

**РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ОТКРЫТЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ**

---

**12/13/2**

**Одобрено кафедрой  
«Тяговый подвижной состав»**

# **ТЕОРИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ**

**Задание на курсовую работу  
с методическими указаниями  
для студентов VI курса  
специальности**

**190303 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТРАНСПОРТ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ  
(ЭПС)**



**Москва – 2008**

Составитель — канд. техн. наук, доц. С.И. Баташов

Рецензент — д-р техн. наук, проф. А.С. Космодамианский

---

## ТЕОРИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Задание на курсовую работу  
с методическими указаниями

Редактор *Д.Н. Тихоньчев*  
Корректор *В.В. Игнатова*  
Компьютерная верстка *О.А. Денисова*

*Переиздание*

---

Тип. зак. <i>1098.</i>	Изд. зак. 80	Тираж 500 экз.
Подписано в печать 11.11.08	Гарнитура NewtonС	
Усл. печ. л. 3,25		Формат 60×90 <sub>1/16</sub>

---

Издательский центр и Участок оперативной печати  
Информационно-методического управления РГОТУПС,  
125993, Москва, Часовая ул., 22/2

© Российский государственный открытый технический университет  
путей сообщения, 2008

## ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ

Курсовая работа выполняется в соответствии с программой дисциплины «Теория автоматического управления ЭПС». Задаaniem предусматривается анализ принципов действия системы автоматического пуска электропоезда и процессов при его разгоне.

Для успешного выполнения курсовой работы необходимо изучить материал дисциплины в соответствии с программой, а также познакомиться с работой силовой схемы, устройством тяговых аппаратов и работой цепей управления электропоезда ЭР9П.

Курсовая работа состоит из нескольких разделов, соответствующих этапам анализа работы системы автоматического пуска электропоезда. По каждому разделу даны методические указания и приводится порядок выполнения, который необходимо соблюдать. Методические указания содержат лишь самые общие сведения по вопросам, предложенным для проработки. Более подробные сведения можно получить из литературы, список которой дан в конце задания.

После выполнения расчетных разделов курсовой работы необходимо сделать выводы о влиянии динамических процессов в аппаратах и объекте управления на работу системы автоматического пуска. Для этого следует ответить на вопросы, приведенные в конце задания.

При оформлении курсовой работы необходимо соблюдать следующие правила:

1. Курсовая работа оформляется в виде расчетно-пояснительной записки в соответствии с общими требованиями к подобным документам.

2. Графический материал выполняется на миллиметровой бумаге и подшивается к расчетно-пояснительной записке в соответствующих местах.

3. Расчетно-пояснительная записка состоит из разделов, оформляемых по рекомендациям методических указаний.

4. При выполнении расчетов следует привести расчетную формулу, произвести подстановку численных значений и запи-

сать результат без промежуточных вычислений. При заполнении таблиц дается один пример расчета.

5. Следует давать расшифровку условных обозначений всех величин, входящих в формулы. Расшифровку каждого условного обозначения достаточно привести один раз при его первом появлении.

6. Все расчеты необходимо вести с точностью до трех значащих цифр, если она не оговаривается особо.

7. Не следует переписывать в качестве пояснений текст из методических указаний или литературных источников. Необходимые пояснения нужно формулировать самостоятельно, по возможности кратко и ясно.

В конце задания приведены контрольные вопросы, которые следует проработать при подготовке к защите курсовой работы. На защите необходимо уметь объяснить все выполненные расчеты, дать оценку полученным результатам и обосновать сделанные выводы.

### **Исходные данные к выполнению курсовой работы**

Исходными данными для расчетной части курсовой работы служат параметры тягового двигателя электропоезда: мощность на валу при номинальном режиме  $P_n$ , скорость движения при номинальном режиме  $V_n$ , индуктивность обмотки  $L_d$ , номер позиции  $n$  отказа катушки РУ-П, время хронометрического вращения главного контроллера  $t_{ксп}$  с 1-й на 20-ю позицию при давлении 5 атм. Численные значения параметров выбираются из табл. 1 в соответствии с двумя последними цифрами учебного шифра. Ряд числовых данных, необходимых при проведении расчетов, приводится в методических указаниях соответствующих разделов. Такие данные являются общими для всех вариантов.



Таблица 1

### Параметры тягового двигателя электропоезда

Параметры	Последняя цифра шифра										Предпоследняя цифра шифра
	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	
$P_n, \text{кВт}$	225	220	215	210	205	200	195	190	185	180	
$L_n, \text{мГ}$	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
	53,6	54,3	51,6	51,1	49,6	50,0	47,8	48,2	46,6	46,0	0
	52,0	52,5	50,0	49,4	48,0	48,3	46,2	46,6	45,0	44,5	1
	50,3	50,8	48,4	47,9	46,5	46,8	44,7	45,0	43,5	43,0	2
	48,8	49,2	46,9	46,4	45,1	45,3	43,3	43,6	42,2	41,5	3
	47,3	47,7	45,6	45,0	43,7	43,9	42,0	42,2	40,8	40,3	4
	46,0	46,3	44,2	43,7	42,4	42,6	40,8	41,0	39,6	39,0	5
	44,7	45,0	43,0	42,5	41,2	41,4	39,6	39,8	38,5	37,9	6
	43,5	43,7	41,8	41,3	40,1	40,2	38,5	38,6	37,4	36,8	7
	42,4	42,5	40,7	40,2	39,0	39,1	37,5	37,6	36,4	35,8	8
	41,3	41,4	39,7	39,1	38,0	38,1	36,5	36,6	35,4	34,8	9
$n$	5	6	7	8	9	10	11	12	13	4	
$t_{\text{квн}}, \text{с}$	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	6,25	7,25	8,25	

# МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

## 1. АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПОЕЗДОМ

Система автоматического пуска электропоезда представляет собой замкнутую систему автоматического регулирования тока тяговых электродвигателей, в которой используется принцип регулирования по отклонению [1, с. 20–21; 4, с. 7–8].

Укрупненная функциональная схема системы приведена на рис. 1. В процессе разгона поезда по мере увеличения скорости движения происходит постепенное уменьшение тока  $I$  тяговых двигателей. При снижении тока до заданной величины  $I_y$  (тока уставки) на тяговые двигатели подается управляющее воздействие, которое приводит к увеличению тока  $I$ . После того, как ток опять снизится до величины  $I_y$ , подается следующее управляющее воздействие, ток опять возрастает и т.д.

Уменьшение тока тяговых двигателей до величины тока уставки регистрируется элементом сравнения ЭС автоматического регулятора. Воздействие на величину тока тяговых двигателей производится путем изменения коэффициента трансформации  $K_T$  и коэффициента ослабления возбуждения  $\beta$ . Последовательность работы соответствующих управляющих каналов регулятора, показанных на рис. 1, определяется заложенным в системе алгоритмом управления.

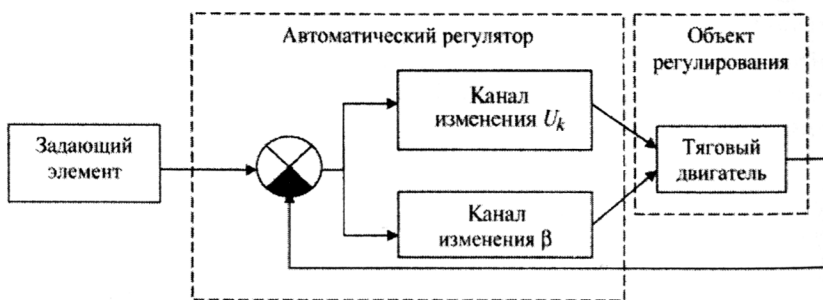


Рис. 1. Укрупненная функциональная схема системы автоматического пуска

Применительно к силовой схеме электропоезда ЭР9П (она изображена на рис. 2 в упрощенном виде с изображением только тех элементов, которые необходимы для рассмотрения системы автоматического пуска) алгоритм управления можно изобразить в виде таблицы замыкания контакторов с ука-

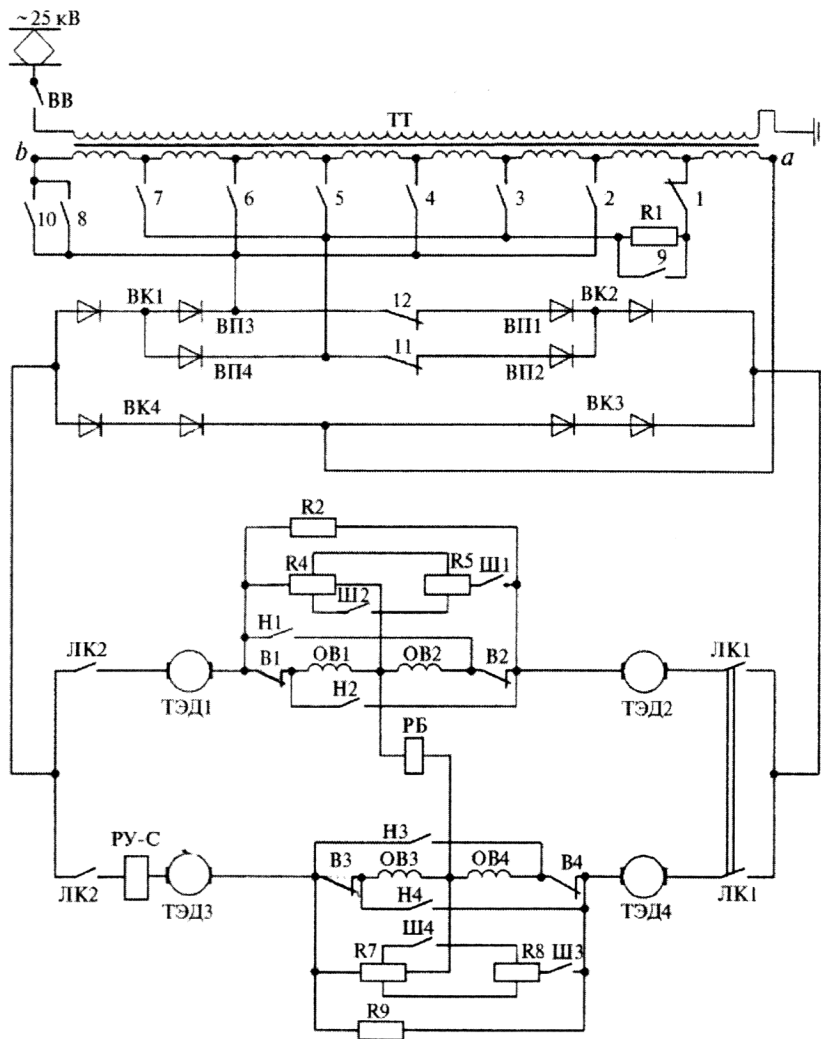


Рис. 2. Упрощенная силовая схема моторного вагона

занием величин параметров, изменяющихся в процессе пуска (табл. 2). На электропоезде ЭР9П имеется 18 позиций силовой схемы, различающихся параметрами  $\beta$ ,  $U_k$ , которым соответствует 20 позиций силового пневматического контроллера КСП.

На рис. 2 контакторы силовой цепи моторного вагона, указанные в табл. 2, не обозначены. При выполнении этого раздела курсовой работы студенту необходимо изучить работу силовой схемы и изобразить ее с обозначением всех контактов. После этого заполняется таблица алгоритма управления электропоездом.

### Описание работы силовой схемы электропоезда переменного тока

На современных электропоездах переменного тока применяется однофазная мостовая схема выпрямления напряжения и тока. В силовую схему моторного вагона входят: тяговый трансформатор, главный контроллер, полупроводниковая выпрямительная установка ВСК1 — ВСК4, тяговые двигатели Д1 — Д4, сглаживающий реактор, линейные контакторы ЛК1, ЛК2, резисторы.

Переменный ток напряжением 25 кВ подается на токоприемник Т и воздушный выключатель ВВ на обмотку высшего напряжения А-Х тягового трансформатора. Второй конец обмотки соединен с «землей» — рельсами посредством щеточного заземляющего устройства, расположенного на оси колесной пары. Обмотка низшего напряжения трансформатора состоит из восьми равных по напряжению секций, соединенных последовательно и имеет 9 выводов 0—8. Для питания тяговых двигателей постоянным током к обмотке низшего напряжения через контакты силового контроллера 1—10 подключена выпрямительная установка, состоящая из четырех групп кремниевых вентилей ВСК1 — ВСК4. Два плеча моста имеют так называемую переходную часть, в которую включены вентили перехода ВП1 — ВП4. К выпрямительной установке подключены 4 тяговых двигателя Д1 — Д4, соединенные в две параллельные группы по два двигателя последовательно. Включение двигателей



осуществляется двумя линейными контакторами ЛК1 – ЛК2. Контакторы ЛК2 включены так, чтобы исключить образование тормозного контура, который может возникнуть в результате генераторного режима при движении моторного вагона с отключенными тяговыми двигателями. Контакторы ЛК1 включены последовательно для облегчения тушения дуги при разрыве общего тока двух групп тяговых двигателей. Регулируют скорость поезда рукояткой главного контроллера ГК, изменяя величину напряжения, подводимого к тяговым двигателям, путем последовательного подключения секций вторичной обмотки трансформатора, а на последних ступенях — ослаблением поля ТЭД, шунтируя обмотки возбуждения ОВ активным сопротивлением. Всего имеется 19 ступеней скорости. Изменение величины напряжения подводимого к ТЭД осуществляют последовательным подключением силовым пневматическим контроллером КСП различного числа секций обмотки низшего напряжения трансформатора. Силовой контроллер имеет 16 контакторов.

На 1-й позиции вала ГК замкнуты контакторы 1, 11, 12, при этом питание тяговых двигателей происходит от одной секции 7–8 обмотки трансформатора через добавочный резистор R1, который ограничивает пусковой ток. На 2-й позиции ГК замыкается контактор 9, который шунтирует пусковой резистор R1. Путь тока на 1-й и 2-й позициях одинаков в первый и второй полупериоды:

- 1-й полупериод: вывод 8 – ВСК3-ЛК1-ТЭД-ЛК2-ВСК1-ВП1 – контактор 11 – контактор 9 – контактор 1 – вывод 7;
- 2-й полупериод: вывод 7 – контактор 1 – контактор 9 – ВП3-ВСК2-ЛК1-ТЭД-ВСК4 – вывод 8.

При повороте ГК на 3 позицию вначале размыкается контактор 12, не обтекаемый током, затем замыкается контактор 2. Таким образом на 3 позиции замкнуты контакторы 1, 2, 9, 11. Напряжение на двигателях повышается, так как в полупериод когда ЭДС вторичной обмотки трансформатора направлена от вывода 8 к выводу 6, к выпрямительной установке приложено напряжение 2 секций обмотки. Во второй полупериод, когда ЭДС обмотки трансформатора направлена от вывода 6 к выводу 8, на двигатели подается напряжение только одной секции

7–8, так как подаче напряжения двух секций трансформатора 6–8 препятствует разрыв цепи контактором 12. Таким образом 3 позиция отличается повышенной пульсацией, так как в один полупериод напряжение на двигателях равно напряжению двух секций обмотки трансформатора, а в другой полупериод — напряжению одной секции:

- 1-й полупериод: вывод 8 – ВСК3-ЛК1-ТЭД-ВСК1-ВП2 – контактор 12 – контактор 9 – контактор 1 – вывод 7;

- 2-й полупериод: вывод 6 – контактор 2 – ВП4-ВСК2-ЛК1-ТЭД-ЛК2-ВСК4 – вывод 8.

Повышенную пульсацию из-за неравенства подводимого напряжения в разные полупериоды имеют все последующие нечетные позиции до 15 включительно, эти позиции используют только как переходные в процессе пуска.

На 4 позиции включается контактор 12 и в оба полупериода двигатели получают питание от двух секций вторичной обмотки трансформатора:

- 1-й полупериод: вывод 8 – ВСК3-ЛК1-ТЭД-ЛК2-ВСК1-ВП2 – контактор 12 – контактор 2 – вывод 6;

- 2-й полупериод: вывод 6 – контактор 2 – ВП4-ВСК2-ЛК1-ТЭД-ЛК2-ВСК4 – вывод 8.

Далее процесс повышения напряжения на тяговых двигателях до 16 позиции аналогичен описанному выше: на нечетных позициях осуществляется несимметричный режим выпрямления с повышенной пульсацией, а на четных позициях осуществляется двухполупериодное выпрямление с нормальной пульсацией тока.

Порядок переключения силовых аппаратов определяется схемой управления электропоезда, которая в упрощенном виде изображена на рис. 3. На этом рисунке изображены только те элементы, которые необходимы для рассмотрения принципов действия системы автоматического пуска. Причем, блокировки силового контроллера на этой схеме обозначены не полностью (только индексом ГК). В этом разделе курсовой работы следует изучить работу схемы управления электропоезда в сокращенном варианте (рис. 3) и изобразить ее с полным обозначением всех блокировок.





При изучении силовой схемы, схемы управления и алгоритма управления электропоездом следует использовать рекомендуемую литературу [2] или [3].

### Порядок оформления раздела

1. Силовая схема моторного вагона электропоезда с обозначением всех контактов.
2. Таблица алгоритма управления электропоездом. Заполняются все столбцы за исключением параметра  $U_{тр}$  и  $U_{дв}^{xx}$ ,  $U_{дв}^н$ .
3. Схема управления с обозначением всех блокировок силового контроллера. Показать (+) и (–) питания цепей управления.

## 2. СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЯГОВОГО ДВИГАТЕЛЯ

К статическим характеристикам (зависимостям между входной и выходной величинами в установившемся режиме) тяговых двигателей относятся скоростные  $V(I)$ , электротяговые  $F(I)$ , тяговые  $F(V)$  и намагничивания (зависимость магнитного потока от тока возбуждения)  $\Phi(I_{в})$ . Для последующего анализа работы системы автоматического пуска и расчета реализуемой пусковой диаграммы потребуются скоростные характеристики тягового двигателя по позициям силовой схемы электропоезда.

При равной степени насыщения магнитной системы тяговые двигатели различных мощностей имеют примерно одинаковую форму скоростных характеристик. Такие характеристики, выраженные в относительных (относительно номинальных) величинах, называют универсальными. В табл. 3 приведена универсальная скоростная характеристика тягового двигателя на 16 позиции.

Для расчета скоростных характеристик в абсолютных величинах необходимо знать номинальные значения тока и скорости. Номинальная скорость задана в исходных данных, а номинальный ток определяется из очевидного соотношения:

$$P_n = I_n U_{дн} \eta_n, \quad (1)$$

где  $U_{дн} = 825$  В — номинальное напряжение на тяговом двигателе;

$\eta_n$  — КПД двигателя при номинальном режиме, принимается равным 0,9.

Таблица 3

**Универсальные скоростные характеристики тягового двигателя**

$I/I_n$	0,4	0,6	0,8	1,0	1,3	1,6	2,0
$V/V_n$ по позициям 16	1,82	1,41	1,12	1,00	0,91	0,84	0,77

Абсолютные численные значения тока и скорости можно получить умножением относительных величин на соответствующие номинальные значения:

$$I = (I/I_n)I_n; \quad v = (V/V_n)V_n. \quad (2)$$

Студенты, имеющие возможность при выполнении курсовой работы использовать вычислительную технику, могут для расчета скоростных характеристик тягового двигателя воспользоваться ЭВМ.

Для определения скоростных характеристик на остальных позициях, необходимо воспользоваться известным способом пересчета характеристик. Учитывая, что при одном и том же токе, протекающем по ТЭД, МДС двигателя можно считать неизменным, формула для пересчета скоростных характеристик имеет следующий вид(при  $U_n = \text{const}$ ):

$$V_n = V_{16} \cdot \frac{U_n - I \cdot r_d}{U_{16} - I \cdot r_d}, \quad (3)$$

где  $V_{16}$  — скорость на 16-й позиции при токе  $I$ ;  
 $V_n$  — скорость на  $n$ -й позиции при токе  $I$ ;  
 $U_{16}$  — напряжение на ТЭД на 16-й позиции при  $I$ ;  
 $U_n$  — напряжение на ТЭД на  $n$ -й позиции при токе  $I$ ;  
 $r_d$  — сопротивление обмоток ТЭД.

При расчете  $V_n$  требуется знать величину сопротивления обмоток ТЭД, которую можно определить из условия:

$$r_d = 0,05 U_{дн} / I_n. \quad (4)$$

При пересчете характеристик по формуле (3) необходимо учитывать, что напряжение  $U_n$  на выходе преобразователя

на  $n$ -й позиции не постоянно и зависит от тока, протекающего по цепи ТЭД. Это объясняется наличием коммутационных и активных потерь в преобразователе. Поэтому для определения величин напряжений  $U_n$  необходимо воспользоваться внешними характеристиками преобразователя. Такие характеристики, выраженные в относительных (относительно номинальных) величинах, приведены на рис. 4.

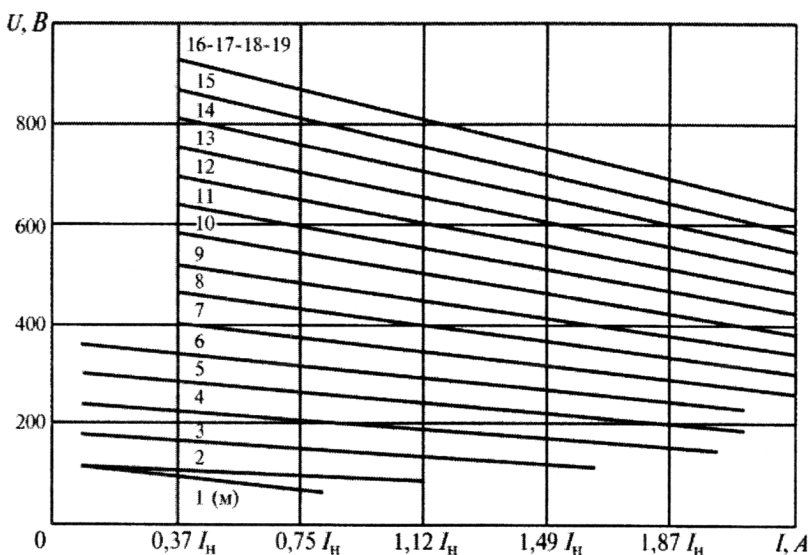


Рис. 4. Внешние характеристики преобразователя электропоезда переменного тока

В курсовой работе необходимо **рассчитать внешние характеристики**, а полученные результаты сравнить с приведенными характеристиками. Так как внешняя характеристика выпрямителя (преобразователя) представляет собой прямую наклонную линию, следовательно, для ее построения требуется две точки. Расчет производится следующим образом.

Напряжение одной секции вторичной обмотки трансформатора составляет  $U_{2c} = 275$  В. Поэтому, зная алгоритм управления электропоездом (т.е. контакторы, замкнутые на каждой из позиций), можно определить среднее значение напряжения вторичной обмотки трансформатора  $U_{тр}$ , прикладываемое к преоб-

разователю за период повторяемости сетевого напряжения  $U_{1C}$ , на каждой позиции.

Например, на третьей позиции работы КСП замкнуты следующие силовые контакторы: 1, 2, 9, 11. Учитывая, что напряжение на вторичной обмотке трансформатора переменное, рассмотрим цепь прохождения тока в каждый из полупериодов. В полупериод питающего напряжения, когда  $U_a > U_b$ , ток протекает по следующей цепи:  $a - BK3 - \text{цепь ТЭД} - BK1 - BP3 - \text{контактор } 2 - b$ . Как видно из рис. 1 на преобразователь подается напряжение двух секций вторичной обмотки трансформатора, т.е.  $U_{\text{тр}}^{(1n)} = 2U_{2C}$ .

При изменении полярности питающего напряжения, когда  $U_b > U_a$ , ток протекает по следующей цепи:  $b - \text{контактор } 1 - \text{контактор } 9-11 - BP2 - BK2 - \text{цепь ТЭД} - BK4 - a$ , т.е.  $U_{\text{тр}}^{(2n)} = U_{2C}$ . Следовательно, среднее значение напряжения, подаваемое на преобразователь, составит:

$$U_{\text{тр}} = \frac{U_{\text{тр}}^{1n} + U_{\text{тр}}^{2n}}{2} = 1,5U_{2C} = 412,5\text{В}.$$

Расчет напряжения, подводимого к группе ТЭД (на выходе преобразователя) в режиме холостого хода, производят по формуле:

$$U_B^{\text{xx}} = K_{\text{cx}} \cdot U_{\text{тр}},$$

где  $K_{\text{cx}}$  — схемный коэффициент, зависящий от типа преобразователя.

Так как к преобразователю подключены два последовательно включенных двигателя, поэтому напряжение двигателя составит:

$$U_{\text{дв}}^{\text{xx}} = \frac{U_B^{\text{xx}}}{2} = \frac{K_{\text{cx}} \cdot U_{\text{тр}}}{2}.$$

Для расчета напряжения, подводимого к ТЭД в режиме номинального тока  $U_{\text{дв}}^{n(3)}$ , необходимо воспользоваться соотношением:

$$\frac{U_{\text{дв}}^{\text{хх}(3)}}{U_{\text{дв}}^{\text{хх}(16)}} = \frac{U_{\text{дв}}^{\text{н}(3)}}{U_{\text{дв}}^{\text{н}(16)}},$$

где  $U_{\text{дв}}^{\text{хх}(3)}$ ,  $U_{\text{дв}}^{\text{хх}(16)}$  — напряжение на ТЭД в режиме ХХ на 3 и 16 позициях соответственно,

$U_{\text{дв}}^{\text{н}(3)}$ ,  $U_{\text{дв}}^{\text{н}(16)}$  — напряжение на ТЭД в режиме номинального тока на 3 и 16 позициях соответственно.

Тогда

$$U_{\text{дв}}^{\text{н}(3)} = U_{\text{дв}}^{\text{н}(16)} \frac{U_{\text{дв}}^{\text{хх}(3)}}{U_{\text{дв}}^{\text{хх}(16)}}.$$

*При перерасчете внешних характеристик преобразователя необходимо обратить внимание, что при номинальном токе  $I_n$  напряжение на выходе преобразователя равно  $U_{\text{дн}} = 825 \text{ В}$ .*

Скоростная характеристика двигателя при ослабленном возбуждении может быть получена из его характеристик при полном возбуждении. Если пренебречь изменением действия реакции якоря и различием падения напряжения в обмотках двигателя при полном и ослабленном возбуждении, то при одинаковой скорости магнитные потоки и, следовательно, МДС для обеих характеристик должны быть равны. Тогда при шунтировании обмотки возбуждения (ОВ) справедливо следующее равенство:

$$\beta = I_{\text{в}}/I, \quad (5)$$

где  $I$  — ток якорной обмотки ТЭД,

$I_{\text{в}}$  — ток обмотки возбуждения ТЭД,

$\beta$  — коэффициент регулирования возбуждения.

При шунтировании ОВ уменьшается сопротивление электрической цепи ТЭД. При этом ток, протекающий по ОВ остается приблизительно неизменным, то есть можно принять  $I_{\text{в}} = \text{const}$  и, следовательно, увеличивается якорный ток:

$$I = I_{\text{в}}/\beta. \quad (6)$$

Таким образом, для получения скоростной характеристики двигателя при ослабленном возбуждении достаточно значения токов, найденные по скоростной характеристике полного воз-

буждения, увеличить в отношении  $1/\beta$  при одинаковых значениях скорости.

Примерный вид скоростных характеристик электропоезда показан на рис. 5.

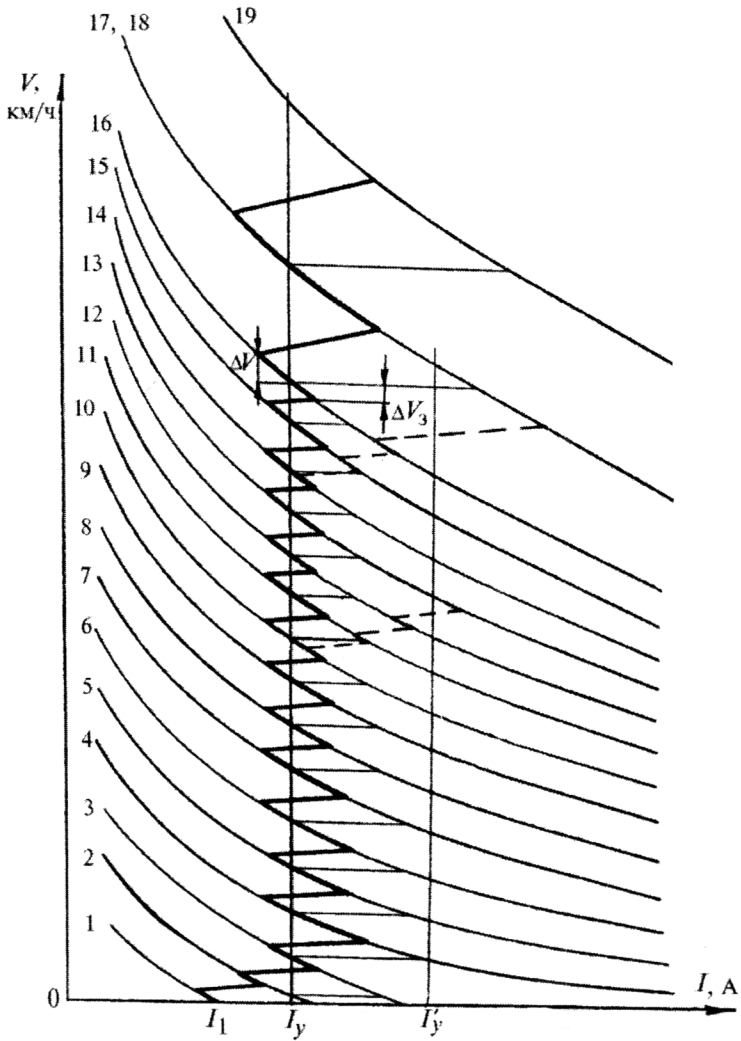


Рис. 5. Скоростные характеристики тягового двигателя и пусковая диаграмма

## Порядок оформления раздела

1. Расчет номинального тока тягового двигателя с точностью до 1 А.
2. Расчет сопротивления обмоток двигателя с точностью до 0,01 Ома.
3. Построение семейства внешних характеристик преобразователя в абсолютных величинах.
4. Расчет напряжения на входе выпрямителя при различных позициях регулирования  $U_{пр}$ , на выходе выпрямителя в режиме холостого хода  $U_{дв}^{xx}$ , подводимое к ТЭД в номинальном режиме  $U_{дв}^н$ .
5. Расчет скоростных характеристик двигателя для позиций 1–20. Значения тока здесь и далее во всех разделах округлять до 1 А. Значения скорости здесь и далее во всех разделах округлять до 0,1 км/ч. Результаты свести в таблицу по следующей форме табл. 4.
6. Построение семейства скоростных характеристик. Масштабы для построения: по скорости — 0,2 км/ч/мм, по току — 2А/мм.

Таблица 4

	$0,8 I_n$	$I_n$	$1,3 I_n$	$1,6 I_n$	$2 I_n$
$V_1$					
$V_2$					
$V_n$					

### 3. ИСХОДНАЯ ПУСКОВАЯ ДИАГРАММА И ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ РАБОТЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПОЕЗДОМ

На рис. 6 показана функциональная схема системы управления электропоездом. Необходимая для движения поезда сила тяги  $F_k$  создается движущимися колесными парами ДКП, кото-

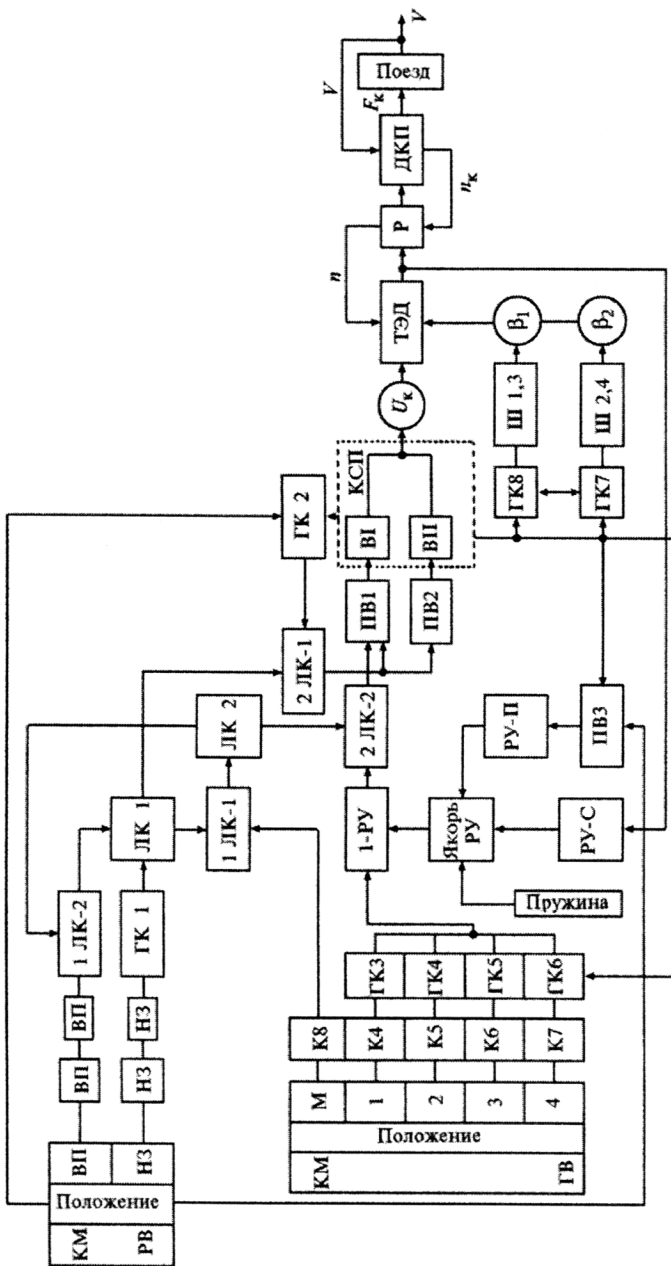


Рис. 6. Функциональная схема системы управления электропоездом ЭР9П



рые вращаются тяговыми электрическими двигателями ТЭД через редукторы Р.

Сила тяги и ток двигателя под действием обратной связи  $v - n_k - n$  функционально связаны со скоростью движения. Эта связь выражается тяговыми  $F_k(v)$  и скоростными  $I(v)$  характеристиками. Каждой характеристике, а их на электропоезде 20, соответствует определенный набор регулируемых параметров  $U_k, \beta$ , показанных на рис. 6 в кружках. Разгон поезда осуществляется последовательным переходом с предыдущей на последующую характеристику посредством ступенчатого изменения регулируемых параметров (см. алгоритм управления электропоездом — табл. 2).

Графическое изображение изменения тока и скорости движения в процессе разгона электропоезда называют пусковой диаграммой. Исходную пусковую диаграмму нужно построить, исходя из условия перехода на следующую скоростную характеристику при значении тока двигателей, равном току уставки реле ускорения. В курсовой работе величина тока уставки принимается равной  $I_y = 1,3I_n$ . Примерный вид исходной пусковой диаграммы показан на рис. 5 тонкими линиями.

Построенная таким образом пусковая диаграмма была бы справедлива, если бы аппараты выполняли свои функции без затрат времени и длительность электрических переходных процессов в цепях тяговых двигателей равнялась бы нулю.

При значительных пусковых ускорениях, характерных для электропоездов пригородного сообщения, время разгона на каждой позиции оказывается соизмеримым с временем переключения аппаратов и временем электрических переходных процессов. Это приводит к тому, что реально реализуемая электропоездом пусковая диаграмма существенно отличается от исходной. В последующих разделах курсовой работы будет произведен расчет реализуемой пусковой диаграммы с учетом указанных обстоятельств.

В табл. 5 приведена последовательность работы аппаратов и все изменения, происходящие в силовой схеме и цепях управления, в том порядке, который соответствует реализации алгоритма управления электропоездом.

Таблица 5

Скоростная характеристика	Такт	Переключение аппаратов или процесс изменения тока в силовой цепи	Длительность	Наименование входного элемента аппарата	Цель подачи воздействий	Исполнение		I <sub>нап</sub> , км/ч	ΔV, км/ч	I, А
						Цепи управления	Силовые цепи			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
		Исходное состояние					1, 11, 12	0	0	0
		Перевод реверсивной рукоятки КМ в положение ВП		ВП	К2		К2, К3, К3	0	0	0
	2	Перевод главной рукоятки КМ в положение М		Подготовка цепи ЛК2			К8, К8	0	0	0
	3	Включение ЛК1	–	ЛК1,	К2, ВП, ГК1	1-ЛК1, 2-ЛК1 <sub>п</sub>	ЛК1	0	0	0
	4	Включение ЛК2	–	ЛК2	К8, 1-ЛК1	2-ЛК2, 1-ЛК2	ЛК2,	0	0	0
1	5	Перевод главной рукоятки КМ в положение 1, Переключение ГК	0,35	В1	К4, ГК3, 1-РУ, 2-ЛК2, ПВ1	К4, ГК3, ГК1 <sub>р</sub> , ПВ3, 1-РУ <sub>р</sub>	9,			
1-2	6	Переход				ПВ3, ПВ1 <sub>р</sub> , ПВ2, ПВ3				
2	7	Задержка								
	8	Отпускание РУ	0,04	РУ/В-С	Силовая цепь	1-РУ <sub>3</sub>				
2-3	9	Переключение ГК	0,35	ВП	К4, ГК3, 1-РУ, 2-ЛК2, ПВ2	ПВ1, ПВ2, ПВ3, 1-РУ <sub>р</sub>	12, 2,			
	10	Переход				ПВ3 <sub>р</sub>				

3	11	Задержка											
	12	Отпускание РУ	РУ-С	Силовая цепь	1-РУ <sub>3</sub>	1-РУ <sub>3</sub>	РУв						
3-4	13	Переключение ГК	В1	К4, ГК3, 1-РУ, 2-ЛК2, ПВ1	ПВ3 <sub>3</sub> , 1-РУ <sub>р</sub>	ПВ3 <sub>3</sub> , 1-РУ <sub>р</sub>	12 <sub>3</sub>						
	14	Переход			ПВ3 <sub>р</sub> , ПВ1 <sub>р</sub> , ПВ2 <sub>3</sub>	ПВ3 <sub>р</sub> , ПВ1 <sub>р</sub> , ПВ2 <sub>3</sub>							
4	15	Задержка											
	16	Отпускание РУ	РУ-С	Силовая цепь	1-РУ <sub>3</sub>	1-РУ <sub>3</sub>	РУв						
4-5	17	Переключение ГК	В11	К4, ГК3, 1-РУ, 2-ЛК2, ПВ2	ПВ3 <sub>3</sub>	ПВ3 <sub>3</sub>	11 <sub>р</sub> , 1 <sub>р</sub> , 3 <sub>3</sub>						
	18	Переход			ПВ3 <sub>р</sub> , ПВ2 <sub>р</sub> , ПВ1 <sub>3</sub> , 1-РУ <sub>р</sub>	ПВ3 <sub>р</sub> , ПВ2 <sub>р</sub> , ПВ1 <sub>3</sub> , 1-РУ <sub>р</sub>							
5	19	Задержка											
	20	Отпускание РУ	РУ-С	Силовая цепь	1-РУ <sub>3</sub>	1-РУ <sub>3</sub>	РУв						
5-6	21	Переключение ГК	В1	К4, ГК3, 1-РУ, 2-ЛК2, ПВ1	ПВ3 <sub>3</sub> , 1-РУ <sub>р</sub> , ГК3 <sub>р</sub> , ГК4 <sub>3</sub>	ПВ3 <sub>3</sub> , 1-РУ <sub>р</sub> , ГК3 <sub>р</sub> , ГК4 <sub>3</sub>	11 <sub>3</sub> , 9 <sub>р</sub>						
	22	Переход			ПВ3 <sub>р</sub> , ПВ1 <sub>р</sub> , ПВ2 <sub>3</sub>	ПВ3 <sub>р</sub> , ПВ1 <sub>р</sub> , ПВ2 <sub>3</sub>							
6	23	Задержка (Перевод главной рукоятки КМ в положение 2)			К5 <sub>3</sub>	К5 <sub>3</sub>							
	24	Отпускание РУ	РУ-С	Силовая цепь	1-РУ <sub>3</sub>	1-РУ <sub>3</sub>	РУв						
6-7	25	Переключение ГК	В11	К5, ГК4, 1-РУ, 2-ЛК2, ПВ2	ПВ3 <sub>3</sub> , 1-РУ <sub>р</sub>	ПВ3 <sub>3</sub> , 1-РУ <sub>р</sub>	2 <sub>р</sub> , 12 <sub>р</sub> , 4 <sub>3</sub>						
	26	Переход			ПВ3 <sub>р</sub> , ПВ1 <sub>3</sub> , ПВ2 <sub>р</sub>	ПВ3 <sub>р</sub> , ПВ1 <sub>3</sub> , ПВ2 <sub>р</sub>							
7	27	Задержка											
	28	Отпускание РУ	РУ-С	Силовая цепь	1-РУ <sub>3</sub>	1-РУ <sub>3</sub>	РУв						
7	29	Переключение ГК	В1	К5, ГК4, 1-РУ, 2-ЛК2, ПВ1	ПВ3 <sub>3</sub> , 1-РУ <sub>р</sub>	ПВ3 <sub>3</sub> , 1-РУ <sub>р</sub>	12 <sub>3</sub>						

Продолжение табл. 5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
7-8	10	Переход				ПВ3 <sub>р</sub> , ПВ1 <sub>р</sub> , ПВ2 <sub>3</sub>				
8	31	Задержка								
	32	Отпускание РУ	РУ-С		Слывая цель	1-РУ <sub>3</sub>	РУв			
	33	Переключение ГК	ВП		К5, ГК4, 1-РУ, 2-ЛК2, ПВ2	ПВ3 <sub>3</sub> , 1-РУ <sub>р</sub>	11, <sub>р</sub> , 3, <sub>5</sub>			
8-9	34	Переход				ПВ3 <sub>р</sub> , ПВ1 <sub>3</sub> , ПВ2 <sub>р</sub>				
9	35	Задержка								
	36	Отпускание РУ	РУ-С		Слывая цель	1-РУ <sub>3</sub>	РУв			
	37	Переключение ГК	В1		К5, ГК4, 1-РУ, 2-ЛК2, ПВ1	ПВ3 <sub>3</sub> , 1-РУ <sub>р</sub> , ГК4 <sub>р</sub> , ГК5 <sub>3</sub>	11 <sub>3</sub>			
9-10	38	Переход				ПВ3 <sub>р</sub> , ПВ1 <sub>р</sub> , ПВ2 <sub>3</sub>				
10	39	Задержка (Перевод главной рукоятки КМ в положение 2)				К6 <sub>3</sub>				
	40	Отпускание РУ	РУ-С		Слывая цель	1-РУ <sub>3</sub>	РУв			
	41	Переключение ГК	ВП		К6, ГК5, 1-РУ, 2-ЛК2, ПВ2	ПВ3 <sub>3</sub> , 1-РУ <sub>3</sub>	4, <sub>р</sub> 12 <sub>р</sub>			
10-11	42	Переход				ПВ3 <sub>р</sub> , ПВ1 <sub>3</sub> , ПВ2 <sub>р</sub>				
11	43	Задержка								
	44	Отпускание РУ	РУ-С		Слывая цель	1-РУ <sub>3</sub>	РУв			
	45	Переключение ГК	В1		К6, ГК5, 1-РУ, 2-ЛК2, ПВ1	ПВ3 <sub>3</sub> , 1-РУ <sub>р</sub>	12 <sub>3</sub>			
11-12	46	Переход				ПВ3 <sub>р</sub> , ПВ1 <sub>р</sub> , ПВ2 <sub>3</sub>				



Окончание табл. 5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
18	70	Отпускание РУ								
	71	Переключение ГК								
18-19	72	Переход								
	73	Задержка								
19	74	Отпускание РУ								
	75	Перевод главной рукоятки КМ в положение 0, отключение ЛК2	ЛК2	ЛК2	К8 <sub>p</sub>	1-ЛК2 <sub>p</sub> , 2-ЛК2 <sub>p</sub>	ЛК2 <sub>p</sub>			
	76	Отключение ЛК1	ЛК1	ЛК1	К2, ВП, 1-ЛК2	1-ЛК1 <sub>p</sub> , 2-ЛК2 <sub>3</sub>	ЛК1 <sub>p</sub>			
	77	Переход		В1	К3, ГК2, 2-ЛК1, ПВ1	ПВ3 <sub>3</sub>				
20	78	Переключение ГК		В1	К3, ГК2, 2-ЛК1, ПВ1	ПВ1 <sub>p</sub> , ПВ3 <sub>p</sub> , ПВ2 <sub>3</sub>	8 <sub>p</sub> , 10 <sub>p</sub> , Ш4 <sub>p</sub>			
	79	Переключение ГК		В11	К3, ГК2, 2-ЛК1, ПВ2	ПВ3 <sub>3</sub>	ПВ3, 12 <sub>p</sub> , Ш1 <sub>p</sub> , 12 <sub>p</sub> , 11 <sub>p</sub> , 1 <sub>3</sub>			
20-1	80	Переход		В11	К3, ГК2, 2-ЛК1, ПВ2	ГК2 <sub>p</sub> , ГК1 <sub>3</sub> , ГК3 <sub>3</sub> , ПВ2 <sub>p</sub> , ПВ3 <sub>p</sub> , ПВ1 <sub>3</sub>				

Примечание. Индексы «р» и «3» обозначают, соответственно, замыкание и размыкание контакта аппарата.

В 1-й колонке этой таблицы указаны порядковые номера скоростных характеристик и переходы с характеристики на характеристику соответственно рис. 5. Очередность процессов во времени отражается порядковыми номерами тактов в колонке 2, а их наименование — в колонке 3.

Каждый такт продолжается определенное время, его длительность (колонка 4) зависит от времени переключения аппаратов или продолжительности процессов изменения тока в силовой цепи. Сумма всех времен, записанных в колонке 4, будет соответствовать длительности автоматического пуска электропоезда.

Отсчет времени процесса пуска начинается с момента установки реверсного вала контроллера машиниста в положение ВП. При этом замыкаются блокировочные контакты К2 и К3 (рис. 3) и питающее напряжение 110 В постоянного тока подается на подмагничивающую обмотку РУ-П катушки реле ускорения РУ, а также на катушку реверсора ВП. Через замкнутый контакт реверсора ВП, через блокировки силового контроллера ГК1 напряжение подается на катушку электропневматического вентиля линейного контактора ЛК1. Через некоторое время (время срабатывания контакторов) он включается и замыкает свои силовые контакты в цепи тяговых двигателей, подготавливая тем самым цепь для подачи напряжения на ТЭД (1-й такт табл. 5).

После включения контактора ЛК1 замыкается блокировочный контакт 1-ЛК1, подготавливая цепь для питания катушки поездного контактора ЛК2 и выключается блок-контакт 2-ЛК1 в цепи вентилях В1 и ВП. При этом катушки вентилях В1 и ВП обесточиваются, тем самым исключается возможность набора позиций.

В колонке 5 табл. 5 указаны наименования входных элементов аппаратов, а в колонке 6 — блокировки цепи управления, по которой подается питание (воздействие) на входной элемент. В колонках 7 и 8 показаны все изменения на данном такте в цепях управления и силовой цепи, которые происходят после переключения аппарата. На такте 1 включается двоярный линейный контактор ЛК1. Однако, при этом тока в цепи двигате-

лей еще не будет, так как цепь не собрана, что видно из силовой схемы (рис. 2).

При переводе рукоятки главного вала контроллера в положение «М» замыкается блокировочный контакт К8 (2-й такт в табл. 5) и напряжение от общего плюсового провода подается на катушку электропневматического вентиля линейного контактора ЛК2. Через 0,08 с он включается и замыкает контакты в силовой схеме. Собирается силовая цепь и по цепи ТЭД через токоограничивающий резистор R1 начинает протекать ток, величина которого соответствует току трогания I, на 1-й характеристике (рис. 5). Эта величина записывается в колонку 11 табл. 5.

С этого момента начинается ускоренное движение электропоезда. При включении ЛК2 замыкается блокировочный контакт 2-ЛК2, которые подготавливают цепь для подачи напряжения на вентили КСП VI и VII, 1-ЛК2 в цепи линейного контактора ЛК1. Он шунтирует блок-контакт главного контроллера ГК1, который выключается после схода КСП с 1-й позиции. После перевода рукоятки контроллера машиниста в положение 1 замыкается контакт контроллера К4 и через нормально замкнутый контакт ГК3, контакт реле ускорения 1-РУ, замкнутый контакт 2-ЛК2 получает питание вентиль VI.

Через определенное время (оно равно 0,35 с и будет рассчитано в разделе 5) КСП поворачивает свои валы, замыкая при этом силовой контакт 9, который шунтирует маневровое сопротивление R1. Сопротивление цепи ТЭД уменьшается и происходит переход на 2-ю скоростную характеристику.

Этот переход характеризуется возрастанием тока и начинается при скорости движения, которую успел набрать поезд за время 0,35 с на такте 3. Величину приращения скорости за время длительности такта 3, скорость движения и ток двигателей в конце такта записывают в колонки 9, 10 и 11 соответственно.

Возрастание тока тяговых двигателей при переходах с предыдущей на последующую скоростную характеристику происходит не мгновенно, а в течение некоторого промежутка времени, что связано с индуктивным характером силовой цепи. При этом ток, протекающий по цепи ТЭД через включающую катушку



РУ-С реле ускорения к концу 4-го такта, достигает или не достигает величины тока уставки. В зависимости от этого дальнейшие процессы протекают по разному.

Переход с 1-й на 2-ю скоростную характеристику в табл. 5 обозначен как такт 4. Расчет времени этих переходов рассматривается в разделе 4. Приращение скорости на этом такте, скорость и ток в его конце записываются в колонки 9, 10 и 11 табл. 5.

После выхода на очередную скоростную характеристику наступает задержка в работе системы автоматического пуска. Задержка на очередной скоростной характеристике, необходимая для реализации требуемой пусковой диаграммы, обеспечивается работой подмагничивающей катушки реле ускорения РУ-П. Подмагничивающая катушка получает питание через контакт ПВЗ (рис. 3), который замыкается на короткое время в период вращения вала КСП (на каждой фиксированной позиции контакт ПВЗ разомкнут). Необходимость в наличии намагничивающей катушки для обеспечения задержки на каждой позиции связана с тем, что для притяжения якоря реле ускорения требуется ток  $I_{пр}$  в силовой катушке больший, чем ток уставки  $I_y$  (ток уставки — ток, при котором якорь реле ускорения отпадает). Этим свойством обладают все электромагнитные аппараты.

При замыкании контакта ПВЗ магнитодвижущая сила подмагничивающей катушки РУ-П складывается с магнитодвижущей силой включающей катушки РУ-С, что обеспечивает притяжение якоря реле ускорения при токах, меньших тока притяжения  $I_{пр}$ . В результате РУ срабатывает и размыкает блокировочные контакты 1-РУ и исключает подачу напряжения на катушки вентилей VI и VII. При отсутствии подмагничивающей катушки в случае, перехода на какую-либо характеристику с увеличением тока до величины, меньшей тока притяжения, якорь реле ускорения не притянется и произойдет переключение КСП на следующую позицию без задержки на данной. Подробнее анализ работы системы автоматического пуска в отсутствии подмагничивающей катушки реле ускорения проводится в разделе 10 курсовой работы.

Если к моменту размыкания контакта ПВ3 и потери питания катушки РУ-П ток в тяговых двигателях и, соответственно, во включающей катушке РУ-С окажется меньше тока уставки, то после притяжения с помощью подмагничивающей катушки якорь реле ускорения отпадает (для его удержания необходим ток  $I_{\text{уд}}$ ), контакты РУ замкнутся и начнется процесс переключения КСП на следующую позицию без задержки на данной (такты 6 и 7, минуя такт 5, именно этот случай изображен на рис. 5).

За время задержки скорость движения увеличивается, а ток двигателей уменьшается. Задержка на 2-й скоростной характеристике (происходит в том случае, если ток в силовой цепи к концу 4-го такта превысит величину тока уставки РУ) — такт 5 табл. 5. При снижении тока до величины тока уставки реле ускорения РУ электромагнитная сила притяжения якоря реле ускорения к сердечнику, создаваемая магнитодвижущей силой включающей катушки реле ускорения РУ-С, становится меньше механической силы отключающей пружины и якорь реле ускорения отпадает, на что затрачивается 0,04 с (такт 6). РУ срабатывает и в цепях управления замыкается контакт 1-РУ. При этом подается напряжение на вентиль ВП. Начинается переключение КСП на третью позицию (такт 7), в результате чего замкнется контакт 2 и разомкнется контакт 12 в силовой цепи главного контроллера. В цепях управления разомкнется блок-контакт ПВ2 в цепи вентиля ВП и замкнется ПВ1, контакты которого подготавливают цепь для последующего включения В1. Происходит переход на 3-ю скоростную характеристику (такт 8).

Рассмотренная последовательность работы системы автоматического пуска сохраняется на последующих тактах. Таким образом будет происходить набор позиций до 6, после чего автонабор заканчивается.

Чтобы произвести дальнейший набор позиций рукоятку главного вала контроллера машиниста надо установить в положение «2», при этом замкнется контакт К5 и через замкнутый контакт ГК4 (замкнулся на 6-й позиции) напряжение будет поочередно подаваться на вентили В I и ВП и произойдет дальнейший набор позиций. На контроллере машиниста шесть положений «0», «М», 1, 2, 3, 4. После набора 16 позиции (3-

положение рукоятки контроллера) увеличение скорости будет происходить за счет включения ослабления поля. Для этого машинист устанавливает рукоятку контроллера в положение 4. При этом включаются контакторы ослабления поля Ш1 и Ш3, и обмотки возбуждения шунтируются резисторами R2 и R4. В результате в обмотке якоря ток увеличивается и срабатывает реле ускорения РУ. В строках каждого такта табл. 5 записываются приращение скорости за время длительности такта  $\Delta V$ , скорость движения  $V$  и ток двигателей  $I$  в конце такта.

### Порядок оформления раздела

1. Функциональная схема системы управления электропоездом. Схему нужно изучить для ответа на вопросы при защите курсовой работы.
2. Расчет тока уставки реле ускорения.
3. Исходная пусковая диаграмма, изображенная на графике скоростных характеристик тонкими линиями.
4. Таблица последовательности работы системы управления электропоездом по форме табл. 5. Колонки 5–8 на тактах 49–71 следует заполнить самостоятельно. Заполнение колонок 4, 9–11 производится после расчетов в последующих разделах.

## 4. ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦЕПИ ТЯГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Динамическими характеристиками цепи тяговых двигателей в нашем случае будет являться изменение тока во времени  $i(t)$  после изменения напряжения, подводимого к двигателям и после включения и отключения ослабления возбуждения.

Уравнение переходного процесса, возникающего после переключения секции тягового трансформатора, можно получить путем решения уравнения электрического равновесия силовой цепи в период перехода с какой-либо  $n$ -й на следующую  $(n + 1)$ -ю позицию, которое выглядит следующим образом:

$$U_k = C_v \Phi V + i \cdot r_d + L_d (di/dt), \quad (7)$$

где  $U_k$  — напряжение на коллекторе ТЭД на  $n + 1$  позиции;  
 $C_v$  — конструктивная постоянная двигателя.

Аналитическое решение данного дифференциального уравнения оказывается довольно сложным в связи с тем, что при изменении тока по сложным законам изменяются магнитный поток и индуктивность обмоток двигателя. Кроме того, изменяются сила тяги и скорость движения электропоезда. В настоящее время подобные уравнения решаются с применением ЭВМ.

Для упрощения последующих расчетов можно нелинейную функцию намагничивания  $\Phi(I)$  представить в ограниченном диапазоне изменения тока в виде прямолинейной зависимости (линеаризировать). При этом индуктивность обмоток двигателя можно считать постоянной. Получаемая при этом погрешность будет допустимой для решаемой в курсовой работе задачи.

Для удобства функцию намагничивания представим в виде зависимости удельной ЭДС от тока двигателя  $C_v \Phi(I)$ . Линеаризованная зависимость будет иметь вид:

$$C_v \Phi = C_v \Phi_0 + k_\Phi I, \quad (8)$$

где  $C_v \Phi_0$  — значение удельной ЭДС в точке пересечения касательной к кривой  $C_v \Phi(I)$  с осью ординат;  
 $k_\Phi = \Delta(C_v \Phi) / \Delta I$  — угловой коэффициент.

В дальнейших расчетах потребуется только угловой коэффициент  $k_\Phi$ . Его следует определить из условия, что в процессе пуска электропоезда ток двигателей изменяется приблизительно от  $1,15I_n$  до  $1,45I_n$ . Данным токам соответствуют скорости движения  $V_{n1}$  и  $V_{n2}$  при работе на 16-й позиции, которые определяются по графику скоростной характеристики. С учетом этого для указанного изменения тока

$$\Delta C_v \Phi = (U_{дн} - 1,45I_n r_d) / (V_{n2}) - (U_{дн} - 1,15I_n r_d) / (V_{n1}). \quad (9)$$

Если пренебречь изменением скорости движения за время переходного процесса, при использовании линеаризованной функции намагничивания уравнение электрического равновесия принимает вид:

$$U_k = (C_v \Phi_0 + k_\Phi i) V_{нач} + i \cdot r_d + L_d (di/dt), \quad (10)$$

где  $V_{нач}$  — скорость, при которой начинается переходный процесс.

Решение данного уравнения имеет вид:

$$i = I_{\text{нач}} + (I_{\text{к}} - I_{\text{нач}})[1 - \exp(-t/\tau)], \quad (11)$$

где  $I_{\text{нач}}$  — ток начала переходного процесса (в момент замыкания контактора в силовой схеме);

$I_{\text{к}}$  — ток выхода на характеристику следующей позиции (окончания переходного процесса);

$\tau$  — постоянная времени цепи,

$$\tau = L_{\text{д}} / (r_{\text{д}} + k_{\text{ф}} V_{\text{нач}}). \quad (12)$$

Анализ уравнения (1) показывает, что переходный процесс практически (с достаточной для инженерных расчетов точностью) заканчивается через время  $t = 3\tau$ , т.е., за это время ток достигает значения  $I_{\text{к}}$ . Поэтому в дальнейших расчетах длительность электрических переходных процессов будет принимать  $t_{\text{эл}} = 3\tau$ .

Длительность переходных процессов  $\tau$  при регулировании пока еще рассчитать нельзя, так как неизвестна скорость начала переходных процессов  $V_{\text{нач}}$ . Этот расчет будет выполнен в дальнейшем.

Переходные процессы, возникающие при уменьшении  $\beta$ , имеют гораздо большую длительность по сравнению с переходными процессами при регулировании  $U_{\text{к}}$ . Поэтому пренебрегать изменением скорости за время перехода в этом случае нельзя. Совместное влияние увеличения скорости и увеличения тока якоря приводит к тому, что ЭДС тягового двигателя в течение переходного процесса практически остается неизменной. При этом допущении (оно подтверждается обработкой осциллограмм тока) возрастание тока во времени соответствует функции (1). Постоянная времени  $\tau_{\text{в}}$ , определяющая длительность переходного процесса при уменьшении  $\beta$ , рассчитывается по формуле

$$\tau_{\text{в}} = (2L_{\text{я}} + L_{\text{ш}}) / (2r_{\text{я}} + R_{\text{ш}}), \quad (13)$$

где  $r_{\text{я}}$  — сопротивление обмотки якоря и добавочных полюсов;  
 $R_{\text{ш}}$  — сопротивление цепи, шунтирующей обмотки возбуждения;

$L_{\text{я}}$  — индуктивность обмоток якоря и добавочных полюсов;

$L_{\text{ш}}$  — индуктивность индуктивного шунта (используется не на всех электропоездах).

В курсовой работе для расчета следует принять:

$$L_{я} = 0,5L_{д}, \quad r_{я} = 0,6r_{д}. \quad (14)$$

Величина  $R_{ш}$  определяется исходя из требуемой величины коэффициента регулирования возбуждения:

$$R_{ш} = [2\beta/(1 - \beta)]r_{в}, \quad (15)$$

где  $r_{в} = 0,4r_{д}$  — сопротивление обмотки возбуждения тягового двигателя.

На электропоезде ЭР9П используется две степени ослабления возбуждения со значениями  $\beta_1 = 0,535$  и  $\beta_2 = 0,32$ .

Расчет переходного процесса при выключении шунтирующей цепи дает достаточную сходимость с результатами осциллографирования переходных процессов, если для расчета использовать формулу (12).

### Порядок оформления раздела

1. Расчет углового коэффициента линеаризованной функции  $C_{\psi}(L)$ .

2. Расчет сопротивлений  $R_{ш1}$  и  $R_{ш2}$  цепи, шунтирующей обмотки возбуждения тяговых двигателей на 1-й и 2-й ступенях ослабления возбуждения.

3. Расчет постоянных времени  $\tau_{в1}$  и  $\tau_{в2}$  цепи тяговых двигателей при включении 1-й и 2-й ступеней ослабления возбуждения.

## 5. ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Каждый электрический аппарат — устройство, имеющее один или несколько входов, на которые подается управляющее воздействие, в результате которого изменяется состояние одного или нескольких выходов.

Элементы аппарата, воспринимающие воздействия, будем называть входными, а выходы в зависимости от их назначения — элементами исполнения или связи.

В рассматриваемой системе управления входными элементами являются обмотки электропневматических вентилях, управляющих приводом тяговых аппаратов. Исключением является реле ускорения РУ, имеющее два входных элемента — обмотку включающей катушки в силовой цепи РУ-С и обмотку подмагничивающей катушки РУ-П в цепи управления.

Элементами исполнения тяговых аппаратов являются их силовые контакты, обеспечивающие работу силовых цепей. Исполнительные элементы контроллера машиниста КМ и реле ускорения РУ включены в цепи управления.

К элементам связи относятся блокировки данного аппарата, обеспечивающие требуемый порядок работы аппаратов. Контроллер машиниста имеет механические связи между рукоятками (механические блокировки).

В структурных схемах систем автоматического регулирования [1, с. 62] электрические коммутационные аппараты изображаются в виде динамического звена с запаздыванием. Это связано с тем, что переключение выходных элементов аппарата происходит с некоторым запаздыванием относительно момента изменения управляющего воздействия на его входе. Поэтому динамическая характеристика аппарата представляет собой ступенчатую функцию, смещенную относительно начала координат на величину запаздывания. Величина запаздывания определяется длительностью электрических и механических переходных процессов в аппарате и зависит от ряда эксплуатационных факторов — напряжения питания цепей управления, давления сжатого воздуха, температуры и т.д.

Для расчетов в курсовой работе принимаются следующие значения времен запаздывания:

$t_{\text{py}} = 40$  мс — время отпадания якоря РУ (время от момента достижения тока уставки до момента замыкания контактов РУ);

$\Delta t_{\text{гк}}$  — время переключения КСП от момента замыкания силовых контактов до момента фиксации на позициях (определяется по развертке силового контроллера, рис. 8);

$t_{\text{пу}} = 20$  мс — время срабатывания РУ (время от момента замыкания контакта ПВЗ до момента размыкания контактов РУ).

Время переключения главного контроллера  $t_{гк}$  с позиции на позицию складывается из длительности ряда процессов, происходящих в аппарате и подчиняющихся определенному порядку — алгоритму.

Время переключения КСП  $t_{гк}$  отсчитывают с момента подачи воздействия (питания) на катушку очередного вентиля В1 или ВП через контакты ПВ1 или ПВ2 соответственно (рис. 3). Однако включение цепи питания катушки вентиля еще не означает его срабатывания.

Время срабатывания вентиля КСП, как и любого электромагнитного устройства (например, реле), складывается из двух времен, а именно: времени трогания  $t_{тр} = 130$  мс, в течение которого ток в обмотке вентиля нарастает до значения тока срабатывания и начинается движение якоря, и времени движения  $t_{д} = 20$  мс якоря, который нажимает на клапан, открывающий доступ воздуха в цилиндр привода. Далее происходит заполнение воздухом цилиндра привода, которое завершается в течение  $t_{зв} = 100$  мс.

Сумма перечисленных выше времен представляет собой время подготовки  $t_{п} = t_{тр} + t_{д} + t_{зв}$ .

После этого начинает вращаться выходной вал привода Решетова, на котором находятся кулачковые шайбы контакторных элементов ПВ1, ПВ2, ПВ3. Одновременно через зубчатую передачу начинает вращаться главный вал силового контроллера, который управляет работой силовых и блокировочных контактов. Этот процесс обозначается как  $t_{вр}$  — время вращения до момента замыкания или размыкания силовых или блокировочных контактов.

Таким образом, время переключения силового контроллера  $t_{гк}$ , которое записывают в таблицу последовательности работы системы автоматического управления (табл. 5), складывается из времени подготовки  $t_{п} = t_{тр} + t_{д} + t_{зв} = 250$  мс и времени вращения  $t_{вр}$  до момента замыкания или размыкания силовых или блокировочных контактов. На различных тактах работы системы это время может быть разным.

Для определения времени вращения и последующего анализа необходимо построить график замыкания и размыкания силовых



и блокировочных контактов КСП, а также контактов переключения вентилей (ПВ1, ПВ2 и ПВ3) в зависимости от времени.

Диаграмма, отражающая последовательность замыкания и размыкания силовых и блокировочных контактов при переключениях КСП с позиции на позицию (развертка КСП), приведена на рис. 7.

Цифрами на диаграмме отмечены углы поворота в градусах выходного вала привода, отсчитанные от фиксированных по-

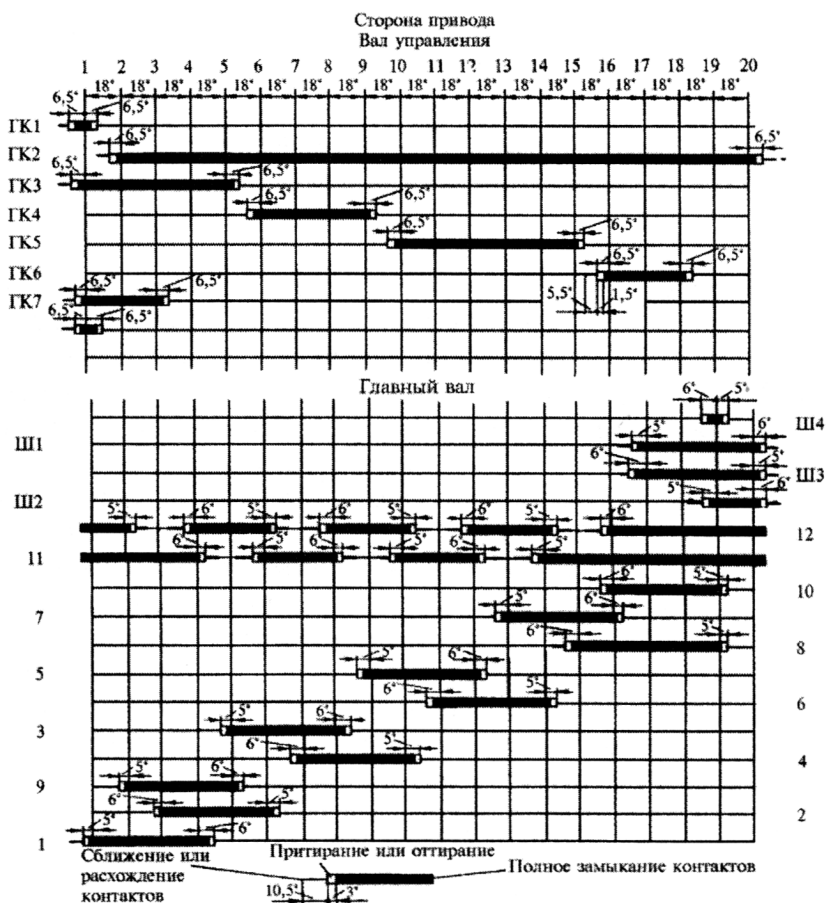


Рис. 7. Развертка силового контроллера

зиций. Полный угол поворота вала при каждом переключении КСП составляет  $18^\circ$ . Для того, чтобы по заданным углам определить время от начала вращения вала до переключения контакта, нужно знать скорость вращения вала. Эту скорость будем считать постоянной. А численное ее значение определяется на основе технических данных котроллера, а именно времени хронометрического вращения  $t_{\text{ксп}}$  с 1-й на 20-ю позицию при давлении 5 атм. Этот параметр нормируется в зависимости от модификации КСП, а в работе выбирается в зависимости от варианта по табл. 1. Скорость вращения вала КСП можно определить по следующей формуле:

$$\omega = \frac{360}{t_{\text{ксп}} - 20t_{\text{п}}}, \text{град/мс.} \quad (16)$$

где  $t_{\text{п}}$  — время подготовки.

Развертку силового контроллера следует построить для любых нескольких поворотов вала с позиции на позицию, где происходит замыкание силовых и блокировочных контактов. *Форма данного графика должна соответствовать рис. 8, где вместо углов нужно нанести времена вращения до замыкания и размыкания каждого контакта от фиксированной позиции.*

Время переключения электрических аппаратов записываются в колонку 4 табл. 5. При этом нужно следить за работой системы пуска по таблице алгоритма управления электропоездом табл. 2 и схемам рис. 2, 3 и 6. Необходимо помнить, что время переключения КСП в зависимости от исполнения может быть различным.

Подробнее процессы, происходящие при регулировании возбуждения рассматриваются в разделе 8. Длительность тактов 64–71 можно записать после выполнения данных разделов.

### Порядок оформления раздела

1. Расчет скорости вращения вала КСП  $\omega$ .
2. График времен замыкания и размыкания контактов силового контроллера в масштабе 1–2 мс/мм (рис. 8 приведен при-



мер развертки силового контроллера для 13–20 позиций при скорости вращения КСП в эксплуатации).

3. Заполнение колонки 4 табл. 5 для тактов, на которых происходит переключение электрических аппаратов, и необходимые для этого расчеты.

## 6. РАСЧЕТ УСКОРЕНИЯ ПРИ РАЗГОНЕ ЭЛЕКТРОПОЕЗДА

Для расчета приращений скорости за время переключения аппаратов и электрических переходных процессов нужно знать ускорение движения поезда. Для движения на прямом горизонтальном участке пути ускорение может быть определено из основного уравнения движения поезда:

$$F_3 - w_0 \cdot Q \cdot g \cdot 10^{-3} = (1 + \gamma) Q(dV/dt)/3,6, \quad (17)$$

где  $F_3$  — сила тяги электропоезда, кН;

$Q = 575$  т — расчетная масса электропоезда, состоящего из 5 моторных и 5 прицепленных вагонов;

$w_0$  — удельное основное сопротивление движению электропоезда, Н/кН;

$g$  — ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$\gamma = 0,06$  — коэффициент, учитывающий инерцию вращающихся масс электропоезда;

$(dV/dt)$  — ускорение движения электропоезда, (км/ч)/с.

Сила тяги электропоезда складывается из сил тяги, реализуемых всеми его тяговыми двигателями. Сила тяги двигателя  $F_d$ , а значит и ускорение движения зависят от тока двигателя. В процессе разгона электропоезда ток двигателей постоянно меняется, причем из-за разброса параметров аппаратов изменения тока двигателей отдельных вагонов происходят не синхронно. В результате средняя величина тока двигателей остается примерно постоянной и близкой к току установки реле ускорения. В связи с этим расчетное ускорение можно определить по силе тяги для полного возбуждения при токе  $I_y$ . Таким же значением ускорения следует пользоваться и для расчета приращений скорости при регулировании возбуждения.

Расчетную величину силы тяги двигателя можно определить из уравнения энергетического баланса:

$$U_{\text{дн}} \cdot I \cdot \eta_{\text{н}} \cdot \eta_{\text{зп}} = F_{\text{д}} \cdot V / 3,6, \quad (18)$$

где  $I = 1,3I_{\text{н}}$ ;

$V = 0,91V_{\text{н}}$  — в соответствии с табл. 3, км/ч;

$\eta_{\text{зп}} = 0,95$  — КПД зубчатой передачи.

Удельное основное сопротивление движению электропоезда в пределах интервала изменения скоростей при пуске усреднено можно принять равным 2,5 Н/кН.

### Порядок оформления раздела

1. Расчетная сила тяги двигателя.
2. Расчетное ускорение движения электропоезда.

## 7. АНАЛИЗ РАБОТЫ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО ПУСКА

Для исследования систем с релейными элементами обычно используется либо метод фазовой плоскости, либо графоаналитический метод, называемый методом «припасовывания». При анализе работы системы управления электропоездом мы будем пользоваться последним методом, так как он наиболее полно отвечает поставленной задаче корректировки исходной пусковой диаграммы. Принцип «припасовывания» заключается в разбиении исследуемого процесса на участки и исследовании процесса на каждом участке при начальных условиях, соответствующих полученным в конце предыдущего участка. Такими участками для рассматриваемой системы являются времена срабатывания аппаратов, переходных процессов в цепи двигателей, задержки на характеристиках до тока уставки РУ. В этой последовательности будет производиться анализ.

Ступеням регулирования  $U_{\text{к}}$  соответствуют скоростные характеристики 1–16 и такты 1–63 в табл. 5.

На первом этапе анализа определяется приращение скорости за время переключения аппаратов. Это время складывается из времени отпадания якоря реле ускорения  $t_{\text{ру}}$  и времени переключения главного контроллера  $t_{\text{гк}}$  до момента замыкания его

силовых контакторов. Эти времена были записаны в колонку 4 соответствующих тактов табл. 5. При определении приращения скорости используется расчетное значение ускорения электропоезда, полученное в разделе 6. Приращение скорости за время отпускания реле ускорения отдельно можно не рассчитывать. Когда КСП работает вслед за РУ приращения скорости можно определять за два такта для суммы времен ( $t_{py} + t_{гк}$ ). Приращения скорости записываются в колонку 9 табл. 5.

Значения скоростей, соответствующих моменту окончания каждого такта, определяются из пусковой диаграммы и должны быть записаны в колонку 10. По определенным скоростям из скоростных характеристик нужно найти величины тока двигателя, которые необходимо записать в колонку 11. Целесообразно отметить точками на характеристиках определившиеся скорости и токи для последующего построения реализуемой пусковой диаграммы.

Далее рассчитывается приращение скорости  $\Delta V_{эп}$  за время переходного процесса в цепи двигателей, который в табл. 5 назван для сокращения «переход». Определение длительности перехода рассмотрено в разделе 4. Расчет приращений скорости за время переходов при регулировании  $U_k$  следует свести в таблицу по форме табл. 6.

Зная приращение скорости за время переходов, можно определить величины скорости движения и тока выхода на очередную характеристику, как показано на рис. 5. Полученные значения скорости и тока следует отметить точками на сетке характеристик и записать в колонки 10 и 11 табл. 5.

Таблица 6

**Расчетная таблица приращений скорости за время перехода**

Переход	$V_{нач}$	$\tau$	$t_{эп}(t_3)$	$\Delta V_{эп}(\Delta V_3)$	$I$
1					
С 1 на 2 позицию					
2					
С 2 на 3 позицию					
3					
С 3 на 4 позицию					
и т.д.					

Приращение скорости за время задержки на характеристике  $\Delta V_3$  определяется из пусковой диаграммы начиная с точки выхода на данную характеристику до достижения тока уставки РУ (см. рис. 5). По определенному приращению скорости и расчетному ускорению определяется время задержки  $t_3$ .

### Порядок оформления раздела

1. Расчет приращения скорости за время переключения аппаратов при регулировании  $U_k$ .
2. Расчет длительности переходных процессов и приращений скорости при переходах по форме табл. 6.
3. Расчет времен задержек на характеристиках регулирования  $U_k$ . Достаточно привести пример расчета для одной характеристики, остальные результаты занести в табл. 5. Заполнение колонок 4, 9, 10 и 11 табл. 5 для тактов реостатного регулирования  $U_k$ .

## 8. АНАЛИЗ РАБОТЫ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО ПУСКА ПРИ РЕГУЛИРОВАНИИ ВОЗБУЖДЕНИЯ

При регулировании возбуждения в работе системы автоматического пуска имеется отличительная особенность, связанная с тем, что после переключения с 17-й на 18-ю позицию главный контроллер хронометрически переключается на 19-ю позицию, то есть отсутствует задержка на 18-й позиции. Причины этого можно выяснить, рассмотрев таблицу алгоритма управления электропоездом (табл. 1)

Отсчет времени будем начинать с момента выхода на 16-ю скоростную характеристику (конец такта 63 по табл. 5). При снижении тока до тока уставки (конец задержки на 16-й характеристике) начинается процесс переключения на 17-ю позицию. Длительность переключения схемы электропоезда на 17-ю позицию складывается из времени отпадания якоря реле ускорения  $t_{py}$ , времени переключения силового контроллера  $t_{тк}$ . Эти времена определяются по данным раздела 5 и записываются в колонку 4 табл. 5. Приращение скорости можно рассчитать суммарное для тактов 64 и 65 и соответственно этому заполнить колонки 9–11 табл. 5.

С момента замыкания контактов Ш1;3 (точка а графика  $i(t)$  рис. 9) начинается переходный процесс возрастания тока тяговых двигателей на 17-ю скоростную характеристику. Расчет длительности переходного процесса для данного случая рассмотрен в разделе 4. Конечное значение тока (точка г графика  $i(t)$  на рис. 9) определяется аналогично тактам регулирования  $U_k$ .

Характер переходного процесса подчиняется экспоненциальному закону (1). Для построения кривой  $i(t)$  на данном интервале следует определить промежуточные точки. В нашем случае достаточно рассчитать два промежуточных значения тока: через интервал времени  $\tau$  и  $2\tau$  от начала переходного процесса. На рис. 9 эти точки обозначены соответственно б и в.

В точке «г» переходной процесс заканчивается и начинается движение электропоезда на 17-й скоростной характеристике. По мере увеличения скорости движения ток в цепи ТЭД уменьшается. При снижении тока до тока уставки (конец задержки на 17-й характеристике — конец такта 67 по табл. 5) начинается процесс переключения на 18-ю позицию (рис. 10). Длительность переключения схемы электропоезда на 18-ю позицию складывается из времени отпадания якоря реле ускорения  $t_{py}$  (такт 68) и времени переключения силового контроллера  $t'_{ГК}$  (такт 69). Из табл. 1 алгоритма управления электропоездом видно, что при переходе с 17-й на 18-ю позицию никаких изменений в силовой схеме электропоезда не происходит, поэтому движение продолжается по той же 17-ой скоростной характеристике, соответствующей 1-ой ступени ослабления возбуждения ТЭД ОВ1.

При замыкании контакта ПВ3 получает питание подмагничивающая катушка РУ-П, якорь РУ притягивается и контакт 1-РУ размыкается. Длительность времени переключения  $t'_{ГК}$  отличается от  $t_{ГК}$  и продолжается до момента размыкания контакта ПВ3.

Сопоставляя построенный график  $i(t)$  с графиком алгоритма переключения аппаратов, можно увидеть, что контакт ПВ3 размыкается в тот момент, когда величина тока тяговых двигателей меньше тока уставки реле ускорения. Поэтому, после размыкания контакта ПВ3 (при этом теряет питание подмагничивающая катушка РУ-П) якорь реле ускорения начинает отпадать (такт 70). Через время  $t_{py}$  замыкается контакт РУ и питание пода-



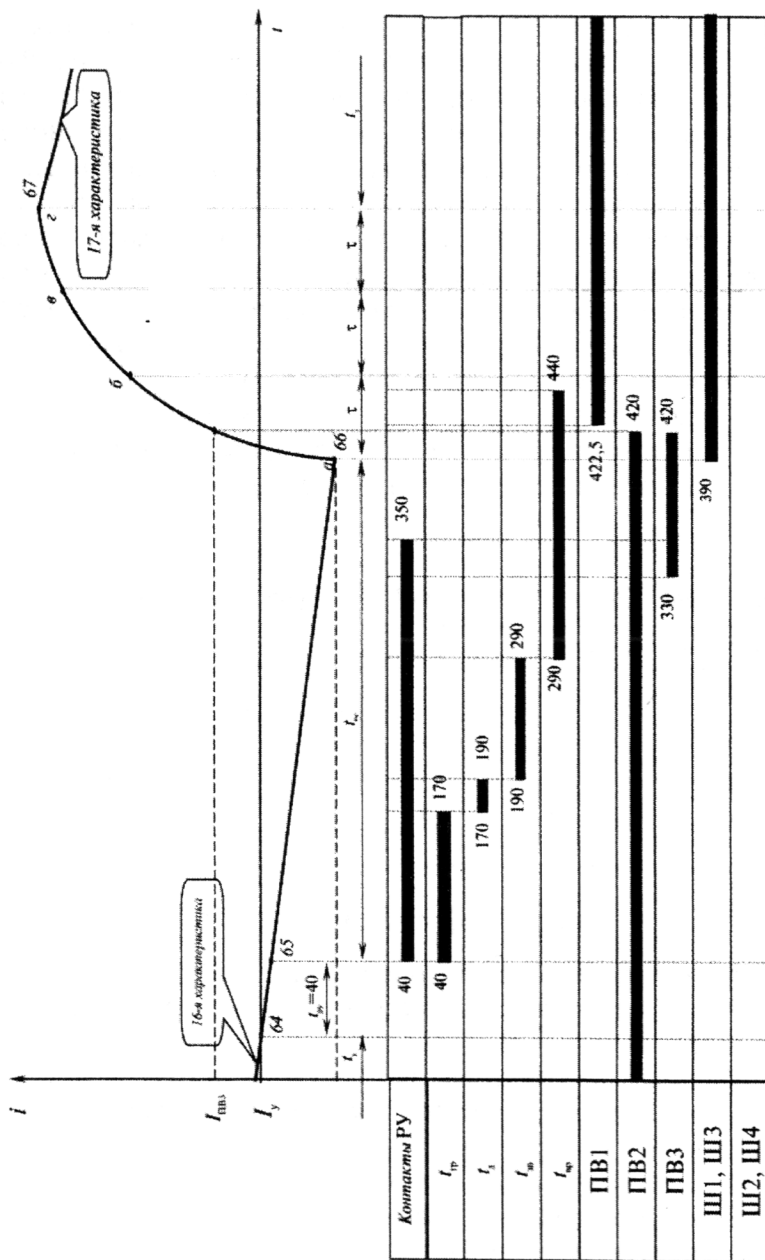


Рис. 9. Графики  $i(t)$  при регулировании возбуждения (такты 64—67)

ется на катушку ВП электропневматического вентиля привода силового контроллера (см. рис. 3), вследствие чего начинается следующий цикл переключения КСП (такт 71) — с 18-й на 19-ю позицию. Таким образом, задержки до тока уставки на 18-й скоростной характеристике не будет, силовой контроллер хронометрически переключается с 17-й через 18-ю на 19-ю позицию.

По окончании цикла переключения КСП на 19-ю позицию замыкаются контакты Ш2, Ш4 и начинается переходной процесс возрастания тока, расчет которого производится аналогично рассмотренному выше. После окончания этого переходного процесса (такт 72) начинается такт задержки на 19 скоростной характеристике до тока уставки РУ (такт 73).

Результаты расчетов приращений скорости и точек кривой  $i(t)$  для переходных процессов при регулировании возбуждения тяговых двигателей следует свести в таблицу по форме табл. 7.

Таблица 7

**Расчет переходных процессов при регулировании возбуждения ТД**

Переход	$\tau$	$I_{эн}$	$\Delta V_{эн}$	$I_a$	$I_b$	$I_v$	$I_r$
16							
16–17							
17							
17–18							
18							
18–19							

**Порядок оформления раздела**

1. Расчет и полное заполнение тактов 63–72.
2. Расчет переходных процессов и таблица результатов по форме табл. 7.

3. Графики  $i(t)$  и алгоритма переключения аппаратов для тактов 64–67 по форме рис. 9 и тактов 68–73 по форме рис. 10. Масштабы для построения: по току — 1 А/мм, по времени — 10 мс/мм. На графике  $i(t)$  нужно указать точки, соответствующие началу и окончанию каждого такта. Ось тока нужно разметить в пределах от  $I_n$  до  $2I_n$ .

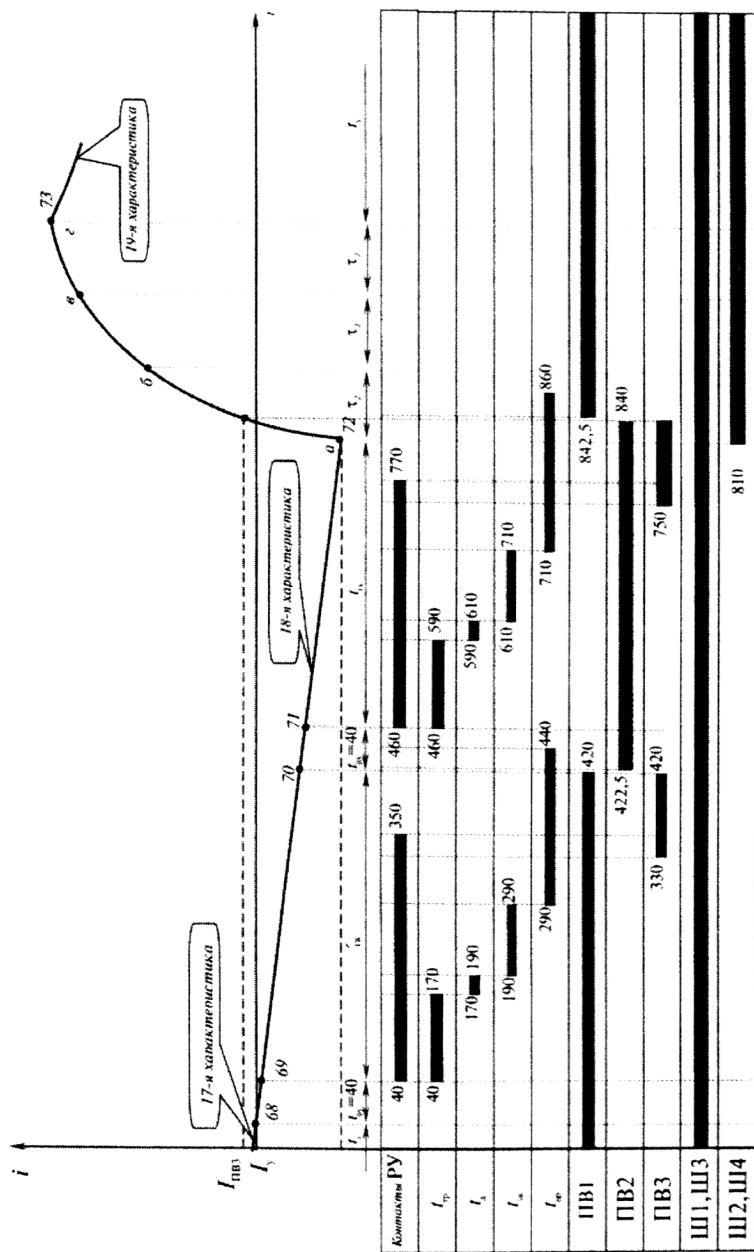


Рис. 10. Графики  $i(t)$  при регулировании возбуждения (такты 68–73)

## 10. АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ СОСТОЯНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ НА КАЧЕСТВО АВТОМАТИЧЕСКОГО ПУСКА

### *Отказ цепи подмагничивающей катушки реле ускорения*

Как отмечалось ранее при рассмотрении последовательности работы системы автоматического пуска (см. раздел 3 методических указаний), подмагничивающая катушка реле ускорения РУ-П предназначена для обеспечения при разгоне задержки на каждой скоростной характеристике. Подмагничивающая катушка, получая питание через контакт ПВЗ силового контроллера в процессе его поворота с одной позиции на следующую, за счет действия м.д.с. помогает притянуть якорь реле ускорения. При притяжении якоря размыкается контакт реле ускорения, размыкая тем самым цепь питания привода КСП.

При неисправности подмагничивающей катушки или ее цепи якорь реле ускорения будет притягиваться при условии, если ток включающей катушки РУ-С, включенной в цепь тяговых двигателей, достигнет определенной величины, называемой током притяжения  $I_{пр}$  (на рис. 5 ток  $I'_y$ ). Этот ток определяется из условия

$$I_{пр} = I_y/k_b, \quad (19)$$

где  $k_b$  — коэффициент возврата реле ускорения; для любого электромагнитного аппарата  $k_b < 1$ .

В курсовой работе можно принять для реле ускорения  $k_b = 0,8$ , т.е., ток притяжения якоря будет больше тока уставки (тока при котором якорь отпадает) на 25%. Это обстоятельство будет приводить к искажению пусковой диаграммы при неисправности цепи подмагничивающей катушки реле ускорения, которое будет заключаться в следующем.

При переключении силовой схемы электропоезда на какую-либо следующую позицию конечное значение тока переходного процесса может быть меньше тока притяжения якоря реле ускорения:  $I_k < I_{пр}$ . Тогда якорь реле ускорения не притянется и его контакты останутся замкнутыми. В этом случае после за-

мыкания контакта ПВ1 или ПВ2 (в зависимости от конкретной позиции) начнется цикл переключения КСП на следующую позицию, т.е. будет наблюдаться хронометрический ход КСП. Очевидно, что хронометрическое переключение силового контроллера будет продолжаться до тех пор, пока ток тяговых двигателей не достигнет величины тока притяжения якоря реле ускорения, после чего будет задержка на соответствующей скоростной характеристике до тока уставки.

В этом разделе курсовой работы нужно рассчитать и изобразить графически изменение пусковой диаграммы для случая отказа цепи подмагничивающей катушки реле ускорения при переключении КСП с  $n$ -й позиции выбирается по табл. 1 до 16 позиции. Кроме того, нужно построить графики  $i(t)$  и алгоритма переключения аппаратов для данного случая (рис. 11).

### Порядок оформления раздела

1. Расчет тока притяжения якоря реле ускорения.
2. Необходимые расчеты для построения пусковой диаграммы в случае отказа цепи подмагничивающей катушки на  $n$ -й позиции.
3. Изменения пусковой диаграммы и графики  $i(t)$  и алгоритма переключения аппаратов для данного случая.

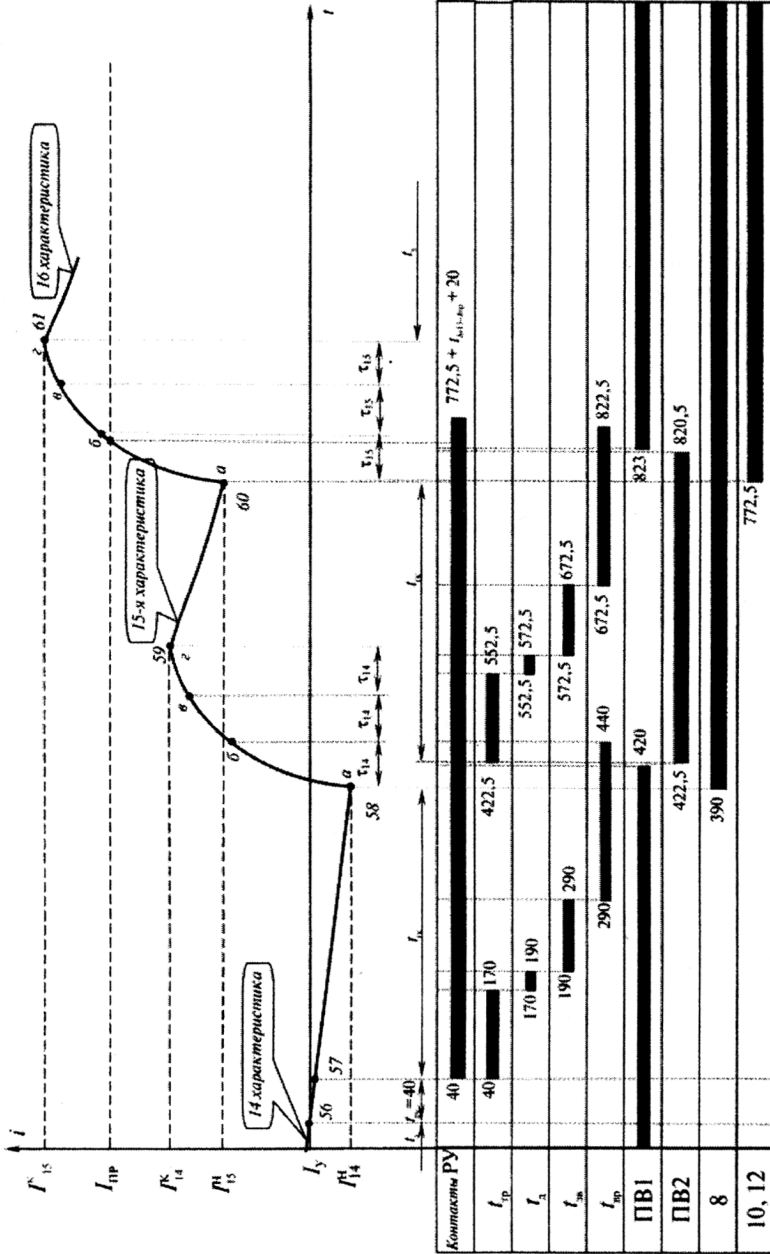


Рис. 1.1. Графики  $i(t)$  при отказе подмагничивающей катушки ПВЗ

## ВЫВОДЫ

В заключение, после выполнения всех расчетов и построений следует написать выводы о влиянии динамических процессов в электрических аппаратах и объекте управления на работу системы автоматического пуска. При этом нужно ответить на следующие вопросы:

— как влияют динамические процессы на пусковую диаграмму электропоезда;

— как изменится работа системы автоматического пуска и пусковая диаграмма, если увеличить или уменьшить число моторных вагонов в поезде;

— как изменится пусковая диаграмма при разгоне электропоезда на спуске и на подъеме;

— как изменится работа системы автоматического пуска и пусковая диаграмма при срабатывании реле боксования РБ или включения кнопки РРУ.

Сделанные выводы должны быть обоснованы.

### *Вопросы для подготовки к защите курсовой работы*

1. Объясните по функциональной схеме системы, как осуществляется автоматическое регулирование тока тяговых двигателей.

2. Объясните по принципиальной схеме цепей управления назначение блокировок аппаратов.

3. Объясните по силовой схеме, как осуществляется воздействие на величину тока тяговых двигателей.

4. От чего зависит длительность переходного процесса в цепи двигателей?

5. Из каких интервалов складывается время переключения силового контроллера с позиции на позицию?

6. Как рассчитывается приращение скорости за время срабатывания аппаратов и за время переходных процессов?

7. Как рассчитывается время задержки на позиции?

8. Почему после переключения с 17-й на 18-ю позицию силовой контроллер хронометрически переключается на 19-ю позицию?

9. Объясните, как получены точки графика  $i(t)$  и как строился график алгоритма переключения аппаратов.

10. Объясните по построенным в проекте графикам, как влияет изменение времени срабатывания аппаратов ( $t_{ру}$ ,  $t_{тр}$ ,  $t_{д}$ ,  $t_{зв}$ ) и развертки КСП (времени вращения КСП  $t_{вр}$ ; времени замкнутого состояния контакта ПВЗ  $t_{ПВЗ}$ , времен начала замыкания и размыкания силовых контактов относительно фиксированных позиций) на качество регулирования тока двигателей.

11. Как отразится отказ цепи подмагничивающей катушки РУ на процессе регулирования тока тяговых двигателей?

12. Как отразится изменение коэффициента ослабления возбуждения ТЭД  $\beta_1$  на процессе пуска электропоезда?

13. Каким минимальным по величине может быть коэффициент ослабления возбуждения ТЭД  $\beta_1$  и почему?

14. Каким максимальным по величине может быть коэффициент ослабления возбуждения ТЭД  $\beta_1$  и почему?

15. Как отразится изменение длительности переходных процессов в цепи ТЭД (например, включение ИШ) на процессе пуска электропоезда?

## ЛИТЕРАТУРА

1. Луков Н.М., Космодамианский А.С. Автоматические системы управления локомотивов: Учеб. для вузов. — М.: Маршрут, 2007. — 127 с.

2. Автоматика и автоматические системы локомотивов / А.С. Космодамианский А.С., В.И. Воробьев, А.А. Пугачев и др.: Уч. пос. — М.: РГОТУПС, 2008. — 102 с.

3. Электропоезда / Под ред. З.М. Рубчинского. — М.: Транспорт, 1983.

4. Авдеев М.М., Гут В.А., Томчук В.И., Хряев В.А. Электропоезда переменного тока., Транспорт, 1985.

5. Кун А. П. Системы автоматического регулирования электроподвижного состава метрополитена. — М.: ВЗИИТ, 1994.

6. Калинин В.К. Электровозы и электропоезда. — М.: Транспорт, 1991.