

СССР — МПС

**ДНЁПРОПЕТРОВСКИЙ ИНСТИТУТ
ИНЖЕНЕРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА**

Инженер И. Г. БЕСПРОЗВАННЫЙ

**Исследование работы импульсных систем управления
вентильями для электроподвижного состава**

(Специальность № 435 — «Электрификация
и электроснабжение железнодороджного транспорта»)

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

ДНЁПРОПЕТРОВСК — 1968

**НТБ
ДНУЖТ**

СССР — МПС
ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ ИНСТИТУТ
ИНЖЕНЕРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Инженер И. Г. БЕСПРОЗВАННЫЙ

**Исследование работы импульсных систем управления
вентильми для электроподвижного состава**

(Специальность № 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

ДНЕПРОПЕТРОВСК — 1968

НТБ
ДНУЖТ

3265a

Работа выполнена во Всесоюзном научно-исследовательском и проектно-конструкторском институте электровозостроения и на Новочеркасском электровозостроительном заводе.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор **Ш. М. Розмадзе**, кандидат технических наук, доцент **К. Г. Кучма**.

Ведущее предприятие — Управление Северо-Кавказской железной дороги.

Автореферат разослан „____“ _____ 1968 г.

Защита диссертации состоится „6“ Декабрь 1968 г. на заседании совета Днепропетровского института инженеров железнодорожного транспорта.

г. Днепропетровск, 10, ул. Университетская, 2, ДИИТ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Ученый секретарь совета

Ю. А. Радзиховский

НТБ
ДНУЖТ

На грузонапряженных железнодорожных магистралях страны внедрена новая прогрессивная система электрической тяги на однофазном переменном токе 25 кВ промышленной частоты. На этих магистралях эксплуатируются электровазы ВЛ60, ВЛ80, ВЛ60Р, оборудованные выпрямительными установками с управляемыми ртутными вентилями-игнитронами, а также электровазы ВЛ60К, ВЛ80К, оснащенные выпрямительными установками на неуправляемых полупроводниковых вентилях.

Широкие перспективы для дальнейшего развития электрической тяги открывает применение управляемых полупроводниковых вентиляй-тиристоров. В настоящее время в нашей стране и за рубежом создаются новые типы электровазов с плавным регулированием напряжения и рекуперативным торможением на основе широкого применения более прогрессивных тиристорных преобразователей. Управление тиристорами, также как и игнитронами, осуществляется импульсными системами управления, исследованию, совершенствованию и разработке которых придается важное значение. В связи с этим существенное научное и практическое значение приобретает исследование и обобщение имеющегося опыта совершенствования и эксплуатации импульсных систем управления вентилями электровазов переменного тока.

Опыт эксплуатации этих электровазов показал, что их надежная и безаварийная работа в тяговом и рекуперативном режимах в значительной степени зависит от надежной и стабильной работы импульсной системы управления вентилями (ИСУВ). Неустойчивая работа ИСУВ приводит к нарушениям в эксплуатации, а в отдельных случаях к возникновению режимов, опасных для силового оборудования электроваза. Для электроваза с рекуперативным торможением надежная и четкая работа импульсной системы управления вентилями имеет особо важное значение. При ненадежной работе ИСУВ возникают аварийные режимы, приводящие к опрокидыванию инвертора и срыву рекуперативного торможения.

Специфические особенности, свойственные электроподвижному составу (непрерывная вибрация, значительные искажения формы кривой и большой диапазон колебания напряжения в контактной сети, значительные понижения напряжения при нагрузке электровоза, запуске вспомогательных машин, повышенная температура в кузове), вызвали необходимость дополнительного изучения и разработки требований, обеспечивающих надежную и стабильную работу импульсных систем управления вентилями на выпрямительно-инверторных преобразователях электровозов переменного тока.

Задачей настоящей работы является аналитическое и экспериментальное исследование электромагнитных процессов в импульсных системах управления вентилями, применяемых в преобразовательных установках электровозов ВЛ60, ВЛ80, Ф, ВЛ60Р, с учетом условий работы электроподвижного состава, а также исследование характеристик полупроводниковых управляющих электродов вентилях (ПУЭВ) в целях: а) определения оптимальных параметрических зон работы ПУЭВ на электроподвижном составе, б) разработки требований для ИСУВ преобразовательных установок выпрямительно-инверторных электровозов, в) разработки комплексного метода исследований, позволяющего определить соответствие импульсных систем управления вентилями электровозов этим требованиям.

Указанный выше комплекс исследований выполнен автором на Новочеркасском электровозостроительном заводе (НЭВЗ) и во Всесоюзном научно-исследовательском и проектно-конструкторском институте электровозостроения (ВЭЛНИИ) в процессе разработки электровозов со статическими преобразователями. Результаты работы использованы при производстве и эксплуатации электровозов ВЛ60, ВЛ80, а также ВЛ60Р, оборудованных рекуперативным торможением. В настоящее время при создании новых электровозов с применением тиристоров в ВЭЛНИИ используют основные положения и требования к ИСУВ, разработанные автором.

Первая глава диссертации посвящена анализу и исследованию особенностей работы ИСУВ на электроподвижном составе.

В связи с тем, что питание импульсной системы управления вентилями на электровозах переменного тока осуществляется от вспомогательной обмотки 380 в силового трансфор-

матора, напряжение питания ИСУВ зависит от величины напряжения на токоприемнике электровоза, от уровня напряжения в системе электроснабжения, удаленности электровоза от тяговой подстанции, количества и нагрузки электровозов в фидерной зоне подстанции и ряда других факторов. В условиях эксплуатации напряжение контактной сети изменяется в пределах от 19 до 29 кВ, т. е. от $0,75$ до $1,16U_n$ ($U_n = 25$ кВ). Кроме того, на величину напряжения питания импульсной системы управления существенное влияние оказывает режим нагрузки силовой и вспомогательной обмотки тягового трансформатора электровоза. В работе установлено, что действительный диапазон изменения напряжения на выводах вспомогательной обмотки, с учетом реализации наибольшей силы тяги электровоза и пуска мотор-компрессора, находится в пределах $260 \div 460$ в, что составляет $0,7 \div 1,2U_n$ ($U_n = 380$ в).

Анализ пусковых режимов вспомогательных машин показал, что при пусках вспомогательных машин и особенно частых пусках мотор-компрессоров, угол опережения и амплитуда напряжения на подхватывающем аноде уменьшается, вследствие чего нарушается работа вентиля. Установлено, что нарушения такого рода можно предотвратить, если ограничить фазу опережения импульса ИСУВ 17 эл. град. при напряжении питания 260 в и 25 эл. град. при напряжении 460 в.

Анализ условий эксплуатации электровозов и проведенные тепловые испытания показали, что наиболее тяжелые условия для работы аппаратуры ИСУВ создаются при максимальной температуре в кузове ($+60^\circ\text{C}$) и максимальном напряжении на вспомогательной обмотке трансформатора $1,2U_n$ (460 в).

В результате проведенного спектрального анализа формы кривой напряжения, как в режиме тяги, так и в режиме рекуперативного торможения установлено, что искажение формы напряжения в контактной сети влияет на электромагнитные процессы в ИСУВ. Вследствие того, что зарядный контур ИСУВ обладает резонансными свойствами, наличие искажения приводит к потере до 20% вольтсекундной площади, что ухудшает фазовую и внешнюю характеристику импульсного генератора.

Вторая глава посвящена аналитическим исследованиям электромагнитных процессов в электромагнитном генераторе импульсов (ЭМГИ). Электромагнитный генератор импульсов

подробно описан в работе Мелвилла. В последующих исследованиях отечественных и иностранных авторов развиты и расширены основные положения, выдвинутые в этой статье. Ю. А. Шмаин провел исследование ЭМГИ, построенного по принципиальной схеме Мелвилла, с резонансным зарядным контуром и дал анализ работы импульсного генератора применительно к задаче импульсного управления зажигателями игнитронов, т. е. при переменном сопротивлении нагрузки генератора импульсов, а также получил аналитическое выражение внешней характеристики этого генератора.

ЭМГИ, применяемые на электроподвижном составе, отличаются от импульсных схем зажигания, исследованных Ю. А. Шмайном, тем, что имеют зарядный контур с резонансной расстройкой и совмещенный контур разряда. В качестве критерия основных характеристик такого ЭМГИ автором предложен коэффициент резонансной расстройки A , который выражается через параметры зарядного контура X_L и X_C

$$A = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}},$$

где X_L и X_C — индуктивное и емкостное сопротивление зарядного контура.

Электромагнитные процессы в импульсном генераторе с резонансной расстройкой зарядного контура имеют свои особенности, в связи с чем в диссертации проведены аналитические исследования электромагнитных процессов в цепях этого генератора. Получены аналитические выражения для расчета фазы импульса, параметров дросселя насыщения, внешней характеристики и другие выражения для расчета импульсной системы управления вентилями. Эти исследования показали, что электромагнитные процессы в ЭМГИ с резонансной расстройкой зарядного контура следует рассматривать в следующих устойчивых режимах.

а) при напряжении питания U_n , не отличающемся от расчетного напряжения U_p ЭМГИ, т. е. при $U_n = U_p$;

б) при напряжении питания U_n , отличающемся в большую сторону от расчетного U_p , т. е. $U_n > U_p$.

Случай $U_n < U_p$ является аварийным, так как в этом режиме работа ЭМГИ становится неустойчивой, вплоть до срыва генерации. Режим $U_n = U_p$ является исходным при рас-

чете ЭМГИ на минимальное напряжение питания, возможное в эксплуатации.

Как показали исследования, максимальное напряжение на зарядном конденсаторе при $U_n = U_p$ равно $U_c = U_p K_c$, где коэффициент заряда

$$K_c = \frac{2X_c}{X_c - X_L} \cos \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{X_L}{X_c}}.$$

Фаза разряда конденсатора относительно нуля питающего напряжения зависит от параметров зарядной цепи

$$\alpha = \left(1 - \sqrt{\frac{X_L}{X_c}} \right) \frac{\pi}{2}.$$

При $U_n > U_p$ фаза импульса относительно нуля питающего напряжения (сопротивление разрядного контура $R_n \gg R_{np}$) определяется выражением

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{A(\cos A\pi + 1)}{\sin A\pi} \left[1 - \frac{U_p}{U_n} \left(\frac{A^2 - 1}{A^2} \right) \right].$$

Если же сопротивление разрядного контура $R_n < R_{np}$, фаза импульса генератора определяется выражением

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{A^2}{A^2 - 1} + \frac{U_0}{U_n \cos \alpha} \frac{A(\cos A\pi + 1)}{\sin A\pi} \left(\frac{U_p}{U_n} - \frac{A^2 - 1}{A^2} \right),$$

где U_0 — остаточное напряжение на зарядном конденсаторе.

Автором также установлено, что для устойчивой работы ИСУВ внешняя характеристика ЭМГИ должна рассчитываться для минимального напряжения питания, с учетом полученных в диссертации соотношений для зарядного контура с резонансной расстройкой.

Разработана методика математического моделирования ЭМГИ на аналоговой вычислительной машине (АВМ), на которой выполнен комплекс исследований.

1. Исследование влияния коэффициента прямоугольности петли гистерезиса коммутирующих элементов на режимы работы ЭМГИ.

2. Исследование погрешности характеристик:

$$\alpha = f(A); \quad K_c = f(A); \quad (\alpha; K_c) = f\left(A; \frac{U_p}{U_n}\right);$$

полученных аналитическим путем.

3. Исследование и выбор параметров РС разрядного контура.

4. Исследование влияния активного сопротивления в зарядном контуре на выходные характеристики ЭМГИ.

На основании выполненного в диссертации теоретического анализа электромагнитных процессов, протекающих в этом импульсном генераторе, разработана комплексная методика, с помощью которой проведены следующие экспериментальные исследования импульсных систем управления вентилями электровозов переменного тока:

1. Исследование электромагнитных процессов в зарядном и разрядном контурах ЭМГИ.

2. Исследование внешних характеристик ЭМГИ.

3. Исследование фазовых зависимостей импульса управления.

4. Исследование магнитных и электрических параметров аппаратуры ЭМГИ.

5. Исследование тепловых характеристик аппаратов.

6. Исследование динамических и статических характеристик полупроводниковых управляющих электродов вентиляей, применяющихся на электровозах.

7. Исследование характеристик полупроводниковых выпрямителей при работе в импульсных цепях ЭМГИ.

В ходе исследований было проведено сравнение экспериментальных данных с данными, полученными при инженерном расчете и при математическом моделировании на АВМ. Параметры:

$$\alpha = f(A); K_c = f(A); \gamma = f\left(A; \frac{U_r}{U_n}\right); K_c' = f\left(A; \frac{U_p}{U_n}\right),$$
$$\alpha' = f\left(A; \frac{U_0}{U_n}\right),$$

полученные расчетным путем, отличаются от параметров, полученных экспериментальным путем, на $15 \div 20\%$. Эти же параметры, полученные на электронном аналоге ЭМГИ, отличаются от экспериментальных на $5 \div 10\%$. Результаты, полученные при моделировании ЭМГИ на АВМ, позволяют рекомендовать разработанную в диссертации блок-схему для расчета, исследования и выбора оптимальных параметров ЭМГИ, а также для моделирования других импульсных схем с дроселями насыщения.

В третьей главе представлены результаты исследований характеристик полупроводниковых управляющих электродов вентилей (ПУЭВ) электровозов. Проведенный комплекс исследований позволил получить параметрические зоны вольтамперных характеристик управления наиболее характерных типов ПУЭВ при различной крутизне управляющего импульса. С помощью полученных вольтамперных зон определены параметры внешней характеристики ИСУВ, которая обеспечивает надежную работу вентилей на электровозе при заданных параметрах управляющего импульса.

В качестве полупроводниковых управляющих электродов игнитронов преобразовательных установок электроподвижного состава применяются полупроводниковые зажигатели на основе карбида бора. На электровозах переменного тока эксплуатируются вентили производства ТЗРВ, опытного завода ВЭИ и вентили типа СФТ-7 фирмы «Штейдер-Вестингауз», Франция. Каждый завод изготавливает ПУЭВ для своих вентилей по технологии, которая имеет свои заводские особенности. В связи с этим ПУЭВ разных изготовителей отличаются по своим характеристикам. Это подтверждается результатами проведенных в диссертации исследований. Экспериментальные исследования динамических характеристик управления произведены для каждого типа ПУЭВ.

В процессе исследований установлено, что полученные динамические вольтамперные характеристики управления свойственны только указанному типу ПУЭВ и являются исходными данными для расчета внешней характеристики ИСУВ. В связи с тем, что внешняя характеристика ИСУВ должна перекрывать разброс характеристик управления, проведены исследования динамических параметров управления большого количества ПУЭВ, применяемых на электровозах переменного тока.

Полученные результаты, обработанные с помощью вероятностных методов математической статистики, показали, что напряжение управления нагруженного вентиля по сравнению с режимом холостого хода уменьшается на $20 \div 30\%$, а ток управления увеличивается на $13 \div 15\%$. Установлено, что разброс характеристик управления для максимального количества ПУЭВ находится в пределах 1,6, а при высоких скоростях движения электровоза и в кривых, вследствие вибрации и наклона, разброс характеристик управления достигает 1,8.

Важнейшим фактором, способствующим повышению долговечности работы ПУЭВ, является снижение мощности рассеивания на нем. В целях более правильного определения этой мощности автором предложен метод исследования термостатических вольтамперных характеристик ПУЭВ. Проведенные по этому методу исследования показали, что мощность рассеивания на управляющем электроде в значительной степени зависит от величины температурного коэффициента сопротивления, который имеет отрицательный знак. Чем больше по абсолютной величине этот коэффициент, тем мягче термостатическая характеристика и тем меньше рассеиваемая на управляющем электроде мощность. Например, полупроводниковые управляющие электроды вентилях ИВП-500/5, ИВС-200/5 и СФТ-7 имеют значительно большую величину температурного коэффициента сопротивления, чем полупроводниковые управляющие электроды вентиля ИВС-300/5. Этим объясняется их способность работать от ИСУВ как с узким, так и с широким импульсом при малой мощности рассеивания, что особенно важно для вентилях, работающих при больших углах коммутации.

Мощность рассеивания на управляющем электроде, как установлено в процессе исследований, более правильно определять не средними, как это было принято, а эффективными значениями напряжения и тока управления, и может определяться по следующей формуле:

$$P = \frac{U_3 I_3 t_3 K_n}{2T} \text{ вт},$$

где U_3 , I_3 — амплитуда напряжения и тока управления, t_3 — время управления, T — период питающего напряжения, K_n — коэффициент, учитывающий термическое воздействие вентиля.

В четвертой главе изложены результаты экспериментальных исследований импульсных систем управления вентилями электровозов переменного тока.

На основании аналитических и экспериментальных исследований ЭМГИ и полупроводниковых свойств электродов управления вентилями установлено, что ИСУВ электровоза переменного тока в режимах тяги и рекуперативного торможения должна отвечать следующим основным требованиям:

а) расчетное напряжение ЭМГИ U_p выбирается по нижнему пределу отклонения питающего напряжения от номинального напряжения источника питания $U_p = 0,7U_n$;

б) внешняя характеристика должна иметь коэффициент запаса не менее $K_3 = 1,5$ при работе ЭМГИ в режиме $U_n \geq U_0$;

в) фаза опережения импульса не должна превышать 17 эл.град. при напряжении питания $0,7U_n$ и 25 эл.град. при $1,2U_n$ с учетом коэффициента нелинейности дросселя зарядного контура;

г) для заданного диапазона опережения фазы импульса (по п. В) при $U_n \geq U_p$, $\frac{U_0}{U_n} = 0$ оптимальным является коэффициент резонансной расстройки $A = 1,2$ (при коэффициенте нелинейности зарядного дросселя $K_L = 1,05$);

д) динамические характеристики ПУЭВ должны быть стабильными и соответствовать выбранной внешней характеристике ИСУВ;

е) тепловая мощность аппаратуры должна соответствовать максимальному напряжению вспомогательной обмотки трансформатора $1,2U_n$ и максимальной температуре внутри кузова ($+60^\circ\text{C}$).

На основании разработанных требований и выполненных экспериментальных исследований импульсных систем управления вентилями электровозов переменного тока проведен сравнительный анализ однокаскадной блочной и однокаскадной одноконтурной схем управления вентилей электровозов ВЛ60, однокаскадной схемы управления вентилей с подмагничиванием зарядного дросселя электровоза Ф (Франция), двухкаскадной блочной и двухкаскадной одноконтурной схем управления вентилей электровозов ВЛ60 и ВЛ80. Ниже приведены результаты сравнительного анализа, который выполнен на основании разработанных в диссертации критериев.

1. Исследованием однокаскадной блочной и однокаскадной одноконтурной импульсной схем управления вентилями установлено, что коэффициент резонансной расстройки зарядного контура этих схем находится в пределах $1,5 \div 1,9$ вследствие нелинейности характеристики зарядного дросселя. Коэффициент запаса внешней характеристики этих схем меньше единицы, аппаратура по тепловой мощности не отвечает требованиям электроподвижного состава. Наблюдается неустойчивая работа этих ИСУВ:

а) когда $U_n < U_p$ и $\frac{U_0}{U_n} > 0$, что приводит к асимметрии

амплитуд импульсов и изменению их фаз в разных полупериодах относительно нуля питающего напряжения;

б) когда $U_n > U_p$ и $\frac{U_0}{U_n} > 0$, что приводит к явлению «опрокидывания» и появлению второго пика в импульсе.

II. Импульсная схема управления вентилями электровоза Ф имеет коэффициент резонансной расстройки зарядного контура, изменяющийся в пределах $A = 0,4 \div 0,56$. На этих электровозах ИСУВ работает в режиме $U_n > U_p$ и $\frac{U_0}{U_n} > 0$ при коэффициенте расстройки $A < 1$. Выбор такого режима обеспечивает устойчивую симметричную работу генератора во всем диапазоне отклонения напряжения от расчетного U_p . Коэффициент запаса внешней характеристики при $U_n = U_p$ равен 1,7, а при напряжении $1,65 U_p$ увеличивается до 2. Аппаратура имеет 40 ÷ 60 %-ный запас по тепломощности при температуре внутри кузова 60°C и напряжении питания $1,65 U_n$.

III. Двухкаскадная блочная импульсная схема управления вентилями электровоза ВЛ80 (первых номеров) работает в режиме, когда $U_n > U_p$ и $\frac{U_0}{U_n} \approx 0$, при коэффициенте расстройки $A = 1,5 \div 1,7$. При таком режиме обеспечивается устойчивая симметричная работа ИСУВ при напряжении превышающем расчетное. Однако вследствие большого значения коэффициента A , а также влияния зависимости $\alpha = f\left(\frac{U_n}{U_p}\right)$ угол α достигает значения 40 эл. град., что приводит к пропускам. Внешняя характеристика запаса не имеет.

IV. Двухкаскадная одноконтурная схема управления вентилями электровозов ВЛ60 и ВЛ80 (последующих номеров) работает в режиме, когда $U_n > U_p$ и $\frac{U_0}{U_n} = 0$ при $A = 1,05$. Фаза опережения импульса находится в пределах 0 ÷ 12 эл.град. Коэффициент запаса внешней характеристики равен 1,3, что не соответствует требованиям.

V. На основании аналитических соотношений, полученных в реферруемой диссертации, произведен расчет ИСУВ для выпрямительно-инверторной установки электровоза ВЛ60Р.

Согласно расчету коэффициент резонансной расстройки был установлен $A = 1,2$ при коэффициенте нелинейности зарядного дросселя $K_L = 1,05$. Коэффициент запаса внешней характеристики при этом повысился до $K_z = 1,6$, угол опережения при напряжении 260 в стал 15 эл.град., при напряжении 460 в угол не превышает 23 эл. град. В режиме рекуперативного торможения вследствие влияния коммутации инвертора имеет место понижение напряжения на 5%. Поэтому схема управления была дополнительно испытана при напряжении питания 240 в. Испытания показали, что ИСУВ работает в симметричном устойчивом режиме и имеет коэффициент запаса 1,45, что обеспечивает вполне удовлетворительное управление даже в самом тяжелом режиме рекуперативного торможения.

Проведенные экспериментальные исследования пяти вариантов схем управления полностью подтвердили аналитические соотношения, полученные при анализе электромагнитных процессов ЭМГИ. Испытания ИСУВ рекуперативного электровоза ВЛ60Р, настроенной согласно приведенному в диссертации расчету, показали удовлетворительную сходимость расчетных и экспериментальных результатов. Разница между расчетными и экспериментальными данными не превышает 10%.

На основании сравнительного анализа свойств исследованных систем управления вентилей, теоретических и экспериментальных исследований электромагнитных процессов генератора импульсов с резонансной расстройкой а также анализа динамических характеристик исследованных ПУЭВ установлено, что оптимальным вариантом импульсной системы управления вентилей, который удовлетворяет особенностям, присущим электровозам переменного тока, является двухкаскадный вариант схемы зажигания с одноконтурной разрядной цепью, разработанный ВЭИ им. Ленина. Теоретические и экспериментальные исследования, выполненные автором, нашли свое применение при разработке совместных (ВЭлНИИ, ВНИИЖТ, ВЭИ, ТЗРВ) рекомендаций по ИСУВ для электровозов переменного тока.

Рекомендации приняты МПС и внедрены на электровозах ВЛ60, ВЛ80 и электровозах ВЛ60Р с рекуперативным торможением. Опыт эксплуатации рекомендованной импульсной системы зажигания вентилей на электровозах ВЛ60, ВЛ80 и ВЛ60Р на различных дорогах в течение нескольких лет и специальные испытания, проведенные в режиме инвертирования на электровозах с рекуперативным торможением ВЛ60Р, по-

казали надежную и безотказную работу системы импульсного управления, выбранную с учетом изложенных теоретических и экспериментальных исследований.

В пятой главе представлены результаты исследований импульсной системы управления вентилями тиристорного преобразователя мощностью 1400 кВт на основании разработанных в диссертации методов и требований к ИСУВ электроподвижного состава. Методы и требования, разработанные для импульсных электромагнитных устройств, нашли свое дальнейшее применение и развитие при разработке систем плавного межступенчатого регулирования напряжения тяговых двигателей с помощью управляемых вентилях-тиристоров для электровозов переменного тока.

Как показал проведенный анализ импульсных систем управления вентилями наиболее рациональной для тиристорного преобразователя ВУКЭЛ-1400 является ИСУВ, основной функциональные узлы которой построены по следующей структурной схеме: фазосмещающее устройство с «вертикальным» принципом управления (ФУ), генератор первичных импульсов (ГИ), выходной усилитель и размножитель импульсов (УРИ).

Установлено, что наиболее рациональным УРИ является усилитель, имеющий импульсный трансформатор с двенадцатью вторичными обмотками по числу параллельных тиристоров в ряду, на которые подается мощный импульс с крутым передним фронтом. По условиям регулирования и коммутации вентилях были приняты два вида импульсов: длительностью 100 мксек и длительностью 500 мксек.

Для исследуемых усилителей импульсов внешняя характеристика представляет собой вольтамперный график зависимости выходных импульсов от сопротивления нагрузки и напряжения питания усилителей. Параметры импульсов, получаемые на выходе импульсного трансформатора, должны обеспечивать надежную работу управляющих электродов тиристоров в диапазоне изменения напряжения $0,7 \div 1,2U_n$ и окружающей температуре $+50 \div -40^\circ\text{C}$. При этих условиях полностью покрывается требуемый диапазон колебания напряжения без дополнительных устройств стабилизации.

Для оценки соответствия внешних характеристик УРИ вольтамперным характеристикам управляющих электродов

тиристоры были исследованы вольтамперные характеристики управляющих электродов большого количества тиристоры ВКДУ-150 для принятых параметров импульсов. Основное внимание было уделено получению минимальных вольтамперных характеристик управляющих электродов (пороговые характеристики управления) при температуре окружающей среды 20°C и максимальной мощности рассеивания на управляющем электроде при работе от принятой системы управления без дополнительного сопротивления в цепи управляющего электрода.

Анализ полученных результатов большого количества вольтамперных пороговых характеристик управляющих электродов тиристоры ВКДУ-150 показал, что эти характеристики находятся в зоне 8в, 1а для импульсов 100 мксек и 4в, 1а для импульсов 500 мксек. Максимальные значения параметров управления вентилях для принятых импульсов находятся в пределах $18\div 24$ в и $2\div 3$ а для импульсов с длительностью 100 мксек и $8\div 10$ в и $1,5\div 2$ а для импульсов с длительностью 500 мксек.

Как установлено, динамические сопротивления управляющих р-п переходов колеблются для разных вентилях в довольно широких пределах от 2 до 60 ом, однако большая часть управляемых р-п переходов имеет динамическое сопротивление в пределах $2\div 40$ ом. Величины максимальных токов и напряжений управления вентилями ВКДУ-150, полученные при испытаниях от импульсов с длительностью 100 мксек, находятся в пределах 24 в и 3 а, т. е. ниже допустимых значений напряжений и токов на управляющем электроде, полученных в МНИЭИ. Следовательно, мощность рассеивания на управляющем электроде не превышает допустимых значений. Величины максимальных токов и напряжений управления тех же вентилях от импульсов с длительностью 500 мксек находятся в пределах $8\div 10$ в и $1,5\div 2$ а, т. е. мощность рассеивания для импульсов 500 мксек больше, чем при работе от импульсов с длительностью 100 мксек.

Как известно, вольтамперные характеристики управления тиристорами зависят не только от окружающей температуры, но и от температуры управляющего перехода. Поэтому очень важно было установить значения вольтамперных характеристик управляющих переходов при температуре $+110\div -40^{\circ}\text{C}$. Если принять значение параметров управления при 20°C за

базисные, то при температуре выше базисной параметры управления понижаются, при температуре ниже базисной — повышаются.

На основе данных МНИЭИ в работе получены коэффициенты для определения вольтамперных характеристик управления тиристорами ВКДУ-150 при температуре $+110^{\circ}\text{C}$ и -40°C . Методом внешних характеристик определено соответствие усилителей импульсов предъявляемым требованиям в части параметров импульсов, колебания напряжения и температуры окружающей среды. Сравнением полученных пороговых вольтамперных характеристик с внешними характеристиками УРИ установлено, что при самых тяжелых условиях работы, температуре -40°C и напряжении питания $0,7U_n$ внешняя характеристика УРИ имеет $2,5 \div 3$ -кратный запас относительно пороговых значений управления вентилями ВКДУ-150, т. е. надежность работы управляющих электродов соответствует установленным требованиям.

Как следует из разработанных требований, фазовые характеристики управления ИСУВ влияют на качественные показатели работы электровоза. Так, например, симметричность импульсов по разным полупериодам обеспечивает равнозначную нагрузку плеч вентильных ответвлений, а в случае применения индивидуальных ИСУВ для каждой выпрямительной установки электровоза или секции — равнозначную нагрузку тяговых двигателей.

На установке ВУКЭЛ-1400 были исследованы фазовые характеристики разных образцов ИСУВ, обладающих и не обладающих стабилизирующими свойствами при колебании напряжения и изменении температуры окружающей среды. В диапазоне отклонения напряжения от номинала ($0,7 \div 1,2U_n$) напряжение на выходе при фиксированных углах импульса 40, 90, 120, 150, 165 *эл.град.* довольно стабильно и отличается от средних значений не более чем на $\pm 3\%$, в основном в крайних точках диапазона изменения напряжения. Симметричность фазы импульсов в разных полупериодах проверялась на нескольких образцах генераторов импульсов. Генераторы управлялись одновременно от одного датчика, а напряжение питания изменялось в диапазоне $0,7 \div 1,2U_n$. Напряжение преобразователя отличалось не более чем на $1,5 \div 2,3\%$ в обоих полу-

периодах, что соответствует допустимым нормам по скоростным характеристикам тяговых двигателей.

Таким образом, исследования тиристорного преобразователя мощностью 1400 кВт подтвердили эффективность разработанных требований и методов исследования ИСУВ для проектируемых электровозов с управляемыми вентилями-тиристорами.

Основные результаты выполненной работы:

1. Проведен анализ условий работы импульсных систем управления вентилями (ИСУВ) на электроподвижном составе. Показано, что специфические особенности, свойственные электроподвижному составу, существенно влияют на основные характеристики ИСУВ.

2. Предложено понятие о коэффициенте резонансной расстройки зарядного контура ИСУВ. Введение этого критерия позволило получить зависимости для расчета электромагнитных ИСУВ, зарядный контур которых может иметь широкий диапазон расстройки относительно частоты источника питания.

3. Разработана методика и получены аналитические выражения для расчета электромагнитных ИСУВ с учетом специфических условий электроподвижного состава.

4. Разработана методика математического моделирования электромагнитных ИСУВ. Доказана правомерность принятых в аналитических расчетах допущений.

5. Проведены экспериментальные исследования электромагнитных ИСУВ различных типов отечественных и зарубежных электровозов (фирмы «Альстом»). Исследования подтвердили правильность полученных аналитических соотношений и разработанных рекомендаций.

6. Произведены исследования вольтамперных динамических и статических характеристик полупроводниковых управляющих электродов вентилях (ПУЭВ). Вероятностными методами математической статистики определен относительный разброс параметров управления ПУЭВ различных заводов-изготовителей. Определен необходимый коэффициент запаса внешней характеристики ИСУВ.

7. Рекомендации по ИСУВ внедрены на электровозах ВЛ60, ВЛ80, ВЛ60Р. Эффективность предложенных рекомендаций подтверждена опытом эксплуатации.

8. Разработанная методика расчета и исследований ИСУВ выпрямительно-инверторных электровозов переменного тока со статическими преобразователями используется для проектируемых электровозов с управляемыми полупроводниковыми вентилями-тиристорами. На основании разработанной в диссертации методики произведено исследование ИСУВ тиристорного преобразователя, мощностью 1400 квт для плавного межступенчатого регулирования напряжения экспортного электровоза.

**По материалам диссертационной работы
опубликованы статьи:**

1. Беспрозванный И. Г. Влияние колебания напряжения на входе схемы зажигания игнитронов ИВС-300/5 на качество работы системы зажигания. С.н.т. «Электровозостроение», т. 4, 1964.
2. Беспрозванный И. Г., Копанев А. С. Исследование температурных режимов элементов игнитронов ИВС-300/5. С.н.т. «Электровозостроение», т. 4, 1964.
3. Беспрозванный И. Г. Исследование преобразователей установки электровоза ВЛ80. С.н.т. «Электровозостроение», т. 5, 1964. Электровоз ВЛ80 (глава 17).
4. Беспрозванный И. Г. Динамические характеристики поджигателей игнитронов электровозов переменного тока. С.н.т. «Электровозостроение», т. 6, 1964.
5. Беспрозванный И. Г. Схема зажигания игнитронов электровозов ВЛ60 и ВЛ80. «Электротехническая промышленность», № 267, 1966.
6. Беспрозванный И. Г. Расчет импульсных схем с насыщающимися магнитными элементами с помощью АВМ. С.н.т. «Электровозостроение» т. 9, 1967.
7. Беспрозванный И. Г. Влияние нагрузки вентиля на основные характеристики управления. С.н.т. «Электровозостроение» т. 10, 1968.
8. Беспрозванный И. Г. Анализ электромагнитных процессов в импульсной системе управления вентилями электровозов переменного тока. С.н.т. «Электровозостроение» т. 10, 1968.

Результаты работы докладывались и обсуждались:

1. На заседаниях электротяговой секции научно-технического Совета ВЭЛНИИ.

2. В Ленинградском институте инженеров железнодорожного транспорта.

3. На Всесоюзном научно-техническом совещании по эксплуатации мощных выпрямительных установок и компенсирующих устройств, г. Запорожье.

4. На техсовете Северо-Кавказского управления железной дороги.

5. В Днепропетровском институте инженеров железнодорожного транспорта.

6. «Главэлектротрансмаше» Министерства электротехнической промышленности.

НТБ
ДНУЖТ

Подписано к печати 13.XI.68 г.
ПК 06894 Объем 1,25 печ. л.
Заказ № 1582 Тираж 180

Типография политехнического
института
г. Новочеркасск, Ростов. обл.,
ул. Просвещения, 132.

Сканировала Камянская Н.А.

НТБ
ДНУЖТ