

6
А-61

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ СССР

МОСКОВСКИЙ ордена ЛЕНИНА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

Инженер БОРИСОВ Б.Д.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО
РЕГУЛИРОВАНИЯ РЕОСТАТНОГО ТОРМОЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОВОЗОВ
ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

(05.433 - подвижной состав и тяга поездов)

(Диссертация на русском языке)

Автореферат диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических наук

Москва

1971

XXIV съезд КПСС определил в качестве основного направления в развитии железнодорожного транспорта увеличение пропускной и провозной способности железных дорог, что связано с необходимостью повышения производительности локомотивов.

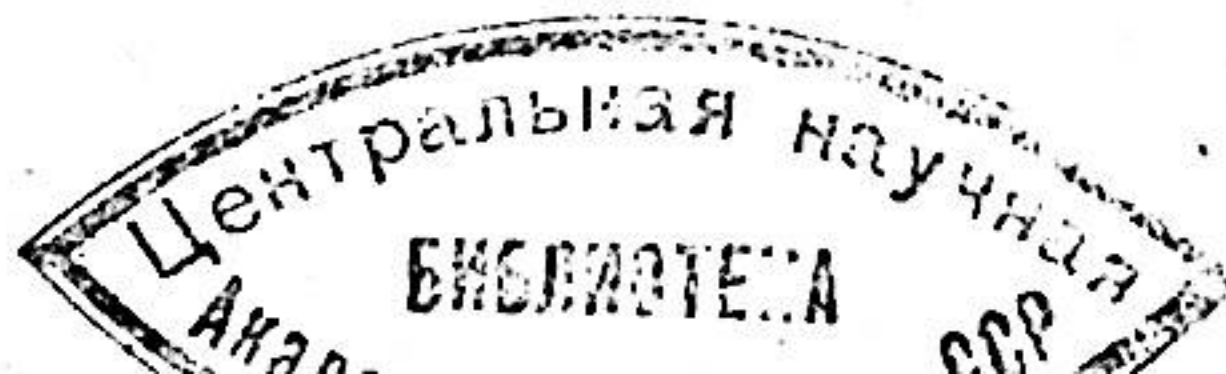
Повышение сил тяги и скоростей движения электрических локомотивов невозможно без одновременного усиления и совершенствования тормозных средств. Степень оснащённости тормозными средствами и их эффективность определяют безопасность движения и существенно влияют на экономические и эксплуатационные показатели локомотивов. Большую роль в достижении этих высоких показателей играет электрическое торможение.

Электрическое торможение обеспечивает существенное повышение эффективности тормозного процесса, позволяет повысить скорости движения поездов и пропускную способность участков с тяжёлыми спусками, даёт существенную экономию расхода тормозных колодок, а при рекуперации — экономию энергии путем отдачи ее в сеть.

Применение электрического торможения при современном уровне развития средств автоматики позволяет осуществить плавное автоматическое управление тормозными процессами по заданной программе.

В связи с этими преимуществами практически все современные зарубежные серии электровозов переменного тока выполняются с реостатным торможением; выпущены также опытные образцы электровозов с рекуперативным торможением с тиристорными преобразователями.

С 1971 года в СССР начато серийное производство электровозов ВЛ80Т, оборудованных системой автоматического управления



реостатным тормозом, разработанной на кафедре электрического транспорта МЭИ совместно с ВЭЛНИИ при участии автора.

Основными требованиями к современной системе автоматического управления электрическим торможением являются:

а) обеспечение наиболее полного использования заданной программы регулирования по предельным ограничениям тормозного режима (по коммутационной стойкости тяговых двигателей, тормозной силе, тепловой мощности тормозных резисторов и др.) при одновременной возможности выбора стабилизированной скорости движения на спусках и тормозной силы при остановке;

б) стабильность тормозных характеристик при любых климатических условиях, возможных в эксплуатации электровозов;

в) высокая эксплуатационная надежность тормоза;

г) простота и удобство управления тормозом.

Современный уровень развития средств автоматики и электронной техники обеспечивает широкие возможности создания систем автоматического управления, удовлетворяющих вышеуказанным требованиям.

Однако выбор наиболее простой и надежной в эксплуатации системы автоматического регулирования тормозной силы (САР ТС) представляет сложную проблему, наилучшее решение которой в значительной степени зависит от правильного выбора элементов САР и их взаимодействия, отвечающего заданным закономерностям регулирования тормозного процесса.

Решение этой проблемы и составляет основное содержание реферируемой работы.

В работе рассмотрены следующие вопросы, связанные с разработкой САР ТС реостатного тормоза электровозов переменного то-

ка: обоснование предпочтительных принципов построения САР; разработка и исследование отдельных ее функциональных блоков на базе современной полупроводниковой электроники, исходя из требований стабильности характеристик, точности и надежности работы системы в целом; разработка методики расчета статических тормозных характеристик электровоза с реостатным торможением, оборудованного исследуемой САР ТС; определение допустимых границ изменения некоторых параметров системы в зоне ее устойчивой работы и косвенный анализ качества переходных процессов.

Экспериментальные работы на первой стадии исследования проводились на специально построенной в лаборатории электрического транспорта МЭИ физической модели САР ТС, выполненной на базе двух тяговых двигателей ДК-104Г мощностью по 72 кВт каждый. Полный комплекс экспериментальных исследований был выполнен в дальнейшем в ВЭЛНИИ с участием автора в процессе стендовых испытаний макетных образцов блоков регулирования тормозной силы, изготовленных на ИЭВЗе в точном соответствии с физической моделью системы. Работоспособность системы и стабильность ее характеристик проверены и подтверждены в процессе промышленных и эксплуатационных испытаний опытных образцов электровозов ВЛ80Т выпуска 1969 года.

В I главе на основе обзора патентной литературы и работ отечественных и зарубежных авторов рассмотрены существующие тенденции развития систем реостатного торможения электроподвижного состава (ЭПС), особенности различных предложенных и выполненных схем силовых цепей тормоза и систем автоматического управления режимами торможения.

При определении принципов построения САР ТС реостатного тор-

моза перспективного магистрального электровоза переменного тока автор исходил из следующих соображений.

Одним из наиболее важных ограничений тормозного режима рельсового транспорта является ограничение по условиям сцепления движущих колес с рельсами. От принципа регулирования тормозной силы на этом участке во многом зависит эффективность реостатного торможения электровоза и степень использования его тормозных возможностей.

Наилучшее выполнения ограничения по условиям сцепления в максимально широком диапазоне скоростей движения возможно при построении САР ТС по принципу сравнения сигналов, пропорциональных истинному и заданному значениям тормозной силы, где в качестве сигнала истинной величины тормозной силы принято напряжение, пропорциональное произведению текущих значений тока якоря и магнитного потока главных полюсов тяговых двигателей (ТД). Другие известные способы автоматического регулирования тормозной силы на участке ограничения ее условиями сцепления уступают указанному по ряду показателей.

Конкретное осуществление этого принципа регулирования тормозной силы на зарубежном ЭПС оставляет резервы для повышения использования мощности силового оборудования электровоза и в этом смысле требует совершенствования.

Такое совершенствование необходимо и возможно на базе современной автоматики и средств электронной техники.

II глава посвящена вопросам разработки и исследования элементов САР ТС, которая обеспечивает регулирование тормозной силы реостатного тормоза по всем ограничениям в режиме остановочного торможения и формирует тормозные характеристики, позволяющие

жестко стабилизировать заданную скорость движения по спуску.

Ограничение тормозной силы по условиям сцепления движущих колес с рельсами может быть осуществлено исследуемой системой благодаря возможности автоматического поддержания заданной величины тормозной силы в широком диапазоне скоростей движения. Реализуемый при этом принцип регулирования основан на непосредственном сравнении сигналов, пропорциональных заданному и истинному значениям тормозной силы. Измерение истинного значения тормозной силы производится косвенным методом с применением электронного решающего устройства (РУ), непрерывно выполняющего операцию перемножения двух аналоговых электрических сигналов, что принципиально отличает указанную систему от всех известных САР ТС [1, 2].

Функциональная схема исследуемой системы регулирования изображена на рис. 1. Тяговые двигатели $1 + N$ в тормозном режиме нагружены на индивидуальные нерегулируемые тормозные резисторы $TR1 + TRN$, а их обмотки возбуждения $OB1 + OBN$, соединенные в одну последовательную цепь, получают питание от управляемого статического возбудителя В, питающегося от специальной обмотки тягового трансформатора. В цепях тока возбуждения I_B и токов якорей I_A включены датчики тока ДТВ и ДТЯ соответственно, сигналы от которых поступают в систему автоматического регулирования. Для жесткой стабилизации скорости движения на спусках на одной или нескольких осях локомотива установлены датчики скорости - тахогенераторы ТГ, сигналы с которых также поступают в САР ТС.

Работой возбудителя В управляет фазорегулятор ФР, сочетающий формирователь управляющих импульсов необходимой амплитуды

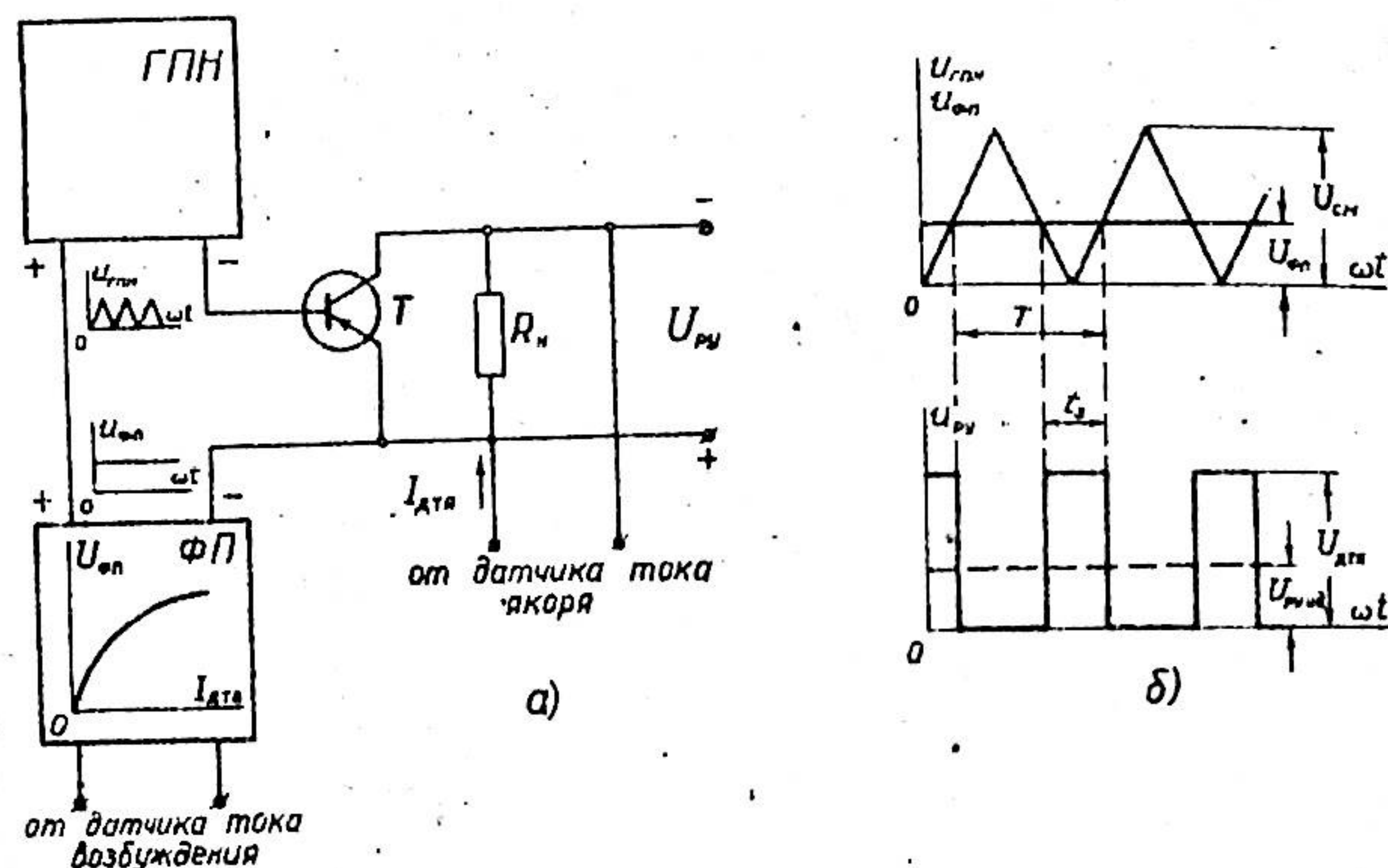


Рис. 2

янное, медленно меняющееся $U_{фп}$.

Можно показать, что выходное напряжение РУ в идеальном случае (при отсутствии его инструментальной погрешности) определяется выражением

$$U_{ру ид} = K \cdot U_{фп} \cdot I_{дтв}, \quad (2)$$

что обеспечивает практическую реализацию зависимости (1), если входной сигнал $I_{дтв}$ пропорционален току якоря, а напряжение $U_{фп}$ — магнитному потоку Φ главных полюсов ТД. Последнее выполняется за счет функционального преобразования сигнала $I_{дтв}$ датчика тока возбуждения по зависимости, повторяющей в определенном масштабе нагрузочную характеристику ТД.

Исполнение входящих в РУ генератора пилообразного напряже-

ния (ГПН) и функционального преобразователя (ФП) подчинено требованиям максимальной их простоты, надежности и точности реализации зависимости (2). Выведенные соотношения позволяют рассчитать параметры элементов РУ, исходя из уровней входных и выходных сигналов и величины питающего ГПН напряжения.

Стабильность тормозных характеристик зависит как от стабильности характеристик отдельных элементов системы автоматического регулирования, так и от функционального построения системы в целом. Исследуемая система содержит несколько транзисторных усилителей медленно меняющихся сигналов. Задача удовлетворительной стабилизации отдельного такого усилителя решается, как правило, путем существенного усложнения его схемы.

Во избежание излишнего усложнения стабильность характеристик исследуемой системы в целом достигается не стабилизацией каждого усилителя в отдельности, а путем взаимной компенсации дрейфов усилителей, работающих в одном канале главной обратной связи, что позволяет максимально упростить каждый из усилителей. Такой принцип стабилизации становится возможным при выполнении следующих условий:

1) включение в цепь г.о.с. не менее двух элементов, характеристики которых подвержены дрейфу при изменении температуры окружающей среды;

2) правильный выбор знака сравнения регулируемой величины с уставкой;

3) взаимное согласование параметров различных усилителей.

Выполнение первых двух условий в исследуемой САР ТС обусловлено ее структурой (см. рис. 1). По два транзисторных усилителя, выполняющих различные функции, включены в каждый из двух кана-

лов г.о.с.: канал стабилизации скорости движения по спуску и канал поддержания постоянства тормозной силы на уровне заданного значения.

Третье условие может быть выполнено на основе теоретического анализа величины температурного дрейфа усилителя. Для усилителей, примененных в САР ТС, в результате такого анализа получено следующее выражение для полного приращения выходного сигнала вследствие изменения параметров транзистора

$$\Delta I_{\text{вых}} = \frac{\beta}{1 + \beta \gamma_{\delta}} \left[\frac{\Delta I_{\text{ко}}}{\alpha} - \frac{\Delta U_{\text{эб}}}{R_3 + R_6} - (I_{\text{ко}} \cdot R_6 - U_{\text{эб}}) \cdot \frac{\Delta \beta}{\beta(1 + \beta) \cdot R_3 + \beta \cdot R_6} \right] + \frac{\beta}{1 + \beta \gamma_{\delta}} \cdot \frac{\Delta \beta}{\beta(1 + \beta) \cdot R_3 + \beta \cdot R_6} \cdot U_{\text{вх}}, \quad (3)$$

где β , α , $I_{\text{ко}}$, $U_{\text{эб}}$ - параметры транзистора;
 $\Delta \beta$, $\Delta I_{\text{ко}}$, $\Delta U_{\text{эб}}$ - приращения параметров транзистора;
 R_3 , R_6 - сопротивления схемы усилителя;
 $\gamma_{\delta} = \frac{R_3}{R_3 + R_6}$ - коэффициент токораспределения.

В работе описаны механизм и условия взаимной компенсации температурных дрейфов и приведены результаты расчетов, выполненные с целью достижения практически полной взаимной компенсации дрейфов характеристик усилителей. Теоретические положения с достаточной точностью подтверждены результатами климатических испытаний макетных образцов САР ТС в диапазоне изменения температуры окружающей среды от -50°C до $+60^{\circ}\text{C}$.

Рассмотрен вопрос стабильности характеристик системы при

работе каналов г.о.с., не содержащих усилителей.

Питание большей части устройств САР ТС производится постоянным стабилизированным или переменным синфазным с напряжением сети стабилизированным по среднему за полупериод значению напряжением. Работоспособность системы и стабильность ее характеристик в значительной степени зависят от качества этих напряжений.

В работе выполнено сравнение технико-эксплуатационных свойств маломощных стабилизаторов постоянного и переменного напряжения, выполненных по различным принципам, и приведены результаты теоретического и экспериментального исследований двух из них. Наиболее полно удовлетворяет всем поставленным требованиям источник переменного стабилизированного напряжения прямоугольной формы, составленный из компенсационного транзисторного стабилизатора последовательного типа и специально разработанного ведомого транзисторного инвертора. Выведены расчетные соотношения, позволяющие выбрать параметры источника питания.

В III главе проводится исследование погрешностей измерения тормозной силы с помощью РУ, что вызвано необходимостью обеспечения заданной точности регулирования и связано с оптимальным выбором параметров схемы РУ с точки зрения его габаритов и стоимости.

Метод измерения с помощью РУ, являясь косвенным, сопровождается рядом погрешностей, которые в соответствии с общепринятой классификацией могут быть разделены по своему происхождению на две основные группы: методические и инструментальные. Первые из них определяются принятым методом измерения, вторые - реализуемыми техническими средствами.

Методическая погрешность в рассматриваемом случае обуслов-

лена, в основном, разностью между истинной тормозной силой, реализуемой на ободу движущей колесной пары, и электромагнитной тормозной силой, соответствующей электромагнитному моменту вращения двигателя. Получено аналитическое выражение, позволяющее рассчитать эту погрешность, пользуясь электромеханическими характеристиками ТД. Установлено, что величина ее меняется незначительно в пределах рабочей части характеристики ТД, что позволяет легко учесть эту погрешность при настройке САР ТС.

Инструментальная погрешность РУ, являющаяся ошибкой перемножения сигналов $I_{дт\lambda}$ и $U_{фп}$, вызывается нелинейностью выходного напряжения ГПН $U_{гпн}$ и отклонением статических и динамических характеристик транзисторного ключа РУ от идеальных. Составляющую суммарной инструментальной погрешности, обусловленную любым из перечисленных факторов, назовем частичной погрешностью.

Частичная погрешность, обусловленная нелинейностью пилообразного напряжения $U_{гпн}$, определяется видом временной зависимости напряжения U_c на формирующем конденсаторе C_r схемы ГПН (рис.3). Показано, что в пределах полупериода (π/ω) питаю-

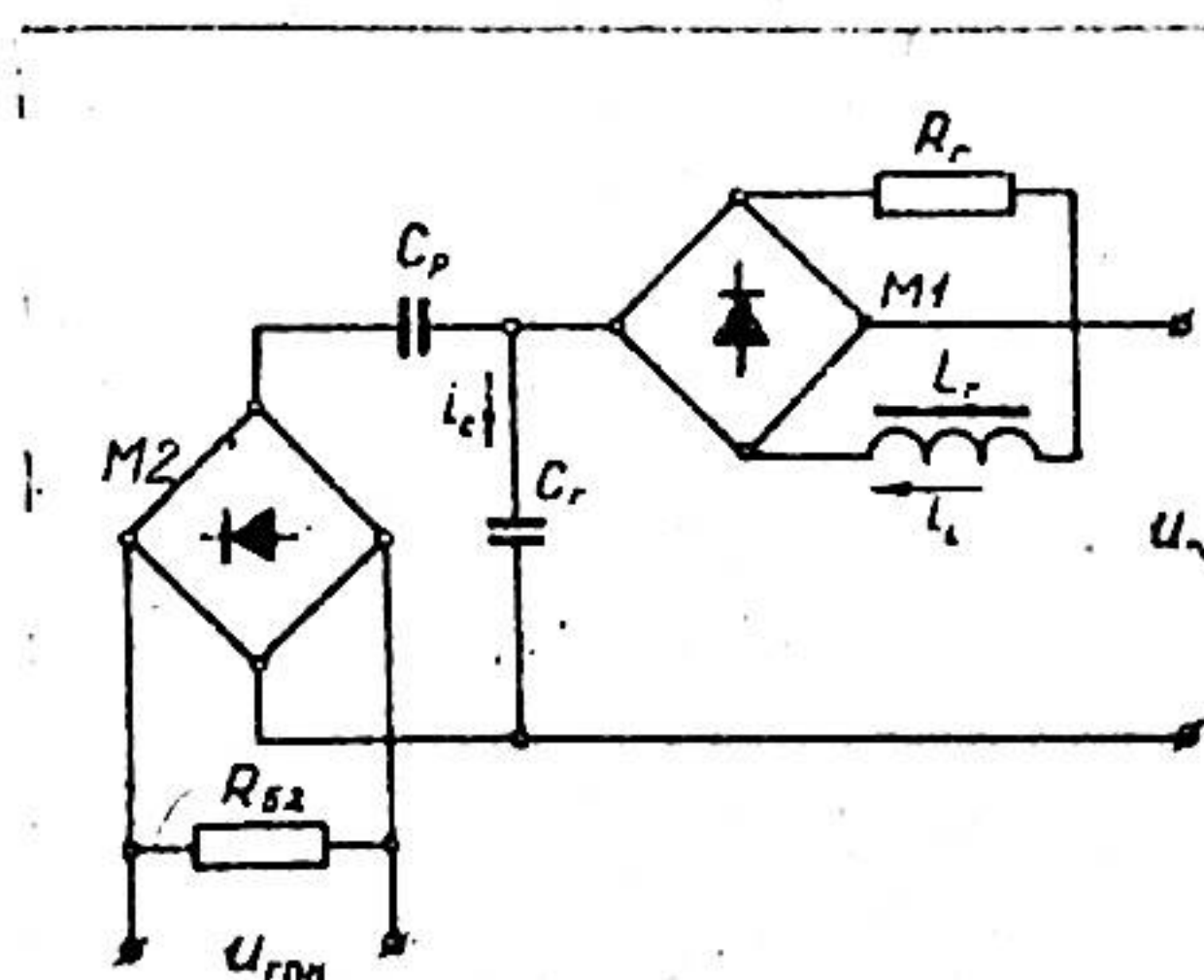


Рис. 3

щего напряжения при различных вариантах граничных значений параметров схемы ГПН эта зависимость определяется выражениями:

а) при $L_r = \infty$ и $R_{с2} = \infty$

$$U_c = \frac{U_{см} \cdot 2\omega}{\pi} \cdot t - U_{см}, \quad (4)$$

где $U_{см} = \frac{U_m \cdot \pi}{2 \cdot R_r \cdot C_r \cdot \omega}$;

б) при $R_{с2} = \infty$ и $L_r \neq \infty$

$$U_c = \frac{B}{C_r(\alpha^2 + \beta^2)} \cdot e^{\alpha t} [\beta \cdot \sin(\beta t + \varphi) + \alpha \cdot \cos(\beta t + \varphi)] - \frac{B}{C_r(\alpha^2 + \beta^2)} \cdot (\beta \cdot \sin \varphi + \alpha \cdot \cos \varphi) + U_c(0), \quad (5)$$

где α и β - коэффициенты, зависящие от параметров R_r , L_r , C_r ;

B , φ и $U_c(0)$ - постоянные интегрирования, определяемые из начальных условий на рассматриваемом интервале времени π/ω ;

в) при $L_r = \infty$ и $R_{с2} \neq \infty$

$$U_c = \frac{U_{см} \cdot \omega}{\pi \cdot R_{с2} \cdot C_r} \cdot \left[(2R_{с2} \cdot C_r + \frac{\pi}{\omega}) \cdot t - t^2 \right] - U_{см}. \quad (3)$$

Общий анализ зависимости рассматриваемой частичной погрешности РУ от параметров схемы ГПН выполнен на основе уравнений (4) + (6) с помощью ЭЦВМ "Наири". При этом обоснованный в работе метод позволил выполнить строгое исследование электрической цепи с вентилями по схеме рис.3 без применения громоздкого математического аппарата и трудоемких вычислений, присущих извест-

ным методам анализа вентильных цепей.

В результате вычислений на ЭЦВМ установлена зависимость частичной погрешности, обусловленной нелинейностью напряжения $U_{гпн}$, от параметров схемы ГПН и величин входных сигналов $U_{фп}$ и $I_{дтя}$. Выражение, найденное для максимального относительного значения этой погрешности, имеет вид

$$\delta U_{(гпн)} = - \left(\frac{1,7}{L_{г} \cdot C_{г}} + \frac{4,9}{(R_{г2} \cdot C_{г})^2} \right) \cdot 10^{-5} \quad (7)$$

Для определения частичной погрешности РУ, обусловленной отклонениями динамических свойств транзистора РУ от идеальных, исследованы переходные процессы при его переключениях под воздействием напряжений $U_{гпн}$ и $U_{фп}$. Конечное выражение для относительного значения искомой погрешности имеет вид

$$\delta U_{(кл')} = 105 \cdot (t_z + 0,5 \cdot t_+ - t_p - 0,5 \cdot t_-) \quad (8)$$

где t_z , t_+ , t_p и t_- - длительности фаз переключения транзистора, определяемые из трансцендентных уравнений вида

$$e^{-\frac{t}{T}} = p t + q \quad (9)$$

T - время жизни носителей заряда в базе транзистора;

p и q - постоянные для каждой длительности коэффициенты, зависящие от параметров схемы РУ и триода.

Для удобства использования полученных результатов при проектировочных расчетах значения погрешности $\delta U_{(кл')}$ для различных типов транзисторов в схеме РУ получены в виде таблиц и графиков.

На основе выполненного анализа найдены зависимости суммар-

ной инструментальной погрешности РУ от параметров его схемы и величин входных сигналов. Максимальное относительное значение этой погрешности определяется выражением

$$\delta U_{ру} = \frac{0,04}{\delta_1} \cdot (7,5 \delta_1 - \delta_2 + 1,05 \delta_3)^2 - 1,25 \delta_1 + \delta_2 + \delta_4 \quad (10)$$

где $\delta_1 = \delta U_{(гпн)}$; $\delta_2 = - \frac{I_{кз}}{I_{дтям}}$;

$$\delta_3 = 1,05 \cdot \frac{r_{к нас}}{R_{н}}; \delta_4 = \delta U_{(кл')};$$

$r_{к нас}$ - сопротивление коллектора триода в насыщенном состоянии;

$I_{кз}$ - ток коллектора закрытого транзистора.

Результаты контрольно-наладочных испытаний макетного образца блока регулирования тормозной силы показали качественное соответствие экспериментальных характеристик РУ теоретически обоснованным с учетом инструментальной погрешности.

Инструментальная погрешность РУ, выполненного по приведенной схеме может не превышать десятых долей процента. Вместе с тем она может быть и довольно значительной (до нескольких десятков процентов), если параметры РУ выбраны без учета требований, вытекающих из полученных зависимостей. Так, погрешность РУ параметрами, первоначально принятыми в САР ТС электровоза ВМ80Т выпуска 1969 года, составляет величину порядка 5%. Оптимизация параметров РУ в принятых габаритах его выполнения позволяет снизить эту погрешность до 0,2%.

В IV главе приведены методика расчета тормозных характеристик электровоза, оборудованного САР ТС, и результаты экспериментального исследования системы в статических режимах.

На стадии проектирования САР ТС возникает необходимость расчетно-теоретического определения формы статических тормозных характеристик замкнутой системы на основе реальных или заданных характеристик составляющих ее функциональных блоков. Это дает возможность проверить правильность заложенных при разработке системы принципов и помогает определить направления деформации характеристик отдельных звеньев системы при настройке ее с целью получения наиболее приемлемых тормозных характеристик автоматического реостатного тормоза.

Многоконтурность и нелинейность структуры исследуемой системы обусловили применение графо-аналитического метода расчета по принципу последовательных приближений. Существенное упрощение расчета было достигнуто линеаризацией на отдельных участках части нелинейных зависимостей и применением обхода цепи регулирования в направлении, обратном прохождению сигнала, обеспечивающем достаточную точность расчетного результата практически при первом же приближении.

Приведены алгоритмы для расчета тормозных характеристик режимов остановочного торможения и стабилизации скорости на спуске. Так как в каждом из этих режимов система имеет несколько зон регулирования, каждой из которых соответствует отличная от других структура системы, то количество алгоритмов расчета соответствует числу зон регулирования.

Пример расчета выполнен для физической модели САР ТС, что позволяет наилучшим образом оценить эффективность предлагаемой методики расчета и получить исходные данные для расчета. Снятые экспериментально на физической модели тормозные характеристики практически совпали с соответствующими расчетными.

Оценка точности работы реальных звеньев, составляющих систему, и влияния каждого из них в отдельности на качество тормозных характеристик выполнена на основе сопоставления ряда различных экспериментальных характеристик, снятых в физической модели САР ТС. Все элементы исследуемой системы работают достаточно точно.

Экспериментальные исследования, выполненные на физической модели системы, а также промышленные и эксплуатационные испытания электровозов ВЛ80Т опытной партии выпуска 1969 года свидетельствуют о том, что система может формировать тормозные характеристики, близкие к идеальным, и обеспечивает режимы: остановочного торможения с тормозной силой, определяемой естественными ограничениями; стабилизации скорости на спуске с точностью ± 2 км/час; предварительного торможения с малой тормозной силой, не зависящей от скорости. На рис. 4 приведены экспериментальные тормозные характеристики режима остановочного торможения, снятые в физической модели системы при различных положениях задатчика тормозной силы.

В У главе на основе исследования устойчивости САР ТС излагается методика определения допустимых границ изменения некоторых параметров системы, от значений которых зависят одновременно качество статических тормозных характеристик, устойчивость и качество переходных процессов в САР ТС, включая быстроедействие системы, влияющее в конечном счете на характер переходного процесса в системе электровоз-состав при входе в торможение.

Анализ устойчивости выполнен для наиболее важного практически режима регулирования постоянства тормозной силы. В этом режиме система имеет самую сложную структуру при меняющихся пара-

метрах, причем возможна работа ТД в начальной ненасыщенной части его нагрузочной характеристики, что ведет к увеличению коэффициента усиления разомкнутой системы и ухудшению ее устойчивости. Указанный режим является лимитирующим при обеспечении устойчивости системы.

Исходные для анализа устойчивости дифференциальные уравнения, описывающие объект регулирования - тяговый двигатель, учитывают насыщение магнитной системы ТД, размагничивающее действие реакции якоря, вихревые токи в магнитопроводе и потоки рассеяния:

$$\left. \begin{aligned} u_B &= i_B (r_B + 2\rho) + 2\rho \cdot \sigma \cdot \omega_{\Gamma\Pi} \cdot \frac{d\Phi}{dt}; \\ F_D &= i_M \cdot \omega_{\Gamma\Pi} - i_A \cdot \omega_P; \\ F_D &= f(\Phi); \\ i_M &= i_B - i_K; \\ i_K &= \frac{1}{r_K} \cdot 2\rho \cdot \omega_{\Gamma\Pi} \cdot \frac{d\Phi}{dt}; \\ C_e \cdot \Phi \cdot n &= i_A \cdot \sum r_A + L_A \cdot \frac{di_A}{dt}, \end{aligned} \right\} \quad (II)$$

где u_B - выходное напряжение холостого хода управляемого возбудителя;

r_B - сопротивление цепи обмоток возбуждения;

r_K - сопротивление эквивалентного контура вихревых токов;

ρ - дифференциальное сопротивление вентильного плеча управляемого мостового выпрямителя-возбудителя;

p - число пар полюсов ТД;

σ - коэффициент рассеяния главных полюсов;

- F_D - намагничивающая сила на полюс;
 $\omega_{\Gamma\Pi}$ - число витков обмотки главного полюса;
 ω_P - эквивалентные размагничивающие витки реакции якоря;
 i_B - ток цепи обмоток возбуждения;
 i_M - намагничивающий ток возбуждения;
 i_K - ток эквивалентного контура вихревых токов;
 i_A - тормозной ток (ток якоря);
 C_e - коэффициент пропорциональности;
 $\sum r_A$ - суммарное активное сопротивление цепи якоря ТД;
 L_A - индуктивность цепи якоря.

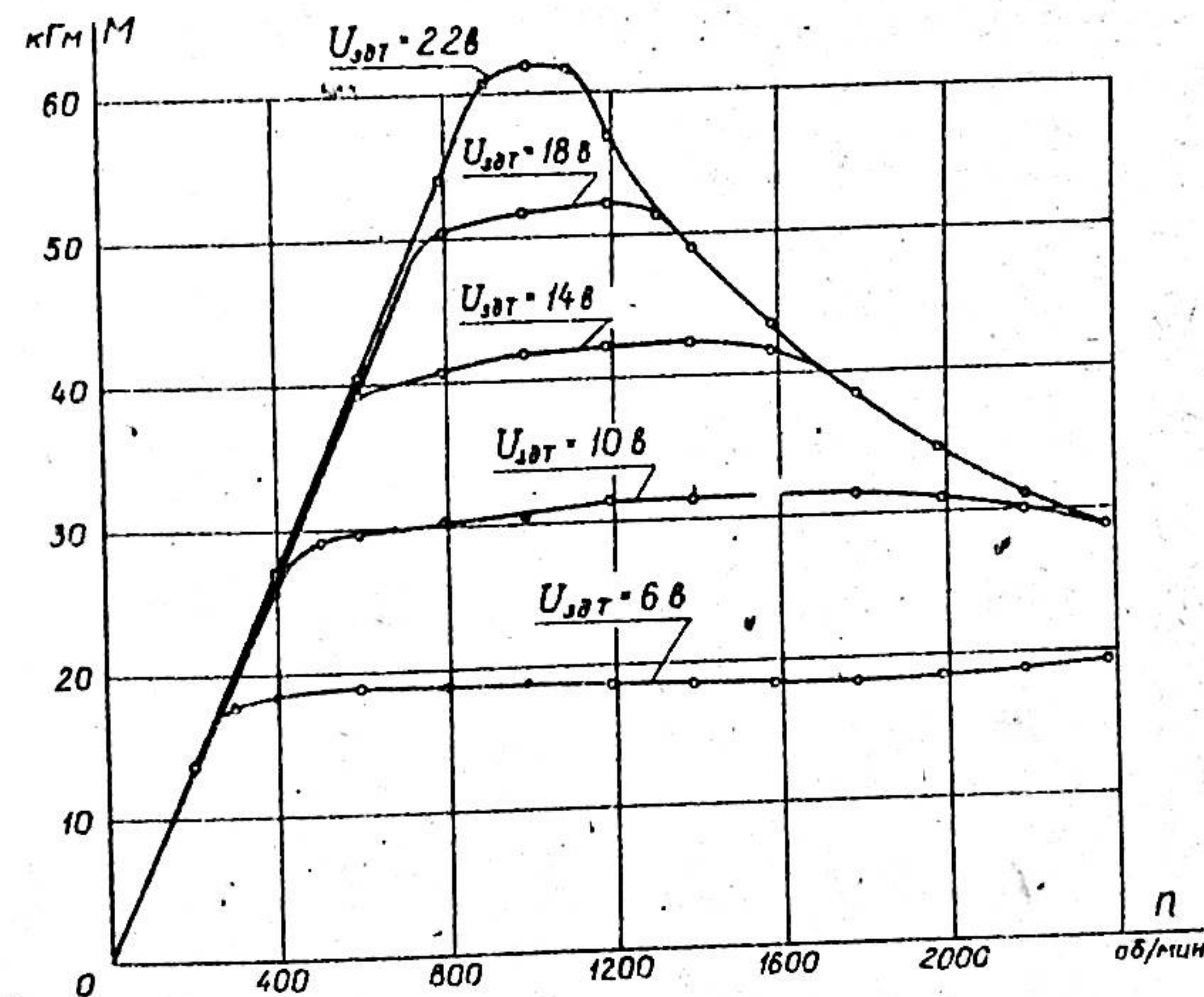


Рис. 4

Уравнения (II) записаны для неизменной скорости вращения ТД. При анализе устойчивости САР ТС такое допущение не искажает реально существующих связей, так как постоянная времени механических колебаний системы, представляющей собой сцепленный с составом электровоз, значительно больше периода колебаний в исследуемой системе автоматического регулирования.

Для всех остальных звеньев САР ТС, в совокупности представляющих собой регулятор, вывод уравнений, связывающих между собой переменные величины в переходных режимах, выполнен на основе общих методов теории электромагнитных цепей.

Вывод общих выражений для передаточных функций звеньев системы выполнен в относительных единицах. Построенная на основе этих выражений структурная схема системы (рис.5) позволяет анализировать поведение системы при больших отклонениях переменных величин от установившихся значений и исследовать устойчивость системы в малом; она одинаково пригодна для аналитического, графо-аналитического и машинного исследования переходных процессов и устойчивости системы.

Схема учитывает практически все влияющие на динамику системы параметры. В частных случаях пренебрежение каким-либо из параметров упрощает схему. Например, применение на электровозе компенсированных тяговых двигателей позволяет исключить коэффициент размагничивания реакции якоря Γ_p , а пренебрежение действием вихревых токов — постоянную времени T_k (см. рис.5).

В пределах известных ограничений, определяющих рассматриваемый режим, исследуемая САР ТС содержит лишь непрерывные гладкие нелинейности. Это дает возможность судить о ее работоспособности в целом по результатам исследования устойчивости в ма-

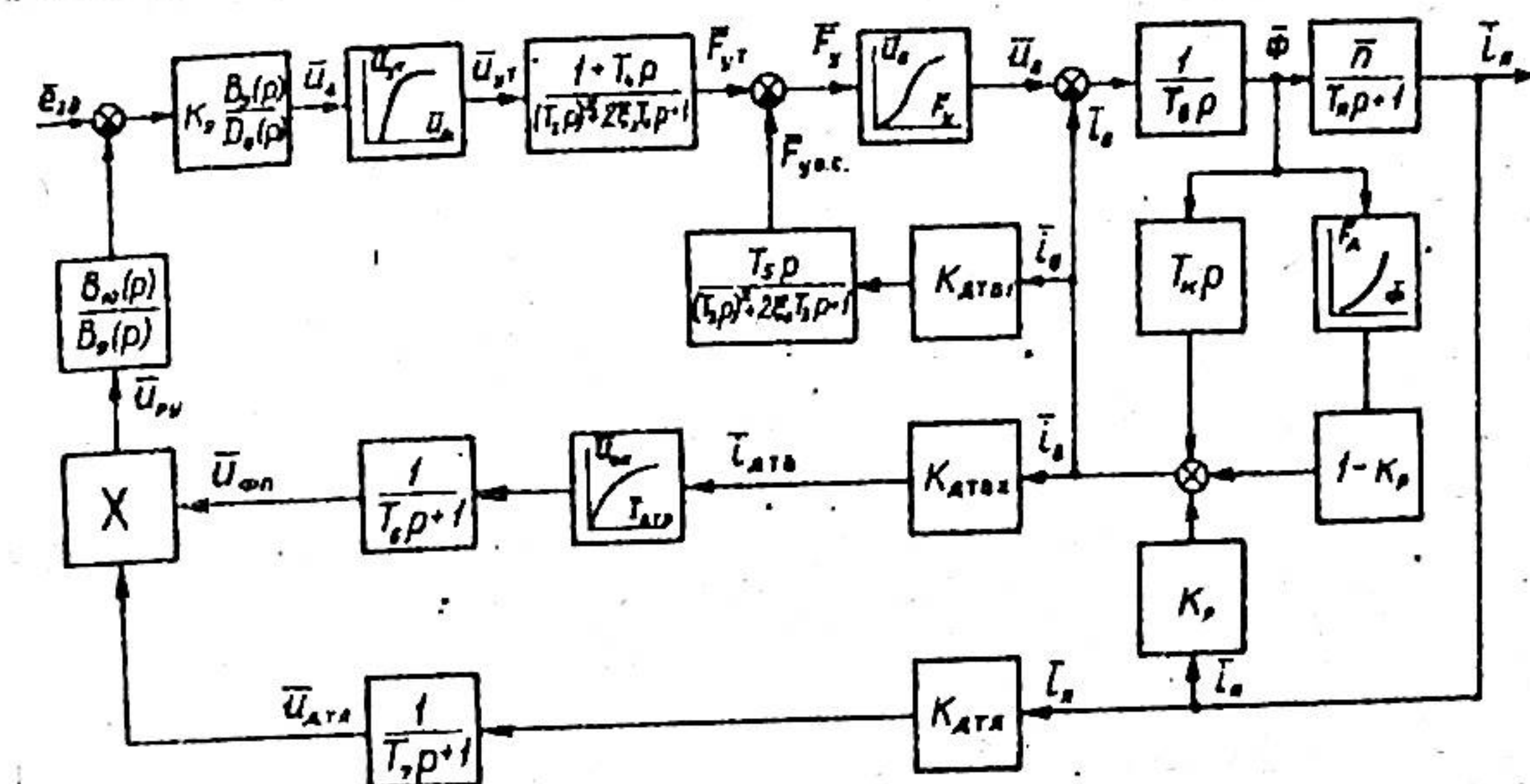


Рис. 5

лом в окрестностях нескольких определенным образом выбранных точек. При этом могут быть использованы линейные методы анализа.

Устойчивость физической модели системы исследована в трех ее рабочих точках, одна из которых по очевидным причинам является лимитирующей для системы, то есть обладает наименьшим запасом устойчивости. Остальные точки выбраны так, чтобы можно было проследить изменение запаса устойчивости системы при изменении скорости вращения двигателя и величины стабилизируемой тормозной силы и таким образом убедиться в невозможности существования режима, характеризующегося меньшим запасом устойчивости.

Передаточная функция линеаризованной разомкнутой системы

имеет вид

$$W_p(p) = \frac{K(p)}{D(p)}, \quad (12)$$

где $K(p)$ - полином 5-ой степени от "p";

$D(p)$ - полином 8-ой степени от "p".

Использование критерия Найквиста в его инверсной форме позволило определить для каждого исследуемого случая предельный коэффициент усиления разомкнутой системы и оценить качество системы в переходных режимах. В рабочей точке с наименьшим запасом устойчивости коэффициент усиления системы удовлетворяет требованиям как статической точности регулирования, так и качества переходных процессов в системе.

Качество переходных процессов исследуемой системы и ее быстродействие в значительной мере определяются параметрами корректирующего звена - элемента местной гибкой обратной связи по току возмущения ТД. Задача определения допустимых пределов изменения параметров стабилизирующей обратной связи решена методом D-разбиения Наймарка.

Получено общее выражение для границы D-разбиения в комплексной плоскости обобщенного параметра цепи обратной связи. Построением границы D-разбиения для лимитирующей по условиям устойчивости рабочей точки физической модели САР ТС установлены пределы изменения обобщенного параметра корректирующего звена. Осциллограммы переходных процессов, снятые в схеме физической модели САР ТС, свидетельствуют о достаточной точности аналитического определения границы устойчивости системы.

Приведены осциллограммы переходных процессов в системе для

различных режимов торможения электровоза ВЛ80Т-623, оборудованного исследуемой САР ТС. Осциллограммы сняты в процессе промышленных испытаний электровоза с участием автора и свидетельствуют о вполне приемлемом качестве системы в переходных режимах.

Полученные в У главе соотношения позволяют расчетно-теоретическими методами определить границы устойчивости системы в любом из ее режимов работы. Исследованный режим является наиболее сложным по структуре. Структурная схема системы в любом другом режиме может быть получена путем существенного упрощения схемы рис.5. Характеристический полином системы при этом будет не выше 4-го порядка. Экспериментальными исследованиями системы установлено, что во всех указанных режимах может быть достигнуто лучшее качество переходных процессов в системе, чем в теоретически исследованном режиме.

Основные результаты и выводы

1. Электрический реостатный тормоз магистральных электровозов переменного тока, повышающий безопасность движения и обеспечивающий возможность увеличения скоростей движения железнодорожных составов, может быть достаточно эффективным лишь при условии автоматизации его во всех режимах торможения.

2. В условиях неуклонного повышения мощности силового электрооборудования электровозов одним из наиболее важных ограничений тормозного режима при реостатном торможении становится ограничение по условиям сцепления движущих колес с рельсами.

Наилучшее выполнение этого ограничения в максимально широком диапазоне скоростей движения возможно при построении системы автоматического регулирования тормозной силы (САР ТС) по принципу сравнения сигналов, пропорциональных истинному и заданному значениям тормозной силы.

3. В качестве сигнала истинного значения тормозной силы для использования в системах регулирования на ЭПС может быть использована величина, пропорциональная электромагнитному моменту вращения ТД. Датчиком тормозной силы при этом может служить разработанное с участием автора и исследованное в реферируемой работе электронное решающее устройство сравнительно простого исполнения, позволяющее измерять текущее значение электромагнитного момента вращения ТД с погрешностью, не превышающей 1%.

4. При эксплуатации электронных устройств на ЭПС важное значение приобретают вопросы обеспечения стабильности их характеристик и работоспособности в условиях широкого диапазона колебаний температуры окружающей среды. Построение исследуемой САР ТС и составляющих ее элементов подчинено требованию максимальной стабильности тормозных характеристик. Теоретические и экспериментальные исследования показывают возможность практически полной взаимной компенсации температурных отклонений характеристик отдельных элементов системы в диапазоне изменения температуры окружающей среды от -50°C до $+60^{\circ}\text{C}$.

5. Исследованный в реферируемой работе маломощный источник питания устройств САР ТС переменным стабилизированным напряже-

нием прямоугольной формы, построенный на базе ведомого транзисторного инвертора и компенсационного стабилизатора, более чем другие известные стабилизированные источники питания отвечает предъявляемым к нему требованиям.

6. Обоснован метод теоретического анализа, позволяющий выполнить с помощью ЭЦВМ точное количественное исследование процессов в электрической цепи с вентилями, включенной на периодически изменяющееся напряжение, без применения громоздкого математического аппарата. Метод успешно использован при анализе погрешностей электронного решающего устройства.

7. Теоретически обоснован и проверен на практике метод расчета статических характеристик многоконтурной САР с многозонным регулированием и наличием зон одновременной параллельной работы нескольких каналов регулирования. Точность расчета вполне удовлетворяет практическим требованиям.

8. Экспериментальные исследования, выполненные на физической модели САР ТС и в процессе испытаний электровозов ВЛ80Т, оборудованных исследуемой САР ТС, показали, что система обеспечивает с заданными характеристиками следующие режимы работы электровоза:

- остановочное торможение при регулировании тормозной силы по всем ограничениям, обусловленным предельными режимами работы тормозного электрооборудования и условиями сцепления движущих колес с рельсами;

- разгон по спуску до заданной скорости движения либо сбивание скорости до заданной с последующей стабилизацией ее в обоих случаях;

- предварительное сжатие состава перед остановочным торможением с незначительной тормозной силой, не зависящей от скорости;

- автоматическая защита тормозного оборудования от перегрузок и опасных режимов;

- полуавтоматическое управление торможением, характеризующееся возможностью ручного регулирования тормозной силы в границах предельной тормозной области.

9. Используемая методика теоретического исследования устойчивости САР ТС позволяет определить допустимые границы изменения основных параметров системы, определяющих ее статические и динамические свойства, с погрешностью, не превышающей $10 + 15\%$, а также оценить качество системы в переходных режимах.

10. Результаты теоретического анализа устойчивости исследуемой САР ТС достаточно точно подтверждаются экспериментальными данными, полученными на физической модели системы и в процессе испытаний электровоза ВЛ80Т, и свидетельствуют о возможности устойчивой работы системы в широком диапазоне изменения ее параметров. Этим обеспечивается применение САР ТС на различных видах электроподвижного состава.

Результаты работы использованы при постройке Норочеркасским электровозостроительным заводом опытной партии магистральных электровозов ВЛ80Т выпуска 1969 года, оборудованных автоматическим реостатным тормозом. Эти электровозы прошли промышленные и эксплуатационные испытания и успешно эксплуатируются на

участках Северо-Кавказской и Восточно-Сибирской железных дорог. С 1971 года завод приступил к серийному выпуску электровозов ВЛ80Т.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Тулупов В.Д., Борисов Б.Д. Совершенствование реостатного тормоза выпрямительных электровозов. "Доклады научно-технической конференции по итогам НИР за 1968-1969 годы. Подсекция электрического транспорта". М., МЭИ, 1969.

2. Тулупов В.Д., Борисов Б.Д. Устройство для плавного автоматического регулирования тормозной силы электроподвижного состава. Авторское свидетельство № 281525 от 16.01.69. Бюллетень изобретений № 29, 1970.

3. Тулупов В.Д., Попов В.И., Свердлов В.Я., Борисов Б.Д., Бабин А.С., Воробьев В.П. Автоматический реостатный тормоз электровозов ВЛ80Т. "Электрическая и тепловозная тяга", 1971, № 4.

4. Борисов Б.Д. Исследование устойчивости системы автоматического регулирования реостатного тормоза электровоза переменного тока. Труды Московского энергетического института. Вып. 88, 1971.