

Министерство путей сообщения РФ
Ростовский государственный университет
путей сообщения

На правах рукописи

РГБ ОД

ОСИПОВ ВЛАДИМИР АЛЕКСАНДРОВИЧ С ЯНВ 2000

УДК 621.331:621.331(075.8)

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПРОТЕКАНИЯ УРАВНИТЕЛЬНЫХ
ТОКОВ В ЭЛЕКТРОТЯГОВОЙ СЕТИ И МЕТОДЫ ИХ
МИНИМИЗАЦИИ**

Специальность 05.22.09 – электрификация
железнодорожного транспорта

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ростов-на-Дону – 2000

Работа выполнена в Ростовском государственном университете путей сообщения (РГУПС)

Научный руководитель — доктор технических наук,
профессор А.С.Бочев

Официальные оппоненты — доктор технических наук
Молодцов В.С.
кандидат технических наук
Стороженко Е.А.

Ведущее предприятие — служба электроснабжения Северо-Кавказской железной дороги

Защита диссертации состоится « 8 » декабря 2000 г. на заседании диссертационного совета Д114.08.01 при Ростовском государственном университете путей сообщения по адресу: 344038, г. Ростов н/Д, пл. Народного ополчения, 2

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять в адрес диссертационного совета университета .

Автореферат разослан «8» ноября 2000 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета



М.Л.Лившиц

0217.007,0

Общая характеристика работы

Актуальность проблемы. Проблема энергосбережения в последнее время выдвинулась в число острых экономических проблем. В современных условиях дефицита топливно-энергетических ресурсов и высоких тарифов на электроэнергию техническая политика в отечественной энергетике предполагает форсированный подход к энергосберегающим технологиям и эффективному снижению потерь электроэнергии. Интенсификация работы объектов железнодорожного транспорта, сосредоточение перевозочного процесса на электрифицированных железных дорогах приводит к повышению тяговых нагрузок и росту энергопотребления, что ведет к усложнению работы системы тягового электроснабжения и требует внедрения новых энергосберегающих технологий, позволяющих снизить потери электроэнергии.

Как известно, при двустороннем питании тяговой сети переменного тока на шинах смежных тяговых подстанций практически всегда имеет место неравенство питающего напряжения по модулю и по фазе, что приводит к протеканию в тяговой сети тока, называемого уравнительным. Уравнительные токи протекают практически по всем зонам с двусторонним питанием независимо от того имеется нагрузка на межподстанционной зоне или нет. Протекая по тяговой сети, уравнительный ток создает дополнительные потери энергии, что может в значительной мере снизить показатели работы дистанции электроснабжения. Кроме того, при значительных размерах движения уравнительные токи, суммируясь с тяговыми токами, могут вызвать перегрев, а в отдельных случаях и отжиг контактной сети. Уравнительный ток существенно усложняет работу релейных защит с направленной характеристикой, защит, работающих по принципу анализа гармонического состава тока фидера. Таким образом, уравнительный ток, с точки зрения системы тягового электроснабжения, представляет собой вредное явление.

В настоящее время на ряде дистанций электроснабжения для борьбы с уравнительными токами применяют наиболее простой способ - нарушение цепи протекания уравнительного тока. Однако такая мера далеко не всегда является оправданной. Связано это с тем, что отказ от двустороннего питания и переход к схемам одностороннего питания межподстанционной зоны должен решаться с учетом ряда влияющих факторов. В противном случае такая мера приведет к возрастанию потерь от тяговой нагрузки. Кроме того, такое решение вопроса требует монтажа нейтральной вставки или изолирующего сопряжения в точке раздела зоны.

Задача снижения потерь от уравнительного тока является комплексной задачей, включающей в себя рассмотрение вопросов обнаружения и измерения уравнительного тока, разработку приборов, позволяющих производить такие замеры, а также разработку методов снижения потерь от уравнительного тока.

Цель работы. Главной целью работы явилось улучшение технико-экономических показателей дистанций электроснабжения путем разработки комплекса энергосберегающих мероприятий, направленных на своевременное выявление уравнильных токов и выбора наиболее целесообразного пути их минимизации.

Общая методика исследований. Исходные данные для анализа закономерностей протекания уравнильных токов получены путем экспериментального исследования на тяговых подстанциях Северо-Кавказской железной дороги. Расчеты основаны на теории установившихся процессов в электрических цепях переменного тока с использованием методов математического моделирования на базе ПЭВМ.

Научная новизна.

- Разработана методика оценки величины уравнильного тока как для существующих, так и для вновь электрифицируемых участков железной дороги.
- Предложена методика оценки уравнильного тока как суммы ряда составляющих, каждая из которых оказывает влияние на суммарную величину тока транзита. Проведен подробный анализ степени воздействия на уравнильный ток каждой из составляющих.
- Предложена методика оценки границ эффективности параллельной работы тяговых подстанций, включающая в себя методические указания по расчету критического значения уравнильного тока и программный модуль, позволяющий произвести расчеты с привлечением методов математического моделирования.
- Разработан новый метод индикации уравнильного тока, наложенного на тяговую нагрузку, позволяющий измерить величину уравнильного тока в произвольный момент времени. Основным достоинством данного метода является отсутствие необходимости в канале связи.

Практическая ценность и реализация результатов работы.

Произведен анализ влияния сопротивления тяговой сети на величину потерь от уравнильного тока, дана оценка целесообразности применения систем тягового электроснабжения с низким погонным сопротивлением.

В работе рассмотрен вопрос о выборе оптимального соотношения модулей питающего напряжения на шинах смежных тяговых подстанций при наличии фазового рассогласования.

В рамках плана НИОКР МПС и плана содружества СКЖД-РГУПС разработана конструкция прибора, позволяющего производить контроль за величиной уравнильного тока в тяговой сети переменного тока 27,5 кВ. Прибор прошел испытания на тяговых подстанциях Северо-Кавказской

железной дороги. Изготовлена пробная партия приборов ДКУРТ-5 и передана в эксплуатацию ДЭЛ СКЖД.

Апробация. Основные положения диссертационной работы доложены и обсуждены на:

Научно—технических конференциях молодых ученых и аспирантов РГУПСа (Ростов-на-Дону, 1997 – 2000 г.г.);

Заседаниях кафедры «Теоретические основы электротехники» (Ростов-на-Дону, 1997 – 2000 г.г.);

Совместном заседании кафедр «Теоретические основы электротехники» и «Автоматизированные системы электроснабжения» (Ростов-на-Дону, 2000 год);

Пятой научно-методической конференции «Актуальные проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта» (Москва, РГОТУПС, 2000 год);

Третьей научно-практической конференции «Ресурсосберегающие технологии на ж.д. транспорте» (Москва, МГУПС, 2000 год);

Втором Международном симпозиуме, посвященном проблемам энергосбережения, качеству электроэнергии и вопросам электромагнитной совместимости на железнодорожном транспорте. (Москва, РАПС, 2000 год).

Разработанный в рамках работы над диссертацией прибор для измерения уравнительного тока ДКУРТ-5 демонстрировался на выставке «Экспожд – 2000», (Москва, ВВЦ, 2000).

Публикации По материалам диссертационной работы опубликовано 11 печатных работ, в том числе 3 в центральной печати.

Структура и объем работы Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и приложений. Работа содержит 135 страниц основного текста, 1 таблицу, 28 рисунков, список литературы из 54 наименований, 39 страниц приложений.

Содержание работы

В первой главе проведен анализ выполненных ранее исследований в области изучения закономерностей перетока мощности по сети тягового электроснабжения.

Протекание уравнительного тока по межподстанционной зоне вызывает дополнительные потери энергии на этой зоне, что автоматически учитывается счетчиками энергии на тяговых подстанциях, хотя эти потери не связаны с передачей энергии электроподвижному составу. Увеличение расстояний между подстанциями, производимое благодаря внедрению современных многопроводных систем электроснабжения с экранирующим и усиливающим проводом (ЭУП), приводит к увеличению разности потенциалов на шинах подстанций как по величине так и по фазе.

Проблемой исследования уравнильных токов и поиском мер для устранения их отрицательного воздействия на систему тягового электроснабжения занимался ряд организаций и творческих коллективов. Проблема приобрела актуальность с началом внедрения на сети дорог системы переменного тока 25 кВ. Существенный вклад в решение поставленных вопросов внесли работы, проводившиеся в МИИТе. Ряд работ К.Г.Марквардта, Ю.А.Чернова и других ученых, объясняющих причины протекания уравнильных токов, явились отправной точкой для решения вопросов, связанных с проблемой уравнильных токов.

С появлением методов индикации факта протекания уравнильного тока, а также методов, позволяющих оценить его величину количественно, стало возможным перейти к разработке мероприятий по борьбе с уравнильными токами. Все мероприятия, которые разрабатывались и разрабатываются в настоящее время, можно разделить на две категории: активные и пассивные. К активным относятся меры, позволяющие влиять на первопричину уравнильного тока - разность напряжений на смежных тяговых шинах. Пассивными методами можно назвать те методы, которые влияют на сопротивление цепи протекания уравнильного тока, включая переход на одностороннее питание.

С начала 80-х годов РИИЖТ принимает активное участие в программе энергосбережения на Северо-Кавказской железной дороге. Работа над проблемой снижения уравнильных токов велась на кафедре электроснабжения электрических железных дорог под руководством профессора Фигурнова Е.П. Большой вклад в решение этой проблемы внесли работы профессора Бочева А.С., в которых предложен активный метод снижения уравнильного тока, разработана функциональная схема устройства для снижения потерь электроэнергии, вызванных этим током.

Вопросами исследования разности напряжений как функции ряда влияющих факторов занимались такие ученые как Г.Г.Марквардт, Р.Р.Мамошин, Л.А.Герман, Р.И.Караев, Б.И.Косарев, Черемисин В.Т. Исследования этих авторов позволили создать достаточно простые методы расчета уравнильного тока, а также определили ряд мероприятий по снижению негативного влияния транзита мощности по тяговой сети. Получены зависимости уравнильного тока от режима работы внешней энергосистемы, положения РПН, наличия устройств емкостной компенсации и некоторые другие. Изучение разработанных ранее методик выявило отдельные недостатки в определении влияния ряда факторов. Некоторые сомнения вызывают выводы, касающиеся влияния тока тяги на величину уравнильного тока. Такое положение, прежде всего, вызвано рядом сложностей на пути решения проблемы.

Задача точного определения уравнильного тока аналитическим методом сильно осложняется влиянием на последний ряда факторов. Зависимость величины уравнильного тока от тяговых нагрузок как исследуемой зоны, так и зон прилегающих к исследуемой слева и справа, а

также режима работы системы внешнего электроснабжения приводит к тому, что для оценки величины уравнильного тока его вектор приходится раскладывать на составляющие, зависящие от различных факторов.

В настоящее время наметились две основные тенденции минимизации потерь от уравнильного тока. Во-первых, рассматривается вопрос о целесообразности раздела межподстанционных зон и перехода на схемы встречно-петлевого питания. Во-вторых, проводится подробный анализ целесообразности применения устройств компенсации напряжения на тяговых шинах.

В первом из указанных направлений работают коллективы РГУПС, МГУПС, ОМГУПС, РГОТУПС. Для борьбы с уравнильными токами таким методом предлагается осуществлять периодический контроль величины уравнильного тока специализированными приборами (ДКУРТ-5, ИУТ-3), при достижении уравнильным током критической величины предлагается отказаться от двустороннего питания, так как потери от уравнильных токов становятся больше дополнительных потерь от тяговой нагрузки при одностороннем питании.

В работе ставится задача анализа величины уравнильного тока в тяговой сети межподстанционной зоны, электрифицированной по системе однофазного тока промышленной частоты железной дороги, с учетом режимов работы системы внешнего электроснабжения, коэффициентов трансформации и тяговых нагрузок как исследуемой зоны, так и прилежащих к ней. Целью этого анализа явилось стремление выявить участки тяговой сети, подверженные протеканию уравнильных токов еще на стадии проектирования.

Во второй главе диссертационной работы ставилась задача исследовать величину уравнильного тока как функцию от ряда влияющих факторов, к которым необходимо отнести ток тяги, направление и величину тока транзита в ЛЭП, тип контактной подвески и др. Уравнильный ток, протекающий в пределах рассматриваемой межподстанционной зоны, представлен как сумма нескольких составляющих: составляющая уравнильного тока, вызванная различием коэффициентов трансформации, составляющая уравнильного тока, вызванная различием первичного питающего напряжения, составляющая уравнильного тока, вызванная наличием тока тяги.

Для рассмотрения вопроса о влиянии на уравнильный ток режима работы системы внешнего электроснабжения все возможные способы питания тяговых подстанций условно разбиты на 3 группы: питание тяговых подстанций от продольной одноцепной ЛЭП, питание блока тяговых подстанций от продольной двуцепной ЛЭП, питание блока тяговых подстанций от различных ЛЭП. Блоком тяговых подстанций в работе называется пара тяговых подстанций, питающих одну и ту же межподстанционную зону.

В результате проведенных исследований получены следующие результаты: в случае питания блока тяговых подстанций от продольной одноцепной ЛЭП составляющая уравнивающего тока, обусловленная режимом работы системы внешнего электроснабжения, будет зависеть от величины падения напряжения в ЛЭП на участке между смежными тяговыми подстанциями. В общем случае различие уровней напряжения на вводах подстанций, питающих одну фидерную зону, будет определяться выражением:

$$\Delta U = \Delta U_{\text{тр}} + \Delta U_{\text{м}}, \quad (1)$$

где: $\Delta U_{\text{тр}}$ - падение напряжения в ЛЭП, вызванное сопротивлением линии электропередачи

$\Delta U_{\text{м}}$ - изменение уровня напряжения на участке ЛЭП, обусловленное взаимоиндуктивным влиянием соседних фаз.

Рассмотрим схему замещения (рисунок 1) 1 фазы линии электропередачи участка внешнего энергоснабжения между тяговыми подстанциями.

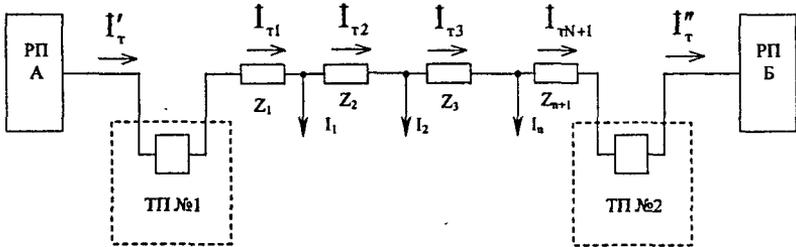


Рисунок 1

На схеме обозначено: ТП №1 и ТП №2 – тяговые подстанции, питающие рассматриваемую межподстанционную зону, «РП А» и «РП Б» - районные подстанции энергосистемы. Сопротивлениями $Z_1 - Z_{n+1}$ представлено сопротивление фазы линии электропередачи на расстоянии между точками присоединения тяговых подстанций ТП №1 и ТП №2 к ЛЭП. Нагрузки, создаваемые районными потребителями, представлены на схеме в виде токов $I_1 - I_n$.

Составляющие падения напряжения (1) определяются выражениями:

$$\Delta U_{\text{тр}} = \sum_{i=1}^{n+1} Z_i \left[I'_{\text{Ат}} + \sum_{j=1}^{i-1} (-I_{\text{А}j}) \right] \quad (2)$$

$$\Delta U_{\text{мА}} = \sum_{i=1}^{n+1} \left\{ Z_{\text{АВ}i} \left[I'_{\text{Вт}} + \sum_{j=1}^{i-1} (-I_{\text{В}j}) \right] + Z_{\text{АС}i} \left[I'_{\text{Ст}} + \sum_{j=1}^{i-1} (-I_{\text{С}j}) \right] \right\} \quad (3)$$

Подставив выражения 2 и 3 в 1, можно получить величину падения напряжения в фазе ЛЭП между точками подключения тяговых подстанций. Для определения составляющей уравнильного тока, обусловленной режимом работы энергосистемы, достаточно полученный по формуле (1) результат привести к шинам 27,5 кВ и разделить на сопротивление тяговой сети рассматриваемой межподстанционной зоны.

При помощи аналогичной методики в диссертации рассмотрены наиболее часто применяемые способы подключения блока тяговых подстанций к системе внешнего электроснабжения и приведены расчетные формулы для определения составляющей уравнильного тока, обусловленной режимом работы питающей энергосистемы.

Существенное влияние на величину уравнильного тока может оказывать составляющая, обусловленная некорректным применением РПН. В случае, если коэффициенты трансформации трансформаторов смежных тяговых подстанций равны, величина уравнильного тока будет зависеть только от параметров питающей энергосистемы и величины тока тяги. Составляющая уравнильного тока, обусловленная рассогласованием позиции РПН, в данном случае будет отсутствовать.

Практически имеет место другой случай. Коэффициенты трансформации тяговых трансформаторов смежных тяговых подстанций имеют некоторое отличие, связанное чаще всего с рассогласованием позиции устройств регулирования напряжения под нагрузкой, что приводит к возникновению составляющей уравнильного тока $I_{ур}^{рнн}$.

Значительную роль в изменении величины уравнильного тока играет его составляющая, вызванная током тяги, протекающего как по зоне, для которой определяется уравнильный ток, так и по двум смежным зонам, получающим питание от тяговых подстанций, питающих рассматриваемой зону. Протекая по обмоткам тягового трансформатора и ЛЭП, ток тяги оказывает двойное влияние: во-первых, ответвляясь в сеть внешнего электроснабжения, он создает дополнительное падение напряжения до точки подключения тяговой подстанции, а во-вторых, протекая по обмотке трансформатора, он создает падение напряжения, что приводит к изменению уровня напряжения на тяговых шинах. Таким образом, для рассмотрения вопроса о влиянии тока тяги на величину уравнильного тока необходимо разбить этот вопрос на 2 составляющие: опосредованное влияние тока тяги на уравнильный ток, связанное с изменением уровня напряжения на шинах высшего напряжения, обусловленного падением напряжения в ЛЭП, и непосредственное влияние, связанное с изменением уровня напряжения на шинах 27,5 кВ, вызванное падением напряжения в тяговом трансформаторе.

В работе рассмотрена методика расчета обеих составляющих потерь напряжения для наиболее часто применяемых схем питания блока тяговых подстанций от ЛЭП. Наиболее существенное влияние на величину уравнильного тока оказывает ток тяги зоны, для которой ведется

исследование. Рассмотрим этот вопрос более подробно.

При рассмотрении вопроса примем, что участок однопутный и по межподстанционной зоне перемещается одна единица электроподвижного состава. Очевидно, что нагрузка, потребляемая ЭПС, будет распределяться между тяговыми подстанциями обратно пропорционально сопротивлению от точки приложения нагрузки до источников. Учитывая, что сопротивления тяговых подстанций оказывают влияние на токораспределение, можно определить величину токов, потребляемую от каждой подстанции.

$$I'_A = \frac{Z_2 + Z_{22}}{Z_1 + Z_{11} + Z_2 + Z_{22}} \cdot I \quad I'_B = \frac{Z_1 + Z_{11}}{Z_1 + Z_{11} + Z_2 + Z_{22}} \cdot I \quad (4)$$

где: Z_1, Z_2 — сопротивление тяговой сети от точки до шин тяговых подстанций А и В соответственно;
 Z_{11}, Z_{22} — сопротивление трансформаторов тяговых подстанций А и В соответственно;
 I'_A, I'_B — токи фидеров тяговых подстанций А и В соответственно.

С учетом того, что по обмотке тягового трансформатора, питающей рассматриваемую зону, протекает $2/3$ тока плеча, можно записать:

$$\Delta U'_A = \frac{Z_2 + Z_{22}}{Z_1 + Z_{11} + Z_2 + Z_{22}} \cdot \frac{2}{3} \cdot I \cdot Z_{11} \quad (5)$$

$$\Delta U'_B = \frac{Z_1 + Z_{11}}{Z_1 + Z_{11} + Z_2 + Z_{22}} \cdot \frac{2}{3} \cdot I \cdot Z_{22} \quad (6)$$

где: $\Delta U'_A, \Delta U'_B$ — падение напряжения на сопротивлении тягового трансформатора.

Учитывая, что возникшая разность напряжений приведет к протеканию уравнивающего тока, можно записать выражение для определения величины последнего:

$$I_{\text{ур}}^{\pi} = \frac{(Z_2 + Z_{22}) \cdot Z_{11} - (Z_1 + Z_{11}) \cdot Z_{22}}{(Z_1 + Z_{11} + Z_2 + Z_{22}) \cdot (Z_1 + Z_2)} \cdot \frac{2}{3} \cdot I \quad (7)$$

После преобразования получим:

$$I_{\text{ур}}^{\pi} = \frac{Z_{11} \cdot Z_2 - Z_1 \cdot Z_{22}}{(Z_1 + Z_{11} + Z_2 + Z_{22}) \cdot (Z_1 + Z_2)} \cdot \frac{2}{3} \cdot I \quad (8)$$

Определим, каким будет токораспределение в схеме при условии, что сопротивления обеих тяговых подстанций равны нулю.

$$I_A = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \cdot I; \quad I_B = \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} \cdot I \quad (9)$$

или с учетом токораспределения по обмоткам:

$$I'_A = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \cdot \frac{2}{3} \cdot I; \quad I'_B = \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} \cdot \frac{2}{3} \cdot I \quad (10)$$

Вычтем из (10) выражение (8):

$$\left(\frac{Z_1 \cdot Z_2 + Z_{11} \cdot Z_2 + Z_2 \cdot Z_2 + Z_{22} \cdot Z_2 - Z_{11} \cdot Z_2 + Z_1 \cdot Z_{22}}{(Z_1 + Z_{11} + Z_2 + Z_{22}) \cdot (Z_1 + Z_2)} \right) \cdot \frac{2}{3} I = \quad (11)$$

$$= \left(\frac{Z_1 \cdot (Z_2 + Z_{22}) + Z_2 \cdot (Z_{11} - Z_{11} + Z_2 + Z_{22})}{(Z_1 + Z_{11} + Z_2 + Z_{22}) \cdot (Z_1 + Z_2)} \right) \cdot \frac{2}{3} \cdot I;$$

Таким образом, величина тока фидера будет равна:

$$I_A'' = \left(\frac{(Z_2 + Z_{22})}{(Z_1 + Z_{11} + Z_2 + Z_{22})} \right) \cdot \frac{2}{3} \cdot I, \quad (12)$$

что полностью соответствует величине I_A' , описываемой выражением (4). Этот факт позволяет утверждать, что при наличии тяговой нагрузки на исследуемой зоне разность напряжений на шинах тяговых подстанций, вызванная током тяги, не приводит к протеканию уравнительного тока а приводит лишь к перераспределению нагрузок. Проанализировав выражение (8), несложно получить среднее значение уравнительного тока, за время прохода 1 единицы ЭПС по межподстанционной зоне, которое будет равно 0 только при условии высокой стабильности величины тяговой нагрузки и равенства сопротивлений тяговых подстанций. Величина, описываемая выражением (8), может быть названа *«псевдоуравнительным током»*, разгружающим одну тяговую подстанцию и увеличивающим нагрузку другой. Наличие этого тока *не позволяет производить непосредственное измерение величины уравнительного тока при наличии тока тяги*, так как результат измерения будет сильно искажен.

В третьей главе диссертационной работы рассмотрены несколько основных методов борьбы с потерями от уравнительного тока: регулировка модуля питающего напряжения на шинах смежных подстанций, переход на одностороннее питание. Рассматривается также вопрос выбора рационального сопротивления тяговой сети на стадии проектирования, что, в свою очередь, позволяет существенно снизить потери от уравнительного тока.

Известно, что при отсутствии уравнительных токов схема двухстороннего питания выгоднее схемы одностороннего питания по критериям потери мощности и потери напряжения. Однако при наличии уравнительных токов эффективность схем двухстороннего питания снижается по мере роста величины уравнительного тока, а при превышении определенной его величины становится выгоднее переход к схеме одностороннего питания.

На однопутных участках возможен только один вариант отказа от двухстороннего питания - раздел посередине зоны (двухконсольная схема). Для двухпутных участков имеет место несколько вариантов: схема

одностороннего раздельного питания; схема двухстороннего раздельного питания, схема встречно-петлевого питания; схема узлового питания, схема одностороннего параллельного питания, схема двухстороннего параллельного питания

Таким образом, в простейшем случае задача сравнения вариантов сводится к определению величины уравнильного тока, при котором дополнительные потери от него становятся равными той экономии потерь, которая достигается за счет применения схемы двухстороннего питания.

С учетом того, что потери в тяговой сети зависят от грузопотока и ряда других факторов, граничное значение уравнильного тока должно определяться для каждого конкретного участка и условий движения, т.е. необходимо определить зависимость уравнильного тока от энергопотребления, либо грузопотока.

Для сравнения различных вариантов схем питания в качестве одного из аналитических методов сравнения предлагается метод наложения.

Исследование вопроса целесообразности сохранения двухстороннего питания на двухпутных участках вследствие большого объема вычислительных операций следует производить на ЭВМ по приводимой ниже методике.

В качестве исходных параметров для исследования задаются токи электроподвижного состава в поминутном интервале за время прохождения им межподстанционной зоны, для которой ведутся исследования, сопротивление тяговой сети, сопротивление подстанций, сопротивление внешней энергосистемы. Исследования проводятся для различной грузонапряженности участка. Так, определение потерь мощности на тягу поездов осуществляется при симметричном проходе по зоне одновременно по двум путям различного числа поездов, с сохранением постоянного межпоездного интервала движения. Расчет потерь мощности производится за все время движения ЭПС по зоне как сумма потерь мощности на каждом элементе схемы замещения за все время хода расчетного поезда по зоне. В качестве расчетного принимается поезд, движущийся по четному пути первым.

После старта программы производится объявление необходимых массивов. Это массивы токов для четного и нечетного направлений, массивы падений напряжения, потерь активной мощности. Длина массивов определяется количеством расчетных точек, что, в свою очередь, зависит от времени хода ЭПС по зоне, так как количество точек расчета равно числу минут в файле данных. Далее в автоматическом режиме производится считывание значений токов в поминутном интервале из файла данных в заранее подготовленные массивы. Значение сопротивления контактной подвески, длины зоны, межпоездного интервала вводятся при старте программы и остаются неизменными во время исполнения программы.

После того, как подготовлены исходные данные для расчета, запускается основной программный цикл, руководящий числом поездов на

исследуемой зоне. Расчет последовательно выполняется для различного числа поездов от 1 до 10. При большой длине зоны максимальное число тяговых нагрузок может быть скорректировано. Однако целесообразность такой меры крайне низка - при большом числе равномерно распределенных по зоне тяговых нагрузок схемы одностороннего питания контактной сети эквивалентны схемам двустороннего питания как по критерию потерь мощности, так и по критерию уровня напряжения.

В программе принята следующая методика: при увеличении числа ЭПС на единицу новый поезд выходит по пути, где число ЭПС меньше.

Руководствуясь принципами метода наложения, для расчета принимается 2 схемы замещения, первая из которых представляет собой расчетный участок с полным параллельным соединением подвесок. Токи всех поездов уменьшаются в два раза. Для программной реализации такого метода местоположение каждого поезда необходимо определять в зависимости от расположения остальных поездов. С целью разрешения этой проблемы в программу введен модуль сортировки, производящий сортировку номеров поездов в зависимости от их расположения.

На таком алгоритме реализована программа, позволяющая рассчитать величину потерь мощности, вызванных тяговой нагрузкой при различном числе поездов на межподстанционной зоне. В результате расчетов можно получить данные, представленные на рисунке 2.

Зависимость суточных потерь энергии в тяговой сети от удельной мощности устройств электроснабжения

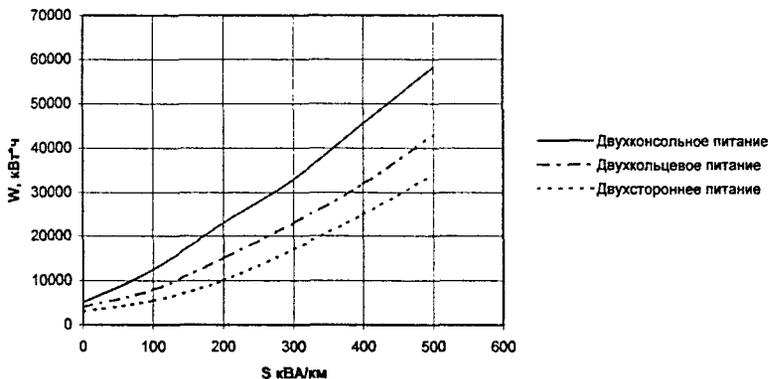


Рисунок 2

Изложенная выше методика борьбы с уравнительными токами позволяет достаточно просто избавиться от вредного влияния последних, без привлечения больших капитальных затрат. Потребность в капиталовложениях при использовании вышеописанного метода будет состоять только в монтаже нейтральной вставки в случае ее отсутствия.

Однако далеко не на всех межподстанционных зонах возможен отказ от схем двустороннего питания. Причиной тому, в первую очередь, служит необходимость безопасного производства перевозок на этих участках. Таковыми являются зоны с затяжными, крутыми подъемами. Для снижения потерь от уравнильных токов на этих зонах в качестве наиболее дешевого предлагается описанный ниже метод - метод поэтапного регулирования напряжения на шинах смежных тяговых подстанций.

Этот метод является логическим дополнением к мерам, описанным выше. Суть его заключается в следующем: на ряде межподстанционных зон с двусторонним питанием выбирается такой уровень напряжения на смежных тяговых шинах, чтобы потери мощности от уравнильного тока были минимальными, при этом уравнильные токи будут вызваны только рассогласованием фаз питающего напряжения. Основной проблемой в реализации поставленной задачи является тот факт, что регулирование уровня напряжения на тяговых шинах производится одновременно для обоих плеч питания, а это приводит к изменению величины уравнильного тока одновременно на двух смежных зонах, что, в свою очередь, требует регулировки уровня напряжения на следующей межподстанционной зоне. Таким образом, может возникнуть ситуация, при которой диапазон регулирования напряжения будет исчерпан, а следовательно, будет иметь место значительная разница напряжений на зонах между тяговыми подстанциями, ограничивающими этот участок (пограничных зонах). Для решения указанной проблемы может быть выбран следующий путь: напряжение выравнивается по модулю на некотором участке электрифицированной железной дороги (на ряде смежных межподстанционных зон). При этом очевидно, что на пограничных зонах будут протекать уравнильные токи, величина которых будет существенна. Для этих зон становится целесообразно отказаться от схемы двустороннего питания, при этом сохранив двухстороннее питание на нескольких межподстанционных зонах, лежащих между пограничными.

Как указывалось выше, уравнильный ток связан с рассогласованием фаз питающего напряжения и различием модулей последних. При этом считается, что при неизменной величине фазового сдвига между векторами питающего напряжения уравнильный ток будет иметь минимальную величину при равенстве модулей напряжений. Покажем, что это не так. Для этого оценим величину потерь мощности при условии, что модули напряжений равны, а имеет место только рассогласование начальных фаз. Очевидно:

$$\Delta U = U_1 - U_2 \quad (13)$$

При этой разнице напряжений потечет уравнильный ток, который приведет к потреблению тяговой сетью как активно-индуктивной нагрузкой дополнительной мощности, не связанной с тяговыми нагрузками. Величина этой мощности описывается выражением

$$\Delta \tilde{S} = \Delta \dot{U} \cdot \dot{I}_{\text{пр}} \quad (14)$$

Преобразуем выражение 14, учитывая, что величина уравнительного тока определяется как отношение комплексной разности потенциалов к полному сопротивлению тяговой сети рассматриваемой зоны

$$\Delta \tilde{S} = \Delta U \frac{\Delta \dot{U}}{\dot{Z}_{\text{тн}}} = \Delta U^2 \frac{Z_{\text{тн}}}{Z_{\text{тн}}^2} \quad (15)$$

Определим величину ΔU^2

$$\Delta U^2 = U_1^2 - 2 \cdot U_1 \cdot U_2 \cdot \cos \varphi + U_2^2 (\cos \varphi)^2 + U_2^2 (\sin \varphi)^2 = U_1^2 - 2 \cdot U_1 \cdot U_2 \cdot \cos \varphi + U_2^2 \quad (16)$$

учитывая, что модули напряжений равны:

$$\Delta U^2 = 2 \cdot U_1^2 - 2 \cdot U_1^2 \cdot \cos \varphi \quad (17)$$

Таким образом, величина потерь мощности, вызванная рассогласованием фаз питающего напряжения, будет равна:

$$\Delta \tilde{S} = 2 \cdot U_1^2 \cdot (1 - \cos \varphi) \frac{Z_{\text{тн}}}{Z_{\text{тн}}^2} \quad (18)$$

Теперь определим эту же величину, полагая, что модули питающих напряжений не равны и отличаются друг от друга на некоторую величину, равную U' . Из выражения 3.29 получим:

$$\Delta U^2 = U_1^2 - 2 \cdot U_1 \cdot (U_1 + U') \cdot \cos \varphi + (U_1 + U')^2 \quad (19)$$

Проведя преобразования, представим (19) в виде:

$$\Delta U^2 = [2 \cdot U_1^2 - 2 \cdot U_1^2 \cdot \cos \varphi] + U'^2 + 2 \cdot U_1 \cdot U' \cdot (1 - \cos \varphi) \quad (20)$$

Очевидно, что выражение в квадратных скобках в точности повторяет выражение (17), а следовательно, представляет собой разницу напряжений, вызванную рассогласованием фаз. Таким образом, дополнительная потеря мощности, вызванная рассогласованием модулей напряжений, будет равна:

$$\Delta \tilde{S}_{\text{доп}} = [U'^2 + 2 \cdot U_1 \cdot U' \cdot (1 - \cos \varphi)] \frac{Z_{\text{тн}}}{Z_{\text{тн}}^2} \quad (21)$$

Определим минимум функции 21, положив U' переменной.

$$\left\{ [U'^2 + 2 \cdot U_1 \cdot U' \cdot (1 - \cos \varphi)] \frac{Z_{\text{тн}}}{Z_{\text{тн}}^2} \right\}' \partial U' = 0$$

После преобразований получим:

$$U' = U_1 \cdot (\cos \varphi - 1) \quad (22)$$

Таким образом, применение выражения (22) позволит выбрать оптимальное соотношение модулей питающего напряжения.

На рисунке 3 представлен график изменения величины дополнительных потерь мощности как функция от разницы модулей питающего напряжения.

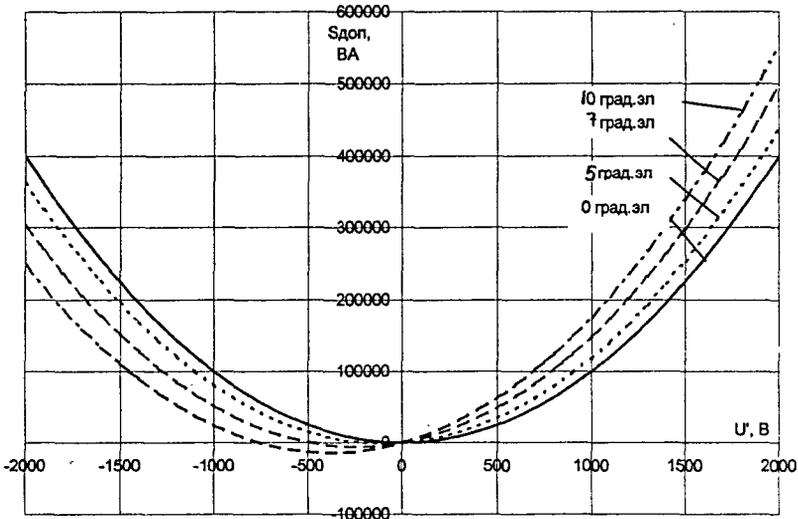


Рисунок 3

Из графика очевидно, что при определенных значениях U' величина $\Delta \tilde{S}_{доп}$ может быть меньше 0. Это свидетельствует о том, что происходит снижение потерь мощности благодаря небалансу напряжений.

Как известно, в настоящее время на электрифицированных железных дорогах России нашли широкое применение различные системы усиления контактной сети, а также контактные подвески нового поколения (система с экранирующим и усиливающим проводом), обладающие значительно более низким погонным сопротивлением. Достоинства этих систем очевидны и неоспоримы, но, как указывалось выше, изменение сопротивления тяговой сети влечет за собой изменение величины уравнительного тока, протекающего по межподстанционной зоне. Таким образом, снижение сопротивления тяговой сети приведет к пропорциональному возрастанию уравнительных токов в ней.

Однако следует отметить, что потери активной энергии в тяговой сети не всегда будут расти со снижением сопротивления подвески. Этот факт является следствием принципа максимума передаваемой мощности. Определим, при каких условиях будут наблюдаться максимальные потери активной мощности в контактной сети. Для анализа поставленной задачи

применим известную теорему Тевенена-Гельмгольца об активном двухполоснике.

По отношению к точкам присоединения контактной сети вся остальная часть энергосистемы, включая тяговые трансформаторы, представляет собой активный двухполосник. Согласно используемой теореме, этот двухполосник можно представить одним эквивалентным сопротивлением - входным сопротивлением двухполосника - и источником напряжения холостого хода, определяемом напряжением на зажимах двухполосника при разомкнутой ветви нагрузки. В качестве нагрузки двухполосника будет выступать сопротивление тяговой сети межподстанционной зоны.

Воспользуемся принципом максимума передаваемой мощности для анализа влияния изменения нагрузки активного двухполосника на величину потерь электроэнергии от уравнительного тока. Если нагрузка $Z_{\text{тс}}$ подключена к активному двухполоснику, то в ней будет выделяться мощность

$$P_{\text{н}} = (I_{\text{н}})^2 R_{\text{н}} = \frac{(U_{\text{х}})^2}{(Z_{\text{экв}} + Z_{\text{н}})^2} R_{\text{н}} \quad (23)$$

Эта мощность в рассматриваемом случае есть потери активной мощности, вызванные уравнительным током. Примем в качестве постоянных величин параметры активного двухполосника, приведенные к уровню напряжения исследуемой цепи.

В сопротивление $Z_{\text{экв}}$ входят составляющие сопротивления обмоток понижающих трансформаторов подстанций и сопротивление сетей энергосистемы. На рисунке 4 и 5 представлены зависимости потерь мощности от уравнительного тока как функция сопротивления тяговой сети для достаточно мощной и менее мощной энергосистем.

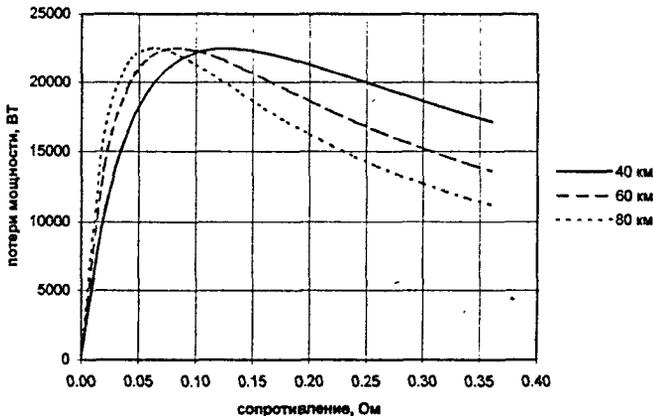


Рисунок 4

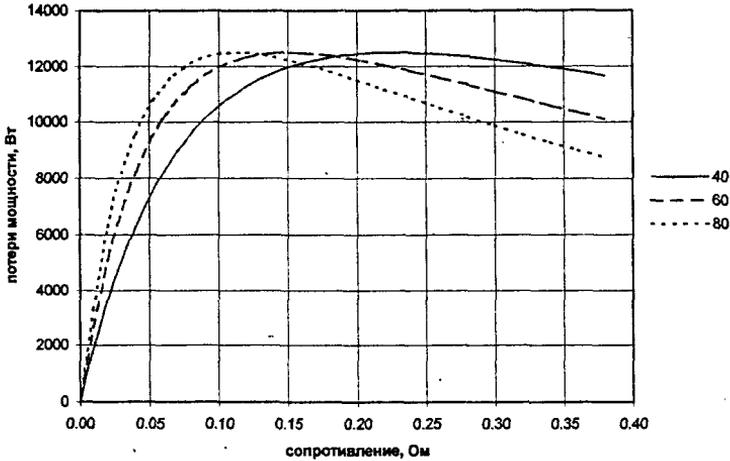


Рисунок 5

Анализ кривых, представленных на рисунках 4 и 5, позволяет сделать следующий вывод: снижение сопротивления в пределах, возможных на сегодняшний день, а именно до 0,2 Ом/км, приведет к возрастанию потерь активной мощности максимум в 1,2 раза, при снижении сопротивления - в 1,5 раза. Указанный результат может иметь место только на достаточно протяженных зонах (около 80 км) и при условии, что питание участка железной дороги производится от энергосистемы достаточно большой мощности. В случае же, если межподстанционная зона имеет небольшую длину, порядка 40 км, и получает питание от энергосистемы с достаточно большим сопротивлением, возрастания потерь активной мощности не будет вообще.

Результаты исследований потерь активной энергии от применяемого сопротивления тяговой сети целесообразно использовать на стадии разработки проектов электрификации новых участков, учитывая их как один из дополнительных критериев при выборе контактной подвески. Такая мера позволит в процессе эксплуатации избежать больших потерь активной мощности от уравнильных токов.

В четвертой главе диссертационной работы описывается разработанный автором прибор для измерения величины уравнильного тока. Предпосылкой для разработки устройства, позволяющего оценить величину уравнильного тока, является необходимость поддержания оптимального режима напряжения на шинах смежных подстанций, посредством непрерывного или периодического контроля величины перетока мощности по тяговой сети. Производить такие замеры без специальной аппаратуры достаточно сложно. Связано это с тем, что

уравнительный ток, протекая по тяговой сети переменного тока, накладываясь на тяговую нагрузку, суммируется с ней. Физическое разделение суммарного тока фидера на тяговый ток и ток, обусловленный перетоком мощности, невозможно. Этот факт приводит к тому, что для измерения величины уравнительного тока в настоящее время применяются косвенные методы измерения.

Проблема определения величины уравнительного тока решалась такими методами, как векторный анализ тока фидера тяговой подстанции, путем сравнения токов смежных путей на двухпутных участках при использовании схемы параллельного питания подвесок, а также при помощи определения факта протекания уравнительного тока посредством гармонического анализа тока фидера. Однако далеко не все методы позволяют адекватно судить о величине уравнительного тока как о критерии качества сопряжения смежных тяговых подстанций, питающих межподстанционную зону. Как показано в главе 2 диссертационной работы, величина уравнительного тока в значительной мере зависит от величины тока тяги как на обследуемой зоне, так и на смежных зонах, получающих питание от тяговых трансформаторов, питающих обследуемую зону. Такое положение вопроса вызвало потребность в проведении исследований, имеющих своей целью отыскание метода или совокупности методов, позволяющих с достаточной точностью отделить уравнительный ток от тока тяги.

Для выбора наиболее оптимального способа определения факта протекания уравнительного тока с последующим его измерением, в работе проведен предварительный анализ известных на сегодняшний день способов индикации уравнительного тока.

Устранение потерь от уравнительных токов требует обследования каждой межподстанционной зоны и оценки величины протекающих по ней уравнительных токов. Такие замеры, если они проводятся без специальной аппаратуры, приходится выполнять при отсутствии в межподстанционной зоне поездов. Это вызывает большие затруднения, тем более, что длительность подобных замеров должна быть достаточно большой. Кроме того, достоверность замеров проводимых без привлечения специально обученного персонала, будет достаточно низкой.

Решение этих вопросов может стать возможным за счет инструментального выявления и определения величины уравнительных токов с помощью разработанных Ростовским государственным университетом путей сообщения (РГУПС) датчиков контроля уравнительных токов ДКУРТ-5.

До появления ДКУРТ-5 величины уравнительных токов определялись путем экспериментальных замеров, а на определенных зонах - с применением датчиков ДКУРТ-3, после чего принимались решения о необходимости мероприятий, ограничивающих уравнительные токи.

За основу при разработке прибора взят метод гармонического анализа тока фидера. Структурная схема прибора представлена на рисунке 6, где 1 и 2- измерительные трансформаторы тока и напряжения фидера тяговой подстанции соответственно; 3 - промежуточный трансформатор тока; 4-разделительный трансформатор напряжения; 5 - входной усилитель-преобразователь тока фидера; 6 - входной усилитель-преобразователь напряжения; 7 - фильтр; 8 - измерительный модуль; 9 - датчик фазы тока фидера; 10 - блок питания; 11 - блок индикации.

Устройство работает следующим образом: с измерительных трансформаторов тока 1 и напряжения 2, установленных на фидере, питающем исследуемую межподстанционную зону, ток и напряжение подаются на промежуточные измерительные трансформаторы 3 и 4, размещенные в корпусе прибора. Такая мера создает гальваническую развязку цепей прибора с измерительными цепями тяговой подстанции и, кроме того, благодаря применению промежуточного трансформатора тока, обеспечивает низкое входное сопротивление прибора по токовым цепям, что делает возможным подключение прибора непосредственно в токовые цепи. С промежуточного трансформатора тока сигнал подается на входной

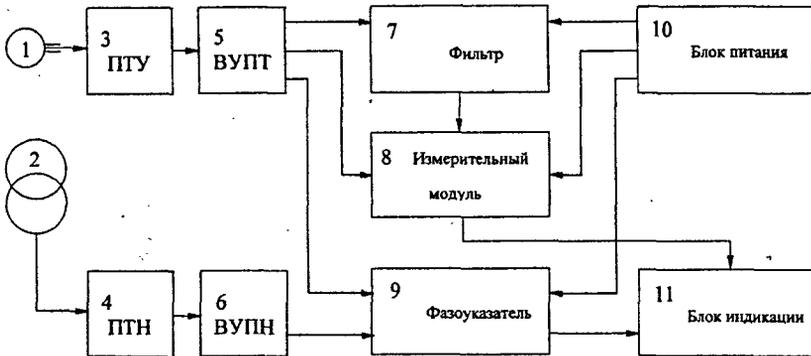


Рисунок 6

усилитель-преобразователь тока фидера 5, который обеспечивает его усиление и распределение по 3 независимым каналам. Аналогичным образом сигнал, снимаемый с разделительного трансформатора напряжения, модифицируется входным усилителем-преобразователем напряжения 6. Кроме того, входные усилители 5 и 6 обеспечивают защиту измерительных цепей от перегрузок и бросков тока при включении. Далее сигналы поступают одновременно на фильтр 7, измерительный модуль 8 и датчик фазы тока фидера 9. Фильтром определяется наличие в токе фидера высших

гармоник нулевой последовательности и при условии, что их процент ниже критической величины, посылается сигнал на измерительный модуль 7, который осуществляет измерение текущего значения тока фидера. При условии обнаружения гармоник фильтром 7 посылается соответствующий сигнал, и измерительный модуль прекращает измерение. При этом в запоминающем устройстве измерительного модуля сохраняется последнее измеренное значение уравнительного тока, измеренного до появления тока тяги. Информация из запоминающего устройства измерительного модуля 8 передается на блок индикации 11, выполненный на цифровых светодиодных сборках.

Направление перетока мощности «от шин» подстанции или «к шинам» подстанции определяется датчиком фазы тока фидера 9 непрерывно, вне зависимости от наличия тока тяги на зоне. Питание всего устройства производится блоком питания 10, помещенным в корпусе прибора.

Прибор выполнен в малогабаритном корпусе размером 170x190x170, масса прибора - 4,5 кг. Потребляемая мощность 25 Вт. Прибор рассчитан на непрерывную работу.

Заключение

Основные выводы и результаты работы по комплексному исследованию закономерностей протекания уравнительных токов в электротяговой сети переменного тока и разработке устройств по их измерению могут быть сформулированы следующим образом:

1. Произведена оценка степени влияния на величину уравнительного тока таких факторов как режим работы системы электроснабжения, положение регуляторов напряжения на тяговых подстанциях и ток тяги. В результате проведенных исследований установлено: уравнительным током следует называть только тот ток, который обусловлен режимом работы энергосистемы и положением РПН. Эта величина свидетельствует о различии напряжений на шинах тяговых подстанций на холостом ходу и, при корректном использовании РПН, является чисто транзитным током, разгружающим сеть внешнего электроснабжения.

2. Показано, что учитывать в качестве составляющей уравнительного тока его составляющую, вызванную током тяги нецелесообразно, так как избавиться от этой составляющей невозможно, а руководствоваться ею при принятии решений о снижении уравнительного тока нельзя, поскольку даже при идеальном сопряжении тяговых подстанций будет иметь место протекание псевдоуравнительных токов.

3. Доказано, что для измерения уравнительных токов необходимо применять методы, основанные на измерении уравнительного тока в моменты отсутствия тяговых нагрузок. Связано это с тем, что на величину уравнительного тока существенное влияние оказывает ток тяги.

4. Предложена методика оценки целесообразности использования схем двухстороннего питания. Рассмотрены различные схемы питания контактной сети, и описаны методы оценки критической величины уравнительного тока. В работе рассмотрена методика определения границ эффективности параллельной работы тяговых подстанций, реализованная на ЭВМ.
5. В работе приведены справочные кривые, полученные в результате расчетов на ЭВМ, которые основаны на разработанной автором математической модели, позволяющие определить эффективность применения схем двустороннего питания.
6. Произведена оценка влияния сопротивления тяговой сети на величину потерь мощности от уравнительных токов, даны рекомендации по учету влияния сопротивления тяговой сети для вновь проектируемых участков. В результате проведенных исследований установлено, что применение современных контактных подвесок с низким погонным сопротивлением приводит к возрастанию потерь от уравнительных токов максимум в 1,5 раза.
7. Даны рекомендации по снижению потерь мощности от уравнительного тока посредством регулировки модуля питающего напряжения РПН при наличии рассогласования фаз питающего напряжения.
8. Предложен новый метод определения уравнительного тока, основанный на векторном анализе тока фидера, также проведен анализ существующих методов измерения уравнительных токов.
9. Разработан и успешно внедрен прибор для определения величины уравнительного тока на действующих межподстанционных зонах.

**Основное содержание диссертации
опубликовано в следующих работах:**

1. Бочев А.С. Блиnnиков Ю.В. Осипов В.А. Снизить уравнительные токи // журнал «Локомотив», №2, 1998 г. Москва, изд. Транспорт
2. Осипов В.А. Методы снижения уравнительных токов в электротяговых сетях. // Тезисы докладов на 57 научно-техническую конференцию г. Ростов-на-Дону, 1998 г. РГУПС
3. Бочев А.С. Осипов В.А. Методы непрерывного измерения уравнительных токов // Тезисы докладов на отраслевую научно-техническую конференцию г. Ростов-на-Дону, 1998 г. РГУПС
4. Бочев А.С. Осипов В.А. Принципы рационального секционирования контактной сети при переходе на одностороннее питание // Тезисы докладов на 58 науч. конф. г. Ростов-на-Дону, 1998 г. РГУПС
5. Бочев А.С. Осипов В.А. Способы измерения уравнительных токов // Сборник научных трудов энергетического факультета РГУПС, 1998 г.

6. Бочев А.С. Блинников Ю.В. Осипов В.А. Схемы включения вольтодобавочных трансформаторов на тяговых подстанциях переменного тока, // Тезисы докладов на 59 науч. конф. г. Ростов-на-Дону, 1999 г. РГУПС

7. Осипов В.А. Энергосбережение на железнодорожном транспорте // Труды международной научно-технической конференции, Ростов н/Д, 1999г.

8. Осипов В.А. Датчик контроля уравнительного тока непрерывного действия //Сборник научных трудов по материалам пятой межвузовской научно-методической конференции «Актуальные проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта» Москва, РГОТУПС, 2000 г.

9. Бочев А.С. Осипов В.А. Пассивные методы борьбы с уравнительными токами //Сборник трудов Второго Международного Симпозиума ЭНСБ-КЭ-ЭМС-МИИТ-ЭМЭ-2000 Москва, РАПС, 2000 г.

10. Бочев А.С. Осипов В.А. Анализ влияния тяговой нагрузки на достоверность измерения уравнительного тока. //Тезисы конференции Экономия топливно-энергетических ресурсов на железных дорогах – текущие и перспективные задачи. Москва, 2000г.

11. Бочев А.С. Осипов В.А. Прибор для контроля и измерения уравнительного тока ДКУРТ-5 // Труды третьей научно-практической конференции «Ресурсосберегающие технологии на железнодорожном транспорте» МГУПС, МОСКВА, 2000

