

На правах рукописи

СЕРДОК ВЛАДИМИР НИКАНДРОВИЧ

УДК 629.424.

УЛУЧШЕНИЕ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ  
ТИРИСТОРНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ  
ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ ЦЕПЕЙ ТЕПЛОВЗОВ

Б.22.07 - Подвижной состав железных дорог и тяга поездов

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

Днепропетровск, 1989



## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В утвержденных XXV съездом КПСС Основных направлениях экономического и социального развития СССР на 1989-1990 годы и на период до 2000 года ставится главная задача - повышение эффективности железнодорожного транспорта, оснащение его более мощными, экономичными, надежными локомотивами новых серий.

В современном тепловозостроении ярко выражена направленность на повышение секционной мощности локомотива. При этом возрастает и количество потребителей, имеющих различные уровни напряжения питания и частоты, увеличиваются потери мощности на привод вспомогательного оборудования.

Расход мощности на привод вспомогательных механизмов современных тепловозов достигает 12% номинальной мощности установленных на них дизелей. Снижение затрат на 1% дает около 1 млн. рублей экономии денежных средств и дизельного топлива в год, что достаточно для работы 25...30 мощных магистральных тепловозов.

Типовая система питания собственных нужд тепловозов, основанная на применении электромашинных преобразователей, имеет существенные недостатки: малое быстродействие при регулировании, большая масса, тяжелые условия коммутации. Неисправности вспомогательных электрических машин составляют около 1% общего числа неисправностей тепловозов на дорогах сети. Кроме того, первичные источники электропитания на тепловозах - аккумуляторная батарея и генератор постоянного тока - не в состоянии удовлетворить всем требованиям, предъявляемым к выходным параметрам вторичных источников электропитания. К числу таких требований следует прежде всего отнести: точность поддержания входных параметров (напряжения, частоты), широкий температурный диапазон и др.

Как показывает опыт эксплуатации электроподвижного состава, наиболее рациональным решением проблем питания вспомогательных цепей тепловозов является применение статических преобразователей. Создан ряд преобразователей на базе полупроводниковых элементов, применяемых для питания устройств автоматики, контрольно-измерительных приборов, средств технической диагностики, заряда аккумуляторных батарей железнодорожного подвижного состава.

В связи с широким внедрением статических преобразователей на железнодорожном транспорте является актуальной проблема дальнейшего совершенствования и улучшения технико-экономических показателей вторичных источников электропитания локомотивов. Важной задачей является

как разработка новых средств, так и модернизация находящихся в эксплуатации в целях получения экономии электроэнергии, снижения массо-габаритных показателей и уменьшения затрат на эксплуатацию.

Диссертационная работа является составной частью исследований, выполненных в ДИИТе в соответствии с решениями партии и правительства и других директивных решений по проблеме "Создание ряда маневровых и прмышленных локомотивов, секций автономного питания" и рядом отраслевых и межотраслевых документов на период 1966-2000 г. совместно с СКБ "ДЭВЗа", ЗПО "Преобразователь".

Цель работы заключается в повышении технико-экономических показателей тиристорных преобразователей собственных нужд тепловозов.

В соответствии с этим сформулированы и решены следующие задачи:

- для питания вспомогательных цепей тепловозов предложен тиристорный преобразователь напряжения с повышенной коммутационной способностью;
- разработана аналитическая модель коммутирующего узла с корректирующими звеньями;
- определено влияние структуры коммутирующего контура преобразователя на его эффективность;
- разработана методика расчета параметров цепей и процессов в коммутирующем узле с корректирующими звеньями;
- разработана программа расчета на ЭВМ оптимальных соотношений параметров узла коммутации с заданным числом корректирующих звеньев, а также тока и напряжения в этом узле в любой момент времени;
- выполнены экспериментальные исследования по определению потерь мощности и перенапряжений в коммутирующем узле сосредоточенного и распределенного вида и сравнение полученных результатов;
- проведены стендовые испытания преобразователя и доказана эффективность применения узла коммутации с корректирующими звеньями;
- проверен в эксплуатационных условиях на дизельной секции тягового агрегата предложенный преобразователь с формирующей цепью узла коммутации с корректирующими звеньями.

Методы исследования. Решение поставленных задач выполнено на основе положений теории нелинейных электрических цепей с использованием операторного метода решения системы дифференциальных уравнений, аппарата линейной алгебры, метода математической индукции в сочетании с результатами экспериментов. Поиск оптимальных значений параметров узла коммутации осуществлен одним из численных методов минимизации функций многих переменных - симплекс - методом.

Экспериментальные исследования проведены на инверторе напряжения для питания вспомогательных цепей тягового агрегата ОПЭГБ. Схема узла коммутации инвертора выполнена с использованием формирующей цепи с корректирующими звеньями.

Научная новизна:

- доказана эффективность применения узла коммутации с корректирующими звеньями в тиристорных преобразователях;
- получены аналитические выражения величины тока и напряжений в коммутирующем узле с любым числом звеньев;
- разработана методика расчета параметров цепей и процессов узла коммутации с корректирующими звеньями;
- определены оптимальные соотношения между  $L$  и  $C$  - параметрами, при которых в коммутирующем узле формируется импульс тока требуемого качества.

Практическая ценность. Применение коммутирующего узла с корректирующими звеньями позволило уменьшить потери энергии преобразователя и повысить его коммутационную устойчивость за счет стабилизации времени выключения тиристорov. Предложена инженерная методика расчета параметров цепей и процессов в узле коммутации с корректирующими звеньями. Разработан, изготовлен и проверен в эксплуатационных условиях тиристорный преобразователь напряжения для питания вспомогательных цепей дизельной секции тягового агрегата.

Реализация работы. Результаты исследований и расчетов использованы: специальным проектно-конструкторским и технологическим бюро по промышленным электровозам производственного объединения Днепропетровского электровозостроительного завода при разработке преобразователя напряжения для питания вспомогательных цепей перспективных тяговых агрегатов, локомотивным депо Докучаевского флюсоделомитного комбината на тяговых агрегатах ОПЭГБ, кафедрой "Локомотивы и локомотивное хозяйство" ДИИТА в учебном процессе при подготовке инженеров по специальности № 1709 при изучении электроборудования локомотивов.

Апробация работы. Основные положения диссертации доложены, обсуждены и одобрены:

- на Всесоюзной научно-технической конференции "Создание и техническое обслуживание локомотивов большой мощности" (г. Ворошиловград, 1985 г.);
- на заседании научно-технической секции СКБ ДЭВЗа (г. Днепропетровск, 1986 г.);
- на научном семинаре кафедры теоретических основ электротехники (г. Днепропетровск, 1986, 1987 гг.);

- на научном семинаре кафедры локомотивов и локомотивного кон-  
струкция ДИИТа (г. Днепропетровск, 1967, 1968 гг.);

- на Всесоюзной научно-технической конференции с участием спе-  
циалистов социалистических стран "Проблемы повышения надежности и  
безопасности технических средств железнодорожного транспорта" (г. Моск-  
ва, ВЗИИТ, 1968 г.).

Публикации. Основное содержание работы изложено в десяти печат-  
ных работах и шести отчетах по НИР. Новизна и оригинальность техни-  
ческих решений подтверждены заявкой на изобретение, по которой полу-  
чено положительное решение.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из  
введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы,  
приложения на 41 стр. и содержит 159 страниц машинописного текста,  
45 рисунков, 7 фотографий, 9 таблиц.

### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, дана краткая крити-  
ческая оценка традиционных однозвенных коммутационных узлов, сформу-  
лированы задачи и направление исследований, указана цель диссертаци-  
онной работы.

В первой главе представлены технические характеристики преобразо-  
вателей напряжений собственных нужд тепловозов. Показано, что раз-  
работке тиристорных преобразователей, применяемых в качестве вторич-  
ных источников питания вспомогательных цепей локомотивов, в настоя-  
щее время уделяется большое внимание. Особое место занимает исследо-  
вания по совершенствованию коммутационных узлов таких преобразова-  
телей.

Большой вклад в разработку теории проектирования статических  
преобразователей внесли советские ученые А.А.Булгаков, Т.А.Глазенок,  
В.А.Лабунцов, В.С.Руденко, А.С.Сандлер, А.Х.Ситник, Д.Г.Толстов,  
Г.М.Чиженок.

Работы ученых А.Т.Буркова, И.П.Исаев, Ю.М.Иникова, А.С.Мазне-  
ва, В.И. Некрасова, А.В.Плакса, Я.И.Пармаса, В.П.Леоктистова суще-  
ственно расширили применение статических преобразователей на отече-  
ственных локомотивах.

Глубокие теоретические и экспериментальные исследования по раз-  
работке и применению тиристорных преобразователей, обладающих высокой  
эксплуатационной надежностью, приемлемой массой и габаритами, для  
установки на локомотивах, содержатся в работах А.С.Захарчука, А.Н.Ко-  
млева, В.В.Стрекопытова, В.Д.Кузьмича, Г.М.Чиликина, А.М.Лукова,  
А.С.Корнева и др.

При разработке тиристорных преобразователей, когда узел коммутации представлен схемой с сосредоточенными параметрами коммутирующих емкости  $C_K$  и индуктивности  $L_K$ , импульс коммутационного тока  $I_K$  имеет форму, близкую к полуволне синусоиды, причем только часть времени перезарядки конденсатора соответствует времени на выключение тиристора, а величина энергии, накапливаемой в коммутирующем узле, превышает необходимую энергию на коммутацию более чем на 50%. Это приводит к увеличению потерь энергии в преобразователе и его массо-габаритных показателей.

Применяемые в настоящее время различные схемотехнические решения улучшают энергетические, массо-габаритные и коммутационные характеристики преобразователей. Однако масса и габариты самих коммутирующих элементов — дросселя и конденсатора — велики, так как значения емкости коммутирующего конденсатора  $C_K$  и индуктивности дросселя  $L_K$  находятся в пропорциональной зависимости от времени восстановления вентильных свойств тиристора, которое для современных мощных тиристорov составляет несколько десятков микросекунд.

Один из наиболее эффективных способов улучшения массо-габаритных, динамических и частотных характеристик автономных инверторов — использование в них в качестве вентиля ключевых полупроводниковых приборов с малыми потерями и высокой скоростью переключения. К таким приборам относятся выключаемые и комбинированно выключаемые тиристоры. Однако ввиду сложности технологии изготовления и дороговизны такие тиристоры пока не нашли широкого применения в преобразовательной технике, особенно на транспорте.

Анализ литературных источников показал, что существенные резервы повышения энергетических показателей преобразующих устройств содержатся в системах коммутирующих узлов с распределенными параметрами. Основными их преимуществами являются стабилизация схемного времени выключения тиристорov, снижения уровня напряжения и уменьшение импульсной нагрузки на полупроводниковые приборы за счет возможности формирования импульса коммутационного тока прямоугольной формы.

Существуют различные способы получения прямоугольного импульса коммутационного тока. В.Т.Долбней и Д.П.Гончаровым предложен коммутирующий узел состоящий из нескольких параллельно включенных резонансных контуров, настроенных на частоты 1,3,5,7... гармоник собственной частоты колебаний основной резонансной цепи с амплитудами, убывающими пропорционально номеру гармоники. При этом расширяется диапазон регулирования напряжения и уменьшаются потери мощности в 1,25...1,3 раза по сравнению с однозвенным узлом коммутации.

Д.З.Гоголицыным и А.С.Басарой исследован преобразователь, где в качестве узла коммутации использован формирующий двухполюсник. Применение такого узла для записания тиристора позволило уменьшить значе-ние коммутационной емкости и амплитудное значение тока коммутации.

Г.Л.Кощев разработал автономный инвертор напряжения, узел ком-мутации которого выполнен в виде искусственной длинной линии, что позволило снизить зависимость времени выключения тиристором от на-грузки и увеличить предельную частоту инвертирования в 1,5 раза.

Вопросы оптимального расчета и проектирования коммутационных уз-лов с многоячейковой однородной цепью наиболее полно рассмотрены А.С.Корневым. Причем для построения узла рекомендуется ограничиться четырьмя ячейками, поскольку большее их число не дает ощутимых допол-нительных преимуществ, а при меньшем форма импульса коммутационного тока сильно отличается от прямоугольной. При этом стабилизируется схемное время выключения тиристором, снижается в 1,5 раза уровень напряжения на коммутационных конденсаторах относительно напряжения ис-точника питания, снижается в 1,2 раза импульсная токовая нагрузка на вентилях, участвующих в коммутации и на 15...20% потери мощности в узле коммутации.

Существенным недостатком коммутационного узла, состоящего из мно-гоячейковой однородной  $L_{я}C_{я}$  цепи, однако является необходимость ис-пользования конденсаторов на полное напряжение и высокие скорости на-растания тока и напряжения, что требует ввода дополнительного дроссе-ля насыщения.

Свободным от указанных недостатков является коммутационный узел с корректирующими звеньями.

В заключение главы, исходя из актуальности повышения технико-эко-номических показателей тиристорных преобразователей тепловозов, сфор-мулированы цель и задачи диссертационной работы.

Во второй главе разработана аналитическая модель коммутационного контура с корректирующими звеньями. Описано состояние такой цепи при-менительно к процессу выключения главного тиристора. Получено общее аналитическое выражение тока коммутации, сформированного многозвен-ным узлом, а также напряжения на коммутационном конденсаторе  $C_0$ . Оп-ределены оптимальные коэффициенты связи между реактивными элементами формирующей цепи, при которых форма импульса тока близка к трапеце-идальной.

В общем случае узел коммутации с распределенными по цепи пара-метрами представляет собой реактивный двухполюсник 2-го каноническо-го вида (рис. 1).

Формирующая цепь с корректирующими звеньями:

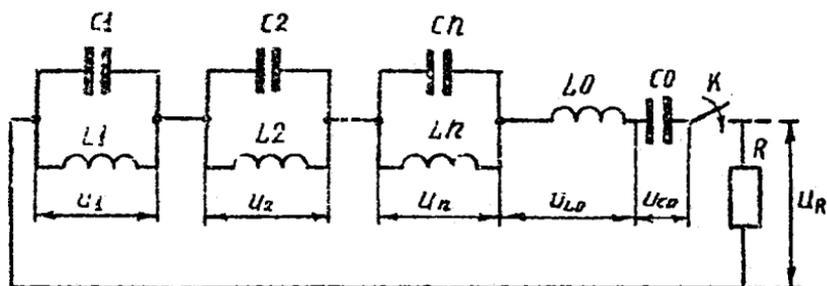


Рис. 1

Процесс разряда конденсатора  $C_0$  в этой цепи описывается системой дифференциальных уравнений

$$\frac{di}{dt} = \frac{i}{L_0} u_{C_0} - \frac{1}{L_0} u_{C_1} - \dots - \frac{1}{L_0} u_{C_n},$$

$$\frac{dU_{C_0}}{dt} = -\frac{1}{C_0} i,$$

$$\frac{dU_{C_j}}{dt} = Y_j, \quad j = \overline{1, n},$$

$$\frac{dY_j}{dt} = \frac{1}{L_0 C_j} U_{C_0} - \frac{1}{L_0 C_j} U_{C_1} - \dots - \frac{1}{C_j} \left( \frac{1}{L_0} + \frac{1}{L_j} \right) U_{C_j} - \dots - \frac{1}{L_0 C_j} U_{C_n}, \quad j = \overline{1, n},$$

с начальными условиями

$$i(0) = 0,$$

$$U_{C_0}(0) = U_0,$$

$$U_{C_j}(0) = 0, \quad j = \overline{1, n},$$

$$Y_j(0) = 0, \quad j = \overline{1, n}.$$

(2)

Система уравнений (I) решена операторным методом с привлечением аппарата линейной алгебры и метода математической индукции.

В результате решения получено аналитическое выражение тока коммутации в  $n$ -звенном коммутующем узле

$$i(t) = \frac{U_0}{L_0} \sum_{K=1}^{n+1} Z_K \cdot \sin \sqrt{-\alpha_K} t \quad (3)$$

и напряжение на коммутующем конденсаторе

$$u_{C_0}(t) = U_0 - \frac{U_0}{L_0} \sum_{K=1}^{n+1} \frac{Z_K}{\sqrt{-\alpha_K}} (1 - \cos \sqrt{-\alpha_K} t), \quad (4)$$

где

$$Z_K = \frac{\beta_n \alpha_K^n + \beta_{n-1} \alpha_K^{n-1} + \beta_{n-2} \alpha_K^{n-2} + \dots + \beta_{n-j} \alpha_K^{n-j} + \dots + \beta_1 \alpha_K + \beta_0}{(-1)^{n+2} a_{n+1} (n+1) (\sqrt{-\alpha_K})^{2(n+1)-1} + (-1)^{n+1} a_n n (\sqrt{-\alpha_K})^{2n-1} + \dots + (-1)^{n-j+1} a_{n-j} (n-j) (\sqrt{-\alpha_K})^{2(n-j)-1} + \dots + (-1)^2 a_1 \sqrt{-\alpha_K}};$$

$\alpha_K < 0, K=1, n+1$  - корни характеристического полинома знаменателя;

$n$  - число корректирующих звеньев, а коэффициенты  $a_j, \beta_j$  определяются выражениями:

$$a_{n+1} = 1,$$

$$a_n = \sum_{i=0}^n \omega_i^2 + \frac{1}{L_0} \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i},$$

$$a_{n-1} = \sum_{\substack{i_1=0 \\ i_1 < i_2}}^{n-1} \sum_{i_2=1}^n \omega_{i_1}^2 \omega_{i_2}^2 + \frac{1}{L_0} \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i} \left( \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \omega_j^2 \right),$$

$$a_{n-k} = \sum_{\substack{i_1=0 \\ i_1 < i_2 < \dots < i_{k+1}}}^{n-k} \sum_{i_2=1}^{n-k+1} \dots \sum_{i_{k+1}=k}^n \left( \prod_{j=1}^{k+1} \omega_{i_j}^2 \right) + \frac{1}{L_0} \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i} \left( \sum_{\substack{i_1=1 \\ i_1 \neq i, i_2 \neq i, \dots, i_k \neq i}}^{n-k+1} \sum_{i_2=2}^{n-k+2} \dots \sum_{i_k=k}^n \left( \prod_{j=1}^k \omega_{i_j}^2 \right) \right),$$

$$a_0 = \prod_{i=0}^n \omega_i^2;$$

$$b_n = 1,$$

$$b_{n-1} = \sum_{i=1}^n \omega_i^2,$$

$$b_{n-2} = \sum_{\substack{i_1=1 \\ i_1 < i_2}}^{n-1} \sum_{i_2=2}^n \omega_{i_1}^2 \omega_{i_2}^2,$$

$$b_{n-k} = \sum_{i_1=1}^{n-k+1} \sum_{i_2=2}^{n-k+2} \dots \sum_{i_k=k}^n \left( \prod_{j=1}^k \omega_{i_j}^2 \right),$$

$$b_0 = \prod_{j=1}^n \omega_j^2.$$

Полученные выражения (3) и (4) содержат в себе один из наиболее показательных компонентов цепных схем - число звеньев  $n$ .

Однако импульс тока, описываемый выражением (3), имеет трапецеидальную форму не при любом соотношении параметров  $L_j, C_j, j = \overline{0, n}$ . Поэтому найдены такие соотношения между LC-параметрами вида  $C_j = \nu_j C_0, L_j = \omega_j L_0, j = \overline{1, n}$ , чтобы ток коммутации в  $n$ -звенном коммутирующем узле имел трапецеидальную форму. С учетом этих соотношений выражения тока (3) и напряжения (4) примут вид:

$$i(t) = \frac{U_0}{\rho} \sum_{K=1}^{n+1} Z_K \sin \sqrt{-\beta_K} \omega_0 t, \quad (5)$$

$$u_{c_0}(t) = U_0 - U_0 \sum_{K=1}^{n+1} \frac{Z_K}{\sqrt{-\beta_K}} (1 - \cos \sqrt{-\beta_K} \omega_0 t),$$

где

$$Z_K = \frac{\hat{b}_n \beta_K^n + \hat{b}_{n-1} \beta_K^{n-1} + \dots + (-1)^{n+2} \hat{a}_{n+1} (n+1) (\sqrt{-\beta_K})^{2(n+1)-1} + (-1)^{n+1} \hat{a}_n n (\sqrt{-\beta_K})^{2n+1} + \dots +}{(-1)^{n+2} \hat{a}_{n+1} (n+1) (\sqrt{-\beta_K})^{2(n+1)-1} + (-1)^{n+1} \hat{a}_n n (\sqrt{-\beta_K})^{2n+1} + \dots +}$$

$$\frac{+\hat{b}_{n-j}\beta_k^{n-j} + \dots + \hat{b}_1\beta_k + \hat{b}_0}{+(-1)^{n-j+1}\hat{a}_{n-j}(n-j)(\sqrt{-\beta_k})^{2(n-j)-1} + \dots + (-1)^2\hat{a}_1\sqrt{-\beta_k}}$$

а коэффициенты  $\hat{a}_j, j = \overline{0, n+1}; \hat{b}_j, j = \overline{0, n}$  зависят от параметров  $V_j, W_j, j = \overline{1, n}; \beta_k < 0, k = \overline{1, n+1}$  являются корнями характеристического уравнения знаменателя;  $\rho = \sqrt{L_0/C_0}$  - волновое сопротивление основного колебательного контура;  $\omega_0 = 1/\sqrt{L_0C_0}$  - собственная частота основного колебательного контура.

Задача определения оптимальных коэффициентов связи  $V_j, W_j, j = \overline{1, n}$  решена с использованием ЭВМ путем минимизации симплекс-методом функции, равной отношению площадей  $F_1/F_2$ , где  $F_2$  - площадь криволинейной трапеции, образованной кривой импульса тока при некоторых значениях параметров  $V_j, W_j, j = \overline{1, n}$ ;  $F_1$  - площадь прямоугольника, одна сторона которого равна максимальной амплитуде тока коммутации, а другая - полупериоду колебаний тока.

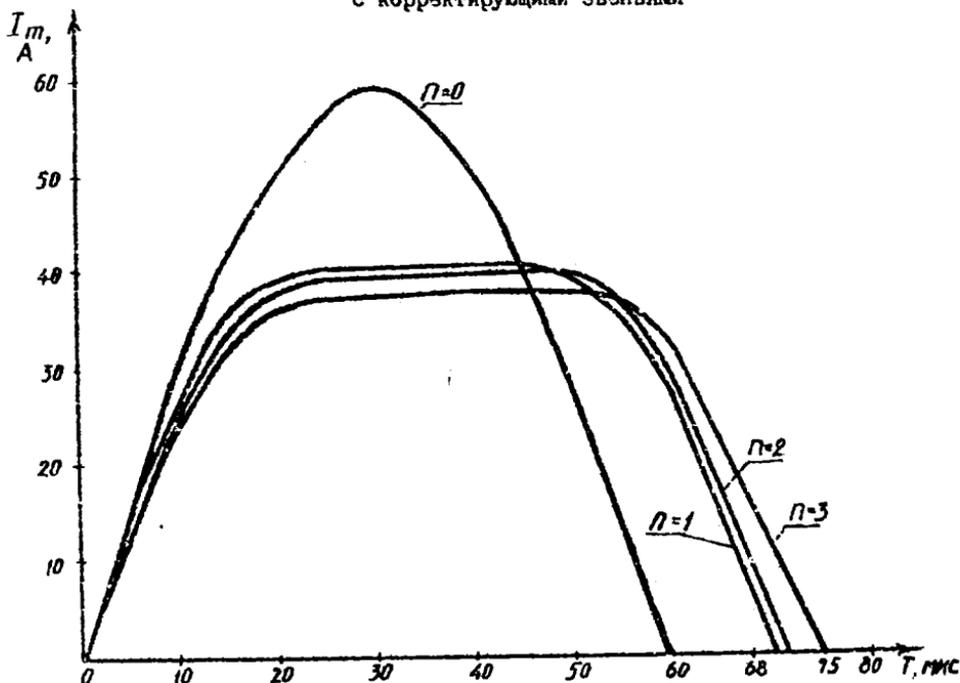
В результате расчетов получены следующие коэффициенты:

для	$n = 1$	$V_1 = 0,667$	$W_1 = 0,313$	
	$n = 2$	$V_1 = 0,637$	$W_1 = 0,332$	(6)
		$V_2 = 0,331$	$W_2 = 0,068$	
	$n = 3$	$V_1 = 0,592$	$W_1 = 0,071$	
		$V_2 = 0,649$	$W_2 = 0,386$	
		$V_3 = 0,566$	$W_3 = 0,040$	

Графики импульсов тока, построенные по полученным результатам, приведены на рис. 2. Там же в качестве примера нанесена кривая тока, сформированная LC-контуром.

Из кривых следует, что амплитуда тока в узле коммутации с корректирующими звеньями снижена в 1,5 раза и увеличено время, предоставляемое тиристорам для восстановления своих запирающих способностей, в 1,2 раза по сравнению с эквивалентным LC-контуром. Кроме того, форма тока явно приближена к трапециoidalной.

Кривые импульсов тока, сформированные узлом коммутации с корректирующими звеньями



$n = 0$  - с обычным LC-контуром;  $n = 1$  - с одним корректирующим звеном;  $n = 2$  - с двумя корректирующими звеньями;  $n = 3$  - с тремя корректирующими звеньями.

Рис. 2

В третьей главе представлена разработанная методика расчета параметров узла коммутации с корректирующими звеньями. Получены аналитические выражения для расчета коммутирующих емкости и индуктивности, а также параметров корректирующих звеньев. Обоснована структура узла коммутации с корректирующими звеньями.

Выбор рационального состава коммутирующего узла с корректирующими звеньями проведен на основе анализа реальных импульсов, построенных по результатам расчета на ЭВМ для числа  $n$ , равного 1, 2, 3.

Для удобства сопоставления и оценки длительности исследуемые импульсы построены в относительных единицах в предположении неизменного значения емкости  $C_0$  и индуктивности  $L_0$ .

Анализ полученных кривых показал, что для рационального использования структуры узла коммутации целесообразно в его состав включать одно корректирующее звено, параметры которого связаны соотношениями (6). Применение большого числа  $LC$ -контуров нецелесообразно, так как это не приводит к существенным изменениям параметров и формы импульса, а также нерационально из конструктивно-технологических соображений. Причем эффективность использования узла с корректирующими звеньями возрастает с уменьшением расчетного значения коэффициента коммутационной способности ( $K_{сп}$ ). Поэтому запас по амплитуде прямого тока главного тиристора, содержащийся в численном значении  $K_{сп}$ , для коммутирующего узла с корректирующими звеньями может быть снижен до  $I, I$ .

Угол восстановления тиристорov определен на основе анализа импульсов тока, построенных на рис. 2. С использованием метода деления отрезка пополам, а также аппарата аналитической геометрии получено выражение угла восстановления для числа  $n$ , равного 0, 1, 2, 3 при выбранном значении  $K_{сп}$ :

$$\omega t_b = 3,14 + 1,065n + 1,315n^2 - 0,37n^3 - \frac{(-2,084n + 1,35n^2 - 0,29n^3) \cdot I}{K_{сп}}$$

Это выражение также в качестве основного компонента содержит число звеньев  $n$ .

Для расчета  $LC$ -параметров автором получены следующие выражения:

$$L_0 = \frac{U_0 Z t_b}{I_H \sqrt{K_1 K_2} (A \cdot K_{сп} - B)} ;$$

$$C_0 = \frac{I_H K_{сп} t_b}{U_0 Z \sqrt{K_1 K_2} (A - B / K_{сп})} ;$$

$$C_i = V_i \cdot \frac{I_H K_{сп} t_b}{U_0 Z \sqrt{K_1 K_2} (A - B / K_{сп})} ;$$

$$L_i = W_i \cdot \frac{U_0 Z t_b}{I_H \sqrt{K_1 K_2} (A \cdot K_{сп} - B)} .$$

где  $t_b$  - паспортное время выключения тиристорov;  $I_H$  - ток нагрузки;  $U_0$  - входное напряжение.

Значения коэффициентов  $A, B, Z, K_1, K_2$  сведены в таблицу.

Таблица

$n$	0	1	2	3
$A$	3,14	5,15	7,57	8,18
$B$	2	2,22	3,4	3,8
$Z$	-	0,695	0,695	0,642
$K_1$	-	0,40	0,18	0,17
$K_2$	-	1,31	1,40	1,50

Сравнительный анализ перенапряжений, возникающих на конденсаторах узла коммутации, проведен в предположении, что цепи имеют равные волновые сопротивления  $\rho = \rho_2$ . В результате получены аналитические выражения энергии коммутации и перенапряжений в  $n$ -звенном узле коммутации.

Показано, что использование коммутирующих узлов с корректирующими звеньями позволило снизить затраты энергии на коммутацию в 1,2 раза, а уровень напряжения на полупроводниковых приборах, участвующих в коммутации, в 1,3 раза по сравнению с обычным LC-контуром.

В четвертой главе приведены результаты экспериментальных исследований, проведенных на стенде ДИИТа, испытательной станции СКБ ПО ДЭВЗа, и эксплуатационных испытаний на тяговом агрегате ОПЭИБ.

Цель исследований - проверка правильности предложенных технических решений и принятых допущений по повышению коммутационной устойчивости тиристорного преобразователя, улучшению его технико-экономических показателей.

Задача эксперимента заключалась в исследовании работоспособности тиристорного преобразователя с предложенной структурой узла коммутации, а также в определении оптимального состава формирующей цепи узла коммутации.

Для исследования электромагнитных процессов в тиристорном преобразователе напряжения создан специальный стенд, который содержит блок питания, контрольно-измерительные приборы, устройства сигнализации, защиты и коммутации электрических цепей, быстродействующий АЦП и микро-ЭВМ "Электроника ДЗ-28".

С помощью микро-ЭВМ были измерены и зафиксированы значения тока и напряжения в узле коммутации для  $n$  корректирующих звеньев.

По результатам эксперимента были построены кривые импульсов тока коммутации и напряжения на  $C_0$  для числа  $n$ , равного 1, 2, 3. Сравнение этих кривых с графиками, построенными по полученным анали-

тическим выражением, показало хорошее совпадение теоретических и экспериментальных данных.

Многообразие форм представления потерь мощности, параметров входных величин и способов реализации функций произведения определяет и многообразие методов измерения потерь мощности. В любом случае на измерительный преобразователь мощности или измерительный преобразователь входных величин воздействует не сама мощность, а входные величины тока и напряжения.

При экспериментальном определении потерь мощности в элементах тиристорного преобразователя применение обычных измерительных приборов и методов измерения затруднено, а в ряде случаев и невозможно ввиду широкого спектра и значительных амплитуд гармонических составляющих токов и напряжений, большой крутизны фронта импульсов и высокой частоты изменения тока, особенно в коммутирующем узле, а также значительной разницы между амплитудами токов и напряжений полупроводниковых приборов в открытом и закрытом состоянии.

На точность определения потерь графоаналитическим способом влияет много факторов, главными из которых являются точность установления масштабов по осциллографу и отсчет текущих значений тока и напряжения, которые могут давать погрешность любого знака.

Получаемые при измерениях осциллограммы тока и напряжения обычно требуют дальнейшей обработки. Для автоматической обработки фиксируют мгновенные значения величин в определенные моменты времени путем их запоминания обычно в цифровой форме.

Анализ методов измерения потерь мощности в элементах полупроводникового преобразователя показал, что наиболее универсальным является метод с накоплением энергии, основанный на колебательном перезаряде конденсатора и фиксации мгновенных значений тока и напряжения с помощью быстродействующего АЦП с последующим вводом получаемой информации в микро-ЭВМ. Этот метод и был использован в работе для определения потерь мощности и оценки перенапряжений, возникающих на элементах узла коммутации. Для реализации метода был разработан и изготовлен быстродействующий аналого-цифровой преобразователь с памятью.

В процессе экспериментальных исследований получены осциллограммы коммутационного тока и напряжения на  $C_0$ , причем кривые токов, формируемых узлом коммутации с корректирующими звеньями, имели форму, явно приближенную к трапецеидальной.

Проведенные испытания преобразователя полностью подтвердили работоспособность выбранных технических решений, достоверность основ-

ных положений теоретических исследований и расчета параметров узла коммутации.

Экспериментально получены следующие основные результаты:

- амплитуда коммутационного тока, сформированного узлом коммутации с корректирующими звеньями, снижена более чем в 1,3 раза по сравнению с эквивалентным  $LC$ -контуром при одинаковом времени восстановления вентильных свойств тиристорov;
- средняя мощность потерь в узле коммутации с корректирующими звеньями в 1,3 раза меньше, чем для  $LC$ -контура;
- применение коммутирующих узлов с корректирующими звеньями уменьшает величину перенапряжений в 1,5 раза по сравнению с эквивалентными им  $LC$ -цепями, причем достаточно использовать одно корректирующее звено с соотношениями между параметрами цепи, полученными в работе;
- стабилизируется время, необходимое для восстановления вентильных свойств тиристорov.

Эксплуатационная проверка работоспособности тиристорного преобразователя, где в качестве формирующей цепи применен узел коммутации с корректирующими звеньями, проведена на тяговом агрегате ОПЭБ Докучаевского флосодоломитного комбината. Результаты испытаний преобразователя оформлены соответствующим актом.

Технико-экономическое обоснование узла коммутации с корректирующими звеньями проведено в сравнении с эквивалентным одноконтурным коммутирующим узлом тиристорного преобразователя для питания вспомогательных цепей тягового агрегата ПЭЗТ.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Анализ схем питания вспомогательных цепей локомотивов, опыт эксплуатации, а также общее развитие преобразовательной техники показали целесообразность замены машинных преобразователей постоянного тока тиристорными.

2. Проведенный анализ схем узлов коммутации тиристорных преобразователей постоянного тока показал, что существенные резервы повышения энергетических показателей преобразующих устройств содержатся в системах коммутирующих узлов.

3. Доказано, что узлы коммутации с корректирующими звеньями (пр определенных в работе соотношениях параметров) позволяют сформировать импульсы коммутационного тока, близкие к трапецидальной форме, что стабилизирует схемное время выключения тиристорov и повышает коммутационную устойчивость преобразователя.

4. Предложенная методика позволяет определять оптимальные соотношения между параметрами многозвенного узла коммутации с любым числом звеньев, при которых форма коммутационных импульсов тока приближена к трапецеидальной.

5. Доказано, что применение коммутационных узлов с корректирующими звеньями позволяет снизить уровень напряжения на тиристорах более чем в 1,3 раза.

6. Доказано, что использование многозвенного узла коммутации позволяет снизить потери на 18% по сравнению с узлами коммутации с обычным LC-контуром, что улучшает энергетические показатели КУ и преобразователя в целом.

7. Проведенные стендовые испытания тиристорного преобразователя полностью подтвердили правильность технических решений и принятых допущений по повышению коммутационной устойчивости тиристорного преобразователя, улучшению его технико-экономических показателей.

8. Эксплуатационные испытания тиристорного преобразователя для питания вспомогательных цепей тепловозов доказали работоспособность выбранных технических решений, достоверность основных положений теоретических исследований и расчета параметров узла коммутации.

9. Установлено, что массо-габаритные показатели узла коммутации с корректирующими звеньями не превышают соответствующие показатели КУ с традиционным LC-контуром.

10. Экономический эффект от использования узла коммутации с корректирующими звеньями составил 3,3 тыс.руб. в год на один тяговый агрегат.

Основное содержание диссертационной работы опубликовано в следующих работах:

1. Сердюк В.Н. Преобразователь постоянного напряжения на базе автономного инвертора с регудируемым выходом/ Днепропетр. ин-т ж.-д. трансп. - Днепропетровск, 1988. - 8 с.: ил.-Деп. в ЦНИИТЭИ МПС 29.02.88 № 4031.

2. Сердюк В.Н. Устройство защиты преобразователя напряжения для заряд. аккумуляторной батареи тягового агрегата/Днепропетр. ин-т ж.-д. трансп.- Днепропетровск, 1987.-8с.: ил.- Деп. в ЦНИИТЭИ МПС 25.05.87, № 4030.

3. Сердюк В.Н. Результаты испытаний схемы защиты полупроводниково-го преобразователя заряда аккумуляторной батареи дизельной секции тягового агрегата // Пути повышения надежности и экономичности тепловозов: Сб.научн. тр./ Днепропетр. ин-т ж.-д. транспорта, Днепропетровск, 1987.-с.80-85.

4. Кияшко Ю.Н., Сердюк В.Н., Лотоцкий Ю.Г. Устройство для управления тиристором/ Положительное решение по заявке № 4238421/24-07 от 28.04.1987.

5. Красильников В.Н., Сердюк В.Н., Буяков С.Н. Результаты испытаний полупроводникового преобразователя напряжения заряда аккумуляторной батареи // Пути повышения надежности и экономичности тепловозов: Сб.научн.тр./ Днепропетр. ин-т ж.-д. транспорта. Днепропетровск, 1987.-с.85-90.

6. Красильников В.Н., Масляникова Н.С., Сердюк В.Н. Преобразователи напряжения систем регулирования устройств автоматики и средств технической диагностики тепловозов // Тез.докл.всесоюз.конференции "Создание и техн.обслуживание локомотивов большой мощности", 21-23 мая 1985 г.- Ворошиловоград, 1985.- с.214.

7. Красильников В.Н., Сердюк В.Н. Разработка стенда для испытания плат и ячеек инвертора электропривода тепловозного кондиционера/ Днепропетр. ин-т ж.-д. трансп.- Днепропетровск, 1985.- 13 с.: ил.-Деп. в ЦНИИТЭИ МПС 30.07.85, № 3215.

8. Красильников В.Н., Сердюк В.Н. Анализ схем полупроводниковых источников питания собственных нужд подвижного состава городского и железнодорожного транспорта/ Днепропетр. ин-т ж.-д. трансп.- Днепропетровск, 1985. - 6 с.: ил.- Деп. в ЦНИИТЭИ МПС Указатель ВНИТИ, № 3.

9. Красильников В.Н., Сердюк В.Н. Анализ схем преобразователей напряжения для питания собственных нужд тепловозов/ Днепропетр. ин-т ж.-д. транспорта - Днепропетровск, 1984. - 16 с.: ил. - Деп. в ЦНИИТЭИ МПС 24.II.84, № 2947.

10. Красильников В.Н., Сердюк В.Н. Результаты испытаний полупроводникового преобразователя для питания радиостанции и локомотивной сигнализации перспективных тепловозов /Днепропетр. ин-т ж.-д. трансп. - Днепропетровск, 1984.-25 с.: ил. - Деп. в ЦНИИТЭИ МПС 24.II.84, № 2947.

**СЕРДЮК Владимир Никандрович**

**Улучшение технико-экономических показателей  
тиристорных преобразователей напряжения  
вспомогательных цепей тепловозов**

Подписано к печати 9.03.89 г. БТ 70023. Формат 60х84 1/16.

Бумага для множительных аппаратов. Ротапринт.

Усл. печ. л. 1,05. Уч.-изд. л. 1,0. Тираж 100 экз.

Заказ 410 Бесплатно.

Участок сперативной полиграфии ДУИТа. 320700, ГСП, Днепропетровск,  
10, ул. Академика В.А.Лазаряна, 2.

Сканировала Семенова Т.Л.