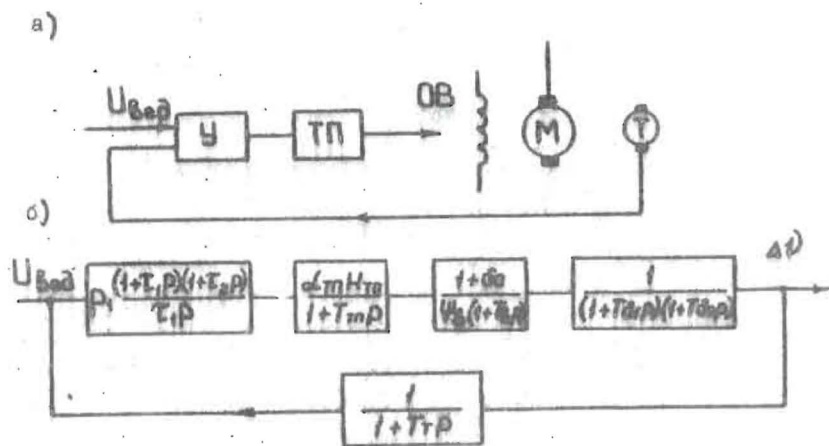


Рис. 7

Предполагая как и раньше $T_{\Sigma} = T_{\Sigma} + T_{\Sigma\text{тп}} + T_{\Sigma\text{д2}}$, и, кроме того, при достаточно большой $T_{\Sigma\text{д1}}$ для замкнутого контура будем иметь

$$\Delta U(p) = \frac{(1+T_{\Sigma}p)(1+4T_{\Sigma}p)}{(1+2T_{\Sigma}p)(1+2T_{\Sigma}p+4T_{\Sigma}^2p^2)} \cdot \Delta U(p). \quad (32)$$

При единичном управляющем воздействии кривую переходного процесса можно получить по уравнению

$$\Delta U(t) = 1 + Ae^{-\beta t} + 2e^{-\alpha t} (B \sin qt - D \cos qt), \quad (33)$$

где $A = 1 - \frac{T_{\Sigma}}{2T_{\Sigma}}; B = 0,433 \frac{T_{\Sigma}}{T_{\Sigma}}; D = 1 - \frac{T_{\Sigma}}{4T_{\Sigma}};$

$$B = \frac{1}{2T_{\Sigma}}; \alpha = \frac{1}{4T_{\Sigma}}; q = 0,433 \cdot \frac{1}{T_{\Sigma}}.$$

в). Настройка на скорректированный оптимум (СКО).

В этом случае применяются следующие параметры

$$\beta = \frac{T_{d1}}{K T_{\Sigma}}; \tau = T_{d1}; \tau_2 = T_{\Sigma}.$$

Дифференциальное уравнение замкнутого контура будет

$$\Delta U(p) = \frac{1+T_{\Sigma}p}{1+T_{\Sigma}p+T_{\Sigma}^2p^2} \cdot \Delta U(p). \quad (34)$$

Кривую переходного процесса изменения скорости двигателя можно получить, воспользовавшись уравнением

$$\Delta U(t) = 1 - e^{-\frac{t}{2T_{\Sigma}}} \left[\cos 0,866 \frac{t}{T_{\Sigma}} + \frac{1}{\sqrt{3}} \left(1 - 2 \frac{T_{\Sigma}}{T_{\Sigma}}\right) \sin 0,866 \frac{t}{T_{\Sigma}} \right]. \quad (35)$$

Расчет переходного процесса изменения скорости секции БМ с использованием ЭВМ. Для разработки алгоритма расчета переходных процессов изменения скорости секции БМ с использованием ЭВМ должна быть составлена математическая модель оптимизированной АСР скорости. Для этого в передаточные функции звеньев, соответствующих регулятору тока РТ и регулятору скорости РС (рис. 6, 7), подставляем параметры РТ и РС в зависимости от заданных оптимальных настроек контуров тока и скорости. При оптимальных настройках контуров большие постоянные времени контуров компенсируются. Внутренний токовый контур сворачиваем и заменяем эквивалентным звеном. Обратную связь по скорости, содержащую апериодическое звено $(\frac{1}{1+T_{\Sigma}p})$, заменяем единичной с передаточной функцией, равной 1. Вследствие такой замены на входе АСР появляется форсирующее звено с передаточной функцией $(1+T_{\Sigma}p)$. После перечисленных преобразований получаем математическую модель оптимизированной АСР скорости,

показанную на рис. 8. В этой модели коэффициенты K_1 и K_2 , а также величина некомпенсированной малой постоянной времени T зависят от выбора настройки контуров. Значения K_1 , K_2 и T в зависимости от № варианта указаны в табл. 8.

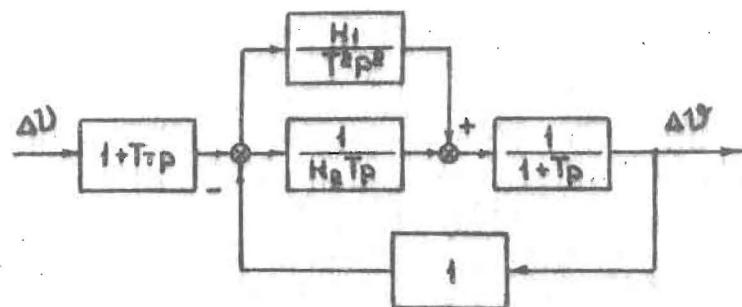


Рис. 8

Таблица 8

Последняя цифра	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
K_1	0	0	0,125	0	0	0	0,125	0	0	0,125
K_2	1	2	2	2	1	2	2	2	2	2
T	T_{Σ}	$T_{\Sigma 1}$	$T_{\Sigma 1}$	$T_{\Sigma 1}$	T_{Σ}	$T_{\Sigma 1}$	$T_{\Sigma 1}$	$T_{\Sigma 1}$	T_{Σ}	$T_{\Sigma 1}$

Для указанной на рис. 8 математической модели составлена программа на языке Фортран - IV, которая может быть использована для работы на ЭВМ "МЕРА", установленной в ЛТИЦП. Эта программа может быть использована также для других ЭВМ, для чего следует изменить операторы ввода-вывод в соответствии с типом ЭВМ. При составлении программы приняты обозначения, указанные в табл. 9. Таблица 9

Название	Обозначение на схеме рис. 8	Обозначение в программе
1	2	3
Коэффициент	K_1 K_2	$C1$ $C2$
Постоянная времени некомпенсированная	T	TS
Постоянная времени тахогенератора	T_T	TG

Окончание табл. 9

1	2	3
Текущее время	t	T
Шаг	ΔU	H
Управляющее воздействие		U
Скорость		$X6$
Число шагов		N

Программа расчета " OPT1 "

```

ACCEPT 5, U, C1, C2, TS, TG, H, N
TYPE 15, U, C1, C2, TS, TG, H, N
5 FORMAT (6F10.5, I4)
X1 = 0
X2 = 0
X3 = 0
X4 = 0
X5 = 0
X6 = 0
B1 = H/TS
A1 = EXP(-H/TS)
A11 = 1 - A1
B2 = C1*B1
B3 = B1/C2
A = TG/H
K = 0
DO 10 I = 1, N
K = K + 1
T = I * H
U1 = U - X6
X1 = U1*B2 + X1
X2 = X1*B1 + X2
X3 = U1*B3 + X3
X4 = X2 + X4
X5 = X4*A11 + X5
X6 = (X5 - X5)*A + X5
X1 = X1
X2 = X2
X3 = X3
X4 = X4
X5 = X5
X6 = X6
IF (I.EQ.1) GOTO 25
IF (H.LT.10) GOTO 10
K = 0
25 TYPE 20, T, X2, X3, X4, X5, X6
10 CONTINUE
15 FORMAT (6F10.5, I4)
20 FORMAT (6F10.5)
STOP
END
Порядок ввода данных

```

Исходные данные для расчета указаны в табл. 8. Вводить данные необходимо в порядке очередности, указанном в операторе ACCEPT, в

виде десятичного числа с десятичной точкой. Числа отделяются одно от другого запятой. Величину шага H рекомендуется выбрать $0,01$ с, число шагов $N = 100$, величину скачка управляющего воздействия $U = 1$.

Пример ввода исходных данных

1., $\emptyset$., 2., $\emptyset . \emptyset 3$, $\emptyset . \emptyset 1$, $1 \emptyset \emptyset$.

Вывод результатов расчета

В приведенной программе осуществляется вывод на экран дисплея. Выводятся исходные данные по оператору **TYPE** $I5, \dots$ и результаты расчета по оператору **TYPE** $2 \emptyset, \dots$. Результаты расчета выводятся через $T = 0,1$ с от 0 до 1 с. Изменению скорости ΔU соответствует $X6$ в программе. Вывод осуществляется в виде десятичных чисел с десятичной точкой.
