

Машкин Владимир Анатольевич

**Определение электроэнергетических  
характеристик и повышение качества  
электрической энергии в системе тягового  
электрооборудования**

05.14.02 – Электростанции и электроэнергетические системы

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Красноярск – 2008

Работа выполнена в ФГОУ ВПО «Читинский государственный университет» (ЧитГУ).

Научный руководитель

кандидат технических наук, доцент  
Петуров Валерий Иванович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор  
Христинич Роман Мирославович

кандидат технических наук, доцент  
Бастрон Андрей Владимирович

Ведущая организация: ФГОУ ВПО Новосибирский государственный технический университет (г. Новосибирск)

Защита состоится 25 декабря 2008 года в 14:00 на заседании диссертационного совета ДМ 212.099.07 при ФГУ ВПО «Сибирский федеральный университет» по адресу: г. Красноярск, ул. Академика Киренского, 26, ауд. Д 501.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГУ ВПО «Сибирский федеральный университет».

Автореферат кандидатской диссертации размещен на официальном сайте ФГУ ВПО «Сибирский федеральный университет» (<http://www.sfu-kras.ru/science/dissertations>).

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу: 660074, г. Красноярск, ул. Академика Киренского, 26, ПИ СФУ, Ученому секретарю диссертационного совета ДМ 212.099.07.

Факс: (3912) 43-06-92 (Для кафедры ТЭС)

E-mail: [boiko@krgtu.ru](mailto:boiko@krgtu.ru)

Автореферат разослан 25 ноября 2008 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат технических наук, доцент

Е.А. Бойко

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Главным потребительским критерием электрической энергии (ЭЭ) является соответствие её параметрам качества электрической энергии (ПКЭ) в точке общего присоединения (ТОП). При этом ЭЭ, в соответствии с российским законодательством, выступает как товар, который должен быть сертифицирован и в соответствии с этим поставлен потребителю. Таким образом, существует такая техническая проблема, как достоверность определения характеристик электропотребления с учетом качества электрической энергии (КЭ), решение которой позволит получить дополнительную информацию о процессах происходящих в системах электроснабжения, дать рекомендации по использованию технических систем для повышения КЭ, таких как, устройства симметрирования, активные фильтры и устройства повышения КЭ.

Действующий на данный момент ГОСТ 13109-97, отвечающий за соблюдение ПКЭ установленным нормам, не позволяет адекватно оценивать качество ЭЭ, так как он в большинстве своём регламентирован по такой характеристике электропотребления, как качество питающего напряжения. Потребление некачественной ЭЭ введёт к дополнительным потерям, которые связаны с компенсацией негативного действия ЭЭ по обратной и нулевой последовательностям, и ЭЭ по высшим гармоникам. Это ведёт к снижению надёжности, бесперебойности, электробезопасности электроснабжения, создаются аварийные и предаварийные режимы в работе оборудования, что в конечном итоге влияет на электроэнергетическую безопасность страны.

Но решение проблемы будет неполным, если не учесть юридическую сторону вопроса. В законодательстве Российской Федерации, на данный момент, описаны гражданско-правовые отношения абонента и продавца ЭЭ, но не определены объёмы ответственности сторон договора энергоснабжения за нарушение ПКЭ. Основным затруднением в разбирательстве является отыскание доказательной базы, которая послужила бы подтверждением того, что потребление некачественной ЭЭ было причиной выхода электрооборудования из строя или привело к дополнительному его износу. Поэтому, на данный момент, актуальным является определение понесённых потерь за счет потребления некачественной ЭЭ. Решением сложившейся ситуации может послужить разработка и дальнейшее применение методик вычисления потоков некачественной ЭЭ, и как следствие этого внесение в законодательную базу РФ законопроектов, которые могли бы ужесточить санкции к нарушителям ПКЭ.

В настоящее время для исследования характеристик электропотребления и измерения параметров КЭ используются следующие измерительно-вычислительные комплексы и анализаторы характеристик электропотребления: AR.5 с программным обеспечением PowerVision, портативный счетчик Альфа+ с программой PowerPlus и AlphaPlus, информационно-вычислительный комплекс «ИВК «ОМСК-М»» с программой «ИВК ОМСК-М» и др. Перечисленные комплексы не позволяют измерять мощность искажения, а также характеристики искажения и ряд других характеристик электропотребления, оценивающих некачественную ЭЭ.

Значительный вклад в определение электроэнергетических характеристик внесли отечественные учёные: Агунов А.В., Агунов М.В., Родькин Д.И., Хусаинов Ш.Н., Мельников Н.А., Соколов В.С., Кучумов Л.А. и др.

В своей работе автор также опирался на труды, посвященные вопросам повышения качества электрической энергии, опубликованные в работах: Шидловского А.К., Жежеленко И.В., Железко Ю.С., Мамошина Р.Р., Василянскогo А.М., Марквардта К.Г. и др.

Анализ измерений и характеристик искажения, а также регистрацию потоков некачественной ЭЭ нужно проводить в тех системах электроснабжения, где велики объёмы генерации некачественной ЭЭ и значительны мощности искажения. Перечисленными выше особенностями, несомненно, обладает граница внешнего и тягового электроснабжения, что и обусловило выбор **объекта исследования** – Топ тяговой подстанции (ТП). **Предметом исследования** является повышение КЭ на границе раздела внешнего и тягового электроснабжения.

Именно поэтому разработка методики и алгоритма определения электроэнергетических характеристик электропотребления с учетом мощности и характеристик искажений является актуальной задачей и требует своего незамедлительного решения.

**Цель и задачи исследования.** Целью работы является анализ реального качества потребляемой электрической энергии на границе раздела внешнего и тягового электроснабжения, определение электроэнергетических характеристик на основе показателей качества электрической энергии с учётом искажений и разработка рекомендаций по повышению качества электрической энергии.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- проанализировать современные средства учета ЭЭ и выявить особенности их алгоритмов;
- обосновать и ввести в рассмотрение величины тока и напряжения искажения;
- разработать средства реализации алгоритма расчета характеристик электропотребления, позволяющих определять величины полной реактивной мощности и мощности искажения, включающие методическое, информационное и программное обеспечение;
- разработать методику и алгоритм определения потоков некачественной ЭЭ;
- выполнить анализ характеристик электропотребления, а также потоков некачественной ЭЭ на границе разделов внешнего и тягового электроснабжения, на основе разработанных средств реализации алгоритма расчета характеристик электропотребления;
- разработать рекомендации по повышению КЭ, заключающегося в симметрировании нагрузки тягового трансформатора.

**Основные методы научных исследований.** В теоретической части работы были использованы методы теории электрических цепей и цифровой обработке сигналов. Математическое моделирование проводилось в программной среде Delphi и MathLab.

**Научная новизна работы.** Научная новизна работы заключается в следующем:

- получены аналитические выражения для тока и напряжения искажения;
- установлена связь активных и реактивных токов и напряжений с током и напряжением искажения;
- доказано, что полный и объективный анализ электропотребления необходимо проводить с учетом характеристик искажений, в том числе,

напряжений и токов искажений;

– определена систематическая погрешность измерения реактивной и полной мощностей и энергий для ряда микропроцессорных счётчиков, вносимая реализуемыми в них алгоритмами.

**Достоверность научных положений и выводов** подтверждена сравнением результатов теоретических, лабораторных и производственных исследований, их проверкой в ТОО ТП и результатами математического моделирования микропроцессорных счётчиков семейства Альфа и ЕвроАльфа.

**Практическая ценность работы** определяется тем, что:

– разработана методика и алгоритм определения объёмов некачественной ЭЭ, позволяющая выделять из общего потока потреблённой ЭЭ некачественную составляющую;

– установлено, что на стороне 220(110) кВ тяговых подстанций мощность искажения и характеристики искажения максимальны по наиболее загруженным, со стороны тягового потребителя, фазам;

– установлено, что генерация некачественной электрической энергии тяговыми потребителями в энергосистему достигает значительных (более 1%) значений, что составляет сотни миллионов кВт\*часов за год;

– результаты моделирования разработанного способа симметрирования нагрузки тягового трансформатора (Патент РФ №2274940 от 20.04.2006, Бюл. № 16), показали значительное снижение на (90-95)% значения коэффициента несимметрии по обратной последовательности.

**На защиту выносятся следующие положения:**

1. Полученные аналитические зависимости между активным и реактивным током и напряжением, позволяют определять ток и напряжение искажения.

2. Учёт характеристик искажений, с помощью вводимого тока и напряжения искажения, позволяет выполнять полный и объективный анализ электропотребления.

3. Ряд выпускаемых микропроцессорных счётчиков ЭЭ реализуют алгоритмы, вносящие существенную систематическую погрешность в измерение реактивной и полной мощностей и энергий.

4. Разработаны рекомендации повышения КЭ в виде способа симметрирования нагрузки тягового трансформатора и мониторинга потоков некачественной ЭЭ.

**Реализация результатов работы.** Разработанная программа расчёта электроэнергетических характеристик объектов электропотребления внедрена в филиале ОАО «РЖД» Энергосбыт Забайкальской железной дороги.

**Апробация работы.** Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на следующих научно-практических конференциях и открытых семинарах. VIII международная молодежная научно-практическая конференция «Молодёжь и новые технологии». – Чита, 2004 г.; V-VII Всероссийские научно-практические конференция «Кулагинские чтения». - Чита, 2005, 2006, 2007 гг.; Всероссийская научно-практическая конференция «Энергетика в современном мире». - Чита, 2006 г.; XIII, XIV международная практическая конференция. СТТ 2007, 2008 – гг. Томск, 2007, 2008 гг.; IV международная научно-практическая конференция «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности» - г. Санкт-Петербург, 2007 г.; Всероссийская научно-практическая конференция «Проблемы теплофизики и теплоэнергетики: материалы

семинара вузов Сибири и Дальнего Востока. Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири» - г. Иркутск, 2008 г.; Всероссийская научно-техническая конференция «Электроэнергия: от получения и распределения до эффективного использования» – г. Томск, 2008 г.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 18 научных работ. Из них 4 статьи, 2 из которых опубликованы в списке, рекомендованном ВАК; официально зарегистрированная программа для ЭВМ - 1; патент на изобретение РФ – 2; 11 работ опубликованы в материалах всероссийских и международных конференций.

**Структура и объём работы.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка литературы и приложения. Общий объём диссертационной работы составляет 152 страницы, в том числе основная часть – 96 страниц, 36 рисунков, 2 таблицы, список литературы из 163 наименований на 17 страницах, приложение на 39 страницах.

#### ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** рассмотрены практические и научные достижения в области учета и измерения характеристик электропотребления, обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследования.

**В первой главе** выполнен обзор наиболее используемых средств учета ЭЭ и измерений характеристик электропотребления, а также особенностей алгоритмов, реализуемых современными средствами контроля качества электрической энергии (КЭ). Проведён анализ арбитражной судебной практики РФ связанной с разрешением споров по проблемам низкого КЭ.

Установлено, что на данный момент в Российской Федерации для учета и контроля электропотребления используются средства типа микропроцессорных счетчиков семейства Альфа, а также анализаторы КЭ: «РЕСУРС-UF2», «ПАРМА РК 3.01», «ППКЭ-3-50», «НЕВА-ИПЭ», «ПРОРЫВ-КЭ», «ЭРИС-КЭ», AR.5, ИВК «ОМСК-М», включающие программное обеспечение (ПО). Различие в перечисленных устройствах заключается в алгоритмах расчета характеристик электропотребления и дискретизации по времени.

Наиболее широкое распространение для определения электроэнергетических характеристик получили микропроцессорные счетчики семейства Альфа.

Данные счетчики обладают рядом очевидных преимуществ: высокая степень эксплуатационной и функциональной надежности, способность объединяться в АИСКУЭ и АСКУЭ. При этом главными недостатками этих счетчиков надо считать то, что они измеряют и регистрируют реактивную мощность и энергию с учетом мощности и энергии искажения, а это ведёт к завышенному определению реактивной мощности и энергии. Также выявлены такие недостатки, как ошибочное определение полной мощности трёхфазной системы и закрытость формата данных измеренных величин.

В настоящее время законодательством РФ электрическая энергия определена как товар, который обладает соответствующим качеством, показатели которого описаны в ГОСТ-13109-97. Таким образом, возникают обоснованные споры участников рынка в получении неустойки за ненадлежащее качество ЭЭ, которые разрешаются в судебном порядке в системе арбитражных судов РФ.

Проанализированные средства учёта с их алгоритмами, а также ПО, поставляемое с ними, дали возможность выявить, что они не позволяют определять ряд электроэнергетических характеристик, в частности объёмы потоков

некачественной ЭЭ. Под электроэнергетическими характеристиками в данном исследовании понимаются: мгновенные значения токов, мгновенные значения напряжений, мгновенная мощность, значения активной мощности и энергии, значения реактивной мощности и энергии, значения полной мощности и энергии, мощность искажения, составляющие токов и напряжений в виде активных и реактивных токов и напряжений, тока искажения, напряжения искажения. Отдельной группой, которая входит в состав электроэнергетических характеристик, выделены потоки некачественной ЭЭ, под которыми понимаются активная энергия по высшим гармоникам, активная энергия по обратной и нулевой последовательностям промышленной частоты.

Для более объективной оценки ситуации, связанной с низким КЭ проведен анализ арбитражной судебной практики РФ, нормативно-правовых баз СССР и РФ касающиеся вопросов, которые связаны с генерацией (потреблением) ЭЭ ненадлежащего качества, чтобы показать проблемные моменты, возникающие при разбирательствах в суде и по ним предложить пути выхода. Анализ судебной практики позволил выделить следующие актуальные проблемные вопросы:

- в связи со спецификой предмета продажи (ЭЭ) проявляет себя проблема фиксации факта снижения ее качества с помощью надлежащих доказательств;
- отсутствие нормативной основы для применения гражданско-правовой ответственности за искажение параметров КЭ в виде законной неустойки ;
- отсутствие у сторон договора энергоснабжения публичной обязанности уплачивать неустойку в случае внесения вклада в ухудшение КЭ влечет невозможность понуждения контрагентов к заключению данного договора на условиях гражданско-правовой ответственности за искажение КЭ.

Так как алгоритмы и ПО современных средств учёта не позволяют определять ряд электроэнергетических характеристик, в частности объём потоков некачественной ЭЭ, тока и напряжения искажений, мощности искажения, а анализ судебной арбитражной практики показал, что при той сложившейся ситуации в законодательной сфере РФ, где отсутствуют механизмы регулирования в отношении низкого КЭ, единственным возможным выходом является определение объёмов потоков некачественной ЭЭ и по этим объёмам проводить возврат пострадавшей стороне.

Поэтому необходимо провести теоретический анализ определения электроэнергетических характеристик и разработать методики их описания.

**Вторая глава** посвящена анализу электроэнергетических характеристик электропотребления, на которые обращено внимание исследователей в настоящее время, а также разработке методики их описания.

Для объективного анализа результатов измерения электроэнергетических характеристик электропотребления и показателей КЭ, осуществляемых микропроцессорными счетчиками и анализаторами КЭ, рассмотрим основные соотношения, связывающие эти характеристики.

Полная мощность  $S$  определяется по известному соотношению:

$$S = \frac{1}{T} \sqrt{\int_0^T i^2 dt \int_0^T u^2 dt}, \quad (1)$$

где  $u, i$  – мгновенные значения напряжения и тока;  $T$  – период основной гармоники.

Можно также определить  $S$  по одной из ниже приведенных формул:

$$S = \sqrt{Q_o^2 + P^2}, \quad (2)$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}, \quad (3)$$

$$S = \sqrt{S_Q^2 + D^2}, \quad (4)$$

где,  $Q_o$  – общая реактивная мощность, определяемая через  $Q$  и  $D$ ;

$S_Q$  – полная мощность, определяемая через  $P$  и  $Q$ ;

$$Q_o = \frac{1}{T} \sqrt{\int_0^T i^2 dt \int_0^T u^2 dt - \left( \int_0^T u i dt \right)^2}; \quad (5)$$

$$S_Q = \sqrt{P^2 + Q^2}; \quad (6)$$

$$P \text{ – активная мощность; } P = \sum_{i=1}^n U_i I_i \cos j_i; \quad (7)$$

$$Q \text{ – реактивная мощность; } Q = \sum_{i=1}^n U_i I_i \sin j_i; \quad (8)$$

$$D \text{ – мощность искажения: } D^2 = \sum_{i=1}^n (U_i^2 I_{2g-i}^2 + U_{2g-i}^2 I_i^2 - 2U_i U_{2g-i} I_i I_{2g-i} \cos(j_i - j_{2g-i})) \quad (9)$$

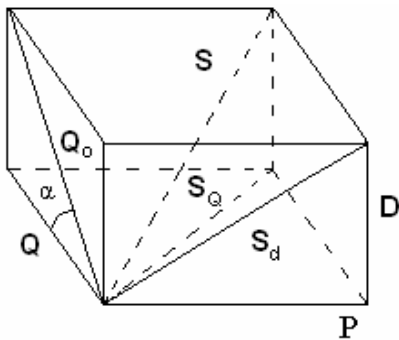


Рис. 1. Параллелепипед мощностей

где,  $U_i$ ,  $I_i$  и  $\varphi_i$  – действующие значения напряжения, тока и угла разности фаз  $i$ -ой гармоники.

Для удобного представления геометрической интерпретации формул (2) - (4) и (6) на (рис. 1) приведён параллелепипед мощностей.

Геометрические параметры параллелепипеда, основанием которого является активная и реактивная мощность, высотой мощность искажения, измеренные с усреднением по времени кратные периоду основной гармоники, позволяют связать друг с другом электроэнергетические характеристики электропотребления, а также выявить новые связи между ними. В этой интерпретации мощность искажения можно определить через величины реактивных мощностей:

$$D = \sqrt{Q_o^2 - Q^2}, \quad (10)$$

Реактивная мощность и мощность искажения связаны значением тангенса угла  $\alpha$ , характеризующего величину мощности искажения:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{D}{Q}, \quad (11)$$

Полная мощность, определяемая только искажениями, рассчитывается по формуле:

$$S_d = \sqrt{P^2 + D^2}, \quad (12)$$

По аналогии с единицей измерения реактивной мощности ВАр (вольт-ампер реактивный) естественно определить единицу измерения мощности искажения как ВАи (вольт-ампер искажающий).

Достаточно полно охарактеризовать процесс электропотребления можно в токовом пространстве (рис. 2): активного  $I_a$ , реактивного  $I_p$  токов и тока искажения  $I_d$ , а также в пространстве напряжений (рис. 3): активного  $U_a$ , реактивного  $U_p$  и напряжения искажения  $U_d$ . Полный ток  $I$  он же среднеквадратичный ток электропотребления определяется по формуле:



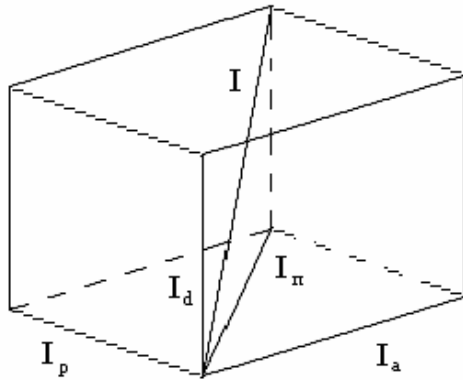


Рис. 2. Токовое пространство

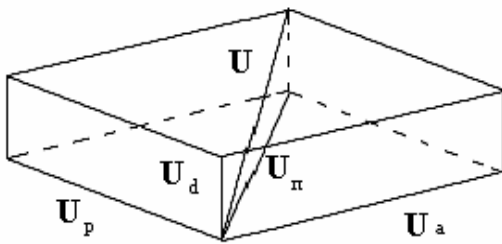


Рис. 3. Пространство напряжений

$$I^2 = I_a^2 + I_p^2 + I_d^2. \quad (13)$$

Полное напряжение  $U$  оно же среднеквадратичное напряжение электропотребления в точке учета находится по формуле:

$$U^2 = U_a^2 + U_p^2 + U_d^2, \quad (14)$$

$$\text{где, } I_a^2 = \frac{\sum_{i=1}^m P_i^2}{\sum_{i=1}^m U_i^2}, \quad I_p^2 = \frac{\sum_{i=1}^m Q_i^2}{\sum_{i=1}^m U_i^2}, \quad I_d^2 = \frac{\sum_{i=1}^m D_i^2}{\sum_{i=1}^m U_i^2},$$

$$U_a^2 = \frac{\sum_{i=1}^m P_i^2}{\sum_{i=1}^m I_i^2}, \quad U_p^2 = \frac{\sum_{i=1}^m Q_i^2}{\sum_{i=1}^m I_i^2}, \quad U_d^2 = \frac{\sum_{i=1}^m D_i^2}{\sum_{i=1}^m I_i^2}. \quad (15)$$

Очевидно, что  $I_n$  и  $U_n$  магнитная и электрическая характеристики результирующего поперечного поля определяются по формулам:

$$I_n^2 = I_a^2 + I_p^2, \quad (16)$$

$$U_n^2 = U_a^2 + U_p^2. \quad (17)$$

Таким образом, результаты анализа электропотребления и КЭ, проводимого в силовом пространстве (рис. 1), в токовом пространстве (рис. 2) и пространстве напряжений (рис. 3) наиболее полно отражают основные характеристики и свойства объекта электропотребления. Это позволяет получать больший объем новой информации об объекте электропотребления. Например, исследования показали, что величина напряжения искажения  $U_d$  всегда больше действующего

напряжения высших гармоник  $\sqrt{\sum_{i=2}^m U_i^2}$ . Существующие средства учета электропотребления и измерения показателей КЭ не позволяют измерять электроэнергетические характеристики, описанные выше.

Любой энергетический процесс в электрических системах полностью и однозначно описывается в пространстве активных, реактивных и искажающих мощностей.

Для определения потоков некачественной ЭЭ воспользуемся ниже представленными формулами:

$$W_{2,n} = \int_t (\sum_{i=2}^n U_i I_i \cos j_i) dt \quad (18)$$

$$W_2 = 3 \int_t (U_2 I_2 \cos j_2) dt \quad (19)$$

$$W_0 = 3 \int_t (U_0 I_0 \cos j_0) dt \quad (20)$$

где,  $W_{2,n}, W_2, W_0$  - соответственно энергии по высшим гармоникам, обратной и нулевой последовательностям промышленной частоты;

$U_2, I_2, j_2, U_0, I_0, j_0$  - соответственно напряжение, ток и угол между ними для обратной и нулевой последовательностей промышленной частоты;

$U_i, I_i, j_i$  - напряжение, ток, угол между ними соответствующей высшей гармоники,  $i = [2, n]$ .

Суммарный поток некачественной  $W_d$  ЭЭ определится по формуле:

$$W_d = W_{2,nA} + W_{2,nB} + W_{2,nC} + W_2 + W_0 \quad (21)$$

где,  $W_{2,nA}, W_{2,nB}, W_{2,nC}$  - энергии по высшим гармоникам соответствующих фаз трёхфазной системы.

Для более достоверного описания процессов протекающих в ТОП ТП предлагается методика определения электроэнергетических характеристик электропотребления, а также методика для определения объёма потоков некачественной ЭЭ. Суть первой методики состоит в том, что на основе полученных значений токов и напряжений определяются электроэнергетические характеристики электропотребления вычисляемые по формулам (1)-(15), а также ПКЭ, которые находятся в соответствии с ГОСТ 13109-97. Методика определения объёма потоков некачественной ЭЭ, заключается в том, что по значениям токов и напряжений высших гармоник, а также токов и напряжений обратной и нулевой последовательностей в соответствии с формулами (18)-(21) определяют общий объём некачественной ЭЭ. Полученные значения приводятся в графическом и в табличном виде.

Для снижения трудоёмкости вычислительного процесса, необходимо реализовать методики в виде программного продукта.

**В третьей главе** проведён экспериментальный анализ характеристик электропотребления на основании разработанных методик.

Был разработан программный продукт, реализующий методики определения электроэнергетических характеристик электропотребления, объёма потоков некачественной ЭЭ, а также моделирующий измерения электропотребления микропроцессорным счетчиком семейства Альфа. Программный продукт реализован на языке программирования высокого уровня Object Pascal в программной среде Delphi 6.0. На (рис. 4) представлен интерфейс разработанной программы.

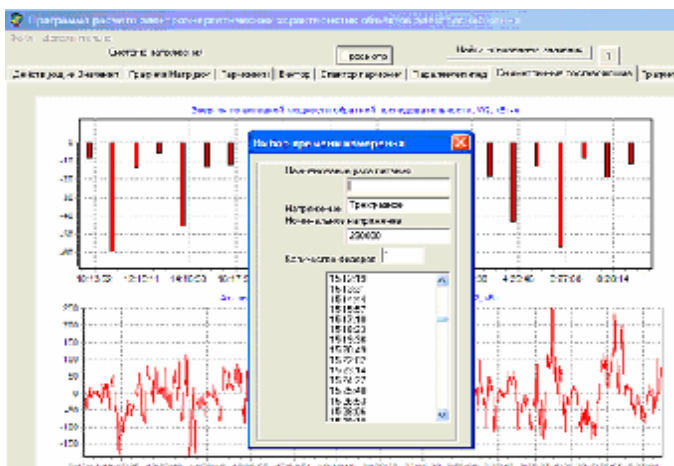


Рис. 4 Интерфейс программы расчета электроэнергетических характеристик объектов электроснабжения

На (рис. 5) приведены типичные диаграммы, по которым проводилось сопоставление величин реактивных мощностей, рассчитанных по алгоритму микропроцессорных счетчиков Альфа с помощью программы совместимой с программой ИВК-1000, использующей открытый формат данных ИВК «ОМСК-М».

Измерения проводились на одной из тяговой подстанции Забайкальской железной дороги. Из приведённых графиков видно, что величина реактивной

мощности  $Q_o$  определённая по алгоритму микропроцессорного счётчика Альфа формула (5) больше реактивной мощности  $Q$  рассчитанной по формуле (8).

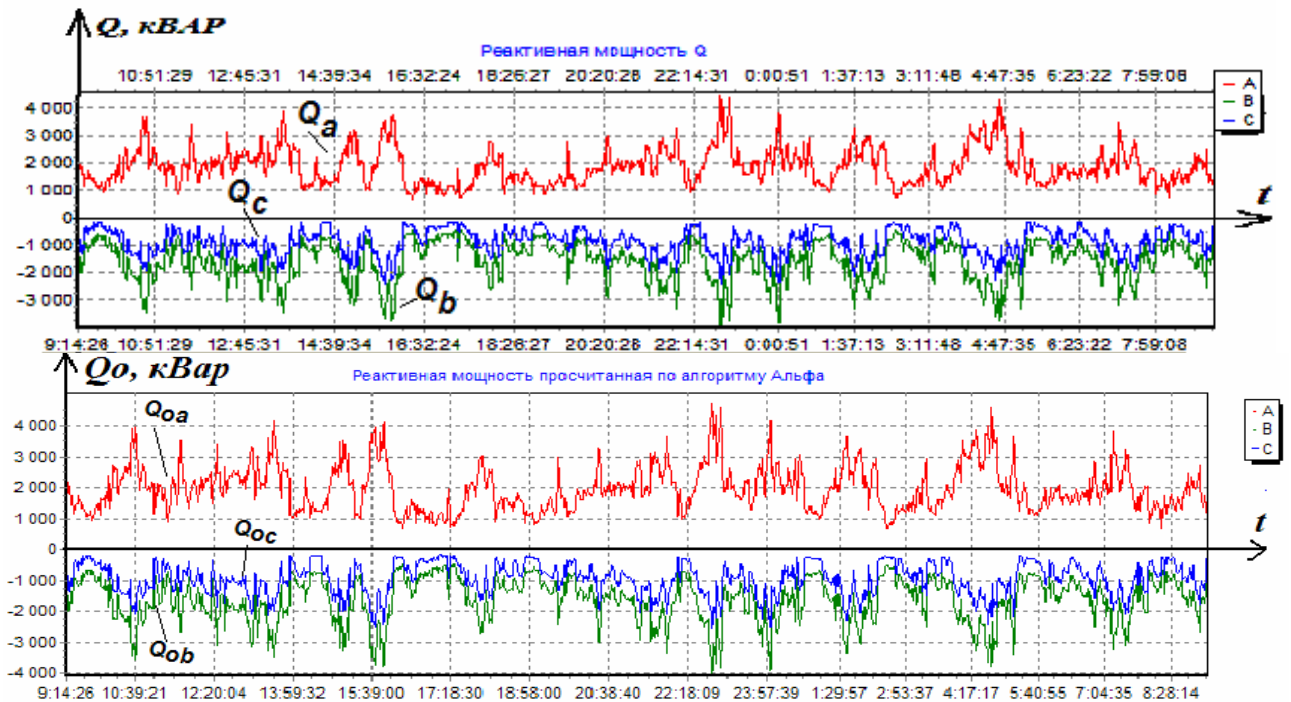


Рис. 5. Потребление по реактивной мощности

Сравнение результатов измерений характеристик электропотребления и КЭ, выполненных с помощью микропроцессорного счетчика Альфа и ИВК «ОМСК-М», на ряде тяговых подстанций Забайкальской железной дороги показали существенное расхождение при определении величин реактивных мощностей двух нагруженных фаз тяговых трансформаторов.

Это расхождение связано со значительной величиной мощности искажения в этих двух фазах. Так как, счётчики Альфа измеряет общую реактивную мощность  $Q_o$ , включительно по 15-ую гармонику, а ИВК «ОМСК-М» реактивную  $Q$ , для любого порядка гармоник, не превосходящих 40-ой, то в нашем случае для обеспечения соответствия частотных характеристик суммирование осуществлялось по 15-ую гармонику включительно.

При расчете активной мощности, включительно по 15-ую гармонику, различие между показаниями счётчика Альфа и ИВК «ОМСК-М» не наблюдалось.

Мощности  $P_{2,n}$ ,  $Q_{2,n}$  определяются по следующим формулам:

$$P_{2,n} = \sum_{i=2}^n U_i I_i \cos j_i, \quad (22)$$

$$Q_{2,n} = \sum_{i=2}^n U_i I_i \sin j_i. \quad (23)$$

Суммирование в формулах (22) и (23) ведется со второй гармоники по  $n$ -ую включительно, где  $n$  для моделирования счетчика Альфа принимает значение 15.

На (рис. 6) приведены графики изменения активной и реактивной мощностей по высшим гармоникам на том же временном интервале, который использовался для графиков мощностей на (рис. 5).

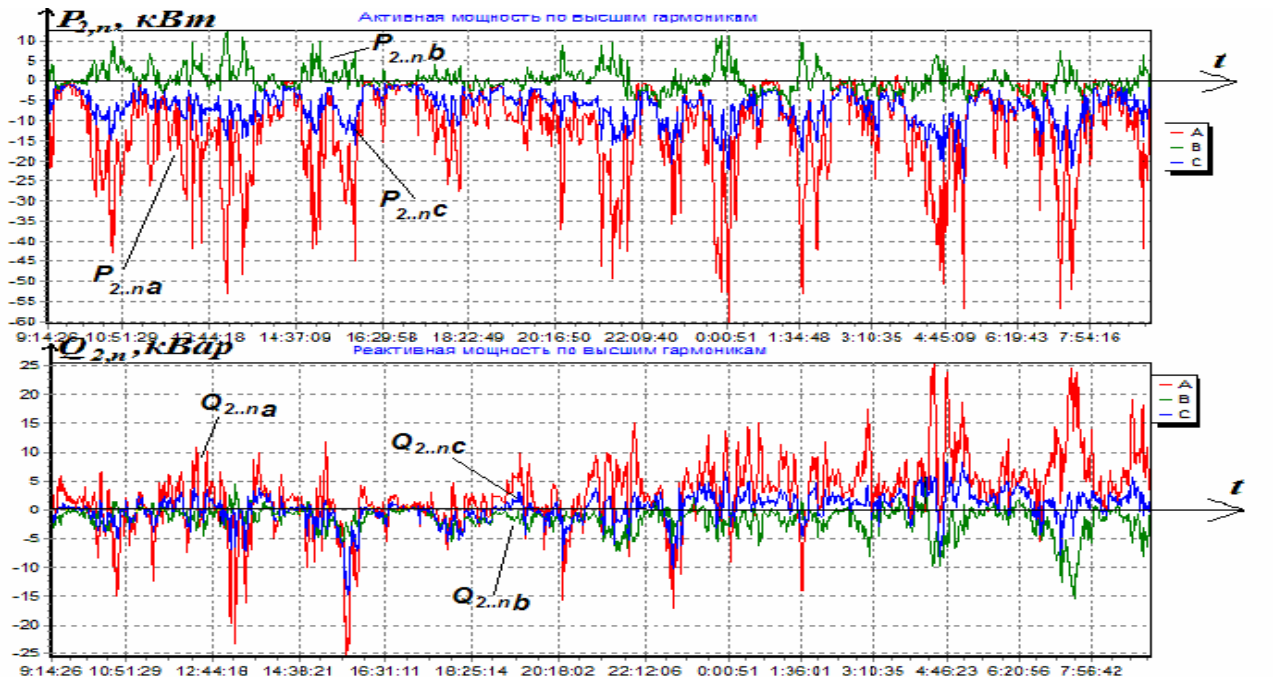


Рис. 6 Активная, реактивная мощности по высшим гармоникам

На (рис.7) представлен график относительной погрешности измерения значений тока искажений по трем фазам тяговой подстанции на стороне 220 кВ.

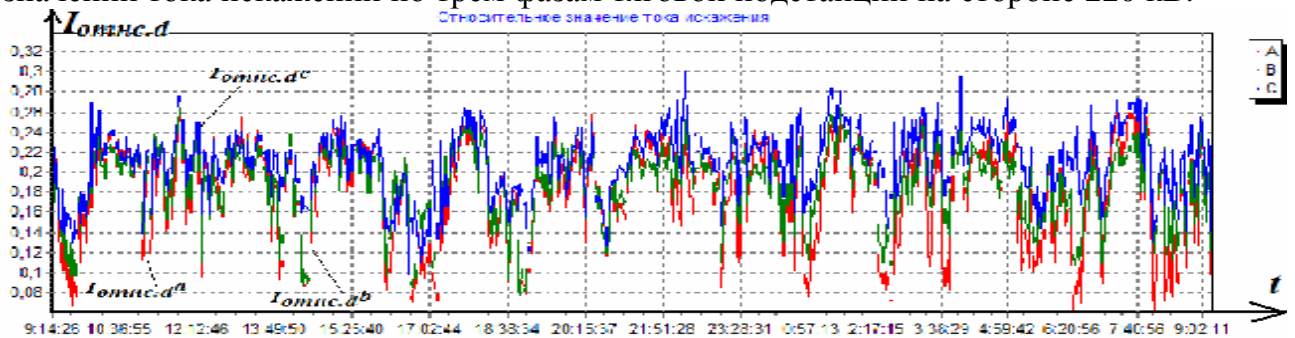


Рис. 7. Динамика суточных искажений по фазам тягового трансформатора

Относительное значение тока искажения рассчитывалось по ниже приведенной формуле:

$$I_{отнс.d} = \frac{I_d}{I} \quad (24)$$

где,  $I_d$  -действующее значение тока искажения;  $I$  –действующее значение тока.

Выше было сказано, что микропроцессорные счетчика Альфа определяют реактивную мощность с учётом мощности искажения, оценим погрешность счётчиков.

**Четвертая глава** посвящена оценке погрешностей микропроцессорных счётчиков семейства Альфа, а также проблеме учета некачественной электрической энергии на границе раздела внешнего и тягового электроснабжения.

Разность величин реактивных мощностей  $Q_o$  и  $Q$  по трем фазам тягового трансформатора в точке общего присоединения можно всегда связать с величиной мощности искажения:

$$Q_o - Q = \frac{D^2}{Q_o}. \quad (25)$$

Относительную погрешность измерения реактивной мощности микропроцессорными счетчиками семейства Альфа можно рассчитать по формуле:

$$g = \frac{Q_o - Q}{Q} 100\% = \frac{D^2}{(Q_o + Q) * Q} * 100\% . \quad (26)$$

На (рис.8) приведена динамика изменения относительной погрешности  $\gamma$  на том же временном интервале, на котором определены величины  $Q$  и  $P$  рисунок (7)-(9).

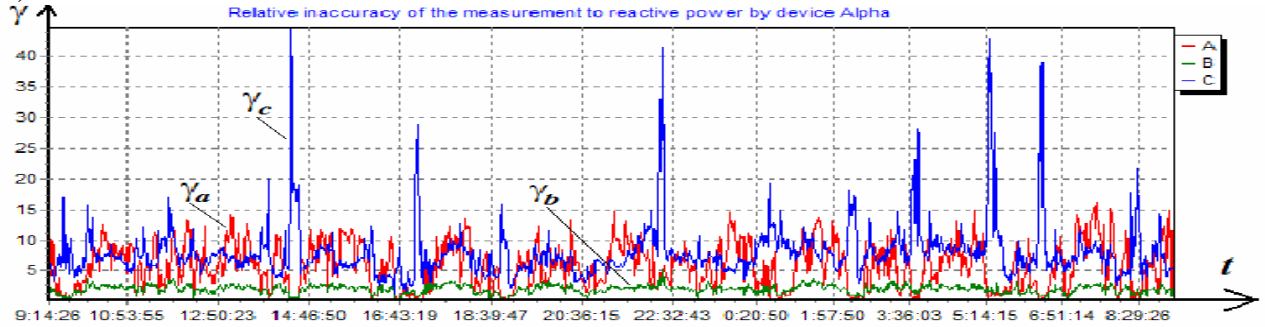


Рис. 8. Относительная погрешность измерения реактивной мощности микропроцессорными счетчиками семейства Альфа

Очевидно, что относительная погрешность измерения реактивной мощности достигает очень больших значений в нагруженных фазах тягового трансформатора, где мощность искажения по величине превышает реактивную мощность. Это напрямую связано с тем, что счетчик измеряет общую реактивную мощность, в которой учитывается вклад величины мощности искажения. Относительная погрешность измерения реактивной мощности ненагруженной фазы (фаза В) лежит в пределах 1,1- 4,2 %.

Выше изложенное позволяет сделать вывод о том, что выбор компенсирующих устройств и фильтр компенсирующих установок (ФКУ), а также анализ реактивной мощности на тяговых подстанциях при помощи установленного АСКУЭ, осуществляемый по показаниям микропроцессорных счетчиков семейства Альфа является, недостоверным. Данный тип счетчиков не обеспечивает потребителя полной информацией об основных электроэнергетических характеристиках электропотребления.

На (рис.9) приведены потоки активной мощности на границах раздела энергосистем и СТЭ (мест установки микропроцессорных счетчиков) с разделением на качественную активную мощность (активная мощность по первой гармонике прямой последовательности) и некачественную активную мощность (активная мощность по первой гармонике обратной последовательности и активная мощность по высшим гармоникам).

Нагрузка со стороны 6 (10, 35) кВ и ДПР имеет незначительную асимметрию, и в ней практически отсутствуют источники высших гармоник, поэтому потоки активной энергии прямой последовательности и потоки активной энергии обратной последовательности и активной энергии по высшим гармоникам совпадают по направлению. Данные потребители оплачивают активную энергию обратной последовательности и высших гармоник по действующим тарифам за электроэнергию.



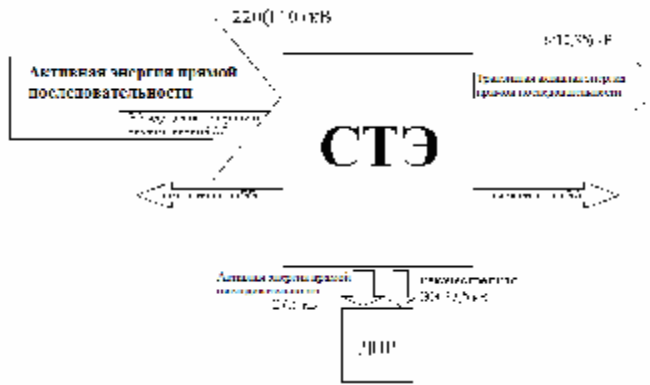


Рис. 9 Потоки ЭЭ на границах раздела энергосистем и СТЭ

Следует считать, что только на стороне 220 (110) кВ тяговых подстанций потоки активной энергии по первой гармонике прямой последовательности и активной энергии по первой гармонике обратной последовательности и по высшим гармоникам имеют противоположные направления. В данном случае имеет место занижение электропотребления по прямой последовательности на величину генерации активной мощности по

обратной последовательности и высшим гармоникам.

На (рис.10) и (рис.11) приведены почасовые объемы генерации активной энергии соответственно по обратной последовательности и по высшим гармоникам до сороковой включительно, а на (рис.12) показано почасовое потребление активной энергии прямой последовательности.

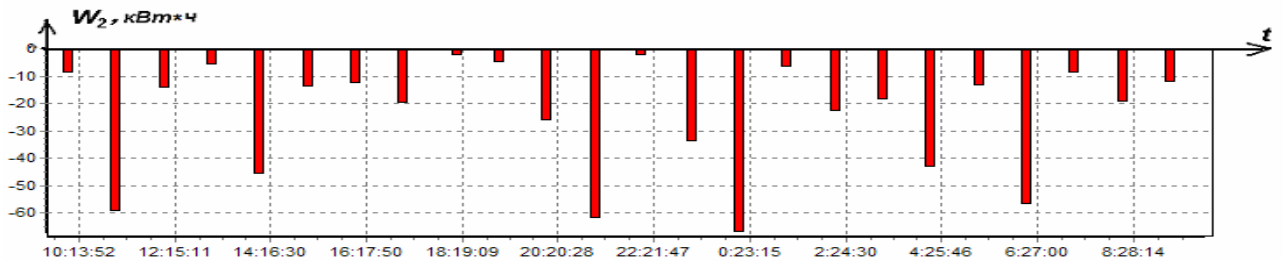


Рис. 10 Генерация активной энергии по обратной последовательности

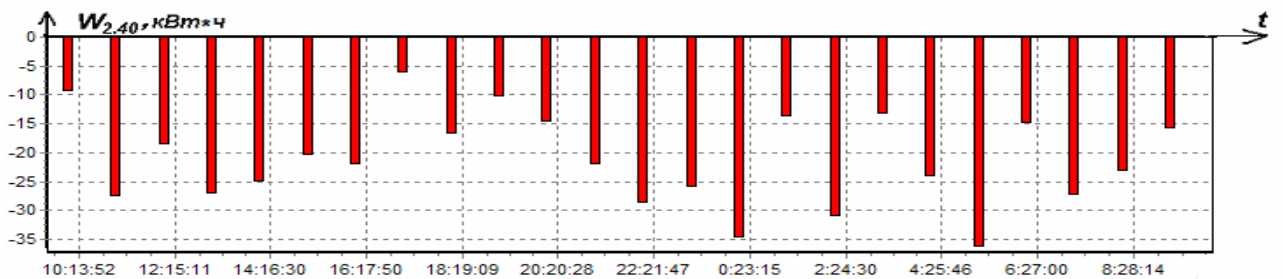


Рис. 11 Генерация активной энергии по высшим гармоникам

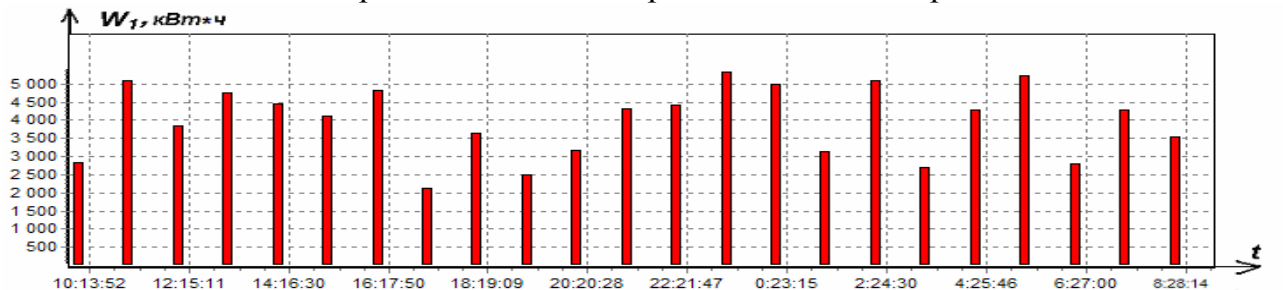


Рис. 12 Общее потребление активной энергии по прямой последовательности

Расчет потоков активной энергии производился программным продуктом, на одной из тяговых подстанций. В данном случае объем суточной генерации активной энергии по обратной последовательности и по высшим гармоникам составил 1.18 % от регистрируемого счетчиками электрической энергии потребления активной энергии.

Изложенное выше позволяет говорить о парадоксальной ситуации по учету электропотребления, которая сложилась на стороне 220(110) кВ тяговых подстанций: чем выше степень асимметрии и несинусоидальности со стороны тяги или другими словами, чем больше тяговая нагрузка, тем больше «экономится» активной энергии. «Экономия» активной энергии определяется генерируемой в СТЭ величиной активной энергии по обратной последовательности и высшим гармоникам.

Последнее связано с тем, что счетчики ЭЭ регистрируют баланс между общим потреблением активной энергии прямой последовательности и активной энергии, которая генерируется в СТЭ. Фактическое почасовое потребление активной энергии определяется разностью между общим потреблением активной энергии по прямой последовательности и активной энергией по обратной последовательности и высшим гармоникам.

Оценочный расчет по учету активной энергии на тяговых подстанциях сети электрифицированных железных дорог страны позволяет говорить о существенных объемах неучтенной активной энергии. Например, при 1 % не учета электрической энергии объем неучтенной электроэнергии прямой последовательности составляет сотни млн. кВт\*час. Те же самые сотни млн. кВт\*час, но в виде активной энергии обратной последовательности и высших гармоник потребляются смежными потребителями ТОП тяговых подстанций и теряются в элементах энергосистем. В первом случае, как правило, потребителям приходится увеличивать электропотребление для нейтрализации действия некачественной ЭЭ, а для исключения аварийных и предаварийных ситуаций при работе технологического оборудования использовать средства симметрирования, фильтрации и стабилизации напряжения. Во втором случае, ухудшается работа трансформаторов и генераторов, увеличивается электромагнитное влияние линий, интенсифицируются процессы старения изоляции, что ведет к снижению системной надежности.

Наиболее оптимальным решением давно наболевшей проблемы КЭ в ТОП тяговых подстанций явится реализация известных технических решений, обеспечивающих симметрирование нагрузки тяговых трансформаторов, использование которых обеспечит реализацию очень широкой программы энергосбережения в электроэнергетике и на электрифицированном транспорте.

Смежные потребители по ТОП тяговых подстанций на стороне 220(110) кВ и потребители на стороне 6 (10, 35) кВ и ДПР платят за ЭЭ обратной последовательности и ЭЭ высших гармоник по тарифам на ЭЭ прямой последовательности.

Счетчики Альфа, ЕвроАльфа не позволяют оценивать величины генерации некачественной ЭЭ в системах электроснабжения, они делают баланс, т.о. вычитают из общей активной мощности сгенерированные активные мощности по обратной последовательности и высшим гармоникам.

Проведенный анализ КЭ в ТОП тяговых подстанций позволил выявить, что на данный момент проблеме КЭ в настоящее время не уделяется должного внимания. Это в первую очередь связано с тем, что на данный момент в системе тягового электроснабжения (СТЭ) присутствуют значительные объемы некачественной ЭЭ, как поступающие из вне, так и генерируемые самой СТЭ.

Поэтому необходимы возможные пути решения для повышения КЭ на границе раздела внешнего и тягового электроснабжения.

**Пятая глава** посвящена рекомендациям повышения КЭ. Автором предложено три возможных пути решения проблемы КЭ.

Важность учета мощности искажения и потоков некачественной ЭЭ в ТОП тяговых подстанций имеет большое значение для анализа процессов протекающих в СТЭ и объективного учета ЭЭ. Поэтому в качестве первой рекомендации автор предлагает методику определения объемов потоков некачественной ЭЭ (потоков активной энергии по обратной и нулевой последовательностям и высшим гармоникам) и расчет мощности искажения, тока и напряжения искажения. Основной задачей методики является:

- мониторинг потоков некачественной ЭЭ, который позволяет наиболее полно и объективно взглянуть на электроэнергетические процессы, протекающие в СТЭ;
- выявить и оценить объёмы недоучета ЭЭ;
- достоверно оценить ущербы смежных потребителей и энергоснабжающей системы по величинам потреблённой ими активной энергии по обратной и нулевой последовательностям и высшим гармоникам.

Реализация данной методики в виде программного обеспечения дает возможность работы с анализаторами КЭ, имеющими открытый формат данных, такие как «РЕСУРС-UF2», «ПАРМА РК 3.01», «ППКЭ-3-50.М», «Энергомонитор 3.3», «НЕВА-ИПЭ», «ПРОРЫВ-КЭ», «ЭРИС-КЭ», ИВК «ОМСК-М». Методика может служить основой перерасчета тарифа за поставку некачественной ЭЭ, как в сторону снижения, так и в сторону повышения оплаты ЭЭ.

Симметрирование нагрузки тягового трансформатора с помощью преобразователей построенных на основе современных силовых ключей IGBT, GTO можно считать более предпочтительным вариантом решения проблем электромагнитной совместимости СТЭ и потребителей электрической энергии получающих питание от ТОП с тяговыми подстанциями.

На (рис. 14) приведена принципиальная схема установки, обеспечивающей полное симметрирование нагрузки тягового трансформатора,

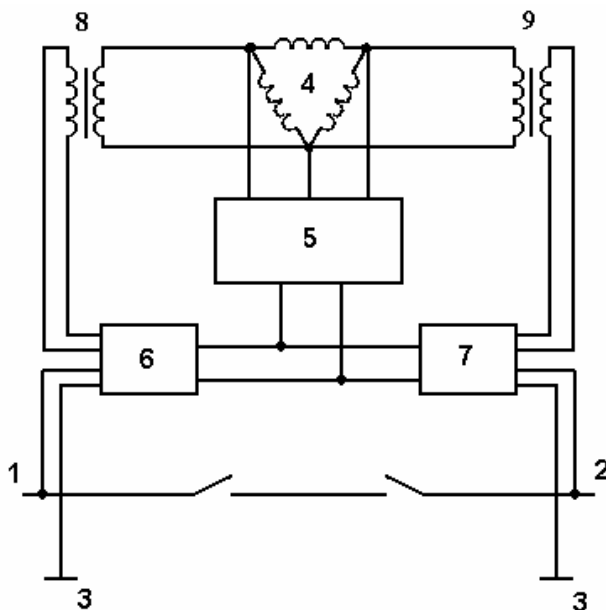


Рис. 14. Принципиальная схема установки по полному симметрированию нагрузки тягового трансформатора

полное симметрирование нагрузки тягового трансформатора,

На (рис. 15) приведена модель для полного симметрирования нагрузки трансформатора для установки по (рис. 14).

Моделирование устройства по полному симметрированию нагрузки трансформатора производилось при различных соотношениях нагрузки, так при соотношении нагрузки 1:7 разность получасового электропотребления фазами обмотки высшего напряжения не превосходило 1 %, а значение величин коэффициента обратной последовательности снизилось с 3,8 % до 0,29 %.

Таким образом, данная установка позволяет осуществить симметрирование тягового



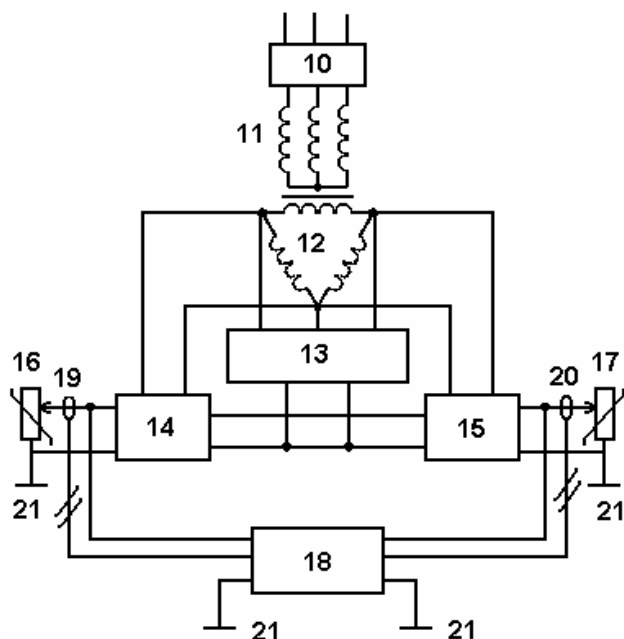


Рис. 15. Принципиальная схема установки реализующей модель по симметрированию нагрузки тягового трансформатора

ций развития силовой электроэнергетики.

СТЭ с симметрированием нагрузки тягового трансформатора, на основе выпрямительно-инверторного каскада, обеспечивает высокую степень симметрии напряжений в ТОП с коэффициентом асимметрии напряжения по обратной последовательности не превышающим 0.2% и токов с коэффициентом асимметрии тока по обратной последовательности не превышающим 1%.

Схема симметрирования нагрузки тягового трансформатора представляет собой активный фильтр, который обеспечивает снижение коэффициента искажения синусоидальности формы кривой напряжения до значения соответствующего требованиям ГОСТ 13109-97.

Моделирование существующей СТЭ и СТЭ построенной на основе симметрирования нагрузки тяговых трансформаторов по схеме - 3 фазы 2 плеча осуществлялось в среде MATLAB при использовании пакета Simulink ver. 6.4 (R2006a). При моделировании напряжение системы внешнего электроснабжения устанавливалось равным 115 кВ, нагрузка тягового трансформатора принималась статической с активно-индуктивным характером, а её величина задавалась активной и реактивной мощностями, сопротивление контактной сети принималась индуктивным. За ТОП принимался высоковольтный ввод трансформатора, смежные потребители принимались симметричными, при активно-индуктивном характере нагрузки.

Увеличение объемов электропотребления и дефицит мощности при непрерывном росте тарифов требуют более эффективного использования электроэнергии (ЭЭ). В связи с этим встает вопрос об ответственности за снижение качества ЭЭ. Именно поэтому автором рассматривается возможность изменения правовых отношений между абонентом и поставщиком ЭЭ, связанная с низким КЭ.

трансформатора, за счет равномерного распределения нагрузки контактной сети по его фазам, а также обеспечить снижение значений коэффициента несимметрии по обратной последовательности практически до нуля и увеличить съём мощности с трансформатора на 50% и повысить надежность его работы.

Реализация способа симметрирования нагрузки тяговых трансформаторов не требует сооружения однофазных линий электропередач, изменения конструкции контактных опор, применения неуравновешенных однофазных трансформаторов, конструирования и использования специальных трехфазных трансформаторов большой мощности (предложение МИИТ), и, по сути, находится в русле современных тенден-

Изучение гражданско-правых отношений позволило выделить ряд актуальных проблем:

- отсутствие правовых механизмов ответственности за ухудшения качества электроэнергии, поддержанных арбитражной практикой, может приводить к росту цен и тарифов на различные виды продукции и услуг;
- нормативно-правовые акты, определяющие фиксированную скидку (надбавку) за ухудшения ПКЭ, прекратили существование за последнее время;
- ответственность энергоснабжающей организации в настоящее время сводится к п.2 ст. 542 ГК РФ;
- реально применяемая мера юридической ответственности за снижение качества ЭЭ – административная ответственность по ст. 19.19 КоАП РФ.

Разрешение этих проблем позволит во многом упростить правовое регулирование между поставщиком и потребителем ЭЭ.

Автор считает, что именно идентификация потоков некачественной ЭЭ, осуществляемая посредством мониторинга объемов потоков некачественной ЭЭ, позволит объективно оценить ущербы от потребления некачественной ЭЭ и однозначно разрешить споры между потребителем и поставщиком некачественной ЭЭ в судебном порядке.

#### **Основные результаты работы.**

1. На основании анализа современных средств учёта ЭЭ и арбитражной судебной практики, установлено, что на данный момент не существует адекватного разрешения проблемы связанной с низким КЭ. Для разрешения сложившейся ситуации предлагается учитывать потоки некачественной ЭЭ и по ним производить перерасчет.
2. Установлено, что микропроцессорные счетчики семейства Альфа измеряют реактивную мощность с систематической погрешностью, это связано с тем, что реактивная мощность считается с учетом мощности искажения, а это ведёт к завышению значения реальной реактивной мощности. На примере тяговой подстанции Забайкальской железной дороги погрешность составляла до 47%.
3. В результате проведённых исследований и анализа установлено, на стороне 220(110) кВ тяговых подстанций мощность искажения и характеристики искажения максимальны по наиболее загруженным со стороны тягового потребителя, фазам.
4. Разработан сертифицированный программный продукт (свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. № 2006613353 от 25.09.2006), позволяющий рассчитывать электроэнергетические характеристики с учетом мощности искажения и характеристик искажения, а также потоки некачественной электрической энергии.
5. Анализ электропотребления позволил выяснить, что генерация некачественной электрической энергии по обратной последовательности и высшим гармоникам тяговыми потребителями в энергосистему достигает значительных (более 1%) значений, что составляет сотни миллионов кВт·ч за год.
6. Разработана рекомендация по повышению КЭ в виде способа симметрирования нагрузки тягового трансформатора (Патент РФ. № 2274940 от 20.04.2006, Бюл. № 16.), позволяющего значительно снизить (до 95%) коэффициент несимметрии по обратной последовательности.

***Научные публикации по теме диссертации в журналах ВАК РФ***

1. Машкин, В.А. Моделирование симметрирования нагрузки тяговых трансформаторов [Текст] / А.Г. Машкин, Д.Е. Федотов, В.А. Машкин // Промышленная энергетика. №8. 2007.
2. Машкин, В.А. Проблемы качества и учета электроэнергии на границах системы тягового электроснабжения [Текст] / А.Г. Машкин, В.А. Машкин // Промышленная энергетика. №11. 2007.

***Патенты и программы для ЭВМ***

3. Патент на изобретение РФ. Машкин А.Г., Буглаг Н.Ю., Балаганский А.П., Лукьянов П.Ю., Машкин В.А. Способ симметрирования нагрузки тягового трансформатора. № 2274940 от 20.04.2006, Бюл. № 16.
4. Патент РФ. Способ повышения эффективности использования электрической энергии. Машкин А.Г., Машкин В.А. Патент РФ. № 2320067 от 20.03.2008 Бюл. №8.
5. Программа расчета электроэнергетических характеристик объектов электроснабжения. А.Г. Машкин, В.А. Машкин, С.Ю. Машкина. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. № 2006613353 от 25.09.2006.

***Другие научные публикации по теме диссертации***

6. Машкин, В.А. Новая программа расчета характеристик электропотребления для ИВК «ОМСК-М» [Текст] / В.А. Машкин // Молодёжь Забайкалья: творчество и прогресс: VIII международная молодежная научно-практическая конференция, Чита; – Чита: ЧитГУ, 2004. – Ч.III. с. 116-119.
7. Машкин, В.А. Расчет электроэнергетических характеристик объектов электропотребления в формате ИВК «ОМСК-М» [Текст] / А.Г. Машкин, В.А. Машкин // V Всероссийская научно-практическая конференция «Кулагинские чтения» (материалы конференции). – Чита: ЧитГУ, 2005. Ч.I. с. 47-51.
8. Машкин, В.А. Программное обеспечение расчета показателей качества электрической энергии и характеристик электропотребления [Текст] / В.А. Машкин // Аспирант (Труды молодых ученых, аспирантов и студентов). – Чита: ЧитГУ, 2006. с. 119-123.
9. Машкин, В.А. Средства и методы измерения электрической энергии [Текст] / А.Г. Машкин, С.Ю. Машкина, В.А. Машкин // Всероссийская научно-практическая конференция «Энергетика в современном мире» (тезисы докладов). – Чита: ЧитГУ, 2006. с. 53-56.
10. Машкин, В.А. Энергетические процессы в линейных цепях [Текст] / А.Г. Машкин, В.А. Машкин, С.Ю. Машкина // VI Всероссийская научно-практическая конференция «Кулагинские чтения» (материалы конференции). – Чита: ЧитГУ, 2006. с. 72-76.
11. Машкин, В.А. Повышение качества электрической энергии в системах электроснабжения [Текст] / С.Ю. Машкина, А.Г. Машкин, В.А. Машкин // XIII Международная научно-практическая конференция «Современная техника и технологии – СТТ 2007». – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2007. с. 135-138.

12. Машкин, В.А. Связь качества электрической энергии (качество напряжения) с качеством электрической изоляции [Текст] / С.Ю. Машкина, А.Г. Машкин, В.А. Машкин // XIII Международная научно-практическая конференция «Современная техника и технологии – СТТ 2007». – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2007. с. 132-135.
13. Машкин, В.А. К вопросу ответственности участников рынка электроэнергии за несоблюдение качества электрической энергии [Текст] / В.А. Машкин, А.Г. Машкин, С.Ю. Машкина // VII Всероссийская научно-практическая конференция «Кулагинские чтения» (материалы конференции). – Чита: ЧитГУ, 2007. ч.1. с. 81-84.
14. Машкин, В.А. Разрешение проблемы качества электрической энергии в современном законодательстве Российской Федерации [Текст] / В.А. Машкин, А.Г. Машкин, С.Ю. Машкина // IV международная научно-практическая конференция «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности». Высокие технологии, фундаментальные и прикладные исследования, образование. Сборник трудов. Т. 11. 02-05.10.2007, Санкт-Петербург./ Под ред. А.П. Кудинова, Г.Г. Матвиенко. с. 164-168.
15. Машкин, В.А. К вопросу симметрирования нагрузки тяговых трансформаторов [Текст] / А.Г. Машкина, Д.Е. Федотов, В.А. Машкин // Проблемы теплофизики и теплоэнергетики: материалы семинара вузов Сибири и Дальнего Востока. Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири: материалы Всероссийской научно практической конференции. – Иркутск. 2008. с. 119-122.
16. Машкин, В.А. Применение гиперкомплексных чисел при расчете электрических цепей [Текст] / В.А. Машкин, А.Г. Машкин // Электроэнергия: от получения и распределения до эффективного использования: материалы Всероссийской научно-технической конференции. – Томск. 2008. с. 43-46.
17. Машкин, В.А. К вопросу ответственности за ухудшение качества электрической энергии [Текст] / В.А. Машкин, А.А. Якимов, А.Г. Машкин, С.Ю. Машкина // XIV международная научно практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современная техника и технологии»/Сборник трудов в 3-х томах. Т.1. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. с. 69-72.
18. Машкин, В.А. Расчет электрических цепей методом кватернионов [Текст] / А.Г. Машкин, В.А. Машкин // Научное обозрение. - 2008. - № 3. - с. 61-65

Машкин Владимир Анатольевич

Определение электроэнергетических характеристик и повышение качества электрической энергии в системе тягового электроснабжения

Автореф. дисс. на соискание учёной степени кандидата технических наук.

Подписано в печать 24.11.2008. Заказ №  
Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.