

МИНИСТЕРСТВО ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ
ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ
ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Ю. Б. НАПАРА

ИССЛЕДОВАНИЕ
ПРОДОЛЬНОЙ ЕМКОСТНОЙ КОМПЕНСАЦИИ
НА ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОМ СОСТАВЕ
С ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫМИ УСТАНОВКАМИ

435 — Электрификация и электроснабжение
железнодорожного транспорта

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Днепропетровск
1969

НТБ
ДНУЖТ

МИНИСТЕРСТВО ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ
ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ
ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Ю. Б. НАПАРА

ИССЛЕДОВАНИЕ
ПРОДОЛЬНОЙ ЕМКОСТНОЙ КОМПЕНСАЦИИ
НА ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОМ СОСТАВЕ
С ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫМИ УСТАНОВКАМИ

435 — Электрификация и электроснабжение
железнодорожного транспорта

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Днепропетровск
1969

НТБ
ДНУЖТ

3846a

Работа выполнена в Днепропетровском институте инженеров железнодорожного транспорта.

Научный руководитель — канд. тех. наук, доцент **К. Г. Кучма**.

Официальные оппоненты:

Член-корреспондент АН Грузинской ССР, заслуженный деятель науки и техники Грузинской ССР, доктор технических наук, профессор **Л. Г. Абелишвили**.

Кандидат технических наук, доцент **Б. А. Метелкии**.

Ведущее предприятие — **ВЭЛНИИ**.

Автореферат разослан «*16*» *мая* 1969 г.

Защита диссертации состоится «*17*» *июня* 1969 г. на заседании совета Днепропетровского института инженеров железнодорожного транспорта.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Ученый секретарь совета, доцент **Б. М. Климовский**.

НТБ
ДНУЖТ

ВВЕДЕНИЕ

Большие масштабы электрификации железных дорог в нашей стране, соответствующие ленинскому плану построения коммунизма обуславливают необходимость решения многих проблем, направленных на дальнейшее совершенствование устройств электрической тяги.

Переход электрической тяги на систему переменного тока промышленной частоты явился важнейшим этапом технического прогресса. К концу текущего года протяженность электрифицированных железных дорог по системе переменного тока в СССР составит более 12000 км.

На этих дорогах эксплуатируются самые мощные в мире восьмиосные электровозы ВЛ80 и ВЛ80^к, а также шестиосные — ВЛ60 и ВЛ60^к. На электровозах ВЛ80^к и ВЛ60^к используются последние достижения электроники — кремниевые полупроводниковые вентили. Ведутся разработки новых типов электровозов с бесколлекторными двигателями.

Система электрической тяги с питанием электроподвижного состава от контактной сети однофазного тока напряжением 25 кв позволяет снизить капиталовложения на тяговые подстанции и контактную сеть, ускорить строительные работы по электрификации железных дорог, снизить потери электроэнергии в контактной сети, обеспечить питание от контактной сети, кроме электровозов, также других железнодорожных потребителей.

Электровозы однофазного тока с выпрямительными установками, особенно с полупроводниковыми, обладают более высокими тягово-эксплуатационными свойствами по сравнению с электровозами постоянного тока, благодаря параллельному соединению двигателей, безреостатному пуску и возможности плавного межступенчатого регулирования напряжения посредством тиристорov.

Наряду с этим система электрической тяги на однофазном токе имеет и некоторые недостатки. К числу их относятся: значительное индуктивное влияние на различные коммуникации,

НТБ
ДНУЖТ

проложенные вдоль полотна железной дороги (воздушные и кабельные линии связи, электрические сети и др.). Для защиты этих сооружений от влияния тягового тока затрачиваются значительные средства. Тяговая однофазная нагрузка вызывает несимметрию напряжений и токов в системе энергоснабжения электрифицированных дорог.

К числу недостатков системы однофазного тока относится также низкий коэффициент мощности электрической тяги на шинах тяговых подстанций вследствие низкого коэффициента мощности выпрямительных установок электроподвижного состава. Это вызывает большие колебания напряжения на пантографе — при номинальном значении 25 кв уровень напряжения на пантографе колеблется от 29 кв до 19 кв и ниже. Понижение напряжения вызывает снижение скорости движения поездов. Кроме того, реактивные токи вызывают значительные потери электроэнергии в контактной сети.

Настоящая работа посвящена исследованию возможности и эффективности применения продольной компенсации на электроподвижном составе переменного тока для повышения скорости движения поездов, снижения потерь энергии в тяговой сети, снижения себестоимости перевозок и повышения пропускной и провозной способности железнодорожного транспорта.

Вопросам определения значений коэффициента мощности электроподвижного состава и факторов, влияющих на его величину, посвящены работы многих советских ученых—Б. Н. Тихменева, С. А. Петрова, В. А. Голованова, Б. Я. Гохштейна, Р. Н. Карякина, В. Н. Хлебникова, С. В. Захаревича и др.

За период эксплуатации на наших дорогах электрической тяги по системе однофазного тока выполнено ряд исследований, посвященных проблеме повышения коэффициента мощности электрической тяги на переменном токе.

Достаточно исследована теоретически Р. Н. Карякиным, Б. М. Бородулиным и др. и проверена в эксплуатационных условиях система параллельной емкостной компенсации, применяемая в настоящее время на всех тяговых подстанциях однофазного тока, которая способствует разгрузке энергосистемы от реактивных токов, но оказывает малое влияние на коэффициент мощности электроподвижного состава.

Теоретически и в лабораторных условиях исследованы различные способы искусственной коммутации, позволяющие повысить коэффициент мощности выпрямительных электровозов (Б. А. Метелкин, А. В. Богушевич и др.).

НТБ
ДНУЖТ

Большое значение имеют исследования, выполненные В. А. Коршуновым по применению последовательного включения конденсаторов в отходящие от подстанции фидеры тяговой сети, так называемая продольная емкостная компенсация на тяговых подстанциях. Несмотря на большую эффективность этого способа компенсации, он не получил применения из-за некоторых недостатков.

Как показано в данной работе, весьма эффективной является продольная емкостная компенсация непосредственно на электровозе. При этом способе не только отпадает надобность в параллельной емкостной компенсации на тяговых подстанциях ввиду возможности повышения коэффициента мощности на шинах подстанций до уровня 0,92—0,93, установленного правительством для промышленных предприятий, но и снижаются потери напряжения в тяговой сети и тем самым повышается скорость движения поездов. Продольная емкостная компенсация (ПЕК) на электровозе позволяет не только повысить показатели электрифицированных дорог, но и снизить первоначальные затраты на приобретение локомотивного парка. Кроме того, повышение коэффициента мощности электровозов способствует разгрузке от реактивных токов тяговой сети и, следовательно, позволяет снизить потери электроэнергии в ней.

В задачу исследований входили следующие вопросы:

- определение влияния коэффициента мощности на тяговые и энергетические показатели электрической тяги;
- анализ возможных мероприятий по повышению коэффициента мощности электрической тяги;
- теоретический анализ электромагнитных процессов при продольной емкостной компенсации на электроподвижном составе;
- анализ влияния продольной емкостной компенсации на электроподвижном составе на уровень выпрямленного напряжения и напряжения на пантографе посредством моделирования;
- анализ возможных аварийных режимов;
- выбор необходимой для компенсации мощности конденсаторных батарей;
- определение экономической эффективности продольной емкостной компенсации на электроподвижном составе

1. Влияние коэффициента мощности электроподвижного состава с выпрямительными установками на тяговые и энергетические показатели электрической тяги

Электроподвижный состав однофазно-постоянного тока с выпрямительными установками потребляет наряду с активной мощностью, затрачиваемой на вращение тяговых двигателей, также реактивную мощность. Потребление последней обуславливается коммутацией тока в вентилях выпрямителей, пульсацией выпрямленного тока и, следовательно, пульсацией вторичного и первичного тока трансформатора, а также потреблением этим трансформатором тока намагничивания.

Отношение активной мощности, потребляемой электровозом, к полной мощности представляет коэффициент мощности электровоза.

Основными факторами, от которых зависит коэффициент мощности ЭПС, кроме нагрузки, являются индуктивность цепей переменного тока, включая трансформатор, и индуктивность сглаживающего реактора в цепи выпрямленного тока. Точный расчет коэффициента мощности ЭПС является весьма затруднительным. Поэтому расчетные формулы, предложенные Н. Л. Кагановым, Б. Н. Тихменевым, С. А. Петровым, К. Г. Кучмой и др. требуют определенных допущений и не всегда удобны для расчетов.

Коэффициент мощности на шинах тяговой подстанции ввиду влияния индуктивности контактной сети имеет значение более низкое, чем у ЭПС (если на нем не применяются компенсирующие устройства). По данным различных авторов величина коэффициента мощности на шинах тяговой подстанции находится в пределах 0,53—0,85.

Произведенные нами измерения на тяговой подстанции Знаменка Одесско-Кишиневской ж. д. показали, что средняя величина коэффициента мощности за сутки по показаниям

НТВ
ДНУЖТ

счетчиков активной и реактивной энергии, расходуемой на тягу в различное время года на этой подстанции составляет 0,72—0,78.

При низком значении коэффициента мощности ЭПС реактивная составляющая тока в контактной сети, близка по величине к активной составляющей. По этой причине имеют место большие потери напряжения в этой сети и снижение напряжения на токоприемнике. Скорость же выпрямительного электровоза определяется нагрузкой и средним выпрямленным напряжением, которое существенно зависит от напряжения на токоприемнике.

Снижение скорости движения пропорционально не снижению напряжения на токоприемнике, а снижению среднего выпрямленного напряжения.

Если принять выпрямленный ток идеально сглаженным, то среднее выпрямленное напряжение в относительных единицах равно

$$\frac{U_d}{E_2} = \frac{2}{\pi} \sqrt{2} \left(1 - \frac{I_d \cdot X}{\sqrt{2} \cdot E_2} \right) \quad (1)$$

Поэтому среднее выпрямленное напряжение имеет тенденцию к более быстрому снижению, чем напряжение на пантографе.

На грузонапряженных участках имеет место снижение напряжения в контактной сети, как указано выше, до 19 кв и ниже, что крайне нежелательно. Одним из наиболее радикальных способов по уменьшению колебаний напряжения в контактной сети является повышение коэффициента мощности ЭПС.

Потери мощности и электроэнергии в питающей сети обратно пропорциональны квадратам коэффициента мощности и напряжения сети.

По ориентировочным расчетам потери электроэнергии в проводах контактной сети на всех дорогах СССР, электрифицированных по системе переменного тока без компенсирующих устройств, составляют около 500 млн. квт час в год. Снижение этих потерь путем применения компенсирующих устройств является весьма актуальной народнохозяйственной задачей.

Коэффициент мощности тяговой нагрузки также существенно влияет на пропускную способность линий электропередач 110—220 кв. питающих тяговые подстанции. С повышением коэффициента мощности ЭПС может быть достигнуто значительное повышение пропускной способности этих линий.

НТБ
ДНУЖТ

2. Анализ возможных мероприятий по повышению коэффициента мощности электрической тяги при системе переменного тока

Повышение коэффициента мощности электрической тяги возможно достичь путем установки компенсирующих устройств на тяговых подстанциях, контактной сети и на ЭПС. Наиболее исследованными мероприятиями по компенсации реактивной мощности на тяговых подстанциях являются:

- а) установка синхронных компенсаторов,
- б) поперечная емкостная компенсация,
- в) продольная емкостная компенсация.

Указанные мероприятия преследуют цель уменьшения реактивных токов в ЛЭП питающих подстанций. Они могут способствовать в той или иной мере снижению несимметрии и улучшению формы кривых тока и напряжения в ЛЭП.

Однако, всем этим мероприятиям присущ общий недостаток — они весьма мало влияют на коэффициент мощности ЭПС, на уровень напряжения на токоприемнике и на величину потерь мощности и электроэнергии в контактной сети, так как не разгружают ее от реактивных токов. Кроме того, компенсирующие установки, включающие в себя конденсаторы, могут способствовать при определенных условиях резонансным явлениям, перенапряжениям и возрастанию аварийных токов.

Продольная емкостная компенсация (ПЕК) на подстанциях, являясь более эффективной, чем поперечная в смысле стабилизации напряжения контактной сети и автоматического регулирования отдачи реактивной мощности в зависимости от нагрузки фидера, обладает и существенными недостатками. При двухстороннем питании участка применение ПЕК вызывает значительные уравнивательные токи в контактной сети, что увеличивает активные потери энергии в сети и снижает к. п. д. системы.

Как показал В. А. Коршунов, применение ПЕК способствует возникновению субгармонических колебаний при работе на участке электровозов с малыми нагрузками и при режиме холостого хода электровоза. Схемы защиты от колебаний усложняют и удорожают ПЕК, кроме того, эти схемы несовершенны.

Компенсационные устройства на выпрямительных электровозах могут служить повышению коэффициента мощности электровозов, а тем самым и тяговых подстанций, а также

для стабилизации уровня напряжения в контактной сети и уменьшения потерь энергии в ней.

Из наиболее исследованных мероприятий по повышению коэффициента мощности электровозов являются:

- а) установка на электровозах синхронных компенсаторов,
- б) искусственная коммутация вентильных токов,
- в) продольная емкостная компенсация.

Возможность установки на выпрямительном электровозе синхронного компенсатора исследовалась в Институте электромеханики АН СССР С. В. Захаревичем. При этом варианте представляется возможным достигнуть коэффициента мощности тяговой подстанции близким к единице. Для этого мощность синхронного компенсатора должна составлять около 40% от мощности тяговых двигателей электровоза. Установка синхронной машины такой мощности на электровозе затруднена по габаритным условиям, требует значительных дополнительных затрат, усложняет схему и увеличивает нагрузку на ось. Поэтому такое мероприятие не получило распространения и не может считаться перспективным.

Опережение открытия вентиля у выпрямителя, достигаемое введением дополнительной э. д. с., называют искусственной коммутацией. Она позволяет достичь опережения первичного тока тягового трансформатора относительно напряжения и, следовательно, повысить коэффициент мощности электровоза.

Введение дополнительной э. д. с. достигается путем различных схемных решений, источником же э. д. с. являются, как правило, конденсаторы.

Исследования схем искусственной коммутации для целей тяги проводились Б. А. Метелкиным, А. В. Богушевичем, Л. В. Бирзниеком и Я. Я. Берзинем.

Предложенные схемы требуют кроме емкости, необходимой для осуществления искусственной коммутации еще дополнительных управляемых вентилях, а в некоторых схемах и основные вентили должны быть управляемыми. В схемах, предложенных Б. А. Метелкиным и А. В. Богушевичем, требуются также дополнительно большие индуктивности.

При вышеуказанных схемах для достижения в номинальном режиме коэффициента мощности равным 0,96—0,98 установленная мощность конденсаторов должна составлять около 30% мощности тяговых двигателей. Схемы искусственной коммутации значительно усложняют и удорожают выпрямительную установку.

Автором исследована возможность применения продольной емкостной компенсации на ЭПС, которая может быть осуществлена при мостовой схеме выпрямления путем включения емкости последовательно в цепь вторичной обмотки тягового трансформатора. Это позволяет создать опережение открытия ечередных вентиляей, так как напряжение на емкости, в нормальном режиме работы, повышает анодное напряжение на этих вентилях к моменту коммутации.

При продольной компенсации повышение коэффициента мощности достигается более простыми средствами и меньшими затратами, чем при искусственной коммутации.

3. Теоретические и экспериментальные исследования продольной емкостной компенсации на электроподвижном составе с выпрямителями

Величина угла опережения открытия вентиляей α при продольной емкостной компенсации определяется выражением

$$\sin(-\alpha) = \frac{I_d \cdot X_c \cdot \left(\frac{\pi}{2} - \frac{\gamma}{2} \right)}{E_{2m}} \quad (2)$$

Таким образом, угол опережения α зависит от выпрямленного тока I_d , величины включенной емкости C и амплитуды линейной э. д. с. электровозного трансформатора E_{2m} . Поэтому при постоянной емкости и при одном и том же выпрямленном токе угол опережения открытия вентиляей будет различным на различных позициях контроллера машиниста. Этот угол будет тем больше, чем ниже позиция. Есть учесть, что разгон поезда (реализация больших токов) происходит именно на этих позициях, то это качество схемы следует считать положительным, как и то, что с увеличением нагрузки автоматически увеличивается угол α . Однако на низких позициях в период трогания, при малых значениях E_{2m} угол опережения α может превышать критическое значение, равное при данной схеме $\alpha = 1$. Превышение критического угла опережения может повлечь повторное зажигание ранее работавших вентиляей, что не желательно. Поэтому при малых значениях E_{2m} предусматривается закорачивание на низких позициях контроллера конденсаторов контактором с разрядом через сопротивление. Это позволит одновременно исключить появление субгармонических колебаний, которое, как показал

НТБ
ДНУЖТ

В. А. Коршунов, может возникнуть при малых нагрузках трансформатора (при маневрах, следовании резервом) и работе трансформатора вхолостую.

Включение емкости во вторичную обмотку трансформатора по сравнению с включением ее в первичную обмотку является более эффективным. Во-первых, это способствует уменьшению реактивных токов, протекающих по обмотках трансформатора, во-вторых, лучше используются конденсаторы, так как работа их при номинальной нагрузке на первичной стороне возможна лишь на высшей рабочей позиции контроллера машиниста.

Как показали теоретические исследования, при условии $E_2 = \text{const}$, $I_d = \text{const}$, $X_L = \text{const}$ изменение величины емкостного сопротивления в пределах от $X_c = 0$ до $X_c = 2X_L$ весьма незначительно влияет на продолжительность коммутации (уменьшается время коммутации на несколько процентов). Однако, принимать при ПЕК для определения α и других параметров величину $E_2 = \text{const}$, т. е. исходить из допущения о постоянстве напряжения на пантографе, не правомерно, так как включение в выпрямитель емкости существенно влияет как на уровень напряжения в контактной сети, так и выпрямленное напряжение (т. е. на внешние характеристики).

При увеличении тока нагрузки электровоза, на котором не применяются искусственные средства повышения коэффициента мощности, увеличивается потеря напряжения в контактной сети, снижая тем самым вторичное напряжение трансформатора, которое в свою очередь определяет угол коммутации вентилей. Среднее же выпрямленное напряжение является функцией этих двух основных переменных величин: вторичного напряжения и продолжительности коммутации.

Продольная емкостная компенсация, повышая коэффициент мощности электровоза, уменьшает тем самым потребляемую реактивную мощность и снижает потери напряжения в сети, а следовательно, уменьшает потери напряжения в выпрямителе.

Если к тому же учесть, что угол опережения открытых вентилей (т. е. компенсация реактивной мощности) увеличивается с повышением нагрузки, то становится очевидным, что определение влияния величины емкости на угол коммутации и на внешние характеристики выпрямителя должно производиться при учете изменения напряжения.

Внешняя характеристика выпрямителей зависит от первичного напряжения и индуктивности цепи. Поэтому эта характеристика зависит от длины фидерной зоны, сечения проводов, удаления электровоза от подстанции, позиции контроллера машиниста (индуктивности трансформатора электровоза), количества работающих на фидерной зоне электровозов, их нагрузки и взаимного расположения и др. факторов.

Аналитический расчет первичного и выпрямленного напряжения для фидерной зоны даже при значительных упрощающих допущениях весьма сложен. Поэтому эффективность ПЕК на электровозе определялась путем моделирования. На физической модели представлялось возможным определить уровни напряжения на пантографах и выпрямленное напряжение при различных эксплуатационных условиях.

На модели были представлены два двухпутных участка, из которых один длиной 45 км с консольным питанием, второй — длиной 60 км с двухсторонним питанием. Густота движения предусмотрена в количестве 6 электровозов типа ВЛ60 на каждом участке. На модели предусматривались режимы соответствующие движению электровозов на ходовых позициях от 13 до 33. Питание тяговых подстанций мощностью 31500 кВА на модели принято от ЛЭП напряжением 110 кВ. Для моделирования контактной сети была принята подвеска проводов ПБСМ1—95+ТФ100.

Моделирование подтвердило, что ПЕК влияет на уровень выпрямленного напряжения в большей степени, чем на уровень напряжения в контактной сети. По этой причине выпрямительные установки электровозов с применением ПЕК имеет более жесткие внешние характеристики.

Экспериментальная проверка эффективности продольной емкостной компенсации на электровозах, выполненная на модели, показала, что применение продольной компенсации при нижерекомендуемой мощности конденсаторов позволяет повысить в среднем на участке с двухсторонним питанием длиной 60 км и 72 парах поездов в сутки напряжение на пантографе на 6—9%, выпрямленное напряжение на 20—26%. На участке с одностор. питанием длиной 45 км и 96 парах поездов в сутки это повышение составляет соответственно 11—15% и 30—40%.

Аналитическое исследование, расчет и эксперименты показывают, что применение ПЕК не оказывает заметного влияния на абсолютную пульсацию выпрямленного тока.

В работе теоретически и экспериментально показано, что на электровозах, оборудованных ПЕК в широком диапазоне

нагрузок (включая значительные перегрузки) возможна на высших позициях контроллера машиниста стабилизация коэффициента мощности электровоза, на позициях же более низких может быть перекомпенсация реактивной мощности при увеличении нагрузки, что положительно повлияет как на уровень напряжения в контактной сети, так и на коэффициент мощности на шинах тяговой подстанции. Продольная компенсация при нижерекомендуемой мощности конденсаторной установки позволит повысить $\cos \varphi$ на шинах тяговой подстанции при работе электровозов в длительном режиме с 0,76 до 0,97, а при работе их с перегрузкой ($I_d=1,3$ I час) с 0,74 до 0,99.

Автором проведены экспериментальные исследования работы выпрямительной установки с ПЕК при режиме короткого замыкания (круговом огне на коллекторе). Эти исследования показали, что ток короткого замыкания существенно зависит от величины емкости, включенной в цепь вторичной обмотки трансформатора. Однако, при оптимальных значениях емкости, с точки зрения компенсации реактивной мощности, токи короткого замыкания незначительно отличаются от таковых при обычных схемах выпрямления.

В работе теоретически также исследован режим пробоя **вентилей** одного плеча. Результаты исследования показывают, что ток короткого замыкания в схеме без ПЕК значительно превосходит ток короткого замыкания в схемах с применением ПЕК.

4. Выбор величины емкости конденсаторных батарей

В работе показано, что применение на ЭПС продольной компенсации существенно изменяет форму первичного напряжения трансформаторов электровозов. Коэффициент искажения для кривой напряжения практически одинаков как для схемы с применением ПЕК и без нее, и при самых неблагоприятных обстоятельствах не имеет значений ниже 0,955.

Однако, искажение формы кривой напряжения весьма существенно влияет на коэффициент сдвига $\cos \varphi$ для первых гармоник первичного тока и напряжения.

При работе на участке электровозов не оборудованных ПЕК форма кривой напряжения искажается таким образом, что его первая гармоника сдвигается вправо, в сторону отставания, ограничивая тем самым увеличение угла φ и снижение $\cos \varphi$.

При работе же на участке электровозов, оборудованных

НТБ
ДНУЖТ

ПЕК, форма кривой напряжения искажается таким образом, что первая гармоника напряжения сдвигается влево, в сторону опережения, ограничивая увеличение компенсации реактивной мощности.

В обоих случаях форма кривой напряжения зависит от большого числа факторов. В связи с этим возникает трудность создания точной инженерной методики расчета $\cos \varphi$, а следовательно, и величины емкости C .

С достаточно й точностью определение $\cos \varphi_{лек}$ при применении ПЕК возможно по формуле

$$\cos \varphi_{лек} = \cos(\varphi - \alpha) \quad (3)$$

где $\varphi_{лек}, \varphi$ — углы сдвига соответственно при ПЕК без нее.

Экспериментальные исследования показали, что угол опережения с учетом грузонапряженности, длины фидерных зон и схем питания может определяться таким выражением

$$\alpha = \arcsin D \cdot \frac{I_d \cdot X_c \cdot \frac{\pi}{2}}{E_{2мп}} \quad (4)$$

где: I_d — потребляемый электровозом выпрямленный ток,

$X_c = \frac{1}{\omega C}$ — величина емкостного сопротивления, рассчитанного для первой гармоники,

$E_{2мп}$ — амплитуда вторичной э. д. с., соответствующая паспортным данным трансформатора для данной позиции контроллера машиниста.

D — коэффициент, зависящий от эксплуатационных условий, равный 1,0—1,25.

Минимальное значение этого коэффициента необходимо принимать для участков с двухсторонним питанием небольшой длины и малым грузопотоком. Максимальное значение коэффициента — для грузонапряженных участков с консольным питанием.

При расчете необходимой величины емкости конденсаторных батарей за исходные были приняты три критерия:

1. Коэффициент мощности электровозов в среднем по участку должен быть не менее значения, установленного для промышленных предприятий, т. е. 0,92—0,93.

2. Вес и габариты установки должны быть при этом минимальными.

3. Наличие емкости не должно вызывать возрастания тока к. з. при аварийных режимах.

При расчете величины емкости за исходные параметры были приняты: выпрямленный часовой ток, вторичное напряжение трансформатора, соответствующее наивысшей позиции контроллера машиниста и действующее напряжение на емкости, выбираемое по ГОСТу для конденсаторов или задаваемое.

Мощность, отдаваемая конденсаторами

$$Q_c = U_{c(1)}^2 \cdot \omega C + U_{c(3)}^2 \cdot 3\omega C + U_{c(5)}^2 \cdot 5\omega C + U_{c(7)}^2 \cdot 7\omega C \quad (5)$$

где: $U_c (n)$ — действующее значение n -ой гармоники напряжения на конденсаторе,

ω — угловая частота равная 314

C — емкость компенсирующего устройства.

Для практического определения величины мощности как показывают расчеты, с достаточной точностью можно учитывать лишь первую и третью гармоники. Исходя из приведенных критериев мощность конденсаторной установки соответствующая часовому режиму должна составлять 30—35% от мощности тяговых двигателей.

5. Экономическая оценка применения на электровозах переменного тока выпрямителей с продольной емкостной компенсацией

Экономическая эффективность того или иного мероприятия, как известно, оценивается с учетом как капитальных вложений, так и будущих эксплуатационных расходов.

Расчет себестоимости перевозок производился способом расходных ставок, основывающийся на определении расходов по главнейшим измерителям.

Технико-экономическая эффективность применения продольной емкостной компенсации на электровозах определялась путем сравнения двух вариантов:

1. Эксплуатация участка с электровозами, оборудованными обычной схемой выпрямления.

2. То же, но с электровозами, оборудованными продольной емкостной компенсацией.

Для экономического сравнения двух вариантов был принят реальный электрифицированный участок длиной 312 км.

Расчеты показали, что применение ПЕК приводит к повышению участковой скорости движения на 15%, уменьшению капвложений по электровозам на 1300000 руб. и по вагонам на

1200000 руб. Снижение эксплуатационных расходов (без учета потребления электроэнергии на тягу) достигает 210000 руб. В то же время оплата электроэнергии на тягу в связи с повышением скорости возрастает на 215000 руб. Экономия на потерях энергии в контактной сети в результате повышения коэффициента мощности составляет для указанного участка 270000 руб.

Увеличение участковой скорости приводит, ввиду сокращения грузовой массы на колесах, к единоразовому сбережению 850000 руб.

По этим результатам расчетов определена экономическая эффективность ПЕК на 1 км эксплуатационной длины электрифицированного участка.

ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Исследования показали, что компенсация реактивной мощности, потребляемой выпрямителями электроподвижного состава, может быть достигнута посредством последовательно-го включения емкости в цепь вторичной обмотки трансформатора при мостовой схеме выпрямления. Благодаря такому способу продольной емкостной компенсации создается опережение открытия вентиля на угол α , от которого зависит угол сдвига между первыми гармониками тока и напряжения на токоприемнике электровоза и, следовательно, повышается коэффициент мощности электровоза.

2. Установлено, что увеличение угла опережения открытия вентиля при включении емкости таким способом и тем самым повышение коэффициента мощности тем более (при $C = \text{const}$), чем выше нагрузка и ниже вторичное напряжение трансформатора.

3. Разгрузка контактной сети от реактивных токов путем применения продольной емкостной компенсации на электровозах способствует уменьшению потерь в этой сети и тем самым повышению напряжения на токоприемниках электровозов.

4. Одним из условий выбора величины емкости для продольной компенсации является обеспечение коэффициента мощности электровоза переменного тока в диапазоне рабочих нагрузок не ниже 0,92—0,93. Как показали исследования, для выполнения этого условия емкость конденсаторов для продольной компенсации должна быть выбрана такой, чтобы мощность отдаваемая ими в часовом режиме составляла 30—35% от номинальной мощности тяговых двигателей.

НТБ
ДНУЖТ

5. При указанной мощности конденсаторов на низких позициях контроллера машиниста возможны значительные углы опережения открытия вентилей и тем самым возможна работа электровозов с опережающим $\cos \varphi$. В связи с этим на шинах тяговой подстанции, как показали эксперименты, величина $\cos \varphi$ может составлять 0,96—0,99.

6. Экспериментальная проверка эффективности продольной емкостной компенсации на электровозах, выполненная на модели, показала, что применение продольной компенсации позволяет повысить в среднем на участке с двухсторонним питанием длиной 60 км и 72 парах поездов в сутки напряжение на пантографе на 6—9%, выпрямленное напряжение на 20—26%. На участке с односторонним питанием длиной 45 км и 96 парах поездов в сутки это повышение составляет соответственно 11—15% и 30—40%.

7. Экспериментально доказано, что внешние характеристики при установке конденсаторов вышеуказанной мощности при токах ниже номинальных являются более жесткими, чем при отсутствии компенсации. Это положение справедливо и при токах больше номинальных для высших позиций контроллера машиниста.

8. Применение на электроподвижном составе продольной емкостной компенсации позволит повысить техническую скорость движения поездов на участках с двухсторонним питанием, ориентировочно, на 15% и снизить потери электроэнергии в тяговой сети на 30% и тем самым повысить к. п. д. электрической тяги на переменном токе.

9. Включение последовательно в цепь тягового трансформатора емкости практически не влияет в рабочем режиме на пульсацию выпрямленного тока.

10. Так как ток короткого замыкания при аварийном режиме зависит от емкостного сопротивления, то целесообразно величину емкости выбирать такой, чтобы это не приводило к ухудшению условий работы выпрямителя при аварийном режиме.

11. Продольная емкостная компенсация на ЭПС в отличие от применения ее на тяговой подстанции и в контактной сети не может вызывать увеличения уравнительных токов между подстанциями.

12. Повышение коэффициента мощности электровозов и вследствие этого увеличение скорости движения поездов позволит достичь экономии на капитальных затратах по при-

обретению электроподвижного состава и вагонов, ориентировочно, в сумме 8500 руб/км, экономии по эксплуатационным расходам, включая расход и экономию электроэнергии, в сумме 850 руб/км год.

13. Продольная емкостная компенсация будет способствовать увеличению пропускной способности сети и ЛЭП. Поэтому возрастание размеров движения и мощности локомотивов на электрифицированных участках при использовании электровозов с продольной емкостной компенсацией не вызовет значительного снижения уровня напряжения на токоприемниках и тем самым скорости движения поездов. В некоторых случаях продольная емкостная компенсация на электровозах позволит избежать сооружения дополнительных линий передач или повышения их напряжения.

НТБ
ДНУЖТ

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Кучма К. Г. Напара Ю. Б. Возможности улучшения коэффициента мощности электровозов однофазно-постоянного тока. Сборник трудов ДИИТа, вып. 58, М., «Транспорт», 1966.
2. Напара Ю. Б. Влияние опережения зажигания вентилей выпрямительных установок электровозов переменного тока на пульсацию выпрямленного тока. Сборник трудов ДИИТа, вып. 66, М., «Транспорт», 1966.
3. Напара Ю. Б. Эффективность искусственного опережения зажигания вентилей выпрямительной установки на электроподвижном составе переменного тока. Сборник трудов ДИИТа, вып. 87, М., «Транспорт», 1969.

Результаты работы докладывались и обсуждались:

1. На заседании электровозной секции научно-технического Совета ВЭЛНИИ.
2. В Рижском филиале Всесоюзного научно-исследовательского института загоностроения.

Днепропетровский институт инженеров железнодорожного транспорта направляет Вам для ознакомления автореферат диссертации инженера **Ю. Б. Напары**.

Просим Вас и всех заинтересованных лиц Вашего учреждения принять участие в публичной защите диссертации или прислать свой отзыв в письменном виде в 2 экземплярах по адресу:

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

НТБ
ДНУЖТ

БТ 00460. Подписано к печати 12. V 1969 г. Бумага 60×84¹₁₆.
Объем 1,25 печатных листа. Заказ № 4670. Тираж 200.

Городская типография № 3 областного управления по печати.
г. Днепропетровск-2. Фрунзе, 6.