

МПС — СССР

**ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА**

На правах рукописи

Кандидат технических наук
доцент Н. Г. ВИСИН

**ВОПРОСЫ ТЕОРИИ
АВТОМАТИЗАЦИИ ТЯГИ
ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА
ПЕРЕМЕННОГО И ПОСТОЯННОГО ТОКА
ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ**

(Специальность № 433—«Подвижной состав и тяга поездов»)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Днепропетровск
1969

НТБ
ДНУЖТ

3625a

МПС — СССР

ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

На правах рукописи

Кандидат технических наук
доцент Н. Г. ВИСИН

ВОПРОСЫ ТЕОРИИ
АВТОМАТИЗАЦИИ ТЯГИ
ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА
ПЕРЕМЕННОГО И ПОСТОЯННОГО ТОКА
ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

(Специальность № 433—«Подвижной состав и тяга поездов»)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Днепропетровск
1969

НТБ
ДНУЖТ

3625a

Работа выполнена в Днепропетровском институте инженеров железнодорожного транспорта.

Официальные оппоненты:

Заслуженный деятель науки и техники Украинской ССР, профессор, доктор технических наук С. А. Волотковский,

Профессор, доктор технических наук А. Е. Зорохович,

Профессор, доктор технических наук Н. А. Панькин.

Ведущее предприятие — Днепропетровский электровозостроительный завод.

Автореферат разослан «28» *июня* 1969 г.

Защита диссертации состоится «*6* *октября*» 1969 г.
на заседании Ученого Совета Днепропетровского института инженеров железнодорожного транспорта, г. Днепропетровск, 10, ул. Университетская, 2, ДИИТ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Ученый секретарь Совета ДИИТа
Климковский Б. М.

НТБ
ДНУЖТ

РАЗДЕЛ ПЕРВЫЙ

В ряде решений партии и правительства, в частности, в постановлении XXII съезда КПСС автоматизация и механизация признана основой дальнейшего развития промышленности и транспорта.

Вследствие большой сложности хозяйства железнодорожного транспорта, проблема его автоматизации распадается на ряд частных задач, связанных с автоматизацией звеньев этого хозяйства.

Одним из таких звеньев является автоматизация управления локомотивами и, в частности, автоматизация пусковых режимов.

К настоящему времени выполнены ряд исследований по вопросам автоматизации тягового электропривода. Здесь следует отметить известные работы Петрова Б. П., Ефремова И. С., Минова Д. К., Розенфельда В. Е., Исаева И. П., Тихменева Б. Н., Трахтмана Л. М., Захарченко Д. Д., Баранова Б. К., Барского М. Р., Рубчинского З. М. и других ученых.

В СССР ряд научных организаций и заводов проводят работы по автоматизации пуска электроподвижного состава (ЭПС).

Автоматизации управления ЭПС уделяется большое внимание и за рубежом.

Но проблема автоматизации плавного управления пуска ЭПС с перспективным тиристорным регулированием напряжения на тяговых двигателях до сих пор еще не решена.

Для решения этой проблемы в диссертации на основе общей теории автоматического регулирования разработана теория автоматического пуска ЭПС и дан обобщенный метод расчета на устойчивость системы плавного тиристорного регулирования напряжения на тяговых двигателях при различных возмущающих воздействиях.

При этом была разработана теория:

- а) плавного автоматического регулирования выпрямленного напряжения на тяговых двигателях;
- б) тиристорно-импульсного автоматического регулирования напряжения на тяговых двигателях при питании от источника постоянного тока;
- в) параллельной работы ступенчатых автоматических систем и синхронизации их работы на ЭПС постоянного и переменного тока.

Диссертация состоит из двух разделов. Первый раздел содержит введение, в котором приводится краткий обзор исследований по рассматриваемым вопросам и девяти глав. Второй раздел содержит пять глав.

В **первой** главе рассматривается состояние автоматизации тяги ЭПС в СССР и за рубежом. Кроме того, дается обоснование выбора системы плавного автоматического пуска на основе исследования других авторов. Поставлена цель и задача исследования.

Во **второй** главе рассматривается анализ схем плавного регулирования напряжения на тяговых двигателях ЭПС с помощью тириستоров.

В целях дальнейшего увеличения плавности пуска следует считать перспективным не увеличение числа позиций, а применение управляемых кремниевых вентилей для плавного регулирования напряжения между ступенями вторичной обмотки трансформатора [1].

Применение плавного регулирования напряжения на тяговых двигателях позволяет:

1. Улучшить использование сцепного веса локомотива.
2. Повысить надежность работы тяговых двигателей локомотива (ввиду отсутствия скачков напряжения при плавном управлении).
3. Упростить конструкцию группового переключателя и трансформатора.
4. Увеличить производительность электровоза за счет улучшения использования тяговых характеристик.

Кроме того, наличие более жестких тяговых характеристик ЭПС постоянного тока при плавном регулировании улучшает противобоксовочные свойства локомотива, а увеличение пускового ускорения на моторвагонном подвижном составе позволяет повысить техническую скорость или уменьшить расход электрической энергии.

В работе рассмотрены различные варианты схем «глубокого» плавного фазового регулирования напряжения на тяго-

вых двигателях с помощью тиристоров и проведено их сравнение.

В частности установлено, что несимметричная мостовая схема с кремниевыми управляемыми вентилями по сравнению с симметричной мостовой схемой обладает меньшей пульсацией тока в цепи нагрузки, меньшим потреблением реактивной мощности а, следовательно, большим коэффициентом мощности.

Схемы «глубокого» плавного регулирования напряжения вторичной обмотки трансформатора дают относительно низкий коэффициент мощности, повышают пульсацию выпрямленного тока, искажают форму тока, потребляемого из контактной сети и создают помехи в линиях связи.

Поэтому наиболее целесообразно применить комбинированное регулирование, т. е. вторичная обмотка трансформатора должна быть разбита на ряд секций и переключаться силовым контроллером. В пределах же каждой секции поочередно производится регулирование напряжения с помощью кремниевых управляемых вентилей.

В настоящее время имеется много схем, которые позволяют осуществить плавное межпозиционное регулирование напряжения на тяговых двигателях с помощью тиристоров при удовлетворительных значениях коэффициента мощности. Эти схемы подробно проанализированы в диссертации с точки зрения величины коэффициента мощности при минимальном количестве выводов трансформатора и контакторов группового контроллера.

В работе [2] и диссертации приведена наиболее рациональная схема межпозиционного плавного регулирования выпрямленного напряжения на тяговых двигателях, предложенная автором (для семи ступеней при шести выводах вторичной обмотки трансформатора и при шести контакторах силового контроллера, выполненных без дугогашения).

При такой схеме, как показывают расчеты, достигается высокий коэффициент мощности.

Исследования показали, что для получения приемлемого коэффициента мощности при пуске, а также минимального усложнения конструкции силового контроллера и трансформатора целесообразно вторичную обмотку трансформатора разбить на 4—6 секций для электровозов и на 2—4 секции для моторных вагонов электропоездов. В перспективе при снижении стоимости тиристоров целесообразно применить

схему бесконтактного межпозиционного силового плавного регулирования напряжения на тяговых двигателях [2].

Ввиду важности и перспективности применения бесконтактной силовой схемы плавного межпозиционного регулирования напряжения, в работе рассмотрены электромагнитные процессы в этой схеме и предложена методика расчета, позволяющая предварительно найти основные параметры ЭПС и оценить различные варианты исполнения схем.

В третьей главе рассматривается характеристика пуска и системы управления при плавном регулировании напряжения на тяговых двигателях.

Канд. техн. наук доцент Петров Б. П. предложил метод, основанный на использовании характеристики системы управления (ХСУ) и характеристики пуска (ХП) для определения установившегося режима пуска при зависимом от тока хронометрическом управлении.

Пользуясь этими характеристиками, можно определить, как влияет на установившееся значение регулируемой величины масса поезда, профиль пути и сопротивление движению.

Автор в работе произвел уточнение в расчете характеристики пуска (характеристика регулируемого объекта), введя коэффициент η_F^I , т. е. к. п. д. двигателя и передачи за вычетом электрических потерь в двигателе.

Система управления или характеристика регулятора должна обеспечить требуемую скорость изменения напряжения на тяговых двигателях и обладать такими свойствами, чтобы при меняющихся условиях движения (разных m , W) установившиеся токи изменялись в допустимых пределах, а переход от одного установившегося тока к другому совершался бы с допустимой скоростью и не сопровождался колебательными процессами.

В следующей главе дается обоснование выбора коэффициентов усиления для обеспечения требуемой устойчивости системы.

В работе приведен анализ выбора регулируемого управляющего параметра при плавном автоматическом пуске.

Исследование показало, что регулирование пуска по постоянству силы тока целесообразнее регулирования по постоянству силы тяги, так как при первом способе регулирования наиболее полно используется сила тяги электровоза близкая к ограничению по сцеплению и проще осуществляется плавный автоматический пуск.

В четвертой главе рассматривается расчет системы плавного автоматического регулирования выпрямленного напряжения на тяговых двигателях ЭПС.

Автором разработано устройство для плавного автоматического регулирования напряжения на тяговых двигателях [л2].

Оно состоит из измерительного устройства (трансформатора постоянного тока), логического элемента «или», первого звена сравнения, безинерционного усилителя, приводного устройства с интегрирующим звеном, второго звена сравнения, статического фазорегулятора, выпрямительного тиристорного блока и регулируемых тяговых двигателей.

Между вторым и первым звеном сравнения предусмотрена гибкая обратная связь для уменьшения инерционности системы управления и повышения устойчивости регулирования.

Для устранения броска тока в цепи тяговых двигателей от изменения напряжения в контактной сети (воздействие по возмущению) предусмотрено корректирующее устройство с жесткой обратной связью воздействующее на второе звено сравнения.

Эта обобщенная блок-схема плавного автоматического регулирования выпрямленного напряжения на тяговых двигателях позволяет обеспечить постоянство установившегося тока во время пуска при различных возмущающих воздействиях, если напряжение на задатчике $U_0 = \text{const}$. Если напряжение на задатчике тока имеет переменное задание $U_0 = f(t)$ и изменяется по определенному закону или программе в соответствии с ограничивающими режимами не только в процессе пуска, но и во время движения поезда, то установившееся значение регулируемой величины (тока) также изменяется в соответствии с программой.

В этой главе на основе общей теории автоматического регулирования разработана теория автоматического пуска ЭПС и дан метод расчета системы на устойчивость.

Возмущающими воздействиями на систему автоматического регулирования являются: изменение напряжения на задатчике тока, изменение напряжения в контактной сети и изменение сопротивления движению.

Расчет переходных процессов в аналитическом виде сложен, так как система автоматического управления содержит много нелинейных элементов.

Для исследования системы на устойчивость и решения уравнений в аналитическом виде, когда скорость ЭПС за вре-

мя переходного процесса изменяется применен метод малых отклонений, впервые использованный в подобных исследованиях Петровым Б. П.

При этом методе индуктивность цепи тяговых двигателей на ожидаемом интервале изменения тока I_{Δ} принималась постоянной и равной ее значению в исследуемой исходной точке. Все нелинейные элементы системы автоматического регулирования линеаризовались на ожидаемом интервале изменения тока, не учитывалось влияние вихревых токов в магнитопроводе двигателей, так как по исследованиям доктора техн. наук, проф. Л. М. Трахтмана учет их вносит поправку не превышающую 10—15%, так как колебания тока невелики.

При определении характера переходного процесса в системе плавного автоматического регулирования напряжения на тяговых двигателях при возмущающих воздействиях определялась передаточная функция разомкнутой системы в операторной форме. При этом передаточные функции каждого звена в операторной форме определялись по приращениям в пределах каждого линеаризируемого участка.

В другом интервале изменения тока соответственно менялись коэффициенты линеаризации, начальные условия и т. д.

Такой метод решения позволяет вначале выяснить общие характерные закономерности работы системы автоматического управления при пуске, оценить влияние наиболее характерных факторов на работу системы и на ее устойчивость при различных возмущающих воздействиях и выбрать предварительно необходимые параметры.

В работе также показано, как можно произвести исследование устойчивости системы плавного автоматического регулирования напряжения на тяговых двигателях при применении аналоговых вычислительных машин и выбрать наиболее рациональные параметры системы управления.

Исследование устойчивости проводилось около начального положения равновесия, определяемого исходным установившимся током I и начальной скоростью движения V_0 , при которой возник переходной процесс. Тогда:

$$\begin{aligned} I &= I_y + I_{\Delta} & [1] \\ V &= V_0 + V_{\Delta} & [2] \end{aligned}$$

I_{Δ} и V_{Δ} — приращения от начального значения тока и скорости.

При малых приращениях тока после линеаризации кривой намагничивания двигателя СФ (I) будем иметь:

$$\text{СФ} = \text{СФ}_y + K_8 I_\Delta \quad [3]$$

где k_8 — угловой коэффициент, характеризующий линеаризацию кривой намагничивания двигателя на рассматриваемом интервале изменения тока.

Приращение скорости за время переходного процесса равно

$$v_\Delta = \int_0^t a dt \quad [4]$$

где ускорение поезда

$$a = \frac{nF_K - W}{m_n} \quad [5]$$

Сила тяги двигателя F после линеаризации равна

$$F = F_y + K_7 I_\Delta \quad [6]$$

K_7 — угловой коэффициент, характеризующий линеаризацию кривой силы тяги двигателя на рассматриваемом интервале изменения тока.

Переходной процесс в цепи тяговых двигателей выразится в приращениях

$$qL_d \frac{dI_\Delta}{dt} + qr_d I_\Delta = U_\Delta - E_\Delta \quad [7]$$

$$U_\Delta = k_5 \int_0^t \omega_\Delta dt \quad [8]$$

$$E_\Delta = \frac{n \text{СФ}_y}{m_n} k_7 \int_0^t I_\Delta dt + k_8 v_0 I_\Delta \quad [9]$$

где: L_d — индуктивность нагрузки выпрямленной цепи в рассматриваемом интервале изменения тока.

k_5 — коэффициент пропорциональности между углом поворота исполнительного устройства и напряжением на двигателе,

U_Δ — приращение напряжения на тяговых двигателях.

E_{Δ} — приращение противоэ.с тягового двигателя,
 v_0 — исходная скорость движения электровоза,
 r_d — активное сопротивление выпрямленной цепи,
 m_n — приведенная масса поезда,
 n — число двигателей,
 q — число последовательно включенных тяговых двигателей,
 ω — угловая скорость вала якоря исполнительного устройства,
 W — сопротивление движению поезда.

После преобразования передаточная функция тягового двигателя равна:

$$K_{т.д.}(p) = \frac{I_{\Delta}(p)}{U_{\Delta}(p)} = \frac{T_E p T_v^{-1}}{(T_d T_E p^2 + T_E p + 1)} \quad [10]$$

где

$$T_d = \frac{L_d}{r_d + k_8 v_0} \quad (\text{сек.}) \quad [11]$$

$$T_E = \frac{m_n (r_d + k_8 v_0)}{n C \Phi_y k_7} \quad (\text{сек.}) \quad [12]$$

$$T_v^{-1} = \frac{1}{q(r_d + k_8 v_0)} \quad \left(\frac{1}{\text{ом}} \right) \quad [13]$$

Передаточная функция приводного устройства в операторной форме

$$K(p)_{пy} = \frac{\omega_{\Delta}(p)}{U_{1\Delta}(p)} = \frac{k_2^{-1}}{(T_{сн} T_{эм} p^2 + T_{эм} p + 1)} \quad [14]$$

где

$$T_{сн} = \frac{L_{сн}}{r_{сн}} \quad (\text{сек.}) \quad [15]$$

$$T_{эм} = \frac{j r_{сн}}{C_E' \Phi_{сн} C_M''} \quad (\text{сек.}) \quad [16]$$

$L_{сн}$ — индуктивность якоря сервопривода,

j — момент инерции приводного устройства, приведенного к валу сервопривода,

$r_{сн}$ — сопротивление якоря сервопривода.

Остальные передаточные функции определены в работе [2].

Общая передаточная функция разомкнутой системы плавного автоматического пуска

$$K(p)_{pc} = \frac{K_1 K_2' K_9 n_1 T_E}{(T_{cn} T_{эм} p^2 + T_{эм} p + 1) (T_E T_d p^2 + T_E p + 1) T_v} \quad [17]$$

где k_1 — коэффициент усиления усилителя,

K_9 — коэффициент пропорциональности между током двигателя и выходным напряжением трансформатора постоянного тока,

$$K_2' = \frac{1}{c^1 \Phi_{cn}} \text{--- постоянная сервопривода,} \quad [18]$$

n_1 — число параллельно включенных тяговых двигателей

$$T_v = \frac{1}{k_v T_v^1} = \frac{q(r_d + k_8 v_0)}{k_v} \quad [19]$$

Передаточная функция замкнутой системы плавного автоматического пуска при перенастройке регулятора, т. е. при изменении напряжения на задатчике тока

$$\begin{aligned} \Phi(p) &= \frac{I_{\Delta}(p)}{U_{o\Delta}(p)} = \\ &= \frac{k_1 n_1 K_2' T_E}{[T_v (T_{cn} T_{эм} p^2 + T_{эм} p + 1) (T_E T_d p^2 + T_E p + 1) + k_1 K_2' k_9 n_1 T_E]} \quad [20] \end{aligned}$$

Характеристическое уравнение определяется из выражения $1 + K_{pc}(p) = 0$ или в общем виде:

$$a_0 p^4 + a_1 p^3 + a_2 p^2 + a_3 p + a_4 = 0 \quad [21]$$

Коэффициенты a_i определены в [л2].

Передаточная функция замкнутой системы регулирования при воздействии по возмущению, т. е. при изменении напряжения в контактной сети равна:

$$\begin{aligned} \Phi_{oF_{\Delta}}(p) &= \frac{K_n^1(p)}{1 + K_{pc}(p)} = \frac{I_{\Delta}(p)}{F_{\Delta}(p)} = \\ &= \frac{n_1 T_E p T_v^1 (T_{cn} T_{эм} p^2 + T_{эм} p + 1) T_v}{[(T_{cn} T_{эм} p^2 + T_{эм} p + 1) (T_E T_d p^2 + T_E p + 1) T_v - k_1 K_2' k_9 n_1 T_E]} \quad [22] \end{aligned}$$

Передаточная функция замкнутой системы регулирования по возмущению $W(t)$, т. е. при изменении сопротивления движению равна

$$\Phi_{0W_{\Delta}}(p) = \frac{I_{\Delta}(p)}{W_{\Delta}(p)} = \frac{1/k_7 (T_{\text{сп}} T_{\text{эм}} p^2 + T_{\text{эм}} p + 1) T_v}{[T_v (T_{\text{сп}} T_{\text{эм}} p^2 + T_{\text{эм}} p + 1) (T_E T_d p^2 + T_E p + 1) + k_1 k_2 k_9 n_1 T_E]} \quad [23]$$

Процесс регулирования при мгновенной перенастройке регулятора, т. е. при быстрой перестановке задатчика из одного положения в другое выражается, если корни вещественные и отрицательные, уравнением:

$$I_{\Delta}(t) = C_1 e^{p_1 t} + C_2 e^{p_2 t} + C_3 e^{p_3 t} + C_4 e^{p_4 t} \quad I_{\Delta \text{ уст}} \quad [24]$$

Анализ показывает, что при перенастройке регулятора зависимость $I_{\Delta}(t)$ более медленно приближается к установившемуся значению, чем при воздействии возмущения на регулируемый объект. Математически — это результат различия структуры правых частей дифференциальных уравнений (см. уравнение (20) и (22)). Физически же это следствие того, что внешние воздействия $F(t)$ и $U(t)$ приложены в разных местах системы: $F(t)$ — к объекту, а $U(t)$ — к регулятору.

Исследования показали, что для получения благоприятной формы кривой переходного процесса большое значение имеет крутизна ХСУ, которая определяется произведением коэффициентов $k_1 k_9$. При больших значениях этих коэффициентов ХСУ становится круче. С увеличением крутизны ХСУ пусковой ток при меняющемся сопротивлении движения (изменение профиля пути и т. п.) будет изменяться в меньших пределах, что для грузовых магистральных электровозов очень важно, так как пуск обычно проводят близко к ограничению по сцеплению.

Исследование показало, что с увеличением крутизны ХСУ (k_1 и k_9) устойчивость системы пуска уменьшается, амплитуда периодической составляющей в выражении $I_{\Delta}(t)$ растет и переходной процесс при некоторых значениях k_1 и k_9 переходит в колебательный, крайне нежелательный для системы управления. При этом возникают резкие колебания силы тяги, что ведет к появлению боксования колесных пар, продольно-динамических ударов в составе и т. п. Поэтому необходимо выбирать наиболее рациональное соотношение k_1 и k_9 для

каждого конкретного случая с учетом параметров силовой цепи и системы управления.

В работе даны критерии по выбору наиболее рациональных значений коэффициентов усиления k_1 и k_9 , которые определяются по следующим соотношениям:

$$k_9 \geq \frac{A_0^2 t_{\text{доп}}}{U_{\text{дн}} k_2^1 k_3 k_{10} I_{0y}} \quad [25]$$

$$k_1 = \frac{U_{\text{дн}}}{A_0 t_{\text{доп}}} \quad [26]$$

где:

$$A_0 = \left(\frac{d U_{\Delta}}{dt} \right)_{\text{хп}} = \left(\frac{d U_{\Delta}}{dt} \right)_{\text{хсy}} \quad [27]$$

A_0 — скорость увеличения напряжения по времени на тяговые двигатели электровоза при пуске на площадке,

$t_{\text{доп}}$ — время хронометрического вращения сервопривода, за которое напряжение на тяговых двигателях увеличивается от 0 до номинального значения $U_{\text{дн}}$,

$I_{0\text{уст}}$ — номинальное установившееся значение тока всех тяговых двигателей,

$k_{10} = 0,07$ — допустимое отклонение тока от номинального значения из-за ограничения тока по сцеплению.

Окончательную корректировку k_1 и k_9 необходимо проводить исходя из условия обеспечения требуемого качества переходного процесса.

Исследование устойчивости системы автоматического регулирования проще всего проводить при помощи амплитудно-фазовых частотных характеристик.

Для автоматических систем высокого порядка необходимо прибегать к вычислительным машинам непрерывного действия.

В пятой главе рассматривается выбор корректирующих средств для системы плавного автоматического регулирования напряжения.

Исследования показали, что введение интеграла в закон регулирования позволяет получить систему автоматического регулирования, не обладающую по принципу своего действия статической ошибкой, что важно для сохранения постоянства тока при пуске тяговых двигателей. Однако введение интеграла ведет к увеличению колебательности переходного процес-

са. Поэтому в систему необходимо вводить корректирующие устройства.

В работе проведено исследование возможности применения в системе автоматического регулирования различных обратных связей.

Анализ показал, что введение жесткой обратной связи в систему автоматического регулирования, несмотря на ее хорошее влияние на динамику процесса, вызывает динамическую ошибку. Для уменьшения инерционности системы управления весьма полезно применять гибкую обратную связь, повышающую устойчивость системы, улучшающую качество переходного процесса и не вносящую статической ошибки.

При применении гибкой обратной связи передаточная функция разомкнутой системы автоматического регулирования определяется [л2].

$$K(p)_{pc} = \frac{k_{per} T_E n_1}{(T_3^3 p^2 + T_2^2 p + 1) (T_E T_d p^2 + T_E p + 1) T_V} \quad [28]$$

где

$$k_{per} = \frac{k_1 k_2^{-1} k_0}{(1 + k_1 k_2^{-1} \mu^1 k_{oc} k_n)} \quad [29]$$

$$T_3^3 = \frac{T_{сп} T_{эм}}{(1 + k_1 k_2^{-1} \mu^1 k_{oc} k_n)} \quad [30]$$

$$T_2^2 = \frac{T_{эм}}{(1 + k_1 k_2^{-1} \mu^1 k_{oc} k_n)} \quad [31]$$

$$\mu^1 = \frac{1}{i_n} \quad [32]$$

k_n — коэффициент передачи потенциометра управления,

k_{oc} — коэффициент обратной связи,

i_n — передаточное отношение редуктора.

При отсутствии гибкой обратной связи передаточная функция определяется по формуле (17). Из сравнения следует, что введение гибкой обратной связи уменьшает инерционность системы, а следовательно, повышает ее устойчивость.

Передаточная функция в этом случае по управляющему параметру и по возмущению определяются соответственно:

$$\begin{aligned} \Phi_o(p) &= \frac{I_\Delta(p)}{U_{0\Delta}(p)} = \\ &= \frac{k_{per}/k_0 T_E n_1}{T_V [(T_E T_d p^2 + 1)(T_3^3 p^2 + T_2^2 p + 1) + k_{per} T_E T_V^{-1} n_1]} \quad [33] \end{aligned}$$

$$\Phi_{oF_{\Delta}(p)}(p) = \frac{I_{\Delta}(p)}{F_{\Delta}(p)} =$$

$$= \frac{1/k_5 \cdot T_E p n_1 (T_3^3 p^2 + T_2^3 p + 1)}{[T_V (T_E T_d p^2 + T_E p + 1) (T_3^3 p^2 + T_2^3 p + 1) + k_{рег} n_1 T_E]} \quad [34]$$

Исследования показали, что для устранения броска тока в цепи тяговых двигателей при системе плавного автоматического пуска от изменения напряжения в контактной сети (воздействие по возмущению) необходимо предусмотреть корректирующее устройство с жесткой обратной связью, пропорциональное изменению напряжения в контактной сети и воздействующее на блок управления силовых тиристоров.

Динамика всей системы регулирования в этом случае описывается уравнением:

$$a_0^* \frac{d^4 I_{\Delta}}{dt^4} + a_1^* \frac{d^3 I_{\Delta}}{dt^3} + a_2^* \frac{d^2 I_{\Delta}}{dt^2} + a_3^* \frac{d I_{\Delta}}{dt} + a_4^* I_{\Delta} =$$

$$= k_{\alpha} T_E T_V n_1 T_V \left(-T_3^3 \frac{d^3 f_{\Delta}}{dt^3} - T_2^2 \frac{d^2 f_{\Delta}}{dt^2} - \frac{d f_{\Delta}}{dt} \right) +$$

$$+ T_3^3 T_V \frac{d^3 F_{\Delta}}{dt^3} + T_2^2 T_V \frac{d^2 F_{\Delta}}{dt^2} + T_V \frac{d F_{\Delta}}{dt} \quad [35]$$

где

$$f_{\Delta}(t) = k_c U_{c\Delta}(t) \quad [36]$$

$$F_{\Delta}(t) = F(t) - k_{\alpha} f_{\Delta}(t) \quad [37]$$

Коэффициенты a_i^* определены в [л 2].

Здесь $f_{\Delta}(t)$ — обратная связь от изменения напряжения в контактной сети,

$F_{\Delta}(t)$ — приращение напряжения в цепи тяговых двигателей от изменения напряжения в контактной сети относительно номинального значения,

$k_{\alpha} f_{\Delta}(t)$ — уменьшение напряжения в цепи тягового двигателя от воздействия обратной связи.

k_c — коэффициент пропорциональности между обратной связью и напряжением в контактной сети.

Параметр k_c входит только в правую часть уравнения (35). Изменение этого параметра не влияет на устойчивость

системы, так как устойчивость определяется только левой частью уравнения.

Если выбрать обратную связь

$$f_{\Delta}(t) = \frac{F(t)}{k_{\Sigma}} \quad (38)$$

то при любом законе возмущения статическая ошибка равна нулю. В этом случае изменение напряжения в контактной сети не влияет на бросок тока в цепи тяговых двигателей, а это является исключительно большим преимуществом системы плавного автоматического пуска по сравнению с обычными системами ступенчатого пуска. Надежность работы тяговых двигателей при том значительно улучшается и возможно использовать силу тяги электровоза близкую к ограничению по сцеплению.

Шестая глава посвящена определению параметров корректирующих устройств для системы плавного автоматического регулирования напряжения.

Определение параметров корректирующих устройств аналитическим путем возможно только в простейших случаях и не может быть универсальным.

Одним из наиболее эффективных способов выбора параметров корректирующих устройств заключается в том, что, исходя из требуемых условий качества переходного процесса, намечают желаемую форму амплитудно-фазовой характеристики, по которой затем находят параметры корректирующего устройства, необходимого для получения намеченной характеристики или близкой к ней. Таким образом использован метод, основанный на деформировании амплитудно-фазовой характеристики исходной системы корректирующими устройствами, предложенный профессором В. В. Солодовниковым. Прежде чем приступить к определению параметров корректирующего устройства, необходимо построить амплитудно-фазовую характеристику $k_{\Sigma}(i\omega)$ скорректированной системы по вещественной частотной характеристике $u(\omega)$, отвечающей заданным показателям качества, т. е. запасу устойчивости по фазе $\Delta\varphi$ и по модулю ΔR , величинам наибольшего отклонения $\sigma_{\max}$ и времени переходного процесса $\tau_{\max}$. Далее строится частотная характеристика $P(\omega)$ и определяется расчетная частота ω_1 .

Дальнейшим графическим построением определяется вектор скорректированной амплитудно-фазовой характеристики, а затем модуль и аргумент $R_{\text{охв}}$, $\varphi_{\text{охв}}$ вектора амплитудно-фазовой характеристики, охваченной обратной связью. Нако-

нец определяются основные параметры обратной связи [2].

В работе дан пример аналитического расчета системы плавного автоматического пуска и выбора основных ее параметров.

В **седьмой** главе рассматривается бесконтактная астатическая система управления плавным автоматическим пуском ЭПС.

В работе автором разработано устройство для бесконтактного управления плавным автоматическим пуском ЭПС с обеспечением при пуске постоянства тока.

Оно состоит из измерительного устройства (трансформатора постоянного тока), логического элемента «или», звена сравнения, безинерционного усилителя, астатического бесконтактного элемента (интеграла по отклонению регулируемой величины), второго звена сравнения, фазорегулятора, выпрямительного тиристорного блока и регулируемых тяговых двигателей [л. 5].

Отличие данной системы автоматического регулирования от описанной ранее системы регулирования состоит в том, что вместо вращающего приводного устройства установлен бесконтактный астатический элемент с передаточной функцией

$$K_{a\Delta}(p) = \frac{U_{\Delta}(p)}{U_{\Delta}(p)} = \frac{k_3(k+p)}{p} \quad [39]$$

где k_3 — коэффициент усиления выходного напряжения из астатического элемента,

k — коэффициент интенсивности введения интеграла в основную цели регулирования.

Передаточная функция разомкнутой системы регулирования

$$K_{pc}(p) = \frac{k_1 k_3 k_0 n_1 T_E (k+p)}{T_V^* (T_d T_E p^2 + T_E p + 1)} \quad [40]$$

Передаточная функция замкнутой системы регулирования при перенастройке регулятора определяется

$$\begin{aligned} \Phi_{0U_{\Delta}}(p) &= \frac{I_{\Delta}(p)}{U_{\Delta}(p)} = \\ &= \frac{k_1 k_3 n_1 T_E (k+p)}{[T_V^* T_d T_E p^2 + T_E (T_V^* + k_1 k_3 k_0 n_1) p + (T_V + k k_1 k_3 k_0 n_1 T_E)]} \quad [41] \end{aligned}$$

где

$$T_V^* = \frac{q(r_d + k_s v_0)}{k_s^*} \quad [42]$$

k_5^* — коэффициент, показывающий на сколько вольт увеличивается напряжение на двигателе при изменении управляющего напряжения на 1 в.

Если изменить управляющее напряжение задатчика скачком на величину $U_{o\Delta}(t) = Z_{o\Delta}$, то установившееся значение тока определится (необходимо в уравнении (41) положить $p = 0$)

$$I_{\Delta \text{ уст}} = \frac{k_1 k_3 n_1 T_E z_{o\Delta}}{(T_V k k_1 k_3 k_9 n_1 T_E)} \approx \frac{z_{o\Delta}}{k_9} \quad [43]$$

Соотношение (43), следовательно, может быть использовано для градуировки шкалы на реостате задатчика в амперах, т. е. можно избирать режим работы при автоматическом пуске.

Переходной процесс при этом описывается уравнением

$$T_V^* T_d T_E \frac{d^2 I_{\Delta}}{dt^2} + T_E (T_V^* + k_1 k_3 k_9 n_1) \frac{d I_{\Delta}}{dt} + (T_V^* + k k_1 k_3 k_9 n_1 T_E) I_{\Delta} = k_1 k_3 n_1 T_E \left(k z_{o\Delta} + \frac{dz_{o\Delta}}{dt} \right) \quad [44]$$

Исследования показали, что для обеспечения устойчивости системы автоматического регулирования (отсутствие колебательных процессов) необходимо иметь следующие соотношение параметров

$$k \frac{k_1 k_3 k_5^* k_9 n_1}{4q L_d} \quad [45]$$

Если коэффициент будет выбран из уравнения (45), то корни характеристического уравнения p_1 и p_2 не равны и отрицательны и переходной процесс описывается уравнением

$$I_{\Delta}(t) = I_{\Delta \text{ уст}} \left(1 - \frac{p_1 e^{p_2 t}}{p_1 - p_2} + \frac{p_2 e^{p_1 t}}{p_1 - p_2} \right) \quad [46]$$

Передаточная функция замкнутой системы автоматического регулирования при воздействии по возмущению

$$\Phi_{oF_{\Delta}(p)}(p) = \frac{I_{\Delta}(p)}{F_{\Delta}(p)} = \frac{n_1 T_E p}{k_5^* [T_V^* T_d T_E p^2 + T_E (T_V^* + k_1 k_3 k_9 n_1) p + (T_V^* + k k_1 k_3 k_9 n_1 T_E)]} \quad [47]$$

Из уравнения (47) следует, что при изменении напряжения в контактной сети скачкообразно, т. е. при $F_{\Delta}(t) = F_{o\Delta}$

статическая ошибка регулирования равна нулю (для этого нужно положить $p=0$).

Динамическая же ошибка имеет место и определяется тем же характеристическим уравнением, что и при перенастройке регулятора.

Для устранения броска тока в цепи тяговых двигателей при системе автоматического регулирования от изменения напряжения в контактной сети предусмотрено также устройство с жесткой обратной связью (воздействие по возмущению), пропорциональное изменению напряжения в контактной сети $f_{\Delta}(t) = k_c U_{c\Delta}$ и воздействующее на тиристорный блок через фазорегулятор.

Передаточная функция замкнутой системы регулирования при воздействии по возмущению $W(t)$, т. е. при изменении сопротивления движению

$$\Phi_{0W_{\Delta}}(p) = \frac{I_{\Delta}(p)}{W_{\Delta}(p)} = \frac{T_V^*}{k_7 [T_V^* T_d T_E p^2 + T_E (T_V^* + k_1 k_3 k_9 n_1) p + (T_V^* - k k_1 k_3 k_9 n_1 T_E)]} \quad [48]$$

При этом статическая ошибка регулирования в установившемся режиме равна при воздействии $W(t) = W_{0\Delta}$

$$I_{\Delta \text{ уст}} = \frac{T_V^* W_{0\Delta}}{k_7 (T_V^* - k k_1 k_3 k_9 n_1 T_E)} \quad [49]$$

Динамическая же ошибка регулирования определяется тем же характеристическим уравнением, что и при перенастройке регулятора.

Исследования показывают, что необходимый коэффициент усиления при астатической системе плавного регулирования

$$k_1 = \frac{2}{k_3 k_5^* k_9 n_1} \sqrt{\frac{q A_0 L_d}{0,07 I_{\text{уст}}}} \quad [50]$$

где

$$A_0 = \left(\frac{d U_d}{dt} \right)_{\text{хп}}$$

Характеристика системы управления автоматического регулирования выражается

$$\left(\frac{d U_d}{dt} \right)_{\text{хсу}} = k k_1 k_3 k_5^* (U_0 - k_9 n_1 I_{\text{уст}}) \quad [51]$$

и отвечает требованиям изложенным в главе III.

С увеличением скорости движения электровоза пусковой ток до выхода на автоматическую характеристику не изменяется.

В работе рассмотрена статическая система автоматического регулирования [л. 5].

Эта система отличается от астатической системы плавного регулирования напряжения на тяговых двигателях отсутствием интегрирующего звена и поэтому она не обеспечивает постоянство тока в процессе пуска при $U_0 = \text{const}$.

Изменение пускового тока в цепи тяговых двигателей в зависимости от скорости.

$$I = \frac{k_1 k_5^* U_0 - q C \Phi_n V}{q r_d - k_1 k_5^* k_9 n_1 - q k_8 v} \quad [52]$$

где

$$C \Phi_n = C \Phi - k_8 I$$

Из выражения (52) следует, что пусковой ток при увеличении скорости движения уменьшается практически прямолинейно, если пренебречь малым значением $q k_8 v$.

Чем больше коэффициент усиления системы, тем на меньшую величину уменьшится ток по сравнению с первоначальным. Небольшое уменьшение тока в конце пуска по сравнению с первоначальным I_0 даже желательно, так как с увеличением скорости движения, как известно, сила сцепления должна уменьшаться.

Это как раз и достигается автоматически при помощи данной системы управления.

Исследования показывают, что необходимый коэффициент усиления усилителя при статической системе автоматического управления

$$k_1 = \frac{q C \Phi_n V_a - 0,04 q r_d I_0}{k_5^* k_9 n_1 0,04 I_0} \quad [53]$$

где V_a — скорость выхода на автоматическую характеристику тягового двигателя.

При анализе статической системы автоматического регулирования в переходной период скорость электровоза принята постоянной, так как электрические процессы, как известно, протекают значительно быстрее, нежели механические процессы.

Передаточная функция тяговых двигателей в этом случае равна

$$K(p)_{т.д.} = \frac{I_{\Delta}(p)}{U_{\Delta}(p)} = \frac{n_1 T_1 V}{T_d p + 1} \quad [54]$$

Общая передаточная функция разомкнутой системы авто-регулирования

$$K_{pc}(p) = \frac{\kappa_1 \kappa_0 n_1}{T_V^* (T_d p - 1)} \quad [55]$$

Передаточная функция замкнутой статической системы регулирования при перенастройке регулятора

$$\Phi_o(p) = \frac{I_{\Delta}(p)}{U_{o\Delta}(p)} = \frac{\kappa_1 \cdot n_1}{T_V^* \cdot T_d p (\kappa_1 \kappa_0 n_1)} \quad [56]$$

Если изменить управляющее напряжение скачком на величину $U_{o\Delta}(t) = Z_{o\Delta}$, то установившееся значение тока определится

$$I_{\Delta \text{уст}} = \frac{\kappa_1 n_1 Z_{o\Delta}}{T_V^* + \kappa_1 \kappa_0 n_1} \quad [57]$$

Соотношение, следовательно, может быть также использовано для градуирования шкалы на реостате задатчика в амперах.

Переходной процесс описывается уравнением

$$I_{\Delta}(t) = \frac{\kappa_1 n_1 Z_{o\Delta}}{(T_V^* + \kappa_1 \kappa_0 n_1)} (1 - e^{-\delta t}) \quad [58]$$

где

$$\delta = \frac{q(r_d + \kappa_8 v_o) + \kappa_1 \kappa_0 \kappa_5^* n_1}{qL_d} \quad [59]$$

Из выражения следует, что переходной процесс тем быстрее стремится к установившемуся значению, чем больше коэффициенты усиления κ_1 и κ_0 . Кроме того, чем больше скорость движения V_o , тем более благоприятно протекает переходной процесс. Поэтому переходные процессы следует также рассматривать при малой скорости движения (порядка 10 км/ч.).

Передаточная функция замкнутой статической системы регулирования при воздействии по возмущению

$$\Phi_o(p) = \frac{I_{\Delta}(p)}{F_{\Delta}(p)} = \frac{n_1}{[T_V^* T_d p + (T_V^* + \kappa_1 \kappa_0 n_1)] \kappa_5^*} \quad [60]$$

При изменении напряжения в контактной сети скачкообразно, т. е. если $F_{\Delta}(t) = F_{o\Delta} = \kappa_c U_{c\Delta}$ переходной процесс описывается уравнением:

$$I_{\Delta}(t) = \frac{n_1 F_{0\Delta}}{(T_V^* + k_1 k_9 n_1) k_5^*} (1 - e^{-\frac{\lambda t}{T_V^* + k_1 k_9 n_1}}) \quad [61]$$

Для устранения броска тока в цепи тяговых двигателей при плавном регулировании от изменения напряжения в контактной сети предусматривается устройство с жесткой обратной связью $f_{\Delta}(t)$ и напряжение подается на второе звено сравнения [л. 5].

В работе дан пример расчета бесконтактной астатической и статической систем плавного автоматического регулирования и выбора основных ее параметров.

Для экспериментальной проверки теоретических выводов по результатам исследований бесконтактных (статической и астатической) систем автоматического регулирования выпрямленного напряжения на тяговых двигателях при помощи тиристоров в ДИИТе был смонтирован специальный испытательный стенд.

На этом стенде были прозережены соотношения, полученные по уравнениям (43) и (57).

Кроме того, скачкообразно изменялось напряжение на вторичной обмотке трансформатора на 18% и определялся вид переходного процесса, а также статические ошибки регулирования $I_{\Delta \text{уст}}$ по уравнениям (47) и (61). Расхождение эксперимента с расчетом не превышает $3 \div 3,5\%$.

На стенде имитировался неблагоприятный случай трогания электровоза с места, когда скорость движения равна нулю. Эксперимент показал, что в этом случае перерегулирование тока превышает 2,8 I_0 . В целях устранения этого недостатка на звено сравнения автоматически и одновременно с напряжением сети подавалось воздействие $f_{\Delta}(t)$ в течение $0,5 \div 0,6$ секунд.

В этом случае перерегулирование тока составляло всего лишь 1,1 I_0 , что вполне допустимо.

Из этого следует, что введение воздействия $f_{\Delta}(t)$ в систему автоматического управления обязательно.

Как теоретические расчеты, так и испытания показали, что статическая и астатическая системы бесконтактного управления плавным автоматическим регулированием выпрямленного напряжения на тяговых двигателях обладают значительно меньшей инерционностью по сравнению с системой автоматического регулирования с электромеханическим приводным устройством и поэтому имеют большую устойчивость при различных возмущающих воздействиях.

Таким образом испытания подтвердили полученные автором теоретические соотношения для расчета и выбора параметров бесконтактной астатической и статической систем автоматического плавного регулирования, а разработанное устройство можно рекомендовать для практического применения на ЭПС.

В восьмой главе дается описание предложенной и разработанной автором системы управления автоматическим плавным регулированием напряжения на тяговых двигателях для наиболее перспективных схем [л. 2].

При комбинированном управлении при статической системе плавное регулирование напряжения первой ступени ΔU вторичной обмотки трансформатора производится фазорегулятором Φ_1 , у которого угол регулирования β_1 автоматически изменяется от 180° до 0° .

Угол же регулирования β_2 от фазорегулятора Φ_2 в этот момент не изменяется и равен нулю.

После окончания регулирования напряжения первой ступени ΔU импульсы напряжений от Φ_1 и Φ_2 , характеризующие углы регулирования, совпадут по времени и, попадая на вход логического элемента «И» через промежуточные бесконтактные звенья, дают разрешение на переход силового контроллера на вторую ступень (позицию) регулирования.

На второй позиции подключается вторая ступень ΔU и возрастающим небольшим приращением тока в цепях двигателей угол регулирования фазорегулятора Φ_2 увеличивается от 0° до почти 180° (определяется статизмом системы).

С увеличением скорости движения поезда система автоматики по мере уменьшения тока дополнительно повышает напряжение от второй ступени обмотки трансформатора, но при помощи уже другой группы тиристоров. Дальнейшее управление происходит аналогично.

В девятой главе рассматривается тиристорно-импульсная система регулирования напряжения на тяговых двигателях постоянного тока.

Современный уровень развития полупроводниковых устройств, в связи с выпуском управляемых кремниевых вентилей-тиристоров, позволяет отказаться от реостатного способа регулирования напряжения на тяговых двигателях при пуске и применить бесконтактный, плавный и не связанный с потерями мощности тиристорно-импульсный способ регулирования.

При этом обеспечиваются следующие преимущества по сравнению с реостатным способом пуска:

а) более высокая эффективность устройств (меньшие потери энергии);

б) возможность осуществления плавного автоматического пуска и обеспечение тяги близкой к предельной по сцеплению;

в) возможность пуска и разгона на параллельном соединении тяговых двигателей;

В данной главе освещаются результаты теоретических и экспериментальных исследований по выбору и расчету параметров тиристорно-импульсного регулятора для контактно-аккумуляторного электровоза постоянного тока при работе его в автономном режиме, т. е. при питании от аккумуляторной батареи напряжением 1000—1200 в. Кроме того, приводятся некоторые соображения для осуществления тиристорно-импульсной системы регулирования напряжения на тяговых двигателях при питании от контактной сети постоянного тока, а также исследования по разработке системы автоматического управления тиристорно-импульсным регулятором.

Для исследования была смонтирована опытная установка, состоящая из аккумуляторной батареи типа ТЖН-550 напряжением 300 в, тиристорно-импульсного регулятора, двигателя ДК105Б мощностью 185 квт и системы автоматического управления.

Тиристорно-импульсный регулятор состоял из неотделяемых от нагрузки коммутирующего конденсатора и индуктивно-диодных перезарядных цепочек [л. 4].

В результате теоретических и экспериментальных исследований было установлено, что указанная система широтно-импульсного регулирования напряжения вполне работоспособна и может быть применена на контактно-аккумуляторных электровозах постоянного тока при автономном режиме и на электропоездах постоянного тока при питании от контактной сети.

При питании же тяговых двигателей электровоза от контактной сети 3,0 кв при помощи широтно-импульсного регулятора возникают значительные затруднения в обеспечении минимального напряжения на тяговых двигателях во время трогания при маневровом токе.

Исследования показали, что при применении тиристоров ТЛ2 минимальная ширина импульса на маневровом режиме не может быть меньше 300 мк сек. Поэтому частоту переключений преобразователя необходимо выбрать ниже 100 гц, что нерационально из-за громоздкости входного фильтра.

ДИИТом под руководством автора предложена и разработана схема широтно-импульсного регулятора с мостовым ком-

мутационным переключателем емкости и с коммутационным колебательным контуром в цепи перезаряда, позволяющие исключить подготовку коммутирующего конденсатора для гашения главных тиристорov в период импульса. Схема коммутационного переключателя емкости обеспечивает посерединное запираание главных тиристорov двух параллельных групп тяговых двигателей.

В этом случае при применении тиристорov ТЛ2 минимальная ширина импульса может быть выбрана 200 мксек, а если учесть, что маневровый ток можно обеспечить за счет открытия только гасящих тиристорov, не открывая главные, то минимальная ширина импульса может быть выбрана 100 мксек, т. е. по сравнению с предыдущей схемой электронного ключа уменьшается в три раза.

В этой схеме электронного ключа отсутствует импульс тока от перезаряда коммутирующего конденсатора через главный тиристор и поэтому установленная мощность главных тиристорov уменьшается. Кроме того, коммутирующий конденсатор используется дважды, заряжается всегда до напряжения источника и по сравнению с известными схемами общая установленная коммутирующая емкость уменьшается в два раза.

Диапазон регулирования напряжения на тяговых двигателях составляет от 1 до 95% номинального напряжения.

К недостаткам указанной схемы электронного ключа следует отнести вдвое большее количество гасящих тиристорov.

Испытания показали, что наличие индуктивно-диодной перезарядной цепочки позволяет обеспечить почти постоянство времени разряда конденсатора до нуля в период коммутации при широких диапазонах изменения нагрузки тягового двигателя.

Ниже, на основании теоретических и экспериментальных исследований приводится обобщенная нами методика расчета и выбора параметров широтно-импульсного регулятора.

1. Минимальная емкость коммутирующего конденсатора:

$$C_{к\text{ мин}} = \frac{I_{дв\text{ макс}} \cdot t_{\text{восст}}}{\delta U_{0\text{ мин}}} \quad [62]$$

где $I_{дв\text{ макс}}$ — максимальный ток тягового двигателя,
 $t_{\text{восст}}$ — время восстановления запирающих свойств тиристора,

$U_{0\text{ мин}}$ — минимальное напряжение источника питания,

δ — поправочный коэффициент, учитывающий уменьшение напряжения на конденсаторе после перезаряда его через главный тиристор.

Обычно $\delta = 0,75$; для второго варианта схемы $\delta = 1$.

2. Время разряда конденсатора до нуля при коммутации по данным Р. Вагнера.

$$t_{\text{раз}} = \frac{1}{\omega} \arctg \frac{\delta U_{\text{о мин}} C_{\text{к}} \omega}{I_{\text{дв мак}}} \geq t_{\text{восст}} \quad [63]$$

где ω — эквивалентная угловая частота коммутирующей перезарядной цепочки

$$\omega^2 \approx \frac{1}{L_{\text{к}} C_{\text{к}}} \quad [64]$$

$L_{\text{к}}$ — индуктивность коммутирующей перезарядной цепочки.

Обычно принимают

$$\frac{\delta U_{\text{о мин}} C_{\text{к}} \omega}{I_{\text{дв мак}}} = 1,2 \quad [65]$$

Тогда

$$\omega = \frac{1,2 I_{\text{дв мак}}}{\delta U_{\text{о мин}} C_{\text{к}}} \quad [66]$$

3. Из уравнения (64) определяют $L_{\text{к}}$.

4. Время разряда конденсатора до нуля при коммутации на маневровой позиции

$$t_{\text{раз}} = \frac{1}{\omega_{\text{ман}}} \arctg \frac{\delta U_{\text{о мин}} C_{\text{к ман}} \omega_{\text{ман}}}{I_{\text{дв ман}}} \quad [67]$$

где $C_{\text{к ман}} = \frac{1}{n} C_{\text{к}}$ — емкость конденсатора включенная на маневровой позиции.

В частном случае $n = 1$.

$$\omega_{\text{ман}} = \sqrt{\frac{1}{n} \omega} \quad [68]$$

$I_{\text{дв ман}}$ — маневровый ток двигателя.

5. Скорость увеличения напряжения по времени на главный тиристор в прямом направлении

$$\frac{dU}{dt} = \frac{U_{\text{о мак}}}{t_{\text{раз мин}}} \cdot \left(\frac{dU}{dt} \right)_{\text{дон}} \quad [69]$$

6. Продолжительность перезаряда конденсатора при открытии главного тиристора в первом варианте схемы ключа

$$t_{ск} = \frac{\pi U_{о макс} C_{к}}{i_{с макс}} \quad [70]$$

где $i_{с макс}$ — максимальный допустимый ток конденсатора при перезаряде через главный тиристор.

7. Индуктивность перезарядной цепочки конденсатора при открытии главного тиристора для первого варианта схемы ключа

$$L_{к} = \frac{t_{ск}^2}{\pi^2 C_{к}} \quad [71]$$

8. Минимальная ширина импульса

$$t_{е мин} = t_{ск} + 2 t_{раз ман} \quad [72]$$

Для второго варианта схемы ключа $t_{ск} = 0$.

9. Минимальная частота переключения электронного регулятора

$$f = \frac{(U_{дв ман} + \Delta U_{щ})}{\lambda U_{о ном} t_{е мин расч}} \quad [73]$$

где $U_{дв ман} = I_{ман} R_{дв}$ — минимальное среднее напряжение цепи двигателей при маневровом токе;

λ — поправочный коэффициент, равный 0,8; для второго варианта схемы $\lambda = 1$;

$R_{д}$ — активное сопротивление в цепи двигателей;

$\Delta U_{щ}$ — падение напряжения в щеточных контактах всех щеток двигателей.

10. Емкость входного фильтра из условия обеспечения допустимой пульсации переменной составляющей напряжения конденсатора по исследованиям Р. Багнера равна:

$$C_{ф} = \frac{I_{дв макс} tq \left(\frac{1}{2} \pi \frac{f_{ф}}{mf} \right)}{4\pi f_{ф} \Delta U_{сф макс}} \quad [74]$$

где

$$f_{ф} = \frac{1}{3} f \quad [75]$$

$\Delta U_{\text{сф}} = k U_{0 \text{ макс}}$ — допустимая переменная составляющая напряжения на конденсаторе фильтра в зависимости от частоты на фильтре $f_{\phi}' = mf$,

f_{ϕ} — собственная вынужденная частота фильтра;

m — число электронных ключей;

$k = 0,1 \div 0,15$.

11. Индуктивность входного фильтра

$$L_{\phi} = \frac{1}{4\pi^2 f_{\phi}^2 C_{\phi}} - L_{\text{кс}} \quad [76]$$

где $L_{\text{кс}}$ — минимальная индуктивность контактной сети.

12. Индуктивность в цепи сглаживающего реактора

$$L_{\text{ср}} = \frac{U_{0 \text{ макс}}}{4 \sqrt{3} k_{\text{по}} I_{\text{дв ном}} f} - L_{\text{дв}} \quad [77]$$

$L_{\text{дв}}$ — индуктивность тяговых двигателей при импульсном регулировании;

$k_{\text{по}}$ — допустимый коэффициент относительной пульсации тока.

Эффективные значения токов тиристоров и диодов определяются по известной методике Р. Вагнера.

В работе разработана система автоматического управления тиристорно-импульсным регулятором. Она состоит из блока управления БУИ, от которого поступают импульсы напряжений на управляющие электроды главных тиристоров через постоянный расчетный интервал времени T .

После открытия главных тиристоров возрастает ток в цепи тяговых двигателей в соответствии с постоянной времени с учетом противоэдс. При достижении мгновенного максимального заданного тока (тока уставки) напряжение на выходе датчика в состоянии открыть электронное реле и обеспечить подачу импульсов напряжений на управляющие электроды гасящих тиристоров. Последние открываются, а главные соответственно закрываются. Так в цепи тяговых двигателей уменьшается и через период T главные тиристоры вновь открываются и процесс далее повторяется.

По мере увеличения скорости вращения тяговых двигателей скважность регулирования автоматически увеличивается и напряжение на тяговых двигателях возрастает.

Для фиксации заданной скорости движения служит устройство фиксации скорости.

Разработанная автором система автоматического управления тиристорно-импульсным регулятором работоспособна и рекомендуется для применения.

В качестве примера применения основных теоретических разработок первого раздела диссертации автором была разработана схема плавного автоматического регулирования выпрямленного напряжения на тяговых двигателях маневрового электровоза переменного тока с источником автономного аккумуляторного питания для Днепропетровского электровозостроительного завода.

В схеме силовой цепи электровоза предусмотрено три режима работы: контактный, автономно-аккумуляторный и рекуперативно-тормозной.

В контактном режиме предусмотрено плавное межпозиционное автоматическое регулирование выпрямленного напряжения вторичной обмотки трансформатора при помощи тиристоров.

Применена бесконтактная астатическая система управления плавным автоматическим пуском электровоза.

В режиме автономного пуска регулирование напряжения на тяговых двигателях производится при помощи тиристорно-импульсного регулятора от аккумуляторной батареи. В этом режиме тиристоры «вентильного перехода» используются в качестве главных тиристоров. Остальные вспомогательные тиристоры и диоды дебавляются.

Скважность регулирования (или коэффициент заполнения) составляют от 4 до 96%. По окончании широтно-импульсного регулирования напряжения тиристорно-импульсные регуляторы закорачиваются контакторами.

РАЗДЕЛ ВТОРОЙ

Во втором разделе рассмотрены вопросы теории автоматизации тяги ступенчатых автоматических систем ЭПС.

Исследованию схем ступенчатого (прерывного) автоматического управления пуском ЭПС посвящено ряд работ. Среди них следует отметить известные работы Тихменева Б. Н., Трахтмана Л. М., Барского М. Р., Петрова Б. П., Рубчинского З. М., Сидорова Н. Н., Привалова В. В. и др.

Однако в этих работах не было в достаточной мере учтено влияние переходных процессов в силовой цепи и цепях управления на работу системы автоматического пуска. Взаимосвязь переходных процессов в силовой цепи и цепях управления за-

трудняет фиксацию позиций группового контроллера и приводит к некоторым нежелательным последствиям в результате чего существующая система автоматического ступенчатого пуска на ЭПС постоянного и переменного тока в настоящее время работает не надежно.

Кроме того, при параллельной работе нескольких ступенчатых автоматических систем в поезде, из-за неодновременного их срабатывания, возникают значительные продольные динамические удары между вагонами до 8—10 тн, что приводит к преждевременным износам механической части, к боксованию колесных пар моторных вагонов и к снижению надежности работы тяговых двигателей.

Решение вышеуказанных проблем крайне необходимо.

Поэтому во втором разделе диссертации автор на основе анализа и обобщения опыта эксплуатации существующих ступенчатых автоматических систем управления разработал некоторые вопросы теории, позволяющие учесть влияние переходных процессов в силовой цепи и цепях управления на работу системы автоматического пуска и тем самым значительно повысить надежность ее работы на ЭПС постоянного и переменного тока.

Произведено также теоретическое и экспериментальное исследование параллельной работы ступенчатых автоматических систем и разработано устройство для синхронизации пуска этих систем на ЭПС постоянного и переменного тока.

Основные результаты теоретических исследований внедрены на ЭПС, эксплуатируемом на восьми железных дорогах. Опыт эксплуатации ЭПС на этих дорогах подтвердил правильность поставленных и решенных проблем.

В **десятой** главе рассмотрены вопросы автоматизации пуска ступенчатых автоматических систем.

Опыт эксплуатации электропоездов показывает, что при работе их по системе автоматического управления из-за нечеткой работы реле ускорения (РУ) в период пуска нередки случаи нефиксации силовым контроллером ряда позиций. Это в определенных условиях приводит к боксованию колесных пар или к срабатыванию защиты тяговых двигателей.

Объясняется это влиянием переходных процессов в силовой цепи на работу системы автоматического управления.

Исследованием установлено, что за время перехода силового контроллера с одной позиции на другую ток в силовой цепи уменьшается на $\Delta I = (5 - 8)\% I_{pв}$, а нарастание тока из-за индуктивности в цепи тяговых двигателей происходит постепенно. За время совместного действия подъемной и си-

ловой катушек РУ в 0,01—0,02 сек на ряде позиций ток не успевает достичь величины тока уставки РУ, при которой происходило его отпадение. Это приводит к проскакиванию позиций силовым контроллером.

Это уменьшение тока ΔI зависит от времени перехода силового контроллера с позиции на позицию t_n , от ускорения при пуске a , т. е. от профиля пути и веса поезда, а также от жесткости характеристик тяговых двигателей.

Линеаризуя на расчетном интервале изменения тока — силу тяги и скорость движения, находим из уравнения движения поезда после ряда преобразований значение начального тока I_2 переходного процесса в зависимости от параметров силовой цепи и цепи управления:

$$I_2 = \frac{I_{py} \cdot k_3}{\frac{t_n \cdot k_1}{e^{\sigma Q k_2}} - k_2} \quad [78]$$

где k_1 — угловой коэффициент, характеризующий линеаризацию силы тяги на расчетном интервале изменения тока;

k_2 — угловой коэффициент, характеризующий линеаризацию скорости на расчетном интервале изменения тока

$$k_3 = \frac{F_n - \frac{W}{n}}{k_1} \quad [79]$$

F_n — условная начальная сила тяги двигателя в результате линеаризации $F_k(I)$ при $I = 0$, в кг;

W — сопротивление движению всего поезда, в кг;

n — число всех тяговых двигателей поезда;

Q — вес всего поезда, в тн;

$\sigma = 2831 + \gamma$ — переводной коэффициент, для первой формы уравнения движения.

t_n — время от момента отпадения якоря РУ до момента начала нарастания тока, т. е. замыкания силовых контакторов контроллера, в сек.

В работе дана зависимость характера нарастания тока в силовой цепи от значения тока I_2 до значения тока I_{py} как:

$$I = I_{уст} - (I_{уст} - I_2) e^{-\delta t} \quad [80]$$

где

$$I_{уст} = \frac{\frac{U_c}{n} - E_0}{r_d + \frac{R_p''}{n} k} \quad [81]$$

$$\delta = \frac{r_d + \frac{R_p''}{n} k}{L_{дв}} \quad [82]$$

δ — величина обратная постоянной времени,
 R_p'' — сопротивление пускового реостата при выключении очередной ступени,
 $L_{дв}$ — индуктивность тягового двигателя в рассматриваемом интервале приращения тока,
 k — коэффициент пропорциональности равный тангенсу угла наклона прямой $E = f(I)$ на расчетном интервале приращения тока.

$$E_0 = C\Phi_0 v \quad [83]$$

причем, скорость v определяется как:

$$v = \frac{\frac{U_c}{n} - I_2 \left(\frac{R_p'}{n} + r_d \right)}{C\Phi_{I_2}} \quad [84]$$

R_p' — сопротивление пускового реостата до выключения очередной ступени.

Для определения характера нарастания тока $I(t)$ до установившейся величины в работе получены нелинейные дифференциальные уравнения и дано решение их на аналоговых вычислительных машинах.

Анализ показал, что время совместного действия подъемной и силовой катушек РУ незначительно по конструктивным параметрам. Поэтому, если за это время ток в силовой цепи не успеет возрасти от значения I_2 до тока уставки РУ, при котором произошло его срабатывание, то якорь РУ отпадает и вал силового контроллера безостановочно повернется на следующую позицию, что недопустимо.

Для устранения этого недостатка необходимо, чтобы якорь РУ отпадал после прекращения питания подъемной катушки РУ с дополнительной выдержкой времени в 0,04—0,06 сек. За это время ток силовой цепи дополнительно возрастет и достигнет установившейся величины на всех позициях.

Для улучшения существующей схемы автоматического управления на электропоездах и на вновь проектируемых ступенчатых автоматических системах необходимо установить дополнительную катушку на реле ускорения параллельно подъемной и зашунтировать их полупроводником в непроводящем направлении, а на электропоездах ЭР9 зашунтировать их конденсатором [24]. Такую выдержку времени необходимо предусмотреть и на бесконтактном реле ускорения.

Основной недостаток существующей схемы подключения подъемной катушки РУ состоит в том, что она включена последовательно с катушкой вентиля силового контроллера (КСП), обладающим значительной индуктивностью. Поэтому в период перехода КСП с одной позиции на другую в момент, когда контакт ПВ1 замыкается катушка РУ подключается последовательно с вентилем КСП.

Исследования показали, что ток в подъемной катушке РУ

$$i_{пк} = I_1 - (I_1 - I_2) e^{-\frac{(r_{пк} + r_v) t}{L_v}} \quad [85]$$

где I_1 — установившийся ток при включенном контакте ПВ1,

I_2 — установившийся ток до включения контакта ПВ1,

L_v — индуктивность вентиля,

$r_{пк}$, r_v — активное сопротивление подъемной катушки и вентиля.

Исследования показали, что за время действия подъемной катушки 0,05 сек ток в ней не успевает возрасти до установившейся величины и в некоторых случаях это приводит к несрабатыванию якоря РУ и, как следствие, к хронометрическому проскакиванию одной из позиций КСП, что недопустимо.

Для устранения этого недостатка автором изменена схема включения подъемной катушки РУ, при этом обеспечена ей независимая цепь питания с помощью полупроводника и сопротивления (ЭР2) и (ЭР9) или с помощью сопротивления (C^p и C_3^p) [24].

Вышеуказанные изменения позволили повысить надежность системы автоматического управления и пуск производить с увеличенным током уставки РУ на 10%.

Этим устройством были оборудованы все электропоезда Южной и Приднепровской железных дорог, а также опытные электропоезда ЭР9 Северо-Кавказской и Юго-Западной дорог.

Эксплуатация электропоездов с новой схемой автомати-

ческого управления в течение ряда лет показала хорошие результаты.

Глава **одиннадцатая** посвящена исследованию параллельной работы ступенчатых автоматических систем.

Несинхронный пуск электросекций в поезде приводит к преждевременным износам головок и хвостовиков автосцепок и в определенных условиях к боксованию колесных пар, что понижает надежность работы тяговых двигателей и снижает тяговые свойства электропоезда.

Исследованием установлено, что главными причинами возникновения динамических ударов между моторными вагонами электропоезда является одновременный переход во времени приводов силовых контроллеров моторных вагонов на очередные позиции из-за одновременного отпадания якорей РУ моторных вагонов. Последнее вызвано расхождением в токах моторных вагонов, так как неизбежно имеются отклонения в параметрах силовой цепи.

Для определения разницы в величинах тока между моторными вагонами, находящимися в одном составе, были установлены фактические отклонения характеристик тяговых двигателей от номинальных.

Для этого был произведен анализ заводских контрольных испытаний 780 тяговых двигателей и методами математической статистики установлено, что процентное отклонение их характеристик подчиняются закону нормального распределения и около 75% всех тяговых двигателей имеют отклонения, не превышающие $\pm 1\%$.

Обработка материалов производилась по методике, разработанной профессором Исаевым И. П.

Для определения времени одновременного срабатывания приводов силовых контроллеров на каждой позиции автором получены необходимые для расчета зависимости [17].

Расчеты показали, что для соударения электросекций (из-за одновременного срабатывания приводов КСП) достаточно 0,3—0,4 сек, в то время как разница во времени срабатывания приводов КСП, обусловленная расхождением скоростных характеристик составляет $0,4 \div 1,0$ сек. Отсюда ясно, что при таких условиях динамические удары между электросекциями неизбежны.

Для аналитического определения разницы в потреблении тока между электросекциями, находящимися в одном составе, в зависимости от процентных отклонений параметров силовой цепи — автором в работе [17] и в диссертации выведены формулы и произведены по ним необходимые расчеты.

Теоретический анализ и испытание более 300 моторных вагонов в электропоездах показал, что практически вероятность самого неблагоприятного сочетания отклонений от параметров силовой цепи весьма редка, и в ряде случаев одни отклонения по конечным результатам противоположны другим. Поэтому практически разница в величинах токов электросекций не превышает 5—8%, что позволяет применить одновременный пуск моторных вагонов в поезде.

В двенадцатой главе рассматриваются вопросы синхронизации пуска параллельно работающих ступенчатых автоматических систем.

Анализ и испытания показали, что небольшие отклонения в токах между моторными вагонами вызывает (вследствие более раннего перехода КСП одного моторного вагона по отношению другого) в несколько раз большую разницу в токах на некоторое время, что приводит к разнице в тяговых усилиях между ними 2,5—3,5 т, т. е. 20—40%. Наличие зазоров в головках и хвостовиках автосцепок приводит к тому, что передача усилий от одной электросекции к другой во время пуска происходит сравнительно жестко и ударные усилия достигают значительных величин (до 10 т на электропоездах СР, СЗР и ЭР9П).

Для устранения этих недостатков автором предложено и разработано устройство, позволяющее синхронизировать работу всех приводов силовых контроллеров моторных вагонов при работе их по системе многих единиц. Достигается это за счет применения реле синхронизации РС, при включении которого поездной провод, питающий приводы ведомых силовых контроллеров, включается последовательно с контактами реле ускорения головного вагона. При этом реле ускорения на всех остальных моторных вагонах остаются, но их взаимная работа автоматически увязывается [л. 24].

Для этого предварительно реле ускорения всех моторных вагонов регулируется на одинаковый ток уставки и выше номинальной на 15%. При синхронном пуске на ведущем моторном вагоне при помощи РС автоматически ток уставки реле ускорения снижается на 10%, но не ниже номинальной. Такая автоматическая перерегулировка реле ускорения на ведущем моторном вагоне необходима для того, чтобы ведомые реле ускорения при снижении тока в силовой цепи ведущего моторного вагона до тока его уставки были уже замкнуты и готовы воспринять импульсы питания от ведущего реле ускорения.

На вышеуказанное устройство автором получено два авторских свидетельства как на изобретение [8, 14].

Конкретное исполнение схемы синхронного пуска на электропоездах $СР, СР_3$, ЭР2 и ЭРП с описанием ее действия изложено в работах [13, 16, 24, 25, 26].

В диссертации также предложена и рассмотрена принципиальная схема синхронного пуска на бесконтактных элементах для электропоездов переменного тока

В работе дается методология выбора параметров индуктивного дросселя и расчет переходных процессов в схеме цепи автоматического управления силовым контроллером для обеспечения синхронного пуска электропоездов постоянного и переменного тока.

Для обеспечения синхронизации пусковых устройств при работе их по системе многих единиц необходимо, чтобы электропневматический вентиль привода силового контроллера у ведущего моторного вагона открывался позже, чем на ведомых на некоторое время Δt , что достигается применением индуктивного дросселя.

Задача заключается в том, чтобы выбрать необходимую задержку времени включения вентиля привода силового контроллера при минимальных габаритах индуктивного дросселя.

Трудность расчета в том, что индуктивность дросселя в зависимости от тока существенно изменяется и, кроме того, электромагнит вентиля привода силового контроллера имеет на сердечнике демпферное кольцо, влияющее на характер изменения тока в цепи катушки вентиля.

Характер нарастания тока в цепи вентиля i_1 и демпферном кольце i_2 описываются уравнениями:

$$\frac{d^2 i_1}{dt^2} + q(i_1) \frac{di_1}{dt} + f(i_1) = 0 \quad (86)$$

$$\frac{d^2 i_2}{dt^2} + q(i_2) \frac{di_2}{dt} + f(i_2) = 0 \quad [87]$$

Полученные уравнения второго порядка с нелинейными коэффициентами и решение их производилось на фазовой плоскости.

В работе произведен числовой расчет по определению задержки времени включения вентиля с индуктивным дросселем по сравнению с временем включения без индуктивного дросселя. При этом задержка Δt на одну позицию составила 0,06 сек, а на один оборот вала КСП 0,9—1,0 сек.

В работе дано решение указанных нелинейных уравнений на аналоговых вычислительных машинах.

По приведенной в работе методике расчета были изготовлены индуктивные дроссели и установлены для эксплуатации по схеме синхронизации пуска на электропоездах Приднепровской, Южной, Северо-Кавказской и Юго-Западной железных дорог. Результаты испытания достаточно хорошо совпадают с теоретическими расчетами.

В **тринадцатой** главе рассматриваются результаты испытаний параллельно работающих ступенчатых автоматических систем.

В 1963 г. на Южной, а в 1968 г. на Юго-Западной дорогах работники кафедр строительной механики и электроподвижного состава с участием автора под руководством профессора В. А. Лазаряна провели динамические и электрические испытания десятивагонных электропоездов ЭР2 и ЭР9П, оборудованных устройством синхронизации хода силовых контроллеров и новой схемой автоматического управления.

При испытаниях установлено [20], что в период автоматического пуска с несинхронной системой управления электропоездов возникают дополнительные динамические ударные усилия, достигающие до 6—8 т при значительной их частоте, что наряду с другими факторами приводит к дополнительному износу головок и хвостовиков автосцепок вагонов поезда.

Кроме того, эти динамические удары приводят к разгрузкам колесных пар, сопровождающихся нередко появлением кругового огня на коллекторах тяговых двигателей.

При синхронном пуске электропоездов нарастание токов, а следовательно и тяговых усилий каждого моторного вагона происходит практически одновременно и, как показали испытания, продольные динамические удары устраняются.

На основании положительных результатов испытаний было оборудовано 40 десятивагонных электропоездов ЭР2 на Южной дороге в 1963—64 гг., 20 девятивагонных электропоездов C_p и C_p^p на Приднепровской дороге в 1964 г., два электропоезда переменного тока ЭР9П на Северо-Кавказской в 1965 г. и в 1968 г. на Юго-Западной дорогах.

Опыт эксплуатации этих электропоездов по настоящее время по данным дорог дал следующие технико-экономические результаты. Увеличилось на 12% ускорение электропоездов при пуске, снизился на 3—4% общий расход электрической энергии, уменьшилось на 40% сменяемость головок автосцепок, устранены продольные динамические удары между вагонами в период пуска и значительно повысилась надежность работы тяговых двигателей.

Согласно расчету и по данным Южной дороги экономический эффект от внедрения новых разработок на электропоездах ЭР2 составил около 100 тыс. руб. в год.

В четырнадцатой главе рассмотрена схема возможного осуществления ступенчатого автоматического пуска на эксплуатируемых электровозах постоянного тока с минимальной переделкой.

Пуск осуществляется под контролем реле ускорения, который управляет вращением сервомотора блокировочного контроллера. Последний управляет питанием индивидуальных реостатных контакторов. Для изменения тока уставки РУ предусмотрен дополнительный контроллер пусковых режимов. Для постепенного увеличения силы тяги и плавного взятия состава с места до значения тока, при котором в работу вступает РУ, — в схеме предусмотрен хронометрический пуск под контролем реле времени.

В работе рассмотрены процессы проскальзывания колес одного из последовательно соединенных двигателей при автоматическом пуске на всех видах соединений и составлены расчетные уравнения переходных электромеханических процессов. Решение произведено методом кусочно-линейной аппроксимации, так как диапазон ожидаемого изменения тока не велик [7].

Исследование показало, что автоматическое устройство для обнаружения боксования должно сработать за 0,3—0,4 сек с момента возникновения боксования и прервать цепь питания автоматического пуска. В этом случае данная позиция, с которой началось боксование, будет зафиксирована и дальнейшее боксование колесных пар при автоматическом пуске станет аналогично боксованию при ручном пуске.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Разработана теория и дан метод расчета на устойчивость системы плавного автоматического тиристорного регулирования напряжения на тяговых двигателях, позволяющие правильно выбрать основные параметры системы автоматического управления электроподвижным составом.

При этом было установлено, что:

а) уменьшение инерционности системы управления достигается применением гибкой обратной связи. Введение гибкой обратной связи значительно повышает устойчивость системы пуска, улучшает качество переходного процесса и не вносит

статической ошибки. В работе дан метод расчета и определения основных параметров обратной связи;

б) предложенное корректирующее устройство с жесткой обратной связью, которое пропорционально изменению напряжения в контактной сети воздействует на систему управления тиристорами и обеспечивает постоянство тока в цепи тяговых двигателей. В этом случае надежность работы тяговых двигателей значительно повышается и возможно использовать силу тяги электровоза близкую к ограничению по сцеплению.

2. Статическая и астатическая системы бесконтактного управления плавным автоматическим регулированием выпрямленного напряжения на тяговых двигателях дают высокую точность регулирования и обеспечивают необходимые режимы пуска. Поэтому эти системы управления можно рекомендовать для практического применения на электроподвижном составе.

3. Схема широтно-импульсного регулятора напряжения с мостовым коммутационным переключателем емкости и коммутационным колебательным контуром в цепи перезаряда при питании от источника постоянного тока вполне работоспособна, а разработанная нами обобщенная методика расчета и выбора параметров широтно-импульсного регулятора и системы автоматического управления рекомендуется для использования при проектировании электроподвижного состава постоянного тока.

4. Исследования показали, что существующая система автоматического управления на электропоездах работает не надежно, что приводит к дополнительным продольным динамическим ударам между вагонами электропоезда, к боксованию колесных пар моторных вагонов, сопровождающихся иногда появлением круговых огней на коллекторах тяговых двигателей.

5. Разработаны некоторые вопросы теории, позволяющие учесть влияние переходных процессов в силовой цепи и цепях управления на работу системы автоматических устройств. и дана методика их расчета. Дана теория параллельной работы ступенчатых автоматических систем.

При этом установлено, что для обеспечения надежной работы системы ступенчатого автоматического пуска необходимо:

а) на существующих электропоездах увеличить время совместного действия силовой и подъемной катушек реле ускорения до 0,05—0,06 сек. и обеспечить независимую цепь включения подъемной катушки;

б) на вновь проектируемом электроподвижном составе обеспечить постоянную задержку на переход силового контроллера с одной позиции на другую на время определяемое переходным процессом нарастания тока в цепи тяговых двигателей до установившейся величины при ступенчатом изменении подаваемого напряжения.

6. Рекомендуются для внедрения устройство синхронизации хода силовых контроллеров электропоезда, которое позволяет:

а) устранить продольные динамические удары между секциями и уменьшить износ механической части;

б) значительно сократить число случаев боксования колесных пар и появления круговых огней на коллекторах тяговых двигателей и тем самым повысить надежность их работы в эксплуатации;

в) повысить ускорение электропоездов при пуске на 10% и снизить общий расход электрической энергии на 2—4%;

г) получить экономию средств от уменьшения расхода электрической энергии, уменьшения износа деталей механической части для размера движения электропоездов Южной дороги около 100 тыс. руб. в год.

7 Теоретические и практические разработки, выполненные в диссертации, позволяют проектировать новый перспективный электроподвижной состав переменного и постоянного тока с автоматическим управлением силы тяги в пусковых режимах.

8. Основные результаты теоретических и экспериментальных исследований внедрены на ЭПС, эксплуатируемом на Прибалтийской, Октябрьской, Приднепровской, Южной, Северо-Кавказской, Юго-Западной и других железных дорогах и подтвердили правильность поставленных и решенных проблем.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Анализ схем регулирования скорости электроподвижного состава с полупроводниковыми выпрямителями. Труды Днепропетровского института инженеров транспорта (ДИИТа), вып. 58, 1966, стр. 76—89, 7 илл. (совместно с Г. М. Чиликиным).

2. Автоматизация пуска электроподвижного состава переменного тока. Труды ДИИТа, вып. 66, стр. 52—78, 13 илл.

3. Маневровые контактно-аккумуляторные электровозы постоянного тока с электронным управлением и переменного тока с плавным автоматическим регулированием при помощи тиристоров. Сборник научных трудов. Электровозостроение, т. VIII, 1967, стр. 76—82.

4. Тиристорно-импульсная система регулирования напряжения на тяговых двигателях контактно-аккумуляторного электровоза постоянного тока. Труды ДИИТа, вып. 77, 1968 (совместно с К. Г. Кучмой и Ф. Е. Пашковым).

5. Бесконтактная астатическая и статическая системы автоматического регулирования выпрямленного напряжения на тяговых двигателях. Труды ДИИТа, вып. 87, 1968 (совместно с В. Д. Токаревым), стр. 25—38, 4 илл.

6. Маневровый электровоз переменного тока с источником автономного питания. Тезисы доклада XVII научно-технической конференции ДИИТа. 1967, стр. 78—79.

7. Ступенчатый автоматический пуск электровозов постоянного тока и требования, предъявляемые к датчикам боксования. Труды ДИИТа, вып. 66, 1966, стр. 101—110, 5 илл.

8. Устройство для синхронизации хода реостатных контроллеров электропоезда. Бюллетень изобретений № 13, 1960.

9. Что показала эксплуатация электросекций C_P и C_{3P} по схеме синхронного пуска. Электрическая и тепловозная тяга, № 3, 1961, стр. 2, 1 илл. (совместно с Б. Н. Никоновым).

10. Улучшенная схема синхронного пуска электросекций. Электрическая и тепловозная тяга, № 2, 1962, стр. 2, 1 илл. (совместно с Г. Л. Климашаном).

11. Улучшенная схема автоматического управления электросекций C_P и C_{3P} . Электрическая и тепловозная тяга, № 12, 1959, стр. 2, 1 илл.

12. Об улучшении работы системы автоматического управления на электросекциях C_P и C_{3P} . Труды Московского института инженеров транспорта, вып. 123, 1960, стр. 53—67, 10 илл.

13. Брошюра «Синхронный пуск электросекций C_P и C_{3P} ». Трансжелдориздат, 1961, 41 стр., 15 илл.

14. Устройство для синхронизации хода реостатных контроллеров электропоезда. Бюллетень изобретений № 1, 1962.

15. Улучшение автоматики управления на электросекциях C_P и C_{3P} при переходе на параллельное соединение. Труды ДИИТа; вып. 39, 1963, стр. 37—49, 3 илл.

16. Новая схема синхронного пуска моторвагонного подвижного состава C_P , C_{3P} и ЭР1. Труды ДИИТа, вып. 39, 1963, стр. 23—36, 4 илл.

17. Анализ реостатных характеристик тяговых двигателей моторных вагонов. Труды ДИИТа, вып. 54, 1965, стр. 42—63, 5 илл.

18. Некоторые вопросы улучшения системы автоматического управления на электропоездах. Труды ДИИТа, вып. 54, стр. 64—82, 8 илл., 1965.

19. Схема синхронного пуска электропоезда ЭР2. Электрическая и тепловозная тяга, № 8, 1965, стр. 2, 1 илл. (совместно с А. З. Хомич и Б. Т. Власенко).

20. Результаты испытаний параллельно работающих автоматических систем электропоезда ЭР2. Труды ДИИТа, вып. 54, 1965, стр. 83—93, 9 илл.

21. Выбор параметров в цепях управления силовым контроллером при синхронном пуске электропоездов. Труды ДИИТа, вып. 58, стр. 16—28, 8 илл.

22. Новая схема включения реле ускорения на электропоездах. Труды ДИИТа, вып. 58, 1966, стр. 29—34, 3 илл.

23. Экономия электрической энергии от реализации повышенных пусковых токов на электропоездах. Труды ДИИТа, вып. 58, 1966, стр. 129—138, 3 илл.

24. Брошюра «Автоматизация и синхронизация пуска электропоездов». Изд. Транспорт, 1966, 70 стр., 22 илл.

25. Синхронизация и улучшение автоматизации пуска электропоезда ЭР-9. Труды ДИИТа, вып. 66, 1966, стр. 79—87, 1 илл. (совместно с Б. Т. Власенко).

26. Синхронный пуск электропоездов переменного тока на бесконтактных элементах. Труды ДИИТа, вып. 77, 1968 (совместно с Б. Т. Власенко).

Результаты работы докладывались автором:

1. На заседаниях кафедры электроподвижного состава ДИИТа.
2. На ученом Совете ДИИТа, 1966 г.
3. На Всесоюзной научно-технической конференции по промышленному транспорту, сентябрь 1966 г., г. Днепропетровск.
4. На отраслевом научно-техническом совещании по электровозостроению, 1965, НЭВЗ.
5. На отраслевом научно-техническом совещании по электровозостроению, 1966, НЭВЗ.
6. На научно-техническом Совете МПС, 1966 г.
7. На научно-технической конференции ВЭИ им. В. И. Ленина «Состояние и перспективы развития производства и внедрения силовых полупроводниковых вентилях и преобразовательных устройств на их основе», Москва, 1966 г.
8. На научно-техническом Совете МПС, 1967 г.
9. На научно-техническом Совете МПС, 1968 г.
10. На отраслевом научно-техническом совещании по электроподвижному составу, ДИИТ, сентябрь 1967 г.
11. На отраслевом научно-техническом совещании по электровозостроению, май, 1967 г., НЭВЗ.
12. На 17-й научно-технической конференции ДИИТа, 1967 г.
13. На заседании кафедры «Электрическая тяга», МИИТ, 1967 г.
14. На конференции по вопросам тиристорного управления, проводимой постоянной комиссией по научным проблемам развития транспорта Академии Наук СССР, 1968 г., Москва.
15. На научно-технической конференции по применению бесконтактных элементов в цепях управления ЭПС. Москва, МИИТ, 1964 г.

НТБ
ДНУЖТ

БТ 00492. Подписано к печати 1. VII. 1969 г. Бумага 60x84^{1/16}.
Объем 2,5 печатных листа. Заказ № 6119. Тираж. 250.

Городская типография № 3 областного управления по печати.
г. Днепропетровск-2, ул. Фрунзе, 6.