

СССР — МПС

Днепропетровский институт инженеров железнодорожного
транспорта

На правах рукописи

КРАСИЛЬНИКОВ Владимир Никитович

629.423.3 621.3.024

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ
ТИРИСТОРНО-ИМПУЛЬСНОГО УПРАВЛЕНИЯ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ТОРМОЖЕНИЕМ ТЯГОВЫХ
ДВИГАТЕЛЕЙ МАНЕВРОВЫХ И ПРОМЫШЛЕННЫХ
ЭЛЕКТРОВЗОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Специальность № 05.22.09

Электрификация железнодорожного
транспорта

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Днепропетровск
1974

НТБ
ДНУЖТ

Работа выполнена в Днепропетровском институте инженеров железнодорожного транспорта.

Научный руководитель — кандидат технических наук,
доцент Н.Г. В И С И Н

Официальные оппоненты:

Заслуженный деятель науки и техники Украинской ССР,
доктор технических наук, профессор С.А. ВОЛОТКОВСКИЙ,
кандидат технических наук, доцент Б.П. ПЕТРОВ.

Ведущее предприятие — Днепропетровский электровозостроительный завод.

Автореферат разослан *"15"* марта 1974г.

Защита диссертации состоится *18* апреля 1974г. на заседании Ученого Совета Днепропетровского института инженеров железнодорожного транспорта.

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью учреждения, просим направлять по адресу: 320629 ГПС, г. Днепропетровск, 10, ул. Университетская, 2, ДИИТ, Ученому секретарю Совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Ученый секретарь совета ДИИТа
канд. хим. наук, доцент

В.Н. ПЛАХОТНИК

НТБ
ДНУЖТ

СССР - МПС

Днепропетровский институт инженеров железнодорожного
транспорта

=====

На правах рукописи

КРАСИЛЬНИКОВ Владимир Никитович

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ
ТИРИСТОРНО-ИМПУЛЬСНОГО УПРАВЛЕНИЯ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ТОРМОЖЕНИЕМ ТЯГОВЫХ
ДВИГАТЕЛЕЙ МАНЕВРОВЫХ И ПРОМЫШЛЕННЫХ
ЭЛЕКТРОВЗОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Специальность № 05.22.09

Электрификация железнодорожного
транспорта

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Днепропетровск
1974

НАУКОВО-ТЕХНІЧНА БІБЛІОТЕКА

Дніпропетровського навукового центру

НТБ
ДНУЖТ

6848a

В В Е Д Е Н И Е

В решениях XXIV съезда КПСС по пятилетнему плану развития народного хозяйства СССР на 1971-1975 гг. предусмотрено дальнейшее развитие железнодорожного транспорта, внедрение прогрессивных видов тяги на маневровой работе с доведением их удельного веса до 80 - 82%. В связи с большими масштабами электрификации железных дорог в нашей стране важное значение приобретают вопросы совершенствования электрического подвижного состава (ЭПС).

Одним из направлений технического развития ЭПС постоянного тока является применение тиристорно-импульсного регулирования напряжения тяговых двигателей в режимах тяги и электрического торможения, обеспечивающее существенную экономию электрической энергии на тягу поездов. Быстрое развитие мощных тиристорных прерывателей тока открыло новые возможности для создания замкнутых систем автоматического управления, новых систем защиты, позволило осуществить рекуперативное торможение в широком диапазоне скоростей движения.

Особенно перспективным направлением является применение тиристорно - импульсных прерывателей тока, например, на маневровых контактно - аккумуляторных электровозах постоянного тока с относительно невысокими скоростями движения, где кроме повышения общих тяговых свойств всегда имеется приёмник энергии при рекуперации - тяговая аккумуляторная батарея. Импульсное рекуперативное торможение, осуществляемое при включении тиристорного прерывателя тока параллельно цепи тяговых двигателей после-

НТБ
ДНУЖТ

довательного возбуждения, работающих в генераторном режиме, и приёмнику энергии позволяет улучшить зарядно - разрядный баланс тяговой аккумуляторной батареи и при неизменной ёмкости аккумуляторов увеличить радиус действия электровоза в автономном режиме.

Существенный технико-экономический эффект даёт применение следящего рекуперативно-реостатного торможения промышленных электровозов постоянного тока, работающих на открытых горных разработках. Рекуперативное торможение здесь используется для подтормаживания поезда на спусках и снижения скорости при технологических или других возможных остановках. При этом повышается безопасность движения поездов, достигается экономия эксплуатационных расходов по смене тормозных колодок, осмотру и ремонту тормозной системы и бандажей.

Актуальность проблемы создания электроподвижного состава постоянного тока с тиристорно-импульсным управлением подтверждается многими работами ведущих исследователей нашей страны и за рубежом. Во многих вузах и научно-исследовательских институтах ведутся интенсивные разработки по внедрению систем тиристорно-импульсного управления, созданы опытные образцы ЭПС для железнодорожного и городского транспорта с применением тиристорных прерывателей тока в режимах пуска и электрического торможения.

Разработка и создание систем тиристорно-импульсного управления для железнодорожного и городского электроподвижного состава проводится в Московском энергетическом институте под руководством докторов технических наук И.С. ЕФРЕМОВА, В.Е. РОЗЕНФЕЛЬДА,

Л.М. ТРАХТМАНА и канд. техн. наук Б.П. ПЕТРОВА. Исследования тиристорных прерывателей тока для электроподвижного состава двойного питания ведутся в ЦНИИ МПС под руководством доктора техн. наук Б.Н. ТИХМЕНЕВА. Рижским филиалом ВНИИ вагоностроения совместно с Прибалтийской железной дорогой, Таллинским электротехническим и Рижским электромашиностроительным заводами, Томским политехническим институтом создан целый ряд электропоездов с тиристорно-импульсным управлением. Исследования тиристорно-импульсных систем управления для поездов метрополитена ведутся в МИИТе под руководством доктора техн. наук В.С. ХВОСТОВА. Разработка и внедрение систем тиристорно-импульсного управления для различного электроподвижного состава проводятся в ЛИИЖТе под руководством проф. Н.Н. СИДОРОВА, Днепропетровском горном институте под руководством доктора техн. наук С.А. ВОЛОТКОВСКОГО, в Кузбасском, Пермском политехнических и Коммунарском горно-металлургическом институтах, в ДИИТе, ВЭЛНИИ, ВНИИЖТе, НИКТИ ГХ УССР, а также в лабораториях и конструкторских бюро заводов НЭВЗ, ДЭВЗ, ТЭВЗ, "Динамо" имени С.М. КИРОВА и в ряде других организаций. За рубежом аналогичные работы ведутся в Чехословакии, ГДР, Японии, США, Франции и др.

Несмотря на широко развернутые работы по созданию электроподвижного состава постоянного тока с тиристорно-импульсным управлением, ряд вопросов, относящихся к исследованию электрического торможения маневровых и промышленных электровозов постоянного тока, в настоящее время изучен недостаточно полно. Дальнейшие исследования указанной проблемы направлены на совершенствование систем тиристорно-импульсного управления электрическим торможением ЭПС, повышение их надёжности и технико-экономических показателей.

Реферлируемая работа посвящена исследованию и разработке системы тиристорно-импульсного управления электрическим торможением тяговых двигателей маневровых контактно-аккумуляторных и промышленных электровозов постоянного тока.

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, основных выводов и предложений. Работа изложена на 138 страницах машинописного текста, содержит II таблиц, 70 рисунков, список литературы, включающий 175 наименований, и приложение.

ГЛАВА I. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СИСТЕМ ИМПУЛЬСНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ТОРМОЖЕНИЕМ ТЯГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ И ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ НА МАНЕВРОВЫХ И ПРОМЫШЛЕННЫХ ЭЛЕКТРОВОЗАХ.

Анализ особенностей различных схем импульсного управления электрическим торможением показывает, что область их применения определяется параметрами тяговых двигателей и силовой схемой, типом и назначением электроподвижного состава, ограничениями и способами расширения диапазона регулирования.

Импульсные методы регулирования электрического торможения тяговых двигателей позволяют осуществить рекуперацию энергии в широком диапазоне скоростей движения ЭПС, повысить быстродействие тормозной системы и сократить длину тормозного пути при реализации максимально допустимой величины тормозной силы.

Следящее рекуперативно-ростатное торможение обеспечивает быстрое автоматическое перераспределение энергии рекуперации тяговых двигателей между контактной сетью или тяговой

аккумуляторной батареей и тормозными реостатами при частичных или полных отказах рекуперации - уменьшении потребляемой мощности, отсутствии потребителя или отрыве токоприёмника. Применение этих схем регулирования на контактно-аккумуляторном ЭПС позволяет ограничить величину тока тяговой батареи в зависимости от степени её заряда при высоких скоростях начала рекуперативного торможения.

В данной главе даётся краткий анализ существующих схем импульсного регулирования электрического торможения тяговых двигателей при различных способах возбуждения. Для маневровых контактно - аккумуляторных электровозов постоянного тока с относительно невысокими скоростями движения более приемлемы схемы останочного рекуперативно - импульсного торможения с отдачей энергии в приёмник практически до полной остановки ЭПС. Эти же схемы импульсной рекуперации с самовозбуждением тяговых двигателей также наиболее полно отвечают требованиям, предъявляемым к промышленным электровозам постоянного тока открытых горных разработок.

В работе дан анализ ограничений и способов расширения диапазона регулирования, рассмотрены зоны и критерии электрической устойчивости импульсного регулирования электрического торможения тяговых двигателей последовательного возбуждения. В зоне скоростей торможения ниже, так называемой критической скорости, достаточно регулировать напряжение тяговых двигателей под контролем системы тиристорно-импульсного управления, а при скоростях выше критических необходимо и достаточно регулировать после возбуждения.

В работе проанализированы схемные решения тиристорно-

НГБ
ДНУИТ

-импульсного регулирования электрического торможения ЭПС постоянного тока при полном и ослабленном поле возбуждения тяговых двигателей. Приведен анализ вариантов построения схем тиристорных прерывателей тока,

Величина пульсаций тока приёмника энергии, тока и напряжения тяговых двигателей в процессе импульсного регулирования рекуперативного торможения зависит от параметров индуктивно-ёмкостного фильтра, конкретных схемных решений тиристорных прерывателей тока и системы регулирования в целом. Одним из рациональных способов уменьшения указанных пульсаций является повышение рабочей частоты переключений вентилях и многофазное исполнение тиристорных прерывателей тока. Существенным отличием многофазных схем регулирования является характер протекания электромагнитных процессов. При этом повышается рабочая частота индуктивно-ёмкостного фильтра, определяющая его вес и габариты. Достигается частичное выравнивание токов параллельно включенных групп тиристоров при реализации больших нагрузок и уменьшение скорости их нарастания.

Анализ показал, что для маневровых контактно-аккумуляторных и промышленных электровозов целесообразно применение многофазных тиристорных прерывателей тока с амплитудно-импульсным методом модуляции на первой ступени регулирования и широтно-импульсным - на второй при постоянной частоте переключения вентилях, обеспечивающих повышение рабочей частоты индуктивно - ёмкостного фильтра и уменьшение пульсаций токов тяговых двигателей и приёмника энергии.

ГЛАВА II. АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ ИМПУЛЬСНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОРМОЖЕНИЯ ТЯГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА И РАЗРАБОТКА СХЕМ.

Аналитические исследования электромагнитных процессов в импульсной системе рекуперативного торможения (рис. I) с самовозбуждением тягового двигателя при полном поле, работающего в генераторном режиме, с учетом общепринятых допущений, изложенных в диссертации, выполнены на основе разностных уравнений и дискретного преобразования Лапласа. Расчет тока тягового двигателя произведен в пределах каждого участка линеаризованной характеристики намагничивания, аппроксимация которой даёт возможность представить э.д.с. генератора следующим выражением:

$$e_{\text{я}} = c v (\Phi_0 + k i), \quad (1)$$

где v, i, c - скорость вращения, ток якоря и постоянная машины;

k - коэффициент линеаризации участка кривой намагничивания.

Закон изменения тока двигателя при записи через смещенные решетчатые функции для двух основных режимов работы системы следующий:

$$\left. \begin{aligned} i[n, \varepsilon] &= I_A + \left(\theta \frac{1 - e^{-\beta_2 n}}{1 - e^{-\beta_2}} + I_0 e^{-\beta_2 n} - I_A \right) e^{-\beta_1 a \varepsilon} \\ & \quad 0 \leq \varepsilon \leq \tau; \\ i[n, \varepsilon] &= \left[I_A + \left(\theta \frac{1 - e^{-\beta_2 n}}{1 - e^{-\beta_2}} + I_0 e^{-\beta_2 n} - I_A \right) \times \right. \\ & \quad \left. x e^{-\beta_1 a \tau} \right] e^{-\beta_2 b (\varepsilon - \tau)} + I_B (1 - e^{-\beta_2 b (\varepsilon - \tau)}); \\ & \quad \tau \leq \varepsilon \leq 1. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Здесь:

$$I_A (1 - e^{-\beta_1 \alpha T}) e^{-\beta_2 \delta (1-T)} + I_B (1 - e^{-\beta_2 \delta (1-T)}) = \theta;$$

$$\beta_1 \alpha T + \beta_2 \delta (1-T) = \beta_2; \quad 1 - \frac{c v K}{R_A} = a; \quad 1 - \frac{c v K}{R_A + R_B} = b;$$

$$\beta_1 = \frac{R_A T}{L_A}; \quad \beta_2 = \frac{(R_A + R_B) T}{L_A}; \quad I_A = \frac{c v \Phi_0}{R_A - c v K}; \quad I_B = \frac{c v \Phi_0 - E_B}{R_A + R_B - c v K}$$

$n = 0, 1, 2 \dots$ - дискретный параметр $\varepsilon \leq 1$;

T, δ - период дискретности и коэффициент импульсного заполнения.

Экстремальные значения тока двигателя квазистационарного режима определяются из уравнений огибающих, которые получаются из формул (2) при $n \rightarrow \infty$, и после подстановки значений θ равны:

$$\left. \begin{aligned} I_{\text{МАКС}} = i[\infty, \delta] &= I_A \frac{1 - e^{-\beta_1 \alpha T}}{1 - e^{-\beta_2}} + I_B \frac{1 - e^{-\beta_2 \delta (1-T)}}{1 - e^{-\beta_2}} e^{-\beta_1 \alpha T} \\ I_{\text{МИН}} = i[-\infty, 1] &= I_B \frac{1 - e^{-\beta_2 \delta (1-T)}}{1 - e^{-\beta_2}} + I_A \frac{1 - e^{-\beta_1 \alpha T}}{1 - e^{-\beta_2}} e^{-\beta_2 \delta (1-T)} \end{aligned} \right\} (3)$$

Амплитуда пульсаций тока тягового двигателя определяется как

$$\Delta I = (I_A - I_B) \left[\frac{1 - e^{-\beta_2 \delta (1-T)}}{1 - e^{-\beta_2}} (1 - e^{-\beta_1 \alpha T}) \right] \quad (4)$$

НТБ
ДНУЖТ

В работе найдены зависимости для определения средних и действующих значений токов тягового двигателя, силовых тиристорных прерывателя, тяговой аккумуляторной батареи и разделяющих диодов.

Пульсация тока двигателя характеризуется коэффициентом пульсации, который после разложения показательных функций в степенной ряд с точностью до второго члена имеет вид:

$$K_{in} = \frac{\beta_1 a \beta_2 \delta (I_A - I_B) T (1 - \gamma)}{I_A \beta_1 a T + I_B \beta_2 \delta (1 - \gamma)} \quad (5)$$

В диссертации получены аналогичные расчетные соотношения схем реостатного и рекуперативно-реостатного торможения тягового двигателя.

Исследования электромагнитных процессов импульсной рекуперации на тяговую аккумуляторную батарею с учетом влияния вихревых токов, индуцируемых в массивном магнитопроводе машины, нелинейности кривой намагничивания и реакции якоря выполнены на АВМ. Анализ способов учета влияния вихревых токов, предложенных различными авторами, позволил сделать вывод, что наиболее приемлемым на стадии проектирования является метод доктора технических наук М.З. ЖИЦА.

Сравнения осциллограмм токов тягового двигателя ДК 105Б при импульсном управлении рекуперативным торможением с возвратом энергии в тяговую аккумуляторную батарею ТБН-550, полученных на физической и математической моделях, показывает, что расхождения не превышают 10%.

НТБ
ДНУЖТ

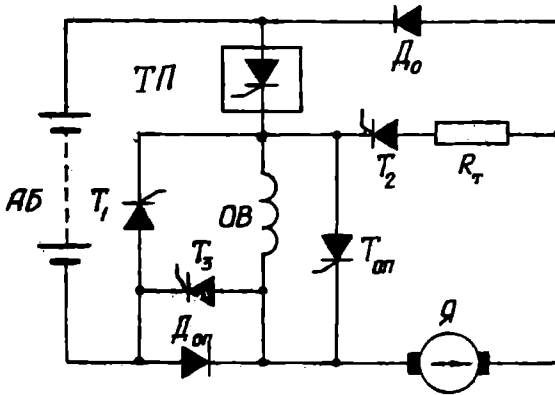


Рис. 1. Схема импульсного регулирования электрического торможения тягового двигателя аккумуляторного ЭПС

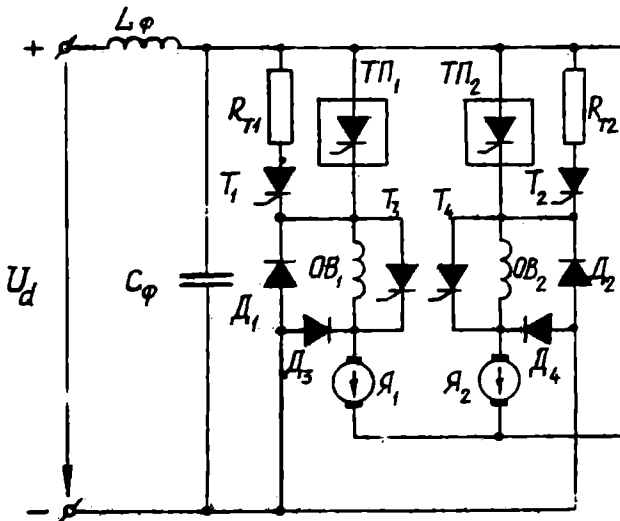


Рис. 2. Схема следящего рекуперативно-реостатного торможения двух параллельных ветвей тяговых двигателей.

ИТЬ
ДРУЖТ

В работе проведен анализ электромагнитных процессов в цепи тягового двигателя при ослаблении поля с помощью диода $D_{оп}$ (рис. I), шунтирующего обмотку возбуждения ОВ и разделяющий вентиль T_1 . Полученные зависимости позволяют рассчитать закон изменения токов возбуждения, якоря для двух основных режимов регулирования рекуперативного торможения в зоне скоростей выше критических.

Исследования режимов импульсной рекуперации показали, что для получения требуемой степени ослабления поля тяговых двигателей в зоне высоких скоростей торможения необходимо регулировать ток возбуждения в широких пределах. В простейшем случае это достигается с помощью тиристора $T_{оп}$. (Рис. I) шунтирующего обмотку возбуждения тягового двигателя, и диода $D_{оп}$. Момент отпирания указанного тиристора $T_{оп}$ сдвигается с запаздыванием во времени относительно момента отпирания силового тиристора прерывателя тока ТП. Запирание тиристора ослабления поля происходит одновременно с запираем силового тиристора прерывателя тока. При этом ток тиристора $T_{оп}$ мгновенно коммутирует на диод $D_{оп}$. Построенный на этом принципе тиристорный прерыватель тока с узлом ослабления поля совмещает функции регулятора напряжения и поля возбуждения тягового двигателя.

На основе анализа электромагнитных процессов получены зависимости, позволяющие рассчитать возможные значения токов элементов данной схемы. Степень ослабления поля возбуждения зависит от коэффициента регулирования $\lambda = t_{тон} / t_{и}$, где $t_{тон}$, $t_{и}$ - продолжительность включенного состояния тиристора ослабления поля и силового тиристора прерывателя тока. Максимальное значение коэффициента ослабления поля определяется потенциальными усло-

виями на коллекторе тягового двигателя.

В работе рассмотрены варианты схем импульсного регулирования электрического торможения тяговых двигателей последовательного возбуждения, приемлемых для маневровых и промышленных электровозов. При этом учитывались основные требования, изложенные в диссертации, определяющие надёжность электрического торможения ЭПС независимо от наличия напряжения в контактной сети.

На рис. 2 представлена схема следящего рекуперативно-реостатного торможения двух параллельных ветвей тяговых двигателей. Перераспределение энергии рекуперации тяговых двигателей между контактной сетью или тяговой аккумуляторной батареей и тормозными резисторами R_{T1} , R_{T2} достигается с помощью тиристоров T_1 , T_2 . Для этого сигналы на отпирание тиристоров T_1 , T_2 сдвигаются во времени относительно момента запираания силовых тиристоров прерывателей тока $ТП_1$, $ТП_2$. Регулирование поля возбуждения тяговых двигателей в зоне высоких скоростей торможения осуществляется с помощью тиристоров T_3 , T_4 , диодов D_3 , D_4 и соответствующих прерывателей тока $ТП_1$, $ТП_2$ ранее указанным методом.

Вариант схемы импульсного регулирования поля возбуждения тягового двигателя в режиме рекуперативного торможения с применением двухфазного тиристорного прерывателя тока представлен на рис. 3,а. Здесь узел ослабления поля выполнен в виде диода D_3 и группы тиристоров T_3 , T_4 по количеству фаз прерывателя тока, подключенных параллельно разделяющим дросселям D_{p1} , D_{p2} и серийной обмотке ОВ электродвигателя. Для регулирования тока возбуждения моменты отпирания тиристоров T_3 , T_4 узла ослабления

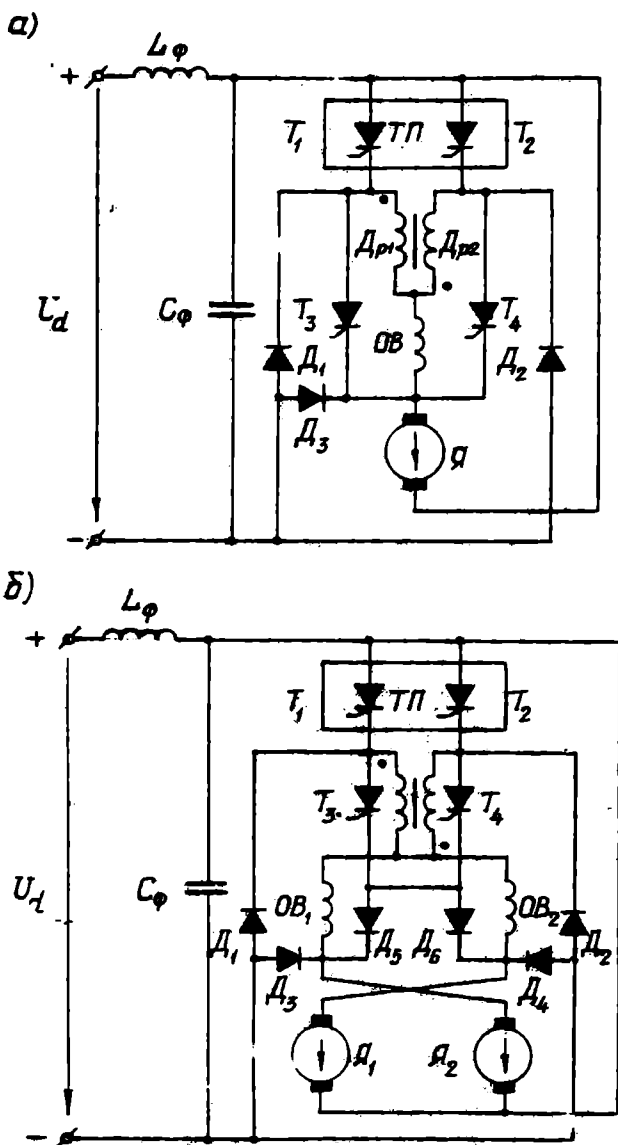


Рис. 3. Двухфазные схемы импульсного регулирования напряжения и поля возбуждения тяговых двигателей в режиме рекуперативного торможения.

поля сдвигаются во времени относительно моментов открытия соответствующих силовых тиристоров T_1, T_2 двухфазного прерывателя тока ПП.

Для двух параллельно соединенных ветвей тяговых двигателей в режиме рекуперации (рис.3,б) узел ослабления поля содержит те же тиристоры T_3, T_4 , но подключенные к серийным обмоткам и якорям через группу дополнительных диодов D_5, D_6 по количеству параллельных ветвей электродвигателей.

Отличительной особенностью схем следящего рекуперативно-реостатного торможения (рис.4) является то, что при открытии силовых тиристоров двухфазных прерывателей тока обеспечивается быстрое начальное возбуждение электродвигателей в зоне низких скоростей торможения, характерных для маневровых и промышленных электровозов. Происходит это при закрытом диоде D_0 . По мере увеличения напряжения на якорях тяговых двигателей и тормозном резисторе R_T открывается диод D_0 и схема автоматически переходит в режим рекуперативно-реостатного торможения с чередующимися циклами самовозбуждения двигателей и отдачи электромагнитной энергии в приемник.

При наличии надёжного потребителя рекуперативной энергии тормозные резисторы R_{T1}, R_{T2} второго варианта схемы (рис.4,б) отключаются с помощью дополнительного прерывателя тока ПП₀. Схема управления данного варианта должна обеспечить раздельную работу двухфазных прерывателей тока ПП₁, ПП₂ для надёжного возбуждения каждого тягового двигателя в начальной стадии торможения.

НТБ
ДНУЖТ

В работе рассмотрены особенности многофазных схем широтно-импульсного регулирования электрического торможения при раздельной работе каждого двухфазного прерывателя тока на свою ветвь тяговых двигателей (рис. 4) и параллельная работа на общую группу.

Аналитические исследования электромагнитных процессов в схемах импульсного регулирования электрического торможения с двухфазными разделяющими дросселями, обмотки которых расположены на общем магнитопроводе (рис. 3, 4), выполнены путем решения дифференциальных уравнений для характерных режимов работы. На основе ранее принятых допущений и с учетом того, что индуктивности и взаимоиндуктивности обмоток равны между собой, а величиной их активного сопротивления можно пренебречь, получены расчетные соотношения для определения пульсаций токов обмоток разделяющих дросселей и тяговых двигателей. Максимальная амплитуда пульсаций токов разделяющих дросселей при $\gamma_{\phi} = 0,5$ равна

$$\Delta I_{др. макс} = \frac{U_d T}{4L(1 + K_c)} \quad (6)$$

где $K_c = \frac{M}{L}$ - коэффициент связи магнитосвязанных обмоток двухфазного разделяющего дросселя.

Максимальные амплитуды пульсаций тока тягового двигателя для значений $\gamma_{\phi 1} = 0,25$ и $\gamma_{\phi 2} = 0,75$ равны

$$\Delta I_{дв. макс} = \frac{U_d T}{16 \left[L_d + \frac{L}{2} (1 - K_c) \right]} \quad (7)$$

НАУКОВО-ТЕХНІЧНА БІБЛІОТЕКА
Дніпропетровського національного
університету залізничного транспорту
імені академіка В. Пазаряка

68/48a

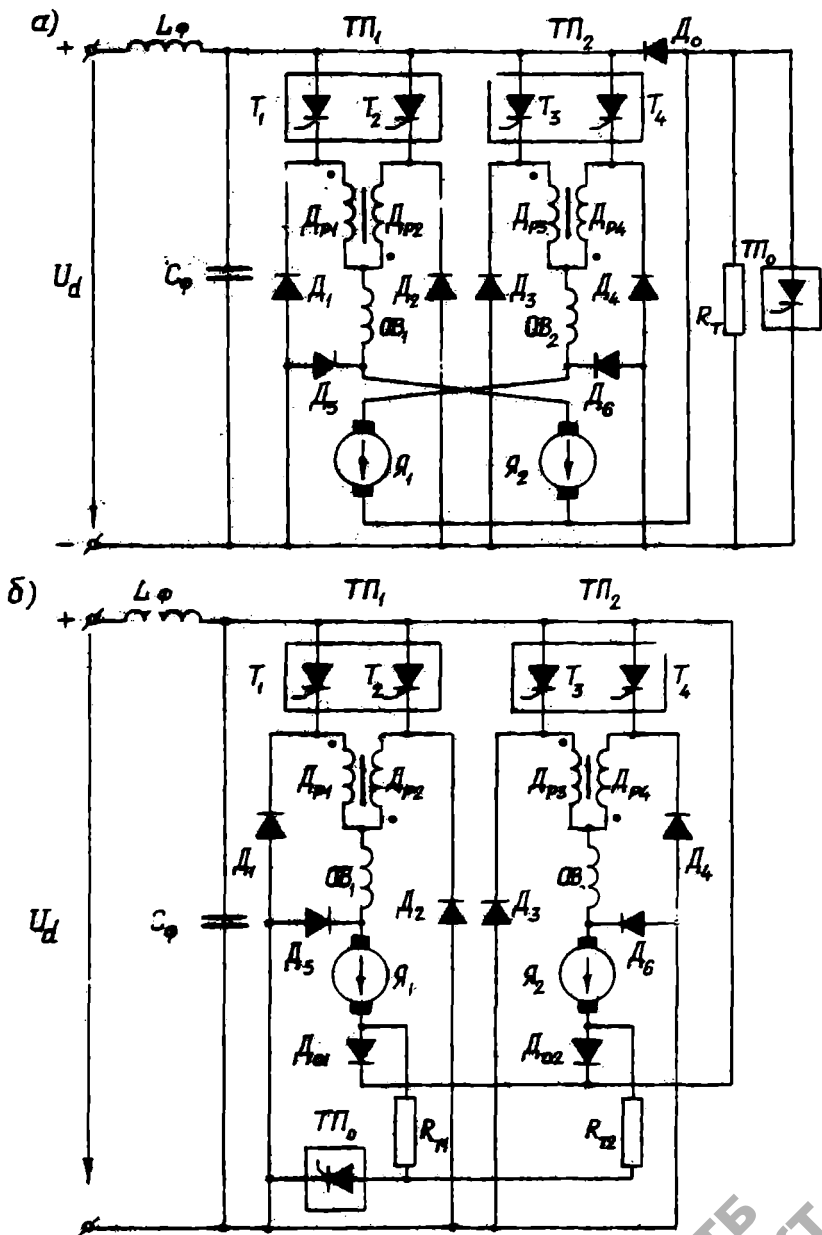


Рис. 4. Многофазные схемы импульсного регулирования рекуперативно-реостатного торможения с общим (а) и индивидуальными (б) тормозными резисторами на каждую ветвь тяговых двигателей .

Для значений коэффициента связи $K_c = 1$ амплитуды указанных пульсаций соответственно равны:

$$\Delta I_{ДР. МАКС} = \frac{U_d T}{8L} \quad (8)$$

$$\Delta I_{ДВ. МАКС} = \frac{U_d T}{16L_d} \quad (9)$$

Произведен анализ электромагнитных процессов в схемах импульсного регулирования поля возбуждения (рис.3) рекуперативного торможения тяговых двигателей в зоне высоких скоростей. Для характерных режимов регулирования поля получены расчетные соотношения, представленные в таблицах, позволяющие определить возможные значения токов элементов рассмотренных схем.

В работе проанализированы электромагнитные процессы в предложенных автором схемах следящего рекуперативно-реостатного торможения тяговых двигателей маневровых и промышленных электровозов при допущении постоянства тока контактной сети, т.е. $I_p = \text{const}$. Полученные зависимости для схем рис. 2,4 позволяют определить напряжение на конденсаторе фильтра, рассчитать его ток, а также значения токов тяговых двигателей, тормозных резисторов и выбрать величину их сопротивления.

Проанализирована начальная стадия электрического торможения тяговых двигателей рассмотренных схем в зоне низких и высоких скоростей движения ЭПС. Исследованы процессы стимулирования начального возбуждения генераторов при заряде коммутировавшихся конденсаторов прерывателей тока от контактной сети или тяговой аккумуля-

мультиотрядный батареи через цепь тяговых двигателей и тормозных реостатов. Применение двухступенчатых тиристорных прерывателей тока с амплитудно-импульсной модуляцией на первой ступени позволяет получить малые значения коэффициента импульсного заполнения при начальном возбуждении тяговых двигателей, что важно в зоне высоких скоростей торможения ЭПС (рис.4).

Многофазные схемы электрического торможения тяговых двигателей электроподвижного состава с применением двухступенчатых тиристорных прерывателей тока имеют широкий диапазон регулирования.

ГЛАВА III. РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ДИСКРЕТНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТИРИСТОРАМИ ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНЫХ ПЕРЕРЫВАТЕЛЕЙ МАНЕВРОВЫХ И ПРОМЫШЛЕННЫХ ЭЛЕКТРОВЗОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА.

В диссертационной работе разработаны принципы построения дискретных систем управления тиристорами многофазных широтно-импульсных прерывателей тока. Дискретный характер изменения коэффициента импульсного заполнения является основным недостатком данных систем управления. Однако при рациональном выборе количества ступеней по допустимой неравномерности тока тормозного режима тяговых двигателей, дискретная система управления обеспечивает строгое порядок-временное распределение импульсных последовательностей по фазам прерывателя, четкую фиксацию позиций регулирования со стабильным значением коэффициента импульсного заполнения, что особенно важно для маневровых и промышленных электровозов. Схема управления тиристорами, построен-

НТБ
ДНУЖТ

ная на дискретном принципе регулирования и выполнения на базе типовых логических элементов, нечувствительна к значительному изменению питающего напряжения, более термостабильна и менее подвержена влиянию помех.

На рис. 5 представлен вариант схемы управления тиристорами многофазного прерывателя тока. Основными узлами схемы являются: ЗГ, ГУ - задающий генератор и генератор управления; ТСИ, РСУ - тактовый счетчик импульсов и реверсивный счетчик управления; ДШ₁, ДШ₂ - дешифраторы; БАУ, КМ - блок автоматического управления и контроллер машиниста.

Двоичные счетчики импульсов ТСИ и РСУ со сквозным переносом единицы выполнены из n триггеров каждый, обеспечивающих

$$N = 2^n - 1 \quad (10)$$

позиций регулирования.

Блок автоматического управления БАУ представлен датчиками тока ДТ, напряжения ДН и скорости ДС. Каждый из датчиков через релейные элементы РЭ₁₋₆ (элементы Т-202 серии "Логика") соединен с элементами "ИЛИ-НЕ" и "ИЛИ".

Контроллер машиниста КМ имеет пять положений: нулевое (0), возврат (В), фиксация (Ф), набор (Н) позиций и автоматическое управление (А).

Единичные и нулевые выходы триггеров одного разряда счетчиков ТСИ и РСУ попарно соединены с входами логических элементов "И - ИЛИ - НЕ". Основным условием появления сигналов на выходах элементов "И - ИЛИ - НЕ" является совпадение состояний триггеров одного разряда счетчиков ТСИ и РСУ. Переключение триггеров счет-

НТБ
ДНУЖТ

чика ТСИ происходит непрерывно импульсами задающего генератора ЗГ, а переключение триггеров счетчика РСУ осуществляется сигналами генератора управления ГУ с помощью контроллера машиниста КМ и блока автоматического управления БАУ.

Для отпирания тиристоров m - фазного прерывателя тока с широтно-импульсной модуляцией в простейшем случае требуется $2m$ последовательностей управляющих импульсов. Узел схемы - элементы "И - ИЛИ НЕ", инверторы "НЕ", дешифратор ДШ₂, формирователи $F_1 - F_m$, реализует m - последовательностей импульсов, управляющих включением силовых (главных) тиристоров многофазного прерывателя тока, дискретно сдвигаемых в пределах периода регулирования T и смещённых во времени относительно друг друга на T/m . Другое такое же количество последовательностей импульсов с постоянным сдвигом на T/m , поступающих на отпирание вспомогательных (гасящих) тиристоров каждой фазы прерывателя тока, реализуется с помощью дешифратора ДШ₁ и формирователей $F_1' - F_m'$.

Две последовательности импульсов тока управления, поступающие на силовые и вспомогательные тиристоры каждой фазы прерывателя, дискретно сдвигаются относительно друг друга в пределах периода регулирования, осуществляя тем самым широтно - импульсную модуляцию. Величина дискретного приращения равна

$$\Delta t = T/2^n \quad (II)$$

Автоматическое управление осуществляется по принципу токовой отсечки с помощью блока БАУ. Переключение триггеров счетчика РСУ при наборе или возврате позиций регулирования осуществ-

НТБ
ДНУЖТ

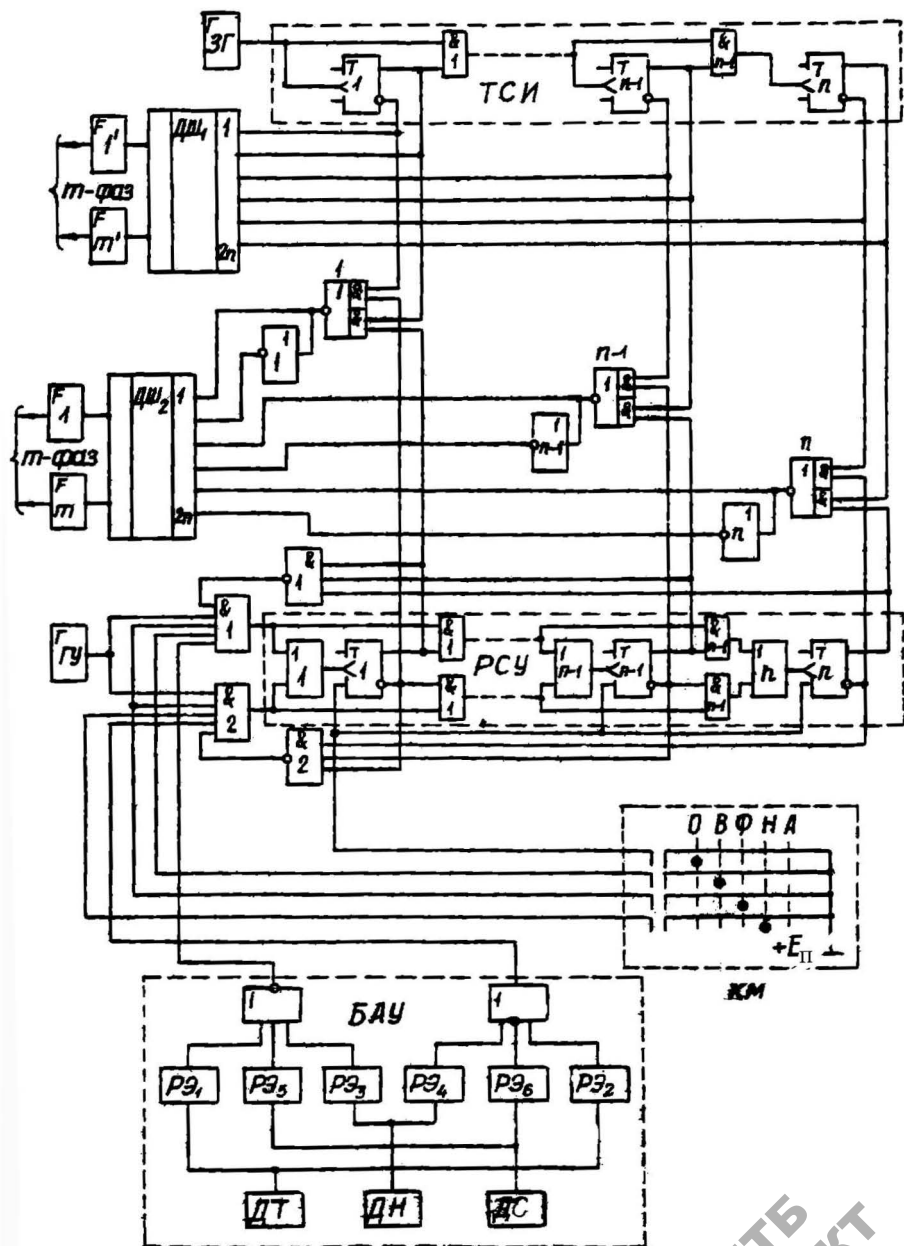


Рис. 5. Схема управления тиристорами многофазного широтно-импульсного прерывателя тока электроваза.

НТБ
ДРУЖТ

лется импульсами управления генератора ГУ, поступающими на вход схемы освождения W_{I-2} в зависимости от величины потенциала (высокий - "0" или низкий - "1") выходных сигналов релейных элементов RS_{I-6} .

В данной главе рассмотрены схемные решения двухфазных выходных каскадов, позволяющих формировать импульсы тока управления требуемых параметров - амплитуды, длительности и скорости нарастания для надёжного отпирания тиристоров мощных прерывателей тока ЭПС с повышенной частотой переключения вентиляей.

ГЛАВА IV. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМЫ ТИРИСТОРНО-ИМПУЛЬСНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ТОРМОЖЕНИЕМ ТЯГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ.

Проверка основных теоретических положений анализа электромагнитных процессов и схемных решений системы тиристорно-импульсного управления электрическим торможением тяговых двигателей постоянного тока были выполнены на двух экспериментальных стендах различной мощности.

На первом экспериментальном стенде, содержащем тяговые двигатели ДК 105 Б мощностью 185 квт, тиристорный прерыватель тока, тяговую аккумуляторную батарею ТАН - 550 напряжением 300в. проведены исследования режимов импульсной рекуперации в широком диапазоне изменения скоростей торможения.

Равносторонние исследования схемных решений системы тиристорно-импульсного регулирования электрического торможения проводились на втором экспериментальном стенде, включавшим два тя-

говых двигателя мощностью 3 квт каждый, соединённых через зубчатую передачу с маховичной установкой; тяговую аккумуляторную батарею ТАН-550 напряжением 100в, 4-х фазный прерыватель тока с дискретной схемой управления тиристорами.

Рассмотрены особенности начальной стадии электрического торможения. Как показали экспериментальные исследования, основные затруднения при начальном самовозбуждении тяговых двигателей возникают из-за сравнительно малых значений остаточной э.д.с. якорей, соизмеримых с прямым падением напряжения на силовых тиристорах прерывателей тока.

Разработаны меры, позволяющие форсировать процесс начального возбуждения и повысить быстродействие тормозной системы, особенно в зоне низких скоростей движения ЭПС.

При исследованиях вариантов схем следящего рекуперативно-реостатного торможения, импульсного регулирования поля возбуждения проводилось осциллографирование токов и напряжений в цепях тяговых двигателей, приемника энергии, тиристорных прерывателей тока и на элементах системы управления. Результаты экспериментальных исследований показали работоспособность, широкий диапазон регулирования и надёжность предложенных схемных решений системы тиристорно-импульсного управления электрическим торможением тяговых двигателей, подтвердили основные положения теоретического анализа.

В работе приведены осциллограммы динамики работы тягового электропривода экспериментального стенда в режимах пуска и электрического торможения, позволившие определить эффективность импульсной рекуперации. Возврат электрической энергии в приём-

ник при остановочном рекуперативном торможении составил 8,5-9,5% от расхода энергии, затраченной на пуск и разгон тяговых двигателей экспериментальной установки.

В экспериментальной части реферируемой работы приведены результаты исследований дискретной схемы управления тиристорами многофазных прерывателей тока с автоматическим контролем по току, напряжению и скорости вращения тяговых двигателей. Экспериментальная проверка показала, что схемы управления, построенные на тяговых логических элементах с дискретным сдвигом управляющих импульсов более помехоустойчивы и стабильны при влиянии различных возмущающих воздействий.

Разработаны и исследованы двухфазные выходные каскады на основе полумостовой схемы инвертора с дополнительным коммутирующим конденсатором, отвечающие требованиям, предъявляемым к тиристорным прерывателям тока электроподвижного состава.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И ПРЕДЛОЖЕНИЯ

Результаты теоретических и экспериментальных исследований, выполненных в диссертационной работе, позволяют сделать следующие выводы:

1. Проведенный сравнительный анализ схемных решений импульсного регулирования электрического торможения и тиристорных прерывателей тока показал, что для маневровых контактно-аккумуляторных и промышленных электровозов постоянного тока целесообразно применение импульсной рекуперации при самовозбуждении тяговых двигателей.

2. На основании математического анализа переходных и квазустановившихся электромагнитных процессов в системе импульсного регулирования электрического торможения тяговых двигателей при полном и ослабленном поле возбуждения получены аналитические зависимости для определения мгновенных, экстремальных, средних и действующих значений токов и напряжений в отдельных цепях и элементах однофазных и двухфазных схем.

Предложена автором инженерная методика расчета пульсаций тока и характеристик электрического торможения тяговых двигателей, которая может быть рекомендована при проектировании ЭПС.

3. Разработаны автором новые схемы импульсного регулирования электрического торможения с тиристорными прерывателями тока, сочетающие функции регуляторов напряжения и поля возбуждения тяговых двигателей.

4. Предложенные автором схемы следящего рекуперативно-реостатного торможения повышают надежность импульсного регулирования, обеспечивают интенсивное начальное возбуждение тяговых двигателей в зоне низких скоростей движения, позволяют осуществить электрическое торможение до полной остановки электроподвижного состава.

Автоматическое перераспределение энергии рекуперации тяговых двигателей между контактной сетью или тяговой аккумуляторной батареей и тормозными реостатами повышает эффективность и надежность электрического торможения при частичных или полных отказах рекуперации - уменьшении потребляемой мощности, отсутствии потребителя или отрыве токоприемника.

НТБ
ДНУЖТ

5. Для маневровых и промышленных электровозов постоянного тока целесообразно применение многофазных тиристорных прерывателей тока с амплитудно-широотно-импульсной модуляцией при постоянной частоте переключения вентилях, обеспечивающих расширение диапазона регулирования электрического торможения, повышение рабочей частоты и уменьшение пульсаций токов тяговых двигателей и приема энергии.

Использование двухфазных разделяющих дросселей с общим магнитопроводом позволяет уменьшить их вес и габариты.

6. Разработана автором схема управления тиристорами многофазного прерывателя тока с широко-импульсной модуляцией, построенная на дискретном принципе регулирования и выполненная на базе типовых логических элементов с автоматическим контролем по току, напряжению и скорости вращения тяговых двигателей.

Экспериментальные исследования показали, что данная схема нечувствительна к значительному изменению питающего напряжения, более термостабильна и менее подвержена влиянию помех; обеспечивает строгое порядко-временное распределение импульсных последовательностей по фазам прерывателя тока и четкую фиксацию позиций регулирования.

7. Результаты экспериментальных исследований подтвердили основные положения теоретического анализа, сделанного в диссертации. Разработанные и предложенные автором схемные решения системы тиристорно-импульсного управления электрическим торможением тяговых двигателей могут быть рекомендованы для применения на маневровых контактно-аккумуляторных и промышленных электровозах, а также на других видах электроподвижного состава постоянного тока.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований по диссертационной работе использованы при разработке технического проекта на модернизацию контактно-аккумуляторного электровоза ВЛ-26М. Основные положения работы отражены в отчетах ДИИТа за 1968, 1972, 1974 гг. по разработке маневровых и промышленных электровозов с тиристорно-импульсным регулированием скорости в режимах тяги и электрического торможения.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ ДОКЛАДЫВАЛИСЬ АВТОРОМ НА :

1. Заседаниях научного семинара кафедры электротехники ДИИТа, Днепропетровск, 1968, 1970, 1972, 1973 гг.
2. Первой республиканской конференции молодых ученых железнодорожников, ДИИТ, Днепропетровск, апрель 1969 г.
3. Второй республиканской междузаводской научно-технической конференции по подведению итогов научно-исследовательских работ в области электротехники, ЗМИ, Запорожье, сентябрь, 1969 г.
4. Научно-технической конференции молодых ученых железнодорожного транспорта, РИИИТ, Ростов на Дону, февраль 1970 г.
5. Юбилейной научно-технической конференции ДИИТа, Днепропетровск, апрель, 1970 г.
6. Всесоюзной конференции по тиристорно-импульсному регулированию напряжения на электроподвижном составе, МЭИ, Москва, июнь, 1971 г.
7. Пятой научно-технической конференции молодых ученых, посвященной 25-летию Института электродинамики АН УССР, Киев, июнь, 1972 г.
8. Научно-технической конференции ДИИТа, посвященной 50-летию образования СССР, Днепропетровск, декабрь, 1972 г.

9. Заседаниях научного семинара кафедр электроподдержного состава, электротехники, электрических машин и преобразователей ДИИТа, Днепропетровск, 1972, 1973гг.

10. Заседаниях научного семинара "Полупроводниковые преобразователи на железнодорожном транспорте", ДИИТ, Днепропетровск, 1973, 1974гг.

11. Научно-технической конференции по проблемам развития железнодорожного транспорта, посвященной 40-летию Калининского выпуска инженеров ДИИТа 1934г., Днепропетровск, март, 1974г.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО В
СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ :

1. КРАСИЛЬНИКОВ В.Н. Особенности рекуперативно-импульсного торможения тяговых двигателей постоянного тока с возвратом энергии в аккумуляторную батарею. Тезисы докладов первой республиканской конференции молодых ученых-железнодорожников. Днепропетровск, 1969, стр. 229-232.

2. КРАСИЛЬНИКОВ В.Н. Исследование режима самовозбуждения тягового двигателя последовательного возбуждения при импульсно-рекуперативном торможении. Тезисы доклада второй республиканской межвузовской научно-технической конференции по электротехнике. Изд-во "ПромІнь", Днепропетровск, 1969, стр. 107-108.

3. КРАСИЛЬНИКОВ В.Н. Некоторые вопросы импульсного рекуперации на контактную сеть. Материалы юбилейной научно-технической конференции ДИИТа. Днепропетровск, 1970, стр. 42-43.

4. КРАСИЛЬНИКОВ В.Н. Особенности работы LC фильтра в системе импульсного рекуперативного торможения тягового двигателя с применением тиристоров. Материалы научно-технической конференции молодых ученых железнодорожного транспорта. Ростов на Дону. 1970, стр. 17-18.

5. ВИСИН Н.Г., КРАСИЛЬНИКОВ В.Н., ЛОСЬ В.А. Рекуперативное импульсное торможение тягового двигателя постоянного тока с возвратом энергии в аккумуляторную батарею. Труды ДИИТа, вып. 106, Днепропетровск, 1971, стр. 7-22.

6. ВИСИН Н.Г., КРАСИЛЬНИКОВ В.Н., КАЛИНИЧЕНКО А.Я. Разработка и исследование системы тиристорно-импульсного регулирования силы тяги и электрического торможения маневровых и промышленных электровозов. Сборник тезисов научной конференции по тиристорно-импульсному регулированию, Москва, 1971, стр.93-95.

7. КРАСИЛЬНИКОВ В.Н. Исследования многофазной тиристорно-импульсной системы регулирования электрического торможения электроподвижного состава постоянного тока. Проблемы технической электродинамики. Тезисы докладов конференции молодых ученых, посвященной 25-летию Института электродинамики АН УССР (на украинском языке). Изд-во "Наукова думка", Киев, 1972, стр. 25-26.

8. ВИСИН Н.Г., КАЛИНИЧЕНКО А.Я., КРАСИЛЬНИКОВ В.Н., МАТУСЕВИЧ С.Б. Разработка системы тиристорно-импульсного регулирования силы тяги и торможения промышленного электровоза ПЭ2. Труды ДИИТа, вып.135, Днепропетровск, 1972, стр.36-46.

9. КРАСИЛЬНИКОВ В.Н. Анализ электромагнитных процессов в тиристорно-импульсной системе регулирования электрического торможения тяговых двигателей электроподвижного состава постоянного тока. Труды ДИИТа, вып.135, Днепропетровск, 1972, стр.57-72.

10. КРАСИЛЬНИКОВ В.Н. Устройство для импульсного регулирования электрического торможения электродвигателя. Авторское свидетельство № 415180. Бюллетень изобретений, № 6, 1974г.

II. КРАСИЛЬНИКОВ В.Н. Устройство для импульсного регулирования электрического торможения. Положительное решение Государственного комитета Совета Министров СССР по делам изобретений и открытий о выдаче авторского свидетельства по заявке № 1860933/24-7 с присоединением заявки № 1860934/24-7 от 23-го марта 1973г. с приоритетом от 21 декабря 1972г. (Авторское свидетельство № 426889, Бюллетень изобретений, № 17, 1974).

БТ 26868.Ротпринт ОЗ ДМетИ,Днепропетровск,5.
Лодыжское шоссе,36.

Заказ №846. Тираж 150. Объем 2 к.л.
Получено к печати 20.11-74 г.

НТБ
ДНУЖТ