

Г. М. ЧИЛИКИН

**ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБОВ РАСШИРЕНИЯ
ДИАПАЗОНА РЕГУЛИРОВАНИЯ ВЫХОДНОГО
НАПРЯЖЕНИЯ ТЯГОВЫХ ТИРИСТОРНО-
ИМПУЛЬСНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ
ПОСТОЯННОГО ТОКА**

**Специальность № 05.435 — Электрификация
и электроснабжение железнодорожного транспорта**

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Г. М. ЧИЛИКИН

ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБОВ РАСШИРЕНИЯ
ДИАПАЗОНА РЕГУЛИРОВАНИЯ ВЫХОДНОГО
НАПРЯЖЕНИЯ ТЯГОВЫХ ТИРИСТОРНО-
ИМПУЛЬСНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ
ПОСТОЯННОГО ТОКА

Специальность № 05.435 — Электрификация
и электроснабжение железнодорожного транспорта

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в Днепропетровском институте инженеров железнодорожного транспорта.

Научный руководитель — кандидат техн. наук, доцент **К. Г. Кучма.**

Официальные оппоненты:

Доктор технических наук, профессор **В. Е. Скобелев.**

Кандидат технических наук, доцент **Л. В. Бирзник.**

Ведущее предприятие — Днепропетровский электровозостроительный завод.

Автореферат разослан « **17** » **октября** 1970 г.

Защита состоится « **8 ноября** » 1970 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

кандидат технических наук, доцент

Б. М. Климковский.

ВВЕДЕНИЕ

Повышение эффективности работы электрифицированного железнодорожного транспорта связано с совершенствованием электроподвижного состава. Современные достижения в области силовой полупроводниковой техники открыли новые возможности усовершенствования электроподвижного состава постоянного тока с использованием безреостатного пуска на основе импульсного способа регулирования напряжения тяговых двигателей. Замена пусковых реостатов полупроводниковыми преобразователями постоянного тока позволяет значительно сократить потери энергии и обеспечить приемлемые регулировочные свойства тягового электропривода.

Конференция по вопросам тиристорного управления и повышения напряжения для электрического подвижного состава постоянного тока, проведенная постоянной комиссией по научным проблемам развития транспорта при АН СССР (Москва, ноябрь 1968) и отраслевое научно-техническое совещание по применению тиристорно-импульсных систем регулирования на электроподвижном составе (Днепропетровск, сентябрь 1967) отметили целесообразность и перспективность дальнейших исследований и разработок полупроводниковых преобразователей постоянного тока, позволяющих более эффективно использовать транспортные средства.

Актуальность проблемы создания средств безреостатного плавного автоматического регулирования силы тяги и торможения на электроподвижном составе постоянного тока подтверждается многими работами ведущих советских и зарубежных исследователей. Разработка и создание тиристорно-импульсных систем для железнодорожного и городского электротранспорта проводятся в Московском энергетическом институте под руководством д. т. н., профессоров И. С. Ефремова, В. Е. Розенфельда, Л. М. Трахтмана. В ЦНИИ МПС под руководством д. т. н. Б. Н. Тихменева ведутся исследования тиристорных преобразователей для электроподвижного состава двойного питания. В Ленинградском политехническом институте группой исследователей под руководством д. т. н. профессора В. Е. Ско-

белева успешно решаются проблемы, связанные с особенностями работы, расчета и конструирования тяговых двигателей пульсирующего тока, питаемых от полупроводниковых преобразователей напряжения. Исследования тиристорно-импульсных преобразователей для поездов метрополитена проводятся в МИИТе под руководством д. т. н. профессора В. С. Хвостова. Рижским филиалом Всесоюзного научно-исследовательского института вагоностроения под руководством к. т. н. доцента Л. В. Бирзниека создана и испытана тиристорно-импульсная система безреостатного пуска для электропоездов С₃^Р-А6М и ЭР-2. Исследования, связанные с вопросами тиристорно-импульсного регулирования для различного электроподвижного состава, проводятся также в Днепропетровском горном институте под руководством д. т. н., профессора С. А. Волотковского, в ЛИИЖТе под руководством проф. Н. Н. Сидорова, в Томском и Кузбасском политехнических институтах, в Коммунарском горно-металлургическом институте, на Рижском электромашиностроительном заводе, в ДИИТе и ряде других организаций. За рубежом подобными работами занимаются в Японии, ФРГ, Англии и др.

Дальнейшие исследования указанной проблемы направлены на совершенствование систем тиристорно-импульсного регулирования напряжения при возрастании мощности тяговых двигателей и увеличении напряжения контактной сети с целью повышения надежности, снижения пульсаций токов источника и нагрузки и т. п. Ряд вопросов, относящихся к импульсным преобразователям, в настоящее время изучен недостаточно. Это, в частности, относится к вопросам расширения диапазона регулирования выходного напряжения и повышения частоты следования импульсов тиристорных преобразователей. Как известно, значительное снижение уровня пульсаций токов улучшает условия работы тяговых двигателей и уменьшает влияние на линии связи и СЦБ. Достижение этого без существенного повышения частоты переключений тиристорных преобразователей связано со значительным увеличением габаритов и веса фильтрующей аппаратуры. Особенно большими становятся габариты преобразовательных установок для мощного электроподвижного состава постоянного тока 3÷6 кв с параллельным соединением тяговых двигателей.

Реферируемая диссертационная работа посвящена исследованию возможностей расширения диапазона регулирования выходного напряжения и повышения частоты переключений импульсных преобразователей постоянного тока.

В первой главе освещены вопросы, касающиеся особенностей работы систем с различными способами импульсного регулирования, а также показаны причины, препятствующие расширению диапазона регулирования выходного напряжения тиристорных преобразователей.

Вторая глава посвящена исследованию схемных решений тиристорно-импульсных преобразователей с параллельной и последовательной коммутацией и анализу электромагнитных процессов в их цепях с целью выбора наиболее приемлемой для мощного тягового электропривода силовой схемы преобразователя.

В третьей главе рассмотрены вопросы управления тиристорами импульсных преобразователей с повышенной частотой переключений и освещены принципы построения дискретных систем в применении к указанным силовым схемам.

В четвертой главе приводятся результаты экспериментального исследования на макетах тягового электропривода вопросов расширения пределов регулирования выходного напряжения и повышения частоты следования импульсов тиристорных преобразователей.

Глава I. Эффективность повышения частоты переключений импульсных преобразователей при дальнейшем совершенствовании систем тягового электропривода

Наряду с достоинствами тиристорно-импульсных преобразователей постоянного тока присущи и определенные недостатки. Одним из существенных недостатков является наличие пульсаций токов в цепях, приводящих к ухудшению работы тяговых двигателей и влиянию на линии связи и СЦБ. Величина пульсаций, определяемая целым рядом факторов, в значительной степени зависит от частоты переключений импульсного преобразователя, которая определяется выбранным способом импульсного регулирования напряжения, а также конкретным схемным решением тиристорного преобразователя. В настоящее время находят применение различные способы импульсного регулирования с использованием преобразователей, отличающихся принципом коммутации, диапазоном регулирования выходного напряжения, а также другими основными параметрами и техническими возможностями.

Тиристорно-импульсный преобразователь совместно с входным и выходным фильтрующими устройствами характеризуется изме-

няемым в зависимости от способа импульсного регулирования коэффициентом трансформации:

$$k_{\text{тр}} = \frac{1}{\alpha\gamma} \quad (1)$$

где: $\alpha = \frac{U_a}{U_0}$ — коэффициент амплитуды;

$\gamma = \frac{t_{\text{и}}}{T}$ — коэффициент заполнения последовательности прямоугольных импульсов напряжения на выходе преобразователя.

В данной главе рассматриваются особенности работы импульсных систем с преобразователями, в которых выходное напряжение изменяется на основе методов амплитудно-импульсной модуляции (АИМ), широтно-импульсной модуляции (ШИМ), частотно-импульсной модуляции (ЧИМ), которые определяют способ импульсного регулирования. Приведены частные случаи одновременного изменения двух параметров ($t_{\text{и}}, T$) при частотно-широтной импульсной модуляции (ЧШИМ). В качестве входного фильтра исследуется, получивший широкое распространение, простейший Г-образный низкочастотный LC-фильтр, а выходным является соединенный последовательно с нагрузкой сглаживающий дроссель. Габариты и вес входного фильтра помимо уровня питающего напряжения и величины потребляемого тока существенно зависят от выбранной частоты собственных колебаний:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_{\Phi} C_{\Phi}}} \text{ и волнового сопротивления контура: } \rho_0 = \sqrt{\frac{L_{\Phi}}{C_{\Phi}}}$$

При определении влияния частоты переключений преобразователя (f) на параметры входного фильтра используется известный анализ электромагнитных процессов в цепях при некоторых допущениях (отсутствие активных сопротивлений источника и фильтра, замена реального тиристорного прерывателя идеальным коммутатором; полное сглаживание тока нагрузки). Амплитуды пульсаций тока источника ΔI_0 и напряжения на входе преобразователя ΔU_{Φ} являясь функциями двух переменных: γ (коэффициента заполнения импульсов) и n (коэффициента резонанса, характеризующего отношение частот собственных f_0 и вынужденных f колебаний), представлены соответствующими поверхностями в пространственной системе координат. На

основании рассмотренных зависимостей проанализирована работа входного фильтра при изменении коэффициента трансформации преобразователя с использованием различных способов импульсного регулирования. В частотно-импульсных системах (при: $t_n = \text{const}$) расширение диапазона регулирования выходного напряжения связано с расширением пределов изменения частоты. Обычно верхний предел ограничен частотными свойствами полупроводниковых приборов. Снижение нижнего предела требует уменьшения f_0 и, следовательно, приводит к увеличению габаритов фильтра. Изменение f_0 в процессе регулирования путем применения секционированной или нелинейной индуктивности L_Φ при постоянстве C_Φ ввиду роста волнового сопротивления ρ_0 нельзя считать радикальным решением, улучшающим работу указанных систем при низкой частоте переключений.

Входные Г-образные фильтры с постоянными значениями f_0 и ρ_0 более просты в изготовлении и применять их целесообразно с неизменной и более высокой частотой вынужденных колебаний. Постоянство частоты переключений, характерное для амплитудно-импульсных и широтно-импульсных преобразователей, позволяет для уменьшения пульсаций тока источника и отстройки от мешающего влияния на линии связи применять фильтры с резонансными ветвями. Расширение диапазона регулирования выходного напряжения преобразователей с постоянной частотой переключений связано с расширением предельных значений энергии, передаваемой в одном импульсе. При повышении частоты особое значение приобретает сокращение минимального значения энергии импульса, которое при постоянном токе нагрузки зависит от минимально возможных значений длительности и амплитуды импульсов напряжения на выходе преобразователя.

Рассмотрение вопроса пульсаций тока нагрузки для систем с различными способами импульсного регулирования также показало, что с целью уменьшения величины индуктивности сглаживающего дросселя и, следовательно, его веса и габаритов целесообразно иметь более высокую частоту переключений импульсного преобразователя.

Существенному повышению частоты переключений и расширению диапазона регулирования выходного напряжения препятствует ряд факторов, связанных с возможностями полупроводниковых приборов и со схемным решением прерывателя. Используемые в настоящее время для мощных импульсных преобразователей однооперационные тиристоры требуют установки дополнительных элементов, с помощью которых в силовую цепь

вводится коммутирующее напряжение для запираания. В зависимости от способа присоединения дополнительных элементов и, следовательно, введения коммутирующего напряжения схемы прерывателей различают по принципу коммутации. Последний вместе со способом подготовки вспомогательных цепей к периоду коммутации составляют основу построения каждого конкретного схемного решения и отражаются на основных технических показателях импульсных устройств, в том числе диапазоне регулирования выходного напряжения и частоте переключений.

В работе рассмотрены достоинства и недостатки принципиальных схем тиристорных преобразователей с параллельной и последовательной коммутацией. В зависимости от дополнительного элемента, вводящего в цепь коммутирующее напряжение, признано также целесообразным разделять схемы с емкостной и индуктивной коммутацией.

Анализ вариантов схем тиристорно-импульсных преобразователей показал, что при повышении частоты переключений достижение наибольшего коэффициента трансформации путем сокращения минимального значения энергии, передаваемой в импульсе, возможно при последовательной емкостной и последовательной индуктивной коммутации. Однако более полная оценка основных технических показателей вариантов возможна на основе рассмотрения электромагнитных процессов в цепях.

Глава II. Анализ электромагнитных процессов в схемах импульсных преобразователей

Ввиду того, что наибольшую известность получили широтно-импульсные преобразователи с параллельной коммутацией и вспомогательным перезарядным контуром для подготовки конденсатора к запираанию, с ними производится сравнительная оценка исследуемых схемных решений по основным показателям: возможному диапазону регулирования выходного напряжения и частоте переключений при этом, коммутационной устойчивости и перегрузочной способности, а также по величине установленной мощности полупроводниковых приборов и коммутирующей емкости.

В работе рассмотрена схема прерывателя без вспомогательного перезарядного контура и наличием дозаряда емкости в зависимости от величины тока нагрузки. При этой схеме достигается высокая коммутационная устойчивость в широком диапазоне токовых нагрузок, обеспечивается жесткость внешней

характеристики и несколько расширяется диапазон регулирования без снижения частоты переключений. Характер процесса в основных цепях схемы анализируется решением дифференциальных уравнений соответствующих контуров. Наиболее важный с точки зрения работы импульсного преобразователя коммутационный процесс исследуется также с помощью метода фазовой плоскости. Принимая в качестве независимых переменных: $x = u_c$ и

$y = \sqrt{L_k C_k} \frac{du_c}{dt}$, которые определяют состояние коммутирующего контура $L_k - C_k - R_k$ указанной схемы и являются координатами фазовой плоскости, из дифференциального уравнения первого расчетного интервала периода коммутации:

$$L_k C_k \frac{d^2 u_c}{dt^2} + R_k C_k \frac{du_c}{dt} + u_c = 0 \quad (2)$$

получено уравнение фазовой траектории:

$$\frac{dy}{dx} = - \left(\frac{x}{y} + \lambda \right) \quad (3)$$

где: $\lambda = \frac{R_k}{\rho}$ — коэффициент затухания;

$\rho = \sqrt{\frac{L_k}{C_k}}$ — волновое сопротивление контура коммутации, в котором: $\rho \gg R_k$

Графическое построение этого участка траектории произведено по семейству изоклин:

$$y = - \frac{x}{g + \lambda} \quad (4)$$

представляющих прямые линии, пересекающиеся в фокусе с координатами: $x=0, y=0$, где: $g = \frac{dy}{dt} = \text{const.}$

Дифференциальному уравнению второго расчетного интервала:

$$L_k C_k \frac{d^2 u_c}{dt^2} + R_k C_k \frac{du_c}{dt} + u_c = E_0 \quad (5)$$

соответствует уравнение фазовой траектории

$$\frac{dy}{dx} = \frac{E_0 - x}{y} - \lambda \quad (6)$$

На фазовой плоскости построение этого участка произведено по семейству изоклин:

$$y = \frac{E_0 - x}{g + \lambda} \quad (7)$$

с фокусом, имеющим координаты: $x = E_0$; $y = 0$.

Перегрузочная способность прерывателя, характеризующаяся устойчивостью процесса коммутации, оценена сопоставлением времени выключения тиристора с изменяемым в зависимости от нагрузки временем действия на тиристор обратного напряжения, которое определяется по фазовым траекториям коммутационного периода. С целью сравнения аналогичный анализ на фазовой плоскости произведен и для схем с параллельной коммутацией и вспомогательным перезарядным контуром.

В работе проанализированы схемы тиристорных прерывателей с последовательной коммутацией. В прерывателях с последовательной емкостной коммутацией длительность импульсов напряжения определяется параметрами конденсатора и нагрузки, а их амплитуда зависит от работы перезарядного устройства. Рассмотренная схема прерывателя с амплитудным способом импульсного регулирования в качестве перезарядного устройства содержит катушку индуктивности и соединенные встречно-параллельно тиристор и диод, которые позволяют изменять напряжение на обкладках коммутирующего конденсатора от величины напряжения источника E_0 до значения:

$$U_c = \frac{E_0}{\exp \frac{2\pi\lambda}{\sqrt{4 - \lambda^2}}} \quad (8)$$

Это значение, определяющее минимальную амплитуду напряжения на нагрузке при открытии силового тиристора зависит от активного сопротивления перезарядного контура и достигается в случае, когда интервал времени между открытием вспомогательного и силового тириستоров больше периода колебаний перезарядного контура:

$$\Delta t \gg T_k = \frac{2\pi}{\sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}} \quad (9)$$

где: $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L C_k}}$; $\delta = \frac{R}{2L}$

Величины коммутирующей емкости, соединенной последовательно с силовым тиристором:

$$C_k = \frac{2U_H \cdot I_H \cdot T_{\min}}{(E_o + U_c)^2} \quad (10)$$

и перезарядной индуктивности:

$$L \leq \frac{T_{\min}^2}{4\pi^2 C_k} \quad (11)$$

определяются в зависимости от номинальных средних значений напряжения (U_H) и тока (I_H) нагрузки и принятого наименьшего значения периода следования импульсов $T_{\min}$. Определенным недостатком схем с последовательной емкостной коммутацией при существующих частотных свойствах серийных тиристоров следует считать необходимость значительного увеличения емкости C_k для получения коэффициента трансформации преобразователя близким к единице.

В диссертационной работе проанализирован один из вариантов схем широтно-импульсного преобразователя с последовательной индуктивной коммутацией, который позволяет существенно расширить диапазон регулирования при высокой частоте следования импульсов.

Прекращение подачи энергии в нагрузку в начальный момент коммутации позволяет получать импульсы напряжения на нагрузке весьма малой величины, но затрудняет отвод накопленной в период коммутации энергии и с целью предотвращения возможных перепапряжений требует установки дополнительных элементов. Обоснование этого произведено исследованием электромагнитных процессов в цепях классическим методом и построением фазовых траекторий коммутационных процессов. Для первого расчетного интервала периода коммутации справедливы выражения: 3,4. Участки траектории второго расчетного интервала описываются уравнением:

$$\frac{dy}{dt} = \frac{n^2 (E_o - x)}{y} - \lambda \quad (12)$$

и строятся по семейству изоклин:

$$y = \frac{n^2 (E_o - x)}{g + \lambda} \quad (13)$$

Коэффициент: $n = \frac{\omega_o''}{\omega_o'} = \sqrt{\frac{C_k}{C_k + C_H}}$, являющийся отношением

круговых частот коммутирующего контура с учетом и без учета накопительной емкости C_n , показывает степень влияния дополнительных элементов по снижению перенапряжений.

В диссертации, кроме указанных тиристорных прерывателей, характеризующихся неизменностью способа импульсного регулирования, рассмотрены прерыватели, основанные на изменении структуры схемы, принципа коммутации и метода импульсной модуляции в процессе повышения выходного напряжения. Основным недостатком таких схем с комбинированным способом импульсного регулирования является некоторое усложнение системы управления тиристорами, особенно при осуществлении автоматического регулирования.

В прерывателях с одним переключением структуры схемы период регулирования разделяется на две ступени. Техничко-экономические показатели двухступенчатых преобразователей зависят от выбранных для каждой ступени методов импульсной модуляции и принципов коммутации. Значительный эффект в улучшении основных параметров импульсных систем с комбинированным способом регулирования достигается применением на первой ступени схемных решений с последовательной емкостной коммутацией и амплитудно-импульсным методом модуляции, а на второй ступени схем с параллельной коммутацией с широтно-импульсным методом модуляции. Комбинирование двух указанных структур схем позволяет компенсировать недостатки каждой и способствует повышению частоты переключений и расширению диапазона регулирования выходного напряжения практически без увеличения установленной мощности полупроводниковых приборов и конденсаторов.

Один из вариантов (рис. 1) двухступенчатого преобразователя с применением вспомогательного тиристорного моста и с двумя ветвями нагрузки для осуществления на первой ступени амплитудно-импульсной модуляции имеет два перезарядных контура с дросселями L_1 , L_2 и диодами D_1 , D_2 . В начале процесса регулирования выходного напряжения силовые тиристоры T_1 и T_2 не включаются и работают только тиристоры $T_3 \div T_6$ вспомогательного моста, передавая энергию от источника к нагрузке через последовательно включаемую емкость C_k . Изменение амплитуды импульсов выходного напряжения путем управления перезарядными контурами производится изменением момента предварительного открытия тиристора T_3 (T_4) перед одновременным открытием плеч T_3 ; T_5 (T_4 ; T_6) вспомогательного моста. Структура схемы с параллельной индуктивной коммутацией и широтно-импульсной модуляцией осуществляется на второй

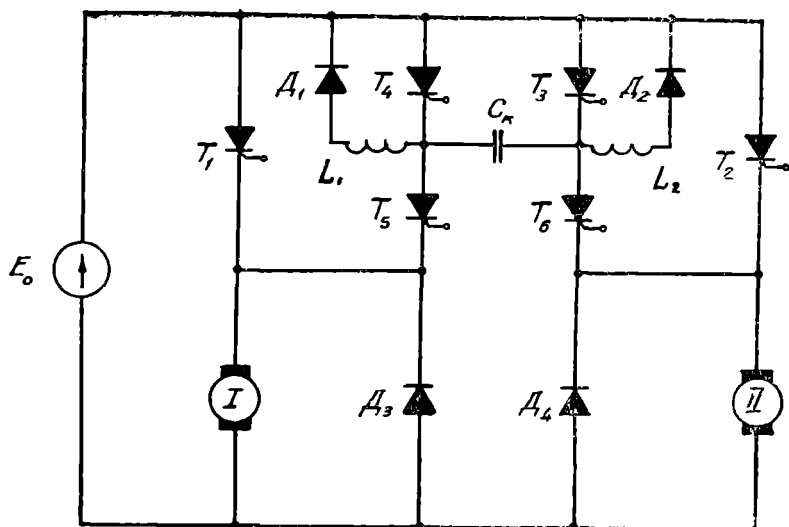


Рис. 1

ступени регулирования при работе силовых тиристоров T_1 и T_2 , запирающие которых производится после открытия соответствующих плеч вспомогательного тиристорного моста без предварительного перезаряда конденсатора.

Период (T) следования импульсов напряжения на ветвях нагрузки зависит от необходимого, для конкретного случая, диапазона регулирования и определяется минимальными средними значениями тока $I_{н(мин)}$ и напряжения $U_{н(мин)}$ нагрузки:

$$T \geq \frac{C_k U_a^2 (мин)}{2 I_{н(мин)} U_{н(мин)}} \quad (14)$$

где: $U_a (мин)$ — минимально возможная амплитуда импульсов.

Величина коммутирующей емкости (C_k) должна обеспечивать устойчивую работу преобразователя (при параллельной коммутации) в наиболее тяжелом режиме при максимальном токе нагрузки ($I_{н(макс)}$) и минимальном напряжении источника ($E_o (мин)$):

$$C_k \geq \frac{I_{н(макс)} t_{зан}}{E_o (мин)} \quad (15)$$

Для получения наибольшего диапазона регулирования ампли-

туды импульсов выходного напряжения, катушки (L_1 ; L_2) перезарядных контуров должны иметь возможно меньшее активное сопротивление при величине индуктивности:

$$L_1 = L_2 = L \leq \frac{T^2}{4\pi^2 C_K} \quad (16)$$

Анализ электромагнитных процессов в цепях рассмотренной схемы произведен операторным методом и методом фазовой плоскости. На первой ступени регулирования пределы ($U_{a(\min)} \div U_{a(\max)}$) изменения амплитуды импульсов напряжения на нагрузке определяются выражениями:

$$U_{a(\min)} = E_0 \left(1 - \frac{1}{\exp \frac{\pi \lambda}{\sqrt{4 - \lambda^2}}} \right) \quad (17)$$

$$U_{a(\max)} = 2E_0 \quad (18)$$

На второй ступени регулирования при постоянной амплитуде длительность импульсов изменяется от величины:

$$t_{n(\min)} = \frac{E_0 C_K}{I_H} \quad (19)$$

практически до значения периода их следования T . Таким образом двухступенчатый преобразователь позволяет при постоянной, относительно высокой, частоте переключений обеспечить широкий диапазон регулирования выходного напряжения.

Для более полной оценки схемных решений импульсных преобразователей наряду с частотой переключений и возможным диапазоном регулирования выходного напряжения в реферируемой диссертации произведено сравнение схем по установленной мощности основных элементов. В качестве критерия сравнительной оценки приняты коэффициенты использования тиристоров, диодов, конденсаторов, которые характеризуют отношение установленной мощности к базисной:

$$\Delta_T = \sum_{i=1}^n \frac{U_{Ti} I_{Ti}}{E_0 I_H}; \quad \Delta_D = \sum_{i=1}^m \frac{U_{Di} I_{Di}}{E_0 I_H}; \quad \Delta_C = \frac{C_K}{C_0} \quad (20)$$

Для полупроводниковых приборов установленная мощность определена на основании анализа электромагнитных процессов, а базисной служит мощность нагрузки при коэффициенте трансформации номинального режима преобразователя равном еди-

нице. Величина емкости C_k учитывает характер коммутационного процесса и необходимое время запираания тиристора, а базисной C_0 принята емкость схемы параллельно-емкостной коммутации с постоянным током перезаряда (I_n).

Полученные данные коэффициентов использования Δ_T , Δ_d , Δ_c , частоты переключений f и достигаемого при этом диапазона регулирования D приведены в таблице 1.

Т а б л и ц а 1

№№ п/п	Схема преобразователя	Δ_T	Δ_d	Δ_c	f [Гц]	D
1	С параллельно-индуктивной коммутацией и вспомогательным перезарядным контуром	1,45	2,33	1,55	100	1 20
2	С дозарядом коммутирующей емкости и без перезарядного контура	2,16	1,23	1,6	150	1 30
3	С последовательно-индуктивной коммутацией и без перезарядного контура	2,3	1,49	6,4	400	1 500
4	С комбинированным способом регулирования (последовательно-емкостной коммутацией на первой ступени и параллельно-индуктивной на второй)	1,43	2,13	0,63	300	1 200

Сравнение полученных результатов показывает определенное преимущество преобразователей с комбинированным способом регулирования, которые являются, по мнению автора, вполне приемлемыми для мощного тягового электропривода.

Г л а в а III. Вопросы управления тиристорами импульсных преобразователей

Наряду с особенностями работы силовых схем диапазон регулирования и частота переключений тиристорно-импульсных преобразователей зависят и от возможностей систем управления. При правильно выбранных параметрах силовой схемы от системы управления зависит также надежность и устойчивость работы импульсного преобразователя, что особенно важно при параллельной работе со сдвигом по фазе нескольких ветвей тиристорных прерывателей, целесообразность применения которых

определяется необходимостью повышения общей частоты переключения и уменьшения пульсаций тока источника и нагрузки.

В работе рассмотрены основные принципы построения систем управления и требования к ним, связанные с принятым способом импульсного регулирования и конкретным решением силовой схемы. Применение вспомогательного тиристорного моста в силовых схемах требует увеличения последовательностей управляющих импульсов в два раза. Для схем с амплитудным и широтным способами импульсного регулирования необходимо обеспечить подачу четырех последовательностей импульсов с синхронным изменением временного сдвига. Основными узлами указанных систем управления, от которых зависят параметры импульсного регулирования (период повторения и амплитуда или длительность импульсов) и, следовательно, выходное напряжение преобразователя являются задающий генератор и сдвигающее устройство. Нестабильность работы этих элементов отражается на качестве процесса регулирования.

В диссертации проанализированы схемные решения сдвигающих устройств, построенных на непрерывном и дискретном принципах. Непрерывные системы, обеспечивая непрерывный характер изменения временного сдвига и позволяя плавно регулировать выходное напряжение преобразователя, не обладают высокой стабильностью работы при наличии помех, изменениях питающего напряжения, окружающей температуры и т. д. Нестабильность временного сдвига и периода повторения не позволяют значительно сокращать интервал времени между управляющими импульсами, что ограничивает диапазон регулирования выходного напряжения преобразователя при повышении частоты переключений.

Основным недостатком системы с дискретным регулированием является ступенчатый характер изменения выходного напряжения преобразователя. Однако по сравнению с реостатным пуском дискретная система управления при увеличении количества позиций не требует дополнительной установки громоздкого силового оборудования и вместе с тем при выборе допустимой неравномерности тока пускового режима позволяет также иметь на электровозе строгую фиксацию позиций со стабильным коэффициентом трансформации преобразователя. Дискретные системы управления по сравнению с непрерывными легче сопрягать с цифровыми вычислительными устройствами, которые в последнее время начинают получать широкое распространение в программированных автоматических устройствах. Собранные на стандартных элементах бесконтактной логики,

дискретные системы меньше подвержены влиянию помех, изменению питающего напряжения и температуры.

В рассматриваемом варианте дискретной системы формирование периода следования управляющих импульсов: $T = KT'$ и временного сдвига $t_{и} = \left(k + \frac{1}{2}\right) T'$ ($0 < k < K$ и принимает только целые значения) осуществляется пропорционально периоду следования T' тактовых импульсов задающего генератора, ввиду чего выходное напряжение широтно-импульсного преобразователя:

$$U_{и} = \frac{k + \frac{1}{2}}{K} E_0 \quad (21)$$

определяется коэффициентами дискретной схемы ($k; K$) и не зависит от возможной нестабильности частоты задающего генератора.

Структурная схема цепей управления (рис. 2), предназначенная для силовых схем с вспомогательным мостом (например, рис. 1), предусматривает подачу с выходных каскадов ВК1, ВК2 двух несдвигаемых последовательностей импульсов через полупериод их повторения с частотой:

$$f = \frac{1}{2^n T'} \quad (22)$$

где: n — число триггеров тактового счетчика импульсов ТСИ. С выходных каскадов ВК3, ВК4 при помощи дешифратора ДШ и ключевого элемента К обеспечивается дискретный синхронный сдвиг двух других последовательностей управляющих импульсов с такой же частотой f . Величина сдвига $t_{и}$, определяющая выходное напряжение преобразователя, зависит от состояния n триггеров реверсивного счетчика управления РСУ и может принимать:

$$N = 2^n - 1 \quad (23)$$

значений в пределах периода T . Для набора и сброса позиций от пульта управления ПУ подаются одиночные импульсы на один из выходов реверсивного счетчика РСУ, который выполняет также функции бесконтактного, быстродействующего интегрирующего звена. В необходимых случаях возможен практически мгновенный переход на нулевую позицию преобразователя подачей сигнала на шину сброса РСУ

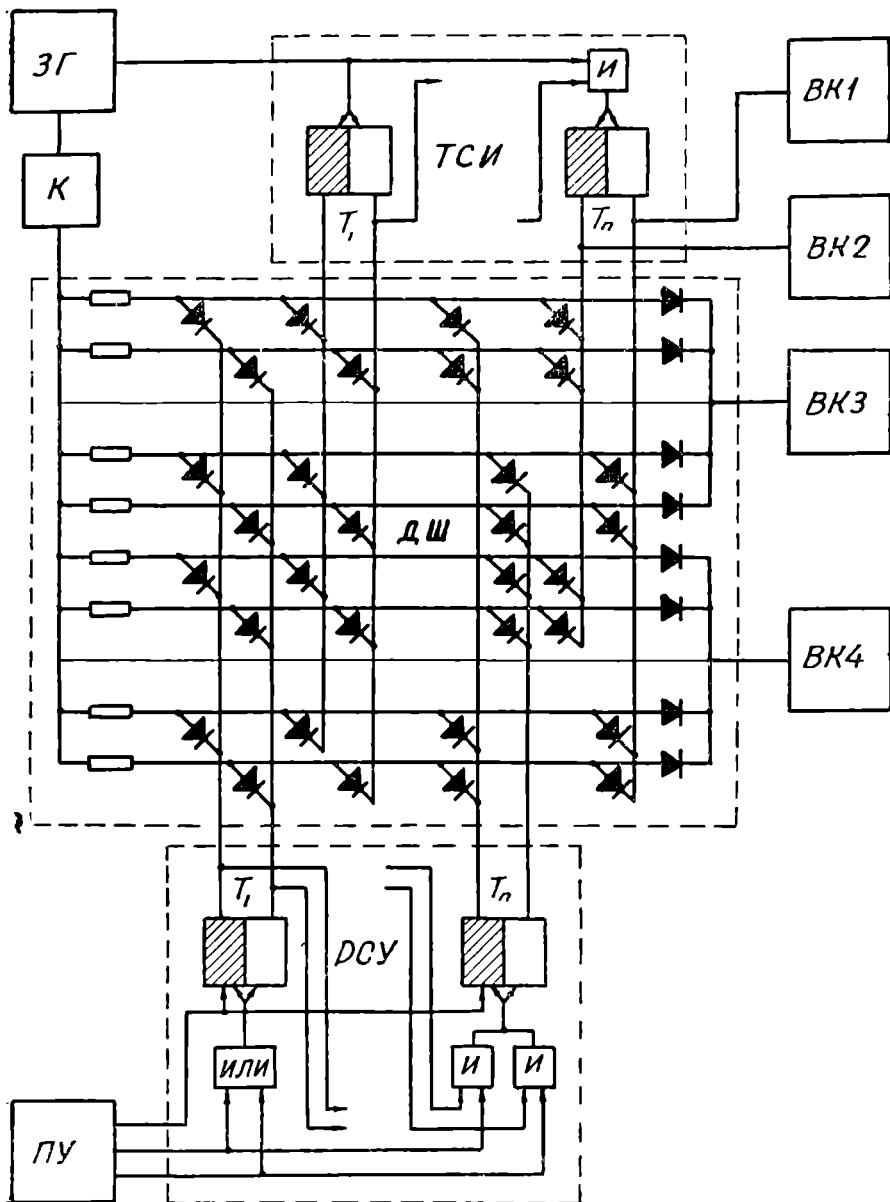


Рис. 2.

В описанной схеме в качестве ЗГ целесообразно использовать генератор релаксационных колебаний с двумя выходами разных полупериодов. С помощью ключевого элемента *K* на сборную шину дешифратора поступают короткие импульсы напряжения в моменты, когда триггеры ТСИ не переключаются. Это позволяет уменьшить установленную мощность элементов устройства и повысить помехоустойчивость системы.

Сдвигающим устройством в дискретной схеме выступает тактовый счетчик импульсов с дешифратором, всегда обеспечивая пропорциональность временного сдвига и периода повторения в результате того, что параметры регулирования определяются работой не двух (как в непрерывных), а только одного элемента устройства — задающего генератора (ЗГ).

В данной главе рассмотрены также вопросы формирования управляющих импульсов в свете требований, предъявляемых схемами мощных преобразователей с повышенной частотой переключений.

Глава IV Экспериментальное исследование вопросов расширения пределов регулирования и повышения частоты тиристорно-импульсных преобразователей

Основные положения анализа электромагнитных процессов в схемах импульсных преобразователей были проверены в свете поставленной задачи на двух установках, отличающихся величиной номинальной мощности, характером нагрузки и параметрами источников.

На первой четырехдвигательной экспериментальной установке общей мощностью 1,5 квт с целью исследования возможности повышения частоты переключений и расширения пределов регулирования выходного напряжения испытаны варианты схем с различными принципами коммутации и способами импульсного регулирования.

Исследования электромагнитных процессов основных схемных решений проводились на второй экспериментальной установке, включавшей два источника питания, машинный нагрузочный стенд и тиристорно-импульсный преобразователь, который по установленной мощности полупроводниковых элементов позволял реализовать мощность 450 квт.

Экспериментальные исследования силовых схем подтвердили основные положения теоретического анализа. Широотно-импульсными преобразователями с параллельной коммутацией ввиду ограничения минимальной длительности импульсов пери-

одом записания тиристора достигается диапазон регулирования 1 : 30 при частоте переключений не выше $150 \div 200$ гц. Схемы с последовательной индуктивной коммутацией позволяют достигнуть диапазона регулирования 1 : 500 при повышении частоты переключений до 400 гц. Однако снижение перенапряжений в послекоммутационный период требует увеличения накопительной емкости, что неблагоприятно отражается на габаритах установок.

Испытания преобразователя с комбинированным способом импульсного регулирования: последовательной коммутацией и амплитудно-импульсной модуляцией на первой ступени, параллельной коммутацией и широтно-импульсной модуляцией на второй ступени регулирования, подтвердили принципиальную возможность построения силовых схем с изменяемой структурой в процессе регулирования выходного напряжения и показали вполне приемлемые результаты предложенного схемного решения, позволяющие рекомендовать такие преобразователи для мощного тягового электропривода.

В экспериментальной части реферируемой работы приведены результаты исследований схем управления и их основных узлов. Подтверждены указанные ранее недостатки непрерывных систем.

Для силовой цепи с вспомогательным тиристорным мостом и двумя ветвями нагрузки разработана схема управления с дискретным сдвигом импульсов. В качестве сдвигающего устройства применен пятиразрядный двоичный счетчик с диодной матрицей на 31 позицию. Для счетчиков экспериментальной установки разработан и исследован триггер на маломощных тиристорах.

Проведенная экспериментальная проверка показывает, что схемы управления, построенные на логических элементах и осуществляющие дискретный сдвиг управляющих импульсов по сравнению с непрерывными, являются более помехоустойчивыми и стабильными при влиянии различных возмущающих воздействий.

С целью получения приемлемых параметров управляющих импульсов при повышении частоты переключений разработаны и исследованы выходные каскады системы управления, удовлетворяющие требованиям мощной тиристорной установки.

Основные выводы и рекомендации

1. Выполненные исследования подтвердили положение о том, что путем повышения частоты переключений тиристорно-импульсных преобразователей постоянного напряжения параметры фильтрующей цепи тягового электропривода могут быть доведены до приемлемых значений при существенном снижении уровня пульсаций тока в контактной сети и тяговых двигателях.

2. Установлено, что повышение частоты переключений тиристорно-импульсных преобразователей до допустимого для применяемых элементов значения зависит от схемного решения прерывателя и от требуемого диапазона регулирования напряжения на тяговых двигателях электроподвижного состава. Диапазон регулирования выходного напряжения импульсного преобразователя, определяемый условиями трогания с места одиночного локомотива и мощностью потерь в тяговых двигателях, должен быть на электровозах постоянного тока напряжением 3÷6 кв порядка $1 \div 150 \div 1:300$.

3. Анализ схемных решений тиристорных преобразователей с различными принципами коммутации и способами импульсного регулирования показал, что при параллельной коммутации сокращение минимальной величины энергии, передаваемой в импульсе, возможно до определенного предела, зависящего от времени запирающего тиристора. Для широтно-импульсных преобразователей с параллельной коммутацией, указанный выше диапазон регулирования выходного напряжения не осуществим при допустимой для серийных тиристорных частоте.

4. В преобразователях с последовательной коммутацией возможно получить весьма малую величину выходного напряжения с предельной для тиристорных частотой переключений, ввиду того, что минимальная длительность импульсов не ограничивается временем запирающего тиристора. Схема широтно-импульсного преобразователя с последовательной индуктивной коммутацией позволяет расширить диапазон регулирования выходного напряжения до 1 500 при частоте следования импульсов $300 \div 400$ гц. Показаны недостатки таких преобразователей, которые не позволяют считать рациональным их применение на указанном электроподвижном составе.

5. В мощном тяговом электроприводе целесообразно применять тиристорные преобразователи с комбинированным способом импульсного регулирования, позволяющие получить приемлемый диапазон регулирования выходного напряжения при

относительно высокой частоте переключений без увеличения установленной мощности полупроводников и реактивных элементов. Предложенные схемные решения тиристорных преобразователей с постоянной частотой следования импульсов и двумя ступенями регулирования позволяют реализовать диапазон регулирования 1:150 при частоте переключений до 400 гц.

6. Анализ электромагнитных коммутационных процессов классическим методом и методом фазовой плоскости позволил получить зависимости для определения параметров коммутирующих элементов рассмотренных схем. Сравнительная оценка преобразователей по установленной мощности полупроводниковых и коммутирующих элементов выявила преимущества схем с комбинированным способом импульсного регулирования.

7. Анализ работы сдвигающих устройств схем управления, построенных на непрерывном и дискретном принципах действия показал преимущества дискретных систем в обеспечении необходимой помехоустойчивости, надежности и стабильности в процессе регулирования. Предложено устройство, осуществляющее дискретный сдвиг управляющих импульсов и даны рекомендации по выбору основных узлов и элементов системы управления тиристорного преобразователя с комбинированным способом импульсного регулирования. Экспериментально подтверждены указанные преимущества дискретных систем управления при повышении частоты переключений и расширении диапазона регулирования выходного напряжения.

8. Экспериментальные исследования подтвердили теоретические положения о возможности повышения частоты переключений и расширения диапазона регулирования выходного напряжения приведенных схем импульсного регулирования. Для мощного тягового электропривода может быть рекомендована разработанная автором схема тиристорного преобразователя постоянного напряжения с комбинированным способом импульсного регулирования и постоянной частотой следования импульсов: амплитудно-импульсной модуляцией на первой ступени регулирования и широтно-импульсной модуляцией на второй.

9. Материалы настоящей работы позволяют создать тиристорно-импульсные установки для маневровых и промышленных электровозов, могут быть положены в основу при разработке электроподвижного состава постоянного тока 3÷6 кв, а также использованы при проектировании других объектов с подобными преобразователями.

Сообщения по диссертационной работе были сделаны:

- а) на I Республиканской конференции молодых ученых-железнодорожников, ДИИТ, февраль, 1969;
- б) на II Республиканской межвузовской научно-технической конференции по электротехнике, Запорожье, сентябрь 1969;
- в) на научно-технической конференции молодых ученых железнодорожного транспорта, РИИЖТ, февраль 1970;
- г) на юбилейной научно-технической конференции, ДИИТ, апрель, 1970.

* * *

Некоторые разделы диссертации освещены в двух отчетах ДИИТа 1966 и 1970 гг. по разработке маневровых электровозов с источником автономной тяги.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Чиликин Г. М. Плавное регулирование напряжения на электровозах переменного тока с источником автономной тяги. Труды ДИИТа, вып. 77, «Транспорт», 1968.
2. Чиликин Г. М. Импульсный преобразователь постоянного напряжения. Авторское свидетельство № 233060. Бюллетень изобретений, № 2, 1969.
3. Чиликин Г. М. Расширение диапазона регулирования напряжения импульсных преобразователей постоянного тока. Труды ДИИТа, вып. 87, «Транспорт», 1969.
4. Чиликин Г. М. Особенности работы фильтроустройств в системах импульсного регулирования напряжения тягового электропривода. Тезисы докладов первой республиканской конференции молодых ученых-железнодорожников. Днепропетровск, 1969.
5. Чиликин Г. М. Дискретные системы управления импульсными преобразователями постоянного тока. Тезисы докладов второй республиканской межвузовской научно-технической конференции по электротехнике. Изд-во «Промінь», 1969.
6. Чиликин Г. М. Повышение частоты переключений тиристорно-импульсных преобразователей тягового электропривода. Материалы научно-технической конференции молодых ученых железнодорожного транспорта. Ростов-на-Дону, 1970.
7. Чиликин Г. М. Тиристорные преобразователи маневровых и промышленных электровозов постоянного тока. Материалы юбилейной научно-технической конференции ДИИТа. Днепропетровск, 1970.
8. Волотковский С. А., Кигель Г. А., Радковская Г. В., Чиликин Г. М., Шахтарь П. С. Вопросы усовершенствования тиристорных коммутаторов рудничных электровозов. «Горная электромеханика и автоматика», вып. 16, Харьков, 1970.
9. Чиликин Г. М. Повышение коммутационной устойчивости тиристорных преобразователей постоянного тока. Труды ДИИТа, вып. 106 (в печати).

10. Чиликин Г. М. Вопросы управления тиристорами широтно-импульсных преобразователей электроподвижного состава. Труды ДИИТа, вып. 106 (в печати).

* * *

В диссертационной работе отражены материалы заявки: Чиликин Г. М. Двухступенчатый импульсный преобразователь постоянного тока, № 1346561/24—7, по которой Комитетом по делам изобретений и открытий при Совете Министров СССР принято решение о выдаче авторского свидетельства.

Сканировала Семенова Т.Л.

БТ 27637. Областная книжная типография
Днепропетровского областного управления по печати,
г. Днепропетровск, ул. Серова, 7.

Заказ № 5079. Тираж 200 экз. Объем 1,5 печ. л. Подп. к печати 1.X-1970 г