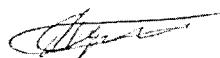


На правах рукописи



Акимжанов Темирболат Балтабаевич

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ДОБАВОЧНЫХ ПОТЕРЬ
В ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ И ОЦЕНКИ
ИХ УРОВНЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ**

Специальность 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические
системы

27 МАЯ 2015

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Томск 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальном исследовательском Томском политехническом университете»

Научный руководитель: **Ушаков Василий Яковлевич,**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Федоров Владимир Кузьмич,**
доктор технических наук, профессор кафедры
«Электроснабжение промышленных предприятий»
ФГБОУ ВПО «Омский государственный техниче-
ский университет»

Рикконен Сергей Владимирович,
кандидат технических наук, доцент, старший на-
учный сотрудник научно-исследовательского ин-
ститута прикладной математики и механики
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский
Томский государственный университет»

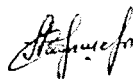
Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный
технический университет»**

**Защита диссертации состоится «24» июня 2015 г. в 15⁰⁰ часов на заседании дис-
сертационного совета Д 212.269.10 при ФГАОУ ВО «Национальный исследова-
тельский Томский политехнический университет», по адресу: 634050, г. Томск,
пр. Ленина, 30.**

**С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Национальный
исследовательский Томский политехнический университет» и на сайте
<http://portal.tpu.ru/council/2800/worklist>**

Автореферат разослан «6» мая 2015 г.

**Ученый секретарь
Диссертационного совета Д 212.269.10**



А.В. Кабышев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. У большинства населения Земли понятия «энергосбережение» и «энергоэффективность», как правило, ассоциируются с эффективностью использования энергии в сфере конечного потребления – в жилищно-коммунальном хозяйстве, в быту, в обрабатывающих отраслях промышленности и т.п. Электроэнергетика и сырьевые секторы ТЭК оказываются вне зоны внимания. И только специалистам известно, что энергоемкость товаров и услуг и интегральный показатель – удельная энергоемкость валового внутреннего продукта (ВВП) в значительной мере определяются энергетической эффективностью всех звеньев технологической цепочки, предшествующих потреблению электрической и тепловой энергии: поиск, разведка и добыча энергетического сырья – преобразование его в электрическую и тепловую энергию – доставка ее потребителям.

Для России с ее огромной территорией и, соответственно, большими длинами линий электропередач (по данным Минэнерго на сегодня их суммарная протяженность составляет 2 647,8 тыс. км) повышение энергоэффективности передачи и распределения электрической энергии всегда было чрезвычайно актуальной проблемой. Она усугубляется еще и высокими удельными потерями электроэнергии при ее транспортировке – около 12% в России в сравнении с 6-7% в развитых странах. (За 90-е годы они увеличились на 3-3,5% в то время как среднемировой уровень потерь продолжал снижаться). Руководство страны и отрасли ставит задачу – снизить потери электроэнергии в электрических сетях Российской Федерации до 8% к 2030 г.

В последние десятилетия все в большей мере на потери энергии влияет постоянный рост нелинейных нагрузок, обусловленный, прежде всего, увеличением доли электропотребления бытовым оборудованием и приборами. Это вызывает рост доли высших гармонических составляющих тока и напряжения в электрических сетях. Кроме нелинейных нагрузок, источниками высших гармоник являются нелинейности элементов сети и возможные резонансные режимы их работы. Высшие гармоники тока, помимо снижения качества электроэнергии, вызывают добавочные потери электроэнергии. Добавочные потери возникают также вследствие несимметрии параметров элементов сети и несимметрии режимов. В настоящее время эти составляющие потерь не учитываются при расчете потерь электроэнергии в российских сетях и, соответственно, при формировании тарифов на электроэнергию, что усложняет составление баланса переданной и потребленной электроэнергии. Для разработки методов борьбы с ними необходимы целенаправленные исследования их природы и количественных характеристик. И эта проблема актуальна не только для отечественной энергетики – убытки от низкого качества электроэнергии исчисляются миллиардами долларов и в других развитых странах.

Решению обозначенной проблемы и ее различных аспектов посвящено множество работ отечественных и зарубежных ученых: Воротицкий В.Э., Кучумов Л.А., Железо Ю.С., Жежеленко И.В., Шидловский А.К., Борисов Б.П., Arrillaga J., Bradley D., Bodger P., Williams S. M., Brownfield G. T., Duffus J.W. Однако, несмотря на это, данная проблема сохраняет актуальность.

Идея работы заключается в исследовании, расчете и оценке потерь электроэнергии в воздушных линиях электропередач и электрической сети от несинусоидальности и несимметрии режимов с применением метода фазных координат и теории цепей с распределенными параметрами.

Цель диссертации – разработка методов исследования и расчета добавочных потерь в ВЛ и методики оценки их уровней в распределительных электрических сетях.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Анализ современного состояния режимов ВЛ, приводящих к появлению добавочных потерь электроэнергии (по результатам инструментальных исследований, выполненных силами РЦР*) и существующих методов расчета потерь (по литературным данным).

2. Выбор математической модели режимов ВЛ для расчета основных и добавочных потерь электроэнергии от протекания высших гармонических составляющих токов и несимметрии токов основной частоты.

3. Алгоритмизация задачи расчета добавочных потерь и ее программная реализация.

4. Использование созданной программы для разработки методики оценки добавочных потерь в электрических сетях.

5. Оценка уровней добавочных потерь в ВЛ ряда электрических сетей 110 кВ.

Объект исследования. Электрические сети 110 кВ ОАО «МРСК Сибири» и ОАО «МРСК Юга» (далее, соответственно, МРСК Сибири и МРСК Юга).

Предметом исследования являются режимные параметры ВЛ и добавочные потери электроэнергии в них.

Методы исследований. Для решения задач, поставленных в настоящей работе, использовались: теория матричного исчисления, методы и приемы математического моделирования, методы физических и вычислительных экспериментов, сопоставление результатов инструментальных обследований с результатами расчетов.

Достоверность результатов и выводов обеспечивалась статистической обработкой данных с использованием стандартного пакета MS Office Excel и специально написанной на языке Fortran программы. Программная реализация математических моделей также осуществлена в среде FortranPowerStation 4.0.

Научная новизна и основные результаты, выносимые на защиту.

1. Разработаны методика и программа расчета основных и добавочных потерь в ВЛ, позволяющие исследовать их природу с учетом:

- многопроводности ВЛ, наличия грозозащитного троса и его заземления;
- несимметрии расположения проводов и тросов, а так же режимов ВЛ;
- распределенности параметров вдоль трассы ВЛ;
- проявления поверхностного эффекта в проводах и тросах.

* РЦР – Региональный центр ресурсосбережения Томского политехнического университета, в котором диссертант выполнял исследования. Результаты моделирования были сопоставлены с результатами инструментальных исследований; при этом получено хорошее совпадение.

2. Установлены следующие закономерности формирования добавочных потерь в ВЛ:

- с падением нагрузки доля добавочных потерь в суммарных увеличивается;
- возникающие в ВЛ резонансные частоты обуславливают рост токов этих частот и, соответственно, доли добавочных потерь;
- величина потерь от несинусоидальности в грозозащитных тросах, не смотря на их частое заземление, может быть сопоставима с таковыми в фазах и даже превышать их;
- значения токов частот высшего порядка могут меняться совершенно непредсказуемо вдоль трассы ВЛ, что подтверждает необходимость их учета при расчете добавочных потерь с применением разработанной программы на всех доступных измерениям частотах.

3. Предложена методика оценки добавочных потерь электроэнергии по ограниченному объему обследованных ВЛ, позволяющая с достаточной для практических целей точностью определять их величину. Объем выборки, достаточный для оценки добавочных потерь, может составлять 10 – 30% от общего количества ВЛ. Для конкретной энергосистемы данная величина должна устанавливаться на основе энергетического обследования.

4. Показано, что в процессе эксплуатации электрических сетей необходим постоянный учет добавочных потерь с целью уточнения их технико-экономических показателей и при составлении балансов мощностей и энергии.

Практическая значимость работы:

1. Предложенная методика оценки добавочных потерь может использоваться для их включения в технологические потери при формировании тарифов.

2. Созданное программное обеспечение используется в МРСК Юга для расчета добавочных потерь в электрических сетях ОАО «Ростовэнерго» и ОАО «Волгоградэнерго». Оно может использоваться для этих целей в других эксплуатируемых и проектируемых электрических сетях.

3. Применение методики оценки добавочных потерь в условиях ограниченного количества обследованных ВЛ может сократить затраты на эту процедуру.

4. Предлагаемые методика и средства оценки эффективности транспорта электроэнергии позволяют выявить потенциал энергосбережения в электрических сетях.

Апробация работы. Результаты работы по теме диссертации докладывались и обсуждались на научно-практических и международных конференциях: XVIII Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии», Томск, 2012; The 8th International Conference on Technical and Physical Problems of Power Engineering (ICTPE-2012), Fredrikstad, Norway, 2012; Международная молодёжная конференция «Энергетическое обследование как первый этап реализации концепции энергосбережения». Томск, 2012; I Международный форум «Интеллектуальные энергосистемы», Томск, 2013; The 9th International Forum on Strategic Technology (IFOST), Cox's Bazar, Bangladesh, 2014.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 10 научных работ, в том числе 3 статьи в изданиях из перечня ВАК и монография (в соавторстве), получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Личный вклад соискателя. Декомпозиция цели на комплекс задач по исследованию, расчету и оценке добавочных потерь электроэнергии в воздушных линиях электропередач и электрических сетях. Разработка эффективных подходов к решению сформулированных выше задач. Личный вклад в каждой работе, опубликованной в соавторстве, составляет более 50%.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, списка литературы из 74 наименований, приложений. Общий объем диссертации 168 страниц, в том числе 70 иллюстраций и 18 таблиц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении диссертации обоснован выбор темы, дана общая характеристика выполненной работы. Сформулированы цель и задачи, научная новизна и практическая значимость.

В первой главе рассмотрены основные причины, обуславливающие потери электроэнергии при ее транспортировке и распределении, их природа, также описаны причины сверхнормативных потерь и их взаимосвязь с качеством электроэнергии.

Потери электроэнергии в электрических сетях Минэнерго СССР находилась на уровне около 9%. Сейчас же, этот показатель равняется 12%. При этом 35% потерь приходится на подстанционное оборудование, а 65% – на линии электропередач.

Одной из главных причин увеличения потерь энергии в электрических сетях является распад СССР и преобразования в экономике страны, изменившие структуру электрических нагрузок и саму электроэнергетическую отрасль. В итоге экономичность режимов работы электрических сетей снизилась. Свой вклад вносит и связанное с технической модернизацией промышленности и развитием бытовой и офисной техники увеличение доли нелинейной нагрузки (например, выпрямители, системы частотного управления и т.п.), а также возможные нелинейности в элементах электрических сетей, обуславливающие добавочные потери.

Задача расчета и оценки потерь в электрических сетях на сегодняшний день решается на основе утвержденной Минэнерго РФ «Инструкции...». При этом используются известные программы расчета установившихся режимов, такие, например, как «РТП 3.1», позволяющие установить структуру потерь в общем виде: по классам напряжения, типам элементов. Базовой формулой расчета потерь электроэнергии в элементах электрических сетей является:

$$\Delta W_{nj} = 3 \cdot R \cdot \sum_{j=1}^M (I_j^2 \cdot \Delta t_j) \cdot 10^{-3}, \quad (1)$$

где R – активное сопротивление элемента, Ом; I_j – токовая нагрузка элемента, принимаемая на интервале времени Δt_j неизменной, А; Δt_j – интервал времени, в течение которого нагрузка элемента сети с сопротивлением R принимается неизменной; M – количество интервалов времени Δt_j в базовом периоде.

Известный метод расчета добавочных потерь мощности от несинусоидальности токов ориентирован на расчет потерь в элементах систем электроснабжения:

$$\Delta P_{\Sigma v} = 3 \sum_{v=2}^n I_v^2 R_1 k_{rv}, \quad (2)$$

где ν – номер гармоники; n – число учитываемых гармоник; I_ν – ток ν -ой гармоники; R_1 – активное сопротивление на основной частоте; k_{rv} – коэффициент, учитывающий влияние поверхностного эффекта.

В первом случае не учитываются ни несинусоидальность токов, ни их несимметрия. Во втором – не учитывается несимметрия высших гармонических составляющих токов. Кроме того, оба метода не дают объективного результата расчета потерь в линиях электропередач электрических сетей, т.к. не учитывают несимметрию и распределенность параметров вдоль трассы линии.

Существующие мероприятия по снижению потерь электроэнергии в электрических сетях не позволяют в полной мере реализовать потенциал энергосбережения. Их совершенствование является актуальной задачей. Эффективных мер снижения добавочных потерь от несинусоидальности токов в электрических сетях отсутствуют в силу слабой изученности данного предмета. Подавление высших гармоник тока иногда осуществляется лишь в системах электроснабжения с целью нормализации питающего напряжения. Но, тем не менее, определенная часть токов частот высшего порядка проникает в электрические сети из-за неточностей в настройках фильтрокомпенсирующих устройств. Добавочные потери от несимметрии токов в электрических сетях так же неизбежны из-за несимметрии нагрузок и параметров ВЛ. Можно сделать вывод, что указанные составляющие потерь должны учитываться при расчете и оценке технологического расхода электроэнергии в электрических сетях.

Во **второй главе** подтверждены декларированные в первой главе утверждения об искажениях в электрических сетях. По результатам инструментальных точных измерений, полученных силами сотрудников РЦР ТПУ, проанализированы фактические режимы ВЛ электрических сетей 110 кВ МРСК Сибири и МРСК Юга по показателям несинусоидальности и несимметрии токов, а также их взаимосвязь с другими режимными параметрами. На рисунках 1–4 приведены характерные для большинства обследованных ВЛ 110 кВ осциллограммы, спектральные составы токов ($K_{I(n)}$), суточные графики коэффициентов искажения синусоидальности токов (K_I) и коэффициентов несимметрии токов по обратной последовательности ($K_{2(1)}$).

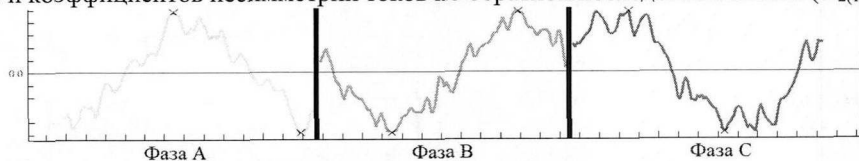


Рис. 1. Характерные осциллограммы токов

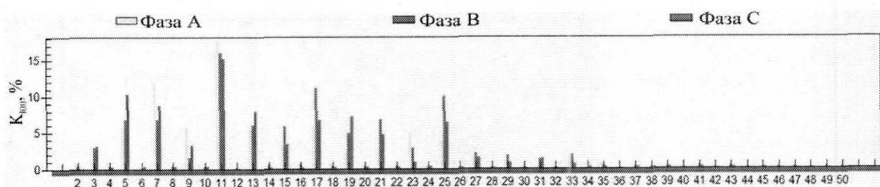


Рис. 2. Характерный спектральный состав токов

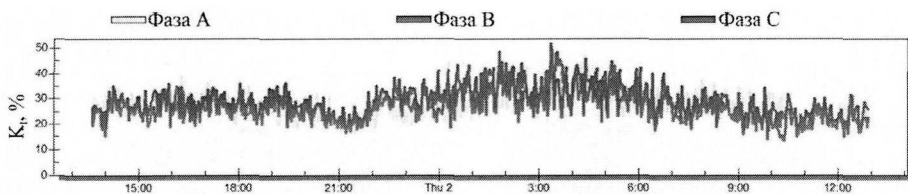


Рис. 3. Характерный график коэффициентов искажения синусоидальности токов

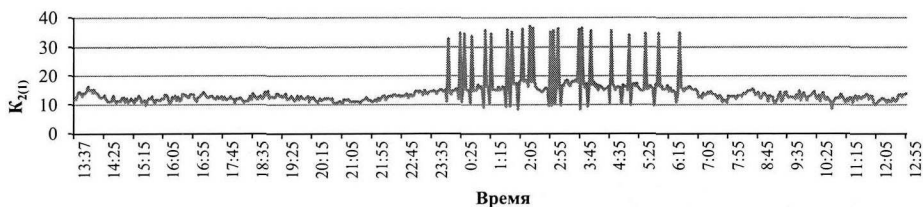


Рис. 4. Характерный график коэффициентов несимметрии токов по обратной последовательности

Анализ суточных измерений показал, что:

- в течение суток K_1 достигает и даже превышает значения 20% в 1/4 присоединений МРСК Сибири и 1/2 присоединений МРСК Юга;
- среднесуточные значения $K_{2(1)}$ токов выше 10% в 1/3 присоединений МРСК Юга и МРСК Сибири.

Кроме того, наблюдениями установлено, что с падением загрузки линий по току основной частоты увеличиваются значения высших гармонических составляющих токов. На рисунке 5 показан пример, описывающий взаимосвязь измеренных в течение суток тока основной частоты и тока пятой гармоники фазы А в одной из исследованных ВЛ 110 кВ.

Так, анализ коэффициентов загрузки линий по экономической плотности тока показал, что меньше, чем на половину загружены 50% линий МРСК Сибири и 30% линий МРСК Юга. Малая загрузка линий, с одной стороны, позволяет в перспективе увеличивать ее, а с другой – как показали наблюдения, она способствует росту токов частот высшего порядка и, как следствие, увеличению добавочных потерь.

В третьей главе диссертации сформулированы требования



Рис. 5. Суточные графики токов основной частоты и пятой гармоники фазы А в одной из исследованных линий

к модели расчета добавочных потерь в ВЛ и описана отвечающая этим требованиям модель расчета системных и режимных параметров. Основные требования можно сформулировать в следующем виде:

1. Несимметрия режимов обуславливает необходимость учета многопроводности, несимметрию расположения проводов ВЛ относительно друг друга и относительно земли. Кроме того, необходимо учитывать наличие грозозащитных тросов и их заземление. При этом следует не забывать, что в современных ВЛ встречаются две линии на одной опоре, где общее количество проводов и тросов может достигать восьми.

2. На частотах высшего порядка возрастает активное сопротивление проводов, поэтому необходимо учитывать проявление поверхностно эффекта в проводах и тросах.

3. Для анализа режимов на основной частоте достаточно использовать элементы с сосредоточенными параметрами, в условиях широкого распространения в электрических сетях несинусоидальности необходимо учитывать распределенность параметров вдоль трассы ВЛ.

Перечисленные факторы учитываются при расчете:

- системных параметров в фазных координатах,
- режимных параметров с применением телеграфных уравнений.

Наличие в воздушных ЛЭП до восьми проводов (в т.ч. тросов), а также необходимость программной реализации расчета потерь делает возможным расчет их режимов только численными методами, что, кроме того, обеспечивает универсальность этих моделей.

Матрицы погонных активных сопротивлений ВЛ, представляющие собой действительные части матриц полных сопротивлений, на частоте n -ой гармоники рассчитывается по условиям, приведенным в таблице 1, и формуле (3).

Таблица 1

Формулы определения активного сопротивления провода в зависимости от χ_n

–	$\chi_n < 1$	$\chi_n > 1$	$\chi_n > 30$
$r_{n\pi}$	$r_0 \cdot (1 + \chi_n^{4/3})$	$r_0 \cdot (\chi_n + 0,25 + 3 / 64 \chi_n)$	$r_0 \cdot (\chi_n + 0,265) \approx r_0 \cdot \chi_n$

Здесь величина χ_n определяется по формуле:

$$\chi_n = \frac{R}{2} \sqrt{\omega_n \mu \gamma / 2}, \quad (3)$$

где R – радиус провода, ω_n – круговая частота на n -ой гармонике, μ , γ – магнитная проницаемость материала и его проводимость, определяемые из справочных материалов, r_0 – удельное активное сопротивление провода на основной частоте.

Принято считать, что активная проводимость ВЛ практически на всех частотах равна нулю в силу малой утечки по изоляторам.

Расчет матриц погонных собственных и взаимных индуктивностей, представляющие собой мнимые части матриц полных сопротивлений, на частоте n -ой гармоники осуществляется по формулам:

$$x_{Ln} = \omega_n \cdot 0,145 \lg \frac{D_2}{\rho}, \quad (4)$$

$$x_{Mn} = x_{ijn} = \omega_n L_{ij} = \omega_n \cdot 0,145 \lg \frac{D_3}{D_{ij}}, \quad (5)$$

где $D_3 = 938 \text{ м} \approx 1000 \text{ м}$ – глубина прохождения эквивалентного тока земли при условии замены ее обратным проводом того же эквивалентного радиуса, м; ρ – для нерасщепленной фазы равняется радиусу провода, D_{ij} – расстояние между проводами фаз (в т.ч. тросом).

Матрица погонных емкостных проводимостей, представляющих собой мнимые части матриц полных проводимостей, многопроводной ВЛ на частоте n -ой гармоники определяется как:

$$b_{cn} = \omega_n C_{ij}, \quad (6)$$

где C_{ij} – при $i=j$ определяется по формуле $C_i = \left(c \cdot \lg \frac{H_{ii}}{\rho_n} \right)^{-1}$, при $i \neq j$ определяется по

формуле $C_{ij} = \left(c \cdot \lg \frac{H_{ij}}{D_{ij}} \right)^{-1}$; c – постоянный коэффициент, равный $c = 41,4 \cdot 10^6$, км/Ф;

ρ_n и ρ_t – внешний радиус поперечного сечений провода и троса соответственно; H_{ij} – расстояние между проводом j и зеркально отраженным проводом i , H_{ii} – расстояние между проводом и его зеркальным отражением относительно поверхности земли.

Таким образом, матрицы собственных и взаимных погонных сопротивлений и проводимостей проводов и тросов на частоте n -й гармоники размерностью $m \times m$ имеют вид:

$$Z(\omega_n) = \begin{bmatrix} Z_{11}(\omega_n) & Z_{12}(\omega_n) & \dots & Z_{1m}(\omega_n) \\ Z_{21}(\omega_n) & Z_{22}(\omega_n) & \dots & Z_{2m}(\omega_n) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ Z_{m1}(\omega_n) & Z_{m2}(\omega_n) & \dots & Z_{mm}(\omega_n) \end{bmatrix}; \quad Y(\omega_n) = \begin{bmatrix} Y_{11}(\omega_n) & Y_{12}(\omega_n) & \dots & Y_{1m}(\omega_n) \\ Y_{21}(\omega_n) & Y_{22}(\omega_n) & \dots & Y_{2m}(\omega_n) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ Y_{m1}(\omega_n) & Y_{m2}(\omega_n) & \dots & Y_{mm}(\omega_n) \end{bmatrix}.$$

Изменение напряжений и токов вдоль трассы линии на различных частотах рассчитывается с применением телеграфных уравнений. Телеграфные уравнения несимметричной многопроводной линии электропередачи из m проводов (в том числе, грозозащитных тросов) на n -й гармонике имеют вид системы дифференциальных уравнений, размерностью $2m$:

$$\begin{aligned} \dot{U}_x(\omega_n) &= e^{-\lambda_u(\omega_n)x} A_n + e^{\lambda_u(\omega_n)x} B_n; \\ \dot{I}_x(\omega_n) &= e^{-\lambda_i(\omega_n)x} C_n + e^{\lambda_i(\omega_n)x} D_n, \end{aligned} \quad (7)$$

где $\dot{U}_x(\omega_n)$ и $\dot{I}_x(\omega_n)$ – векторы-столбцы комплексных гармонических составляющих напряжений и токов n -й гармоники на расстоянии x от начала линии размерностью $m \times 1$; $\lambda_u(\omega_n)$, $\lambda_i(\omega_n)$, $e^{-\lambda_u(\omega_n)x}$, $e^{\lambda_u(\omega_n)x}$, $e^{-\lambda_i(\omega_n)x}$, $e^{\lambda_i(\omega_n)x}$ – комплексные квадратные матрицы размерностью $m \times m$, представляющие собой соответствующие функции от матриц параметров линии на частоте n -й гармоники размерностью также $m \times m$: $\lambda_u(\omega_n) = \sqrt{Z(\omega_n)Y(\omega_n)}$, $\lambda_i(\omega_n) = \sqrt{Y(\omega_n)Z(\omega_n)}$; A_n, B_n, C_n, D_n – постоянные векторы-столбцы независимые от расстояния x размерностью $m \times 1$, вычисляемые из граничных условий, что $x=0$ и $x=l$.

Функции от матриц типа $\lambda_u(\omega_n) = \sqrt{Z(\omega_n)Y(\omega_n)}$, $\lambda_l(\omega_n) = \sqrt{Y(\omega_n)Z(\omega_n)}$ $e^{-\lambda_u(\omega_n)}$, $e^{\lambda_u(\omega_n)}$, $e^{-\lambda_l(\omega_n)}$, $e^{\lambda_l(\omega_n)}$ вычисляются с использованием теоремы Кэли-Гамильтона:

$$f(A) = \frac{1}{\Delta} \sum_{k=1}^n \Delta_{n-k} A^{n-k}, \quad (8)$$

где Δ – определитель Вандермонда $\det[\lambda_i^{k-1}]$:

$$W(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n) = \begin{pmatrix} 1 & \lambda_1 & \lambda_1^2 & \dots & \lambda_1^{n-1} \\ 1 & \lambda_2 & \lambda_2^2 & \dots & \lambda_2^{n-1} \\ 1 & \lambda_3 & \lambda_3^2 & \dots & \lambda_3^{n-1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & \lambda_n & \lambda_n^2 & \dots & \lambda_n^{n-1} \end{pmatrix},$$

где λ собственные значения матрицы A , а Δ_j – определитель, получаемый, если в Δ вместо $\lambda_1^j, \lambda_2^j, \dots, \lambda_n^j$ подставить значения функций $f(\lambda_1), f(\lambda_2), \dots, f(\lambda_n)$.

На основе представленных выше уравнений разработан алгоритм и программа расчета основных и добавочных потерь мощности и электроэнергии в одно- и двухцепных ВЛ (описание применения которого приводится в четвертой главе), включающая в себя: а) блок расчета активных сопротивлений в зависимости от номера гармоники (пример результатов на Рис. 6); блок расчета эмпор напряжений и токов вдоль трассы ВЛ (пример результатов на Рис. 7); в) блок исследования частотных характеристик ВЛ и определение резонансных частот.

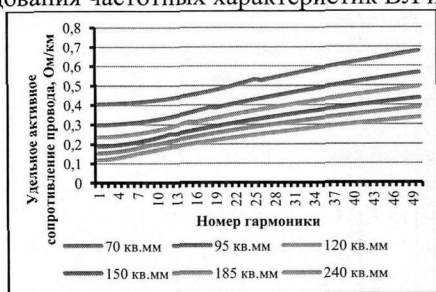


Рис. 6. Активное сопротивление проводов различного сечения

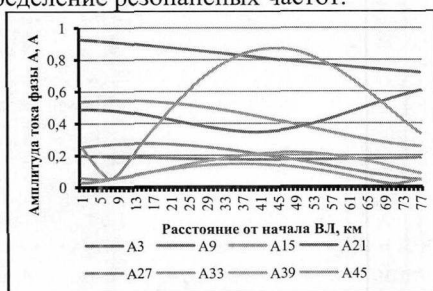


Рис. 7. Эмпоры токов различных частот в ВЛ 110 кВ, 77 км

Под частотными характеристиками ВЛ подразумевается зависимость входных проводимостей фаз линии от частоты приложенного напряжения. Величина этих проводимостей численно равна фазному току, возникающему в фазах линии под действием трехфазной симметричной системы напряжений единичной величины, приложенной к зажимам линии:

$$\begin{aligned} \dot{U}_A &= 1.0 + j0.0; \\ \dot{U}_B &= -0.866 - j0.5; \\ \dot{U}_C &= 0.866 + j0.5. \end{aligned}$$

Нижe приведены результаты сопоставления расчетных частотных характеристик (Рис. 8) и измеренного гармонического состава тока ($K_{I(n)}$) (Рис. 9) в одной из радиальных ВЛ 110 кВ (филиала МРСК Сибири – ОАО «Читаэнерго») длиной 70 км, выполненной проводами марки АС-120 на опорах типа П110-5В. Инструментальные измерения показали, что коэффициент загрузки рассматриваемой линии по экономической плотности тока в период максимальной передачи мощности равен 0,14.

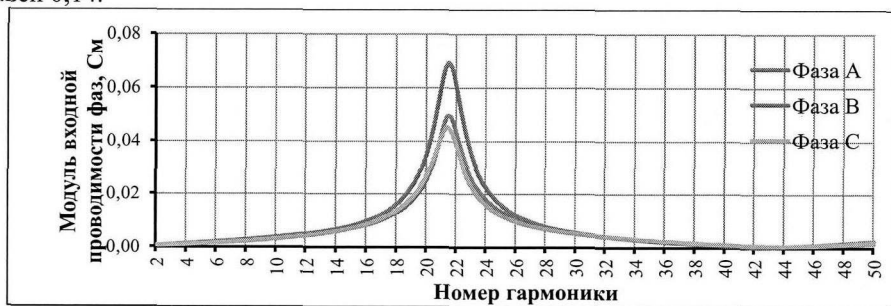


Рис. 8. Рассчитанные частотные характеристики ВЛ



Рис. 9. Измеренный гармонический состав токов в ВЛ

Из рисунков видно, что частотные характеристики ВЛ действительно оказывают влияние на спектральный состав тока, увеличивая токи частот, соответствующих резонансным. Данное обстоятельство, во-первых, подтверждает адекватность созданной программы, во-вторых, указывает на то, что резонансные частоты ВЛ способствуют увеличению доли добавочных потерь от несинусоидальности.

В четвертой главе описаны порядок расчета и определения структуры потерь в ВЛ, а также этапы оценки уровня добавочных потерь в электрических сетях на основе созданной в ходе выполнения работы программы.

На первом этапе определения величины добавочных потерь мощности в ВЛ рассчитываются суммарные потери (ΔP_{Σ} , Вт) по формуле (9), потери на основной частоте по формуле (10), потери от протекания токов прямой последовательности основной частоты по формуле (11).

$$\Delta P_{\Sigma} = \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^K r_{i(k)} \int_0^l I_{i,(k)}^2(x) dx, \quad (9)$$

$$\Delta P_{(1)} = \sum_{i=1}^m r_{i(1)} \int_0^l I_{i(1)}^2(x) dx, \quad (10)$$

$$\Delta P_{1(1)} = \sum_{i=1}^m r_{i(1)} \int_0^l I_{i,1(1)}^2(x) dx. \quad (11)$$

где m – количество проводов в линии; K – количество гармоник, учитываемых в расчете; $r_{i(k)}$ – погонное активное сопротивление i -го провода на частоте k -той гармоники (см. табл. 1 и рис. 6); $I_{i(k)}(x)$ – действующее значение тока i -го провода на частоте k -той гармоники на расстоянии x от начала линии (см. формулу (7) и рис. 7), $I_{i,1(1)}(x)$ – то же, но для тока основной частоты, $I_{i,1(1)}(x)$ – то же, но для тока прямой последовательности основной частоты; l – длина ВЛ.

Добавочные потери мощности от несимметрии токов:

$$\Delta P_{\text{д.несимм.}} = \Delta P_{(1)} - \Delta P_{1(1)}. \quad (12)$$

Добавочные потери мощности от несинусоидальности токов:

$$\Delta P_{\text{д.вг.}} = \Delta P_{\Sigma} - \Delta P_{(1)}. \quad (13)$$

Потери мощности в ВЛ на частоте k -той гармоники:

$$\Delta P_{(k)} = \sum_{i=1}^m r_{i(k)} \int_0^l I_{i(k)}^2(x) dx. \quad (14)$$

По результатам суточных измерений режимов линии рассчитываются основные (15) и добавочные потери энергии от несимметрии токов основной частоты (16) и несинусоидальности токов (17), а также коэффициент, представляющий собой оценку добавочных потерь энергии в ВЛ (18).

$$\Delta W_{(1)} = \sum_{j=1}^N \frac{\Delta P_{(1)j} \cdot (\Delta t_{\Sigma} / 60)}{1000}, \quad (15)$$

$$\Delta W_{\text{д.несимм.}} = \sum_{j=1}^N \frac{\Delta P_{\text{д.несимм.}j} \cdot (\Delta t_{\Sigma} / 60)}{1000}, \quad (16)$$

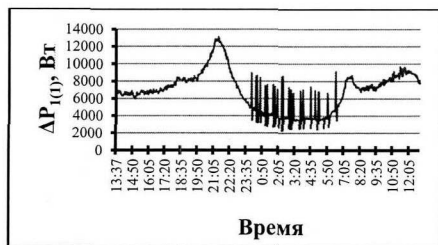
$$\Delta W_{\text{д.вг.}} = \sum_{j=1}^N \frac{\Delta P_{\text{д.вг.}j} \cdot (\Delta t_{\Sigma} / 60)}{1000}, \quad (17)$$

где N – количество измерений; Δt_{Σ} – продолжительность экстраполированного интервала времени между измерениями (мин.): $\Delta t_{\Sigma} = 1440/N$; 1440 – количество минут в сутки.

$$k_{\text{дп.ВЛ}} = \frac{\Delta W_{\text{д.вг.}} + \Delta W_{\text{д.несимм.}}}{\Delta W_{(1)}} + 1. \quad (18)$$

В качестве примера, на рисунках 10 и 11 приведены суточные графики и структура основных и добавочных потерь в ВЛ, представление об искажениях в которой дают рисунки 1–4.

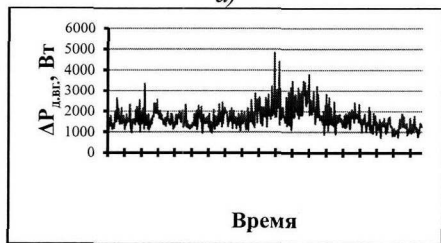
Результаты расчета потерь энергии сведены в таблицу 2. Видно, что добавочные потери (45,77 кВт*ч) увеличивают основные (161,8 кВт*ч) в 1,28 раз.



а)



б)



в)

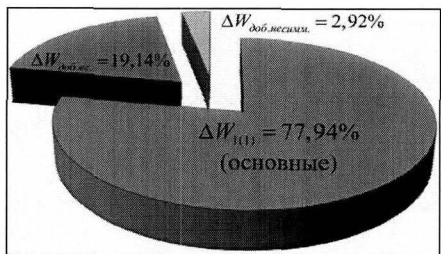


г)

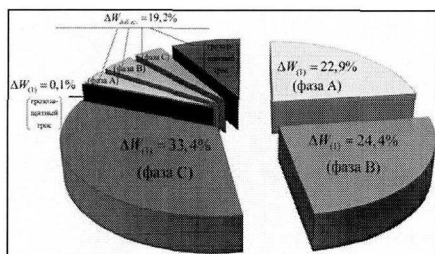
Рис. 10. Суточные графики: а) основных потерь; б) потерь от несимметрии токов основной частоты; в) потерь от несинусоидальности токов; г) относительных добавочных потерь.

Таблица 2

$\Delta W_{1(1)}, \text{кВт.ч}$	$\Delta W_{д.}, \text{кВт.ч}$	$k_{д.в.л.}$	$\Delta W_{з.}, \text{кВт.ч}$
161,8	45,77	1,28	207,6



а)



б)



в)

Рис. 11. Структура потерь энергии в ВЛ за сутки: а) укрупненная; б) по проводам; в) по высшим гармоникам.

Подобные расчеты были сделаны для более 240 линий МРСК Сибири и МРСК Юга. На рисунке 12 приведен вариационный ряд из 36 линий по показателю $\Delta W_{\text{д.}\%}$ для филиала МРСК Сибири – ОАО «Бурятэнерго».

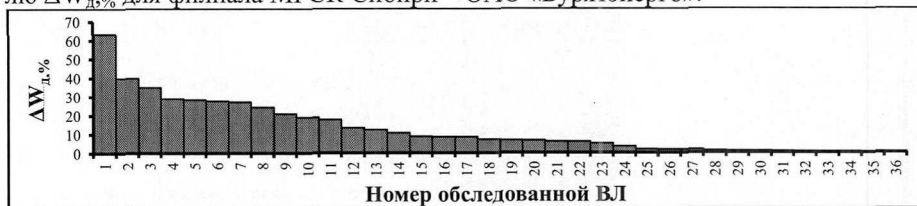


Рис. 12. Уровни добавочные потери в линиях 110 кВ ОАО «Бурятэнерго»

При таких уровнях потерь задача их учета во всей сети становится актуальной. Так, в данной работе предлагается методика оценки добавочных потерь в электрической сети по ограниченному количеству обследованных ВЛ при условиях, что имеются: а) результаты расчета основных потерь с применением известных программ расчета установившихся режимов, б) точные измерения режимных параметров, которые принимаются характерными для базового периода оценки.

Оценку добавочных потерь предлагается производить в 5 этапов:

Этап 1. Полное инструментальное обследование ВЛ электрической сети, которое согласно ФЗ №261 «Об энергосбережении...» подлежит выполнению раз в 5 лет, и расчет фактического $k_{\text{дп.ВЛ.ЭС}}$:

$$k_{\text{дп.ВЛ.ЭС}} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta W_{\text{дп.ВЛ}i}}{\sum_{i=1}^n \Delta W_{1(1)\text{ВЛ}i}} + 1, \quad (19)$$

где $\Delta W_{\text{дп.ВЛ}i}$ и $\Delta W_{1(1)\text{ВЛ}i}$ – добавочные и основные потери электроэнергии в i -ой ВЛ ЭС соответственно; n – количество обследованных ВЛ.

Этап 2. Исследование полученного $k_{\text{дп.ВЛ.ЭС}}$ в зависимости от количества обследованных ВЛ с целью определения достаточного набора ВЛ для получения объективной оценки $\tilde{k}_{\text{дп.ВЛ.ЭС}}$. На рисунке 13 приведен пример исследования $k_{\text{дп.ВЛ.ЭС}}$ в зависимости от количества обследованных ВЛ. Из графика видно, что сходимость достигается на 20-й ВЛ.



Рис. 13. Сходимость ВЛ 110 кВ ОАО «Бурятэнерго» по $\tilde{k}_{\text{дп.ВЛ.ЭС}}$

Кроме того, исследования показали, что общность режимов в конкретных электрических сетях (обусловленные, например, плотностью населения региона, степенью развитости промышленности, электрифицированного транспорта и т.д.) задают закономерность в распределении ВЛ по показателю $\Delta W_{д, \%}$, рисунок 14.

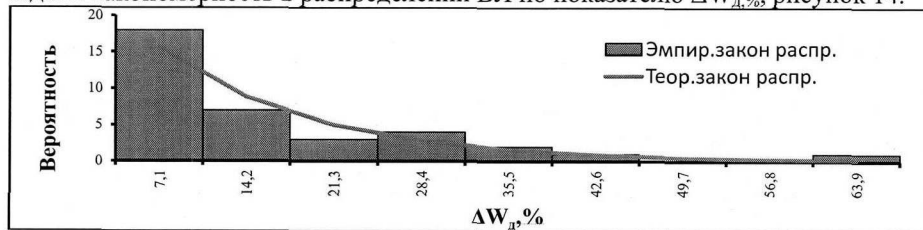


Рис. 14. Закон распределения ВЛ по показателю $\Delta W_{д, \%}$

Здесь вероятность соответствия распределения экспоненциальному закону равняется 40%, что является не малым соответствием, при оценке математического ожидания относительных добавочных потерь $\bar{T}=12,452$, степеней свободы $s=7$ и уровне значимости $\alpha=0,05$.

Результаты, иллюстрированные на рисунках 12–14, подтверждают правомочность предлагаемого подхода к сокращению объема инструментальных измерений при определении оценки $\tilde{k}_{дп.ВЛ.ЭС}$.

Этап 3. По результатам определения оптимального порядка обследования и достаточного количества обследуемых ВЛ $\tilde{k}_{дп.ВЛ.ЭС}$ оценивается с периодичностью, необходимой для защиты тарифов в федеральной службе по тарифам.



Рис. 15. $\tilde{k}_{дп.ВЛ.ЭС}$ для некоторых сетей 110 кВ МРСК Сибири и МРСК Юга

Этап 4. Расчет реального значения потерь электроэнергии в линиях всей электрической сети:

$$\Delta W_{ВЛ.ЭС} = \tilde{k}_{дп.ВЛ.ЭС} \cdot \Delta W_{1(1)ВЛ.ЭС}, \quad (20)$$

где $\Delta W_{1(1)ВЛ.ЭС}$ – потери в линиях сети, рассчитанные с применением известных программ расчета установившихся режимов.

Этап 5. Выделение добавочных потерь из суммарных:

$$\Delta W_{дп.ВЛ.ЭС} = \Delta W_{ВЛ.ЭС} - \Delta W_{1(1)ВЛ.ЭС}. \quad (21)$$

По нашему мнению, Федеральная служба по тарифам должна принимать данные о добавочных потерях, полученные по предлагаемой методике.

Заключение

1. Для объективной оценки эффективности транспорта электроэнергии, а также уровней несинусоидальности и несимметрии напряжений и токов в электрической сети необходимо проводить её инструментальные обследования, не смотря на их относительно высокую стоимость.

2. Эффективность инструментальных обследований повышается при их комплексном исполнении – одновременной оценке качества электроэнергии (например, при её сертификации на соответствие ГОСТ), энергетическом обследовании (энергоаудите), оценке уровня добавочных потерь.

3. Созданная программа расчета добавочных потерь в ВЛ может послужить основой для разработки программы исследования и расчета добавочных потерь электроэнергии в сложных электрических сетях.

4. Предложенная методика оценки добавочных потерь электроэнергии в электрических сетях позволяет решить не только основную задачу, но и уточнить балансы мощностей и энергии.

5. В следствие неучета добавочных потерь электроэнергии при расчёте норматива технологических потерь они автоматически попадают в разряд коммерческих, т.е. не включаются в тариф. Энергоснабжающие компании при этом несут убытки, а государство недополучает налоги от потерянных компаний доходов.

Автор выражает глубокую благодарность научному руководителю проф. Ушакову В.Я. и соруководителю доц. Харлову Н.Н. за их постоянное внимание к работе и помощь, а также сотрудникам РЦР ЭНИН Волкову М.В. и Боровикову В.С. за предоставление результатов инструментальных энергетических обследований ряда распределительных сетей 110 кВ, Богдановой Е.В. за помощь в решении организационных вопросов.

Список работ, опубликованных по теме диссертации:

а) в изданиях по перечню ВАК

1. О необходимости включения добавочных потерь от высших гармоник тока в технологические потери при передаче электрической энергии / В.С. Боровиков, Н.Н. Харлов, Т.Б. Акимжанов // Известия Томского политехнического университета / Томский политехнический университет (ТПУ). – Томск, 2013. – Т. 322, № 4 : Энергетика. – С. 91–93.

2. Инструментальная оценка эффективности работы фильтрокомпенсирующих устройств в системах электроснабжения горнодобывающих предприятий / Н.Н. Харлов, Т. Б. Акимжанов // Известия Томского политехнического университета / Томский политехнический университет (ТПУ). – Томск, 2013. – Т. 322, № 4 : Энергетика. – С. 99-103.

3. Искажения синусоидальности и несимметрия напряжений в электрических сетях 110 кВ Сибири и Юга России / Т.Б. Акимжанов, В.Я. Ушаков, Н.Н. Харлов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – Казань, 2014. – № 1–2. – С. 67–73.

б) в других изданиях

4. Development of calculation methods for additional electrical power losses during transportation. T.B. Akimzhanov, N.N. Kharlov, V.S. Borovikov, V.Ya. Ushakov.

The 9th International Forum on Strategic Technology (IFOST), October 21-23, 2014, Cox's Bazar, Bangladesh. Publisher: IEEE. pp. 351–354.

5. Свид. № 2014619784. Расчет добавочных потерь в одно- и двухцепных линиях электропередачи // Харлов Н.Н., Боровиков В.С., Акимжанов Т.Б.; Заявитель и правообладатель «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»; – №2014617803; заявл. 06.08.2014; опублик. 22.09.2014 г.

6. Режимные свойства электрических сетей 110 кВ юга России в обеспечении эффективности транспорта электроэнергии / В.С. Боровиков, М.В. Волков, В.В. Иванов, В.В. Литвак, В.А. Мельников, А.В. Погонин, Н.Н. Харлов, Т.Б. Акимжанов. – Томск, STT, 2013. – 268 с.

7. К вопросу разработки модели расчета параметров катушки индуктивности. Смагулов С.Б., Акимжанов Т.Б. // материалы Международной молодежной конференции «Энергетическое обследование как первый этап реализации концепции энергосбережения», 3–4 декабря 2012 г. / Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во ООО «СПБ Графикс», 2012. – С. 345–348.

8. Statistical estimation of the voltage quality ratings distribution in the electric load nodes of 110 kV. N.N. Kharlov, T.B. Akimzhanov // Conference proceedings. The 8th International Conference on Technical and Physical Problems of Power Engineering (ICTPE-2012). Ostfold University College 5–7 September 2012, Fredrikstad, Norway. – P. 283–285.

9. К вопросу разработки методики и математического аппарата для расчета добавочных потерь в элементах электроэнергетических систем. Акимжанов Т.Б., Боровиков В.С., Волков М.В. // сборник трудов XVIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. В 3 т. Т. 1 / Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – С. 7–8;

10. Смагулов С.Б., Акимжанов Т.Б. Расчет добавочных потерь электроэнергии в ЛЭП 110 кВ на примере Ростовэнерго и Бурятэнерго // Материалы I Международного форума «Интеллектуальные энергосистемы». Томск, 2013. – 321 с.

Подписано к печати 23.04.2015. Формат 60х84/16. Бумага «Снегурочка».
Печать XEROX. Усл. печ. л. 1,16. Уч.-изд. л. 1,05.
Заказ 296-15. Тираж 130 экз.



Национальный исследовательский Томский политехнический университет
Система менеджмента качества

Издательства Томского политехнического университета
сертифицирована в соответствии с требованиями ISO 9001:2008



ИЗДАТЕЛЬСТВО



ТПУ, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30

Тел./факс: 8(3822)56-35-35, www.tpu.ru