

На правах рукописи

Сулайманов Алмаз Омурзакович

**НЕАКТИВНАЯ МОЩНОСТЬ И ЕЕ СОСТАВЛЯЮЩИЕ
В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**

Специальность 05.14.02 – Электростанции и электроэнергетические системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

2009

Работа выполнена на кафедре электрических станций электротехнического института Томского политехнического университета.

Научный руководитель:	кандидат технических наук, доцент Гольдштейн Ефрем Иосифович
Официальные оппоненты:	доктор технических наук, профессор Манусов Вадим Зиновьевич
	кандидат технических наук, доцент Харлов Николай Николаевич
Ведущая организация:	Учреждение Российской академии наук Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения РАН

Защита состоится «23» декабря 2009 г. в 10-00 часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.269.10 при ГОУ ВПО «Томский политехнический университет» по адресу: г. Томск, пр. Ленина, 30.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ТПУ.

Автореферат разослан « » ноября 2009 г.

Ученый секретарь совета
по защите докторских
и кандидатских диссертаций
Д 212.269.10, д.т.н., профессор

А.В. Кабышев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Вопросы описания энергообменных процессов в электрических цепях с несинусоидальными токами и напряжениями до сих пор остаются предметом полемики и дискуссий. Используемый при этом параметр – “реактивная мощность” (РМ), логичный и совершенно оправданный при синусоидальных режимах, не всегда правильно характеризует указанные процессы; а вопрос о методике определения РМ при несинусоидальном режиме так и не получил однозначного ответа в виде какого-либо регламентирующего документа. Известные формулы определения РМ при несинусоидальных токах и напряжениях часто противоречат друг другу, а их использование диктуется решением какого-либо узкого круга задач. При этом для каждого круга задач часто предлагается свое понимание этих процессов, своя терминология и своя декомпозиция параметров, описывающих эти процессы. Все это создает путаницу, затрудняющую как разработку новых систем измерения и управления, так и практику эксплуатации энергосистем.

Поэтому актуальной является задача создания логически завершенных методик определения неактивной мощности и ее составляющих – реактивной мощности и мощности искажения, в однофазных и трехфазных цепях; пригодных для использования в современных устройствах измерительной техники и максимально приближенно описывающих физические процессы в электрических цепях при несинусоидальных токах и напряжениях.

Параметр называемый “неактивная мощность” (НМ) довольно часто используется в работах, посвященных исследованию обменных процессов при несинусоидальных режимах, но он пока не закрепился в области теории электротехники. Применение параметра “неактивная мощность”, под которым понимают “все кроме активной”, оправдано тем, что он учитывает влияние не только реактивной мощности, но и мощности искажения.

Усиление интереса к рассмотрению вопросов, связанных с несинусоидальными режимами, обусловлен рядом объективных причин. В первую очередь это объясняется увеличением доли высших гармонических составляющих в токах нелинейных нагрузок. Увеличение числа и уровня высших гармонических составляющих токов и напряжений связано с широким распространением электротехнических и электромеханических устройств, являющихся источниками гармоник: статических преобразователей, электродуговых печей, сварочных аппаратов, регулируемого привода электромеханизмов, устройств с насыщающимися магнитными элементами и т.д. Как следствие - растут потери в линиях электропередач, увеличиваются помехи в электрооборудовании, ухудшается электромагнитная обстановка и качество электроэнергии.

Цель работы. Целью работы является создание методик определения неактивной мощности и ее составляющих (при несинусоидальных токах и напряжениях), пригодных для реализации в современных устройствах

измерения и наиболее правильно описывающих физические процессы в энергосистемах и их элементах.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

- проведен анализ имеющихся работ по определению параметров характеризующих энергообменные процессы при несинусоидальных токах и напряжениях в разных областях науки и техники; определены терминологии данной проблематики;

- выделены из имеющихся подходов к определению неактивной мощности и ее составляющих такие, которые наиболее правильно характеризуют физические процессы в электрических цепях и не имеют ограничения по их областям применения;

- разработаны методики определения неактивной мощности и ее составляющих, на основе выделенных подходов;

- создан программный продукт для проведения экспериментальных исследований и обработки их результатов;

- проведены экспериментальные расчеты для однофазных и трехфазных цепей (четырёхпроводных и трехпроводных) в порядке обоснования работоспособности разработанных методик;

- проведена оценка реализации разработанных методик в устройствах измерения и контроля; и возможностей их использования при определении потерь в элементах электрической сети, а также при определении уровня компенсации реактивной мощности.

Методы исследования. Основные методы исследования – вычислительные эксперименты с использованием современных программных систем: программы моделирования электронных и электрических схем “PSpice”; математического пакет MathCAD; программных средств собственной разработки. При отсутствии эталонной модели, для проверки достоверности результатов экспериментов была применена методика ковенной оценки результатов экспериментов, при которой в сигналы тока и напряжения вводились гармонические составляющие с разными по знаку фазами и по полученным значениям определялась правильность полученных результатов. При исследованиях использовались фундаментальные законы теоретических основ электротехники, численные методы обработки данных, методы математического моделирования электрических цепей.

Научная новизна диссертационной работы:

1. Показана целесообразность использования интегрального параметра “неактивная мощность” для несинусоидальных режимов, что позволяет, при анализе обменных процессов в энергосистемах, в комплексе учитывать влияние не только реактивной мощности, но мощности искажения.
2. Обоснована процедура определения неактивной мощности, как полусуммы интегралов обратной мощности за первую и третью (или вторую и четвертую) четверти периода основной частоты.

3. Разработана методика определения реактивной мощности сдвига для трехфазных цепей с использованием площадей вольт-амперных характеристик, построенных по мгновенным значениям токов и напряжений.
4. Предложено определять мощность искажения как алгебраическую разность между неактивной мощностью и реактивной мощностью сдвига.

Практическая ценность работы.

1. Выполнена программная реализация предложенных методик расчета неактивной мощности и ее составляющих, адаптированная для применения в микропроцессорных системах.
2. Разработана функциональная схема для аппаратной реализации предложенных методик с использованием аналоговой измерительной электроники.
3. Предложена и экспериментально проверена методика определения потерь в электрических сетях и силовых трансформаторах по текущим показаниям телеизмерений.
4. Показана возможность использования предложенных методик при определении уровня компенсации реактивной мощности в электрических сетях.

Реализация результатов работы.

- Методика определения потерь и методика определения уровня компенсации электрической сети рекомендованы к внедрению в Томских магистральных сетях.
- Методики определения мощностей использовались на Березовском электромеханическом заводе при разработке автоматизированных систем технологического сопровождения производства счетчиков электрической энергии.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались: на восьмой международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых “Современные техника и технологии” (Томск, 2002); на всероссийской научно-практической конференции “Проблемы современной радиоэлектроники и систем управления” (Томск, 2002); на 48 международном научном colloquium (Ильменау, Германия, 2003); на международной научно-технической конференции “Электроэнергия и будущее цивилизации” (Томск, 2004); на международной научно-технической конференции “Состояние и перспективы развития энерготехнологий” (Иваново, 2005); на международном научно-техническом семинаре “Системы электроснабжения с возобновляемыми источниками энергии” (Томск, 2006); на второй всероссийской научно-технической интернет-конференции “Энергетика. Инновационные направления в энергетике. CALS-технологии в энергетике” (Пермь, 2009).

Личный вклад. Автором совместно с научным руководителем разработаны: методики определения неактивной мощности и реактивной

мощности сдвига; обсуждены и проанализированы результаты экспериментов. Самостоятельно разработаны: программные средства для расчета и анализа РМ по различным методикам, методика расчета неактивной мощности и ее составляющих для трехфазных цепей, методика определения мощности искажения.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 23 печатных работ из которых: 2 статьи в рецензируемых периодических изданиях по перечню ВАК; 1 монография (в соавторстве); 4 патента РФ на изобретения; 4 патента РФ на полезную модель, 1 свидетельство РФ на полезную модель.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех основных разделов и заключения; выполнена на 110 страницах машинописного текста; содержит 31 иллюстрацию, 28 таблиц; список используемой литературы из 70 наименований и приложения на 25 страницах. Общий объем диссертации составляет 135 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации и дана общая характеристика выполненной работы. Сформулированы цель работы, научная новизна и практические результаты.

В первом разделе приведены общие сведения, термины, определения и упрощения, принятые в диссертационной работе; выделены основные расчетные соотношения.

Приведены основные алгоритмы определения реактивной мощности при синусоидальных токах и напряжениях. Проведен анализ работ по определению реактивных мощностей при несинусоидальных токах и напряжениях. Показано, что основное число работ по данной тематике проводится в рамках решения узкого круга задач или для частных случаев. Отмечено, что многообразие подходов создает путаницу, как в терминологии, так и в выборе методик определения реактивной мощности.

Сделан вывод о том, что общепризнанного понимания энергообменных процессов в электрической цепи при несинусоидальных токах и напряжениях не существует, а регламентирующие документы посвящены, как правило, реактивной мощности первой гармоники.

Сформулированы особенности расчета коэффициента мощности.

Представлены области и практика применения алгоритмов определения реактивной мощности. Обозначены сферы возможного использования разрабатываемых алгоритмов: счетчики электрической энергии; измерительные преобразователи; вопросы определения потерь мощности в сетях и силовых трансформаторах и при расчете и оценке уровня компенсации реактивной мощности в электрических сетях.

Отмечено, что под “неактивной мощностью” Q_H принято считать интегральную величину, характеризующую обменные и какие-либо другие энергетические (мощностные) процессы при несинусоидальных токах и

напряжениях, которые не описываются понятием “активная мощность”. Считается, что неактивная мощность ортогональна активной мощности.

Принято разложение неактивной мощности на две составляющие:

– реактивную мощность сдвига Q_c – характеризующую взаимодействие одинаковых по частоте гармоник тока и напряжения;

– мощность искажения Q_{II} – характеризующую взаимодействие разных по частоте гармоник тока и напряжения.

Во втором разделе описывается порядок и результаты вычислительных экспериментов при исследовании выбранных методик определения неактивной мощности, мощности сдвига и мощности искажения для однофазных цепей переменного тока при наличии и отсутствии в токах и напряжениях этих цепей, кроме основной, других гармонических составляющих, с целью анализа достоверности получаемых результатов по данным методикам.

Для экспериментов были отобраны подходы Маевского и Бакова. Эксперименты проводились путем добавления в основную гармонику четных и нечетных гармонических составляющих. При этом знак фазы добавочных гармоник менялся на противоположный и по полученным результатам делался вывод о качественной характеристике полученных результатов. Реактивная мощность сдвига проверялась по известной формуле (2), а значение неактивной мощности сравнивалось со значением, полученным через полную мощность (РМ по Фризе).

Реактивная мощность сдвига характеризует взаимодействие одинаковых по частоте гармоник тока и напряжения. При этом известны три модификации формулы для определения мощности сдвига; все они представляют собой сумму реактивных мощностей гармоник разных частот:

$$Q = \sum_{k=1}^{\infty} U_k I_k \sin \varphi_k \quad (1); \quad Q = \sum_{k=1}^{\infty} k U_k I_k \sin \varphi_k \quad (2); \quad Q = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k} U_k I_k \sin \varphi_k \quad (3).$$

В работе показана работоспособность формулы (2).

Для определения мощности сдвига используем подход Маевского, рассматривая реактивную мощность сдвига как площадь вольтамперной характеристики $i(u)$. Для определения площади ВАХ используем формулу площади многоугольника

$$F = \sum_{j=1}^N \left\| \left[u(t_j) - u(t_{j+1}) \right] \cdot \left[i(t_j) + i(t_{j+1}) \right] \right\|_{j=1}^N. \quad (4)$$

Мощность сдвига в [вар] определится формулой

$$Q_c = \frac{F}{4\pi} = \frac{1}{4\pi} \sum_{j=1}^N \left\| \left[u(t_j) - u(t_{j+1}) \right] \cdot \left[i(t_j) + i(t_{j+1}) \right] \right\|_{j=1}^N. \quad (5)$$

Здесь $u(t_j)$, $i(t_j)$ – мгновенные значения напряжения и тока; N – число отсчетов на периоде T сигналов i , u ; Δt – шаг дискретизации

$$N = \frac{T}{\Delta t}. \quad (6)$$

При определении неактивной мощности использовалась следующая процедура:

- Находится мгновенная мощность $p(t_j) = u(t_j) \cdot i(t_j)$;
- Рассчитывается активная мощность

$$P = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \|p(t_j)\|_{j=1}^N = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \|u(t_j) \cdot i(t_j)\|_{j=1}^N; \quad (7)$$

- Определяется обратная (возвратная, обменная) мощность

$$\|p_{обр}(t_j)\|_{j=1}^N = \|p(t_j)\|_{j=1}^N - P; \quad (8)$$

- Производится интегрирование обратной мощности на четырех интервалах времени, соответствующих каждой четверти периода напряжения (тока):

- интервал I – от t_1 до $(t_1 + T/4)$;
- интервал II – от $(t_1 + T/4)$ до $(t_1 + T/2)$;
- интервал III – от $(t_1 + T/2)$ до $(t_1 + 3T/4)$;
- интервал IV – от $(t_1 + 3T/4)$ до $(t_1 + T)$;

$$\begin{aligned} Q_I &= \frac{\pi}{2(N/4)} \sum_{j=1}^{N/4} \|p_{обр}(t_j)\|_{j=1}^N; & Q_{II} &= \frac{\pi}{2(N/4)} \sum_{j=N/4}^{N/2} \|p_{обр}(t_j)\|_{j=1}^N; \\ Q_{III} &= \frac{\pi}{2(N/4)} \sum_{j=N/2}^{3N/4} \|p_{обр}(t_j)\|_{j=1}^N; & Q_{IV} &= \frac{\pi}{2(N/4)} \sum_{j=3N/4}^N \|p_{обр}(t_j)\|_{j=1}^N. \end{aligned} \quad (10)$$

Здесь t_1 - момент начала интегрирования; он соответствует переходу напряжения через ноль (от отрицательной полуволны к положительной);

- Определяется неактивная мощность по любой из двух формул

$$\begin{aligned} Q'_{H\Sigma} &= 0.5(Q_I + Q_{III}); \\ Q'_{H\Sigma} &= 0.5(Q_{II} + Q_{IV}) \end{aligned} \quad (11)$$

В большинстве известных работ понятие о мощности искажения вводится достаточно формально, чтобы сделать точной формулу для полной мощности

$$Q'_{II} = \sqrt{S^2 - P^2 - Q_C^2}. \quad (12)$$

Т. е. по существу, мощность искажения рассматривается как небаланс при разложении полной мощности.

Поскольку мощность искажения является одной из составляющей полной реактивной мощности в системе, автору представляется правильным определять мощность искажения как алгебраическую разность уже известных неактивной мощности и мощности сдвига

$$Q_{II} = Q_H - Q_C. \quad (13)$$

При этом знак “плюс” для мощности искажения будет соответствовать ее “индуктивному характеру”, тогда как при $Q_C > Q_H$ мощность искажения будет иметь “емкостный” характер и будет уменьшать суммарную реактивную мощность в системе “источник питания - нагрузка”.

На рис. 1 приведены ток, напряжение и вольт-амперная характеристика для случая, когда и в токе и в напряжении присутствуют четная и нечетная гармоники:

$$u(t) = 300\sin \omega t + 100\sin 2\omega t + 100\sin 3\omega t ;$$

$$i(t) = 3,737\sin(\omega t - 51,34) + 0,74\sin(2\omega t - 68,2) + 0,513\sin(3\omega t - 75,1).$$

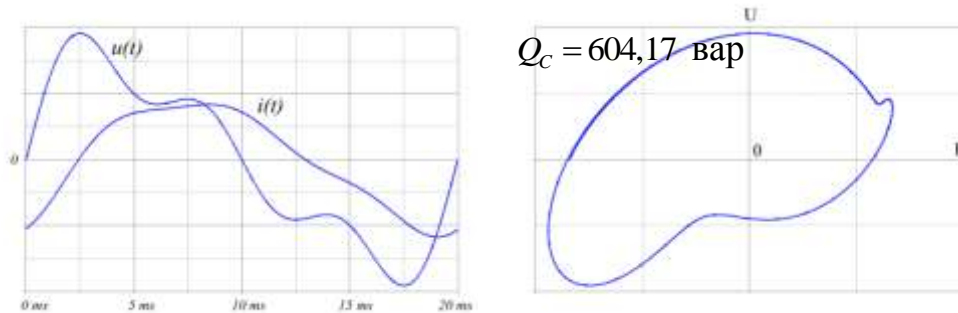


Рис. 1.

На рис. 2 приведены графики $u(t)$, $i(t)$, мгновенной $p(t)$ и активной мощности P , обратной мощности $p_{обр}(t)$ для этого же примера. Здесь же показаны значения интегралов за четверти периода по формулам (10).

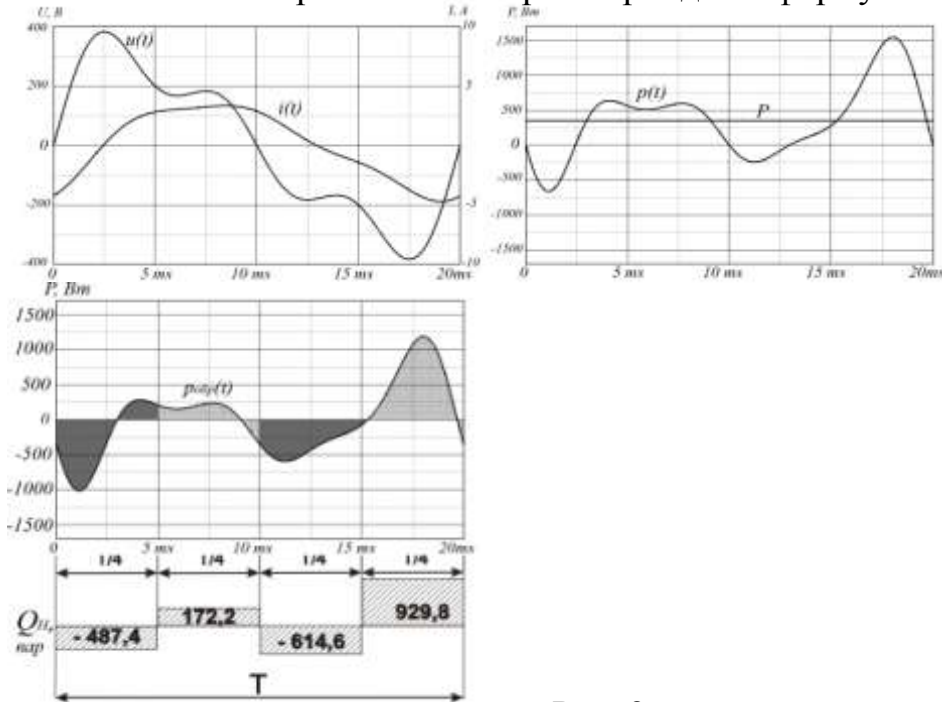


Рис. 2.

В таблице 1 приведены некоторые результаты расчетных экспериментов. По результатам экспериментов были сделаны выводы о том, что выбранные подходы определения неактивной мощности и ее составляющих, правильно, а мощность по Фризе не верно характеризуют энергообменные процессы в несинусоидальных режимах.

Показано, что влияние мощности искажения на неактивную мощность может быть как в сторону ее увеличения, так и сторону ее уменьшения, поэтому в общем случае учет мощности искажения принципиально необходим.

Таблица 1.

№ примера	Напряжение и ток	Активная мощность	Полная мощность	Реактивная мощность по фризе	Неактивная мощность	Мощность сдвига	Мощность искажения по (13)
		P , Вт	S , ВА	Q_F вар	Q_H вар	Q_C вар	Q_H вар
1	$u(t) = 300 \sin \omega t$ $i(t) = 3,8 \sin(\omega t - 54)$	335	570	461,1	461,1	461,1	0
2	$u(t) = 300 \sin \omega t + 100 \sin 3\omega t$ $i(t) = 3,8 \sin(\omega t - 54)$	335	600,8	498,7	616,6	461,1	155,5
3	$u(t) = 300 \sin \omega t$ $i(t) = 3,8 \sin(\omega t - 54) +$ $+0,513 \sin(3\omega t - 75,1)$	335	575,2	467,2	387,1	461,1	-74
3а	$u(t) = 300 \sin \omega t$ $i(t) = 3,8 \sin(\omega t - 54) +$ $+0,513 \sin(3\omega t + 75,1)$	335	575,2	467,2	535,1	461,1	74
4	$u(t) = 300 \sin \omega t + 100 \sin 3\omega t$ $i(t) = 3,8 \sin(\omega t - 54) +$ $+0,513 \sin(3\omega t - 75,1)$	341,6	606,3	500,9	550,8	535,5	15,3
5	$u(t) = 100 \sin 3\omega t$ $i(t) = 0,513 \sin(3\omega t - 75,1)$	25,65	6,6	24,7	8,256	74,36	-66,08
6	$u(t) = 300 \sin \omega t$ $i(t) = 0,513 \sin(3\omega t - 75,1)$	76,95	0	76,95	74	0	74
8	$u(t) = 300 \sin \omega t + 100 \sin 3\omega t$ $i(t) = 0,513 \sin(3\omega t - 75,1)$	81,11	6,6	80,84	65,88	74,36	-8,46
9	$u(t) = 100 \sin 3\omega t$ $i(t) = 3,8 \sin(\omega t - 54) +$ $+0,513 \sin(3\omega t - 75,1)$	191,7	6,6	191,6	163,7	74,36	89,36
12	$u(t) = 300 \sin \omega t +$ $+100 \sin 2\omega t + +100 \sin 3\omega t$ $i(t) = 3,8 \sin(\omega t - 54) +$ $+0,74 \sin(2\omega t - 68,2) +$ $+0,513 \sin(3\omega t - 75,1)$	647,6	355,4	541,4	551	604,2	-53,17

В третьем разделе описываются вычислительные эксперименты в трехфазных цепях. Трехфазные цепи могут быть как с заземленной, так и с изолированной нейтралью. При этом нулевая точка нагрузки может быть доступна или недоступна.

В трехфазных четырехпроводных цепях, когда нулевая точка нагрузки доступна, суммарные мощности сдвига и неактивные мощности трехфазной системы определяются очевидным образом:

$$\begin{aligned} Q_C^\Sigma &= Q_C^A + Q_C^B + Q_C^C; \\ Q_H^\Sigma &= Q_H^A + Q_H^B + Q_H^C. \end{aligned} \quad (14)$$

Здесь Q_C^Σ и Q_H^Σ - суммарная мощность сдвига и суммарная неактивная мощность трехфазной системы; Q_C^A, Q_C^B, Q_C^C , - мощности сдвига фаз А, В, С; Q_H^A, Q_H^B, Q_H^C , - неактивные мощности фаз А, В, С.

Получается что, связь суммарной мощности искажения трехфазной системы Q_H^Σ с мощностями искажений отдельных фаз (Q_H^A, Q_H^B, Q_H^C) даже при доступной нулевой точке не столь очевидна и требует дополнительных исследований. Можно предположить, что

$$Q_H^\Sigma = Q_H^A + Q_H^B + Q_H^C. \quad (15)$$

В трехфазных трехпроводных цепях, когда нулевой провод отсутствует, при несимметричной нагрузке или несимметричных питающих напряжениях нулевая точка будет смещаться относительно нуля источника, а фазные напряжения на нагрузках будут не равны фазным напряжениям питающей сети.

При недоступной нулевой точки нагрузки, когда мощности сдвига и неактивные мощности отдельных фаз трехфазной системы “в лоб” не могут быть определены, использование формулы (14) невозможно, поэтому предложено рассматривать трехпроводную трехфазную цепь как трехпроводную двухфазную, где роль нулевого провода играет третья фаза (в нашем случае фаза “С”).

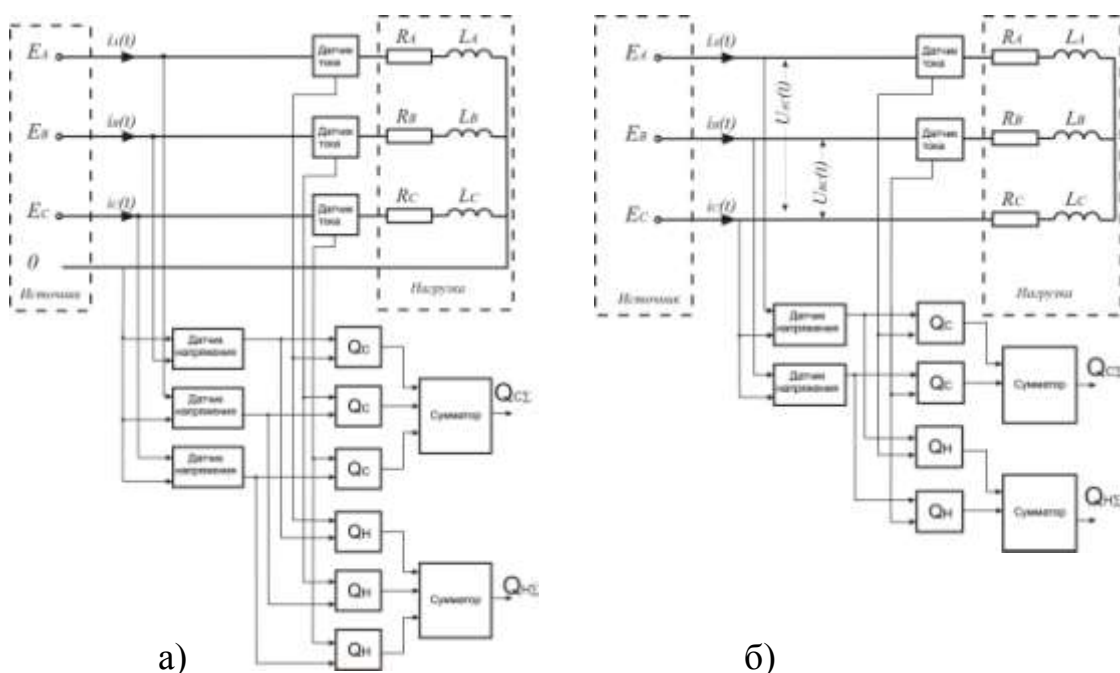


Рис. 3.

Расчеты ведутся по формулам:

$$\begin{aligned} Q_C^\Sigma &= Q_C^{AC} + Q_C^{BC}; \\ Q_H^\Sigma &= Q_H^{AC} + Q_H^{BC}. \end{aligned} \quad (16)$$

Здесь Q_C^{AC} , Q_C^{BC} и Q_H^{AC} , Q_H^{BC} - мощности сдвига и неактивные мощности двух искусственных фаз AC и BC.

На рис. 3 приведены схемы измерения для случая с доступной нулевой точкой (а) и для случая с недоступной нулевой точкой (б). Вычислительные эксперименты проводились по массивам мгновенным значений, полученным в результате моделирования электрической цепи в системе PSpice.

На рис. 4 и рис. 5 приведены осциллограммы токов и напряжений фаз для четырехпроводной и трехпроводной цепей, их вольт-амперные характеристики и результаты расчета для случая, когда симметричны нагрузки, но несимметричны несинусоидальные питающие напряжения

$$e_A(t) = 300\sin\omega t + 100\sin(2\omega t); \quad e_B(t) = 250\sin(\omega t - 120^\circ) + 80\sin(2\omega t - 240^\circ);$$

$$e_C(t) = 330\sin(\omega t + 120^\circ) + 110\sin(2\omega t + 240^\circ);$$

$$R_A = R_B = R_C = 50 \text{ Ом}; \quad L_A = L_B = L_C = 100 \text{ мГн}.$$

В таблицах 2 и 3 приведены результаты расчетов для этих примеров

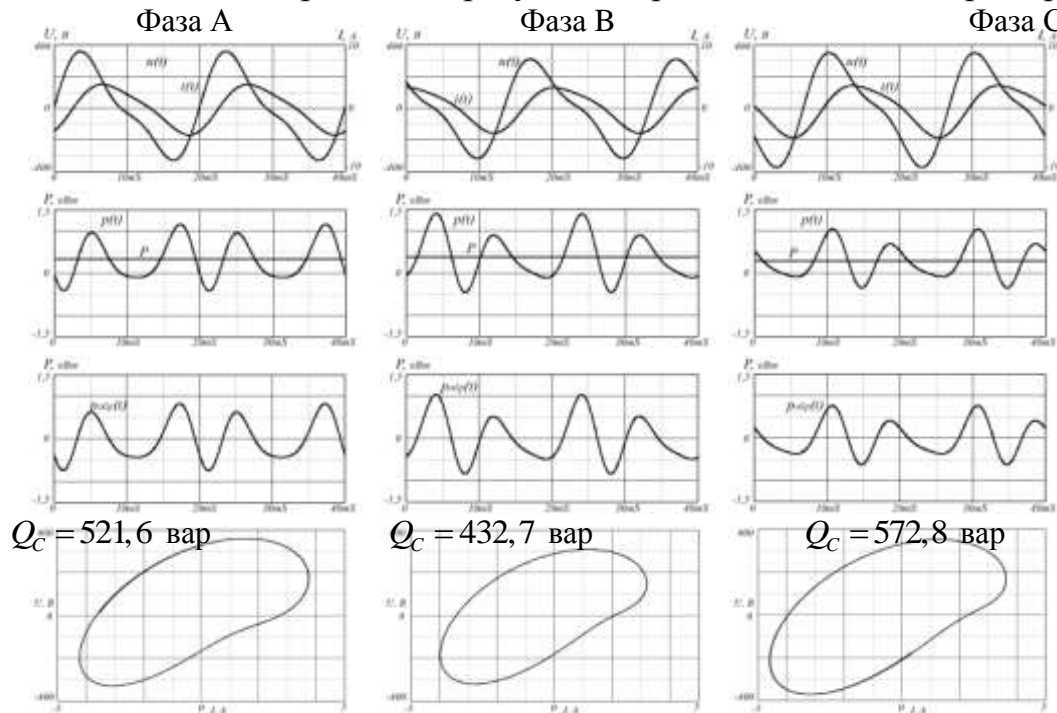


Рис. 4.

Таблица 2.

	Р	Qп	Qс	Qi
	Вт	вар	вар	вар
Фаза А	341,7	420	521,6	101,6
Фаза В	284,6	388,9	432,7	43,6
Фаза С	375,6	518,7	572,8	54,1
Для трехфазной системы	1001,9	1327,6	1527,1	199,5

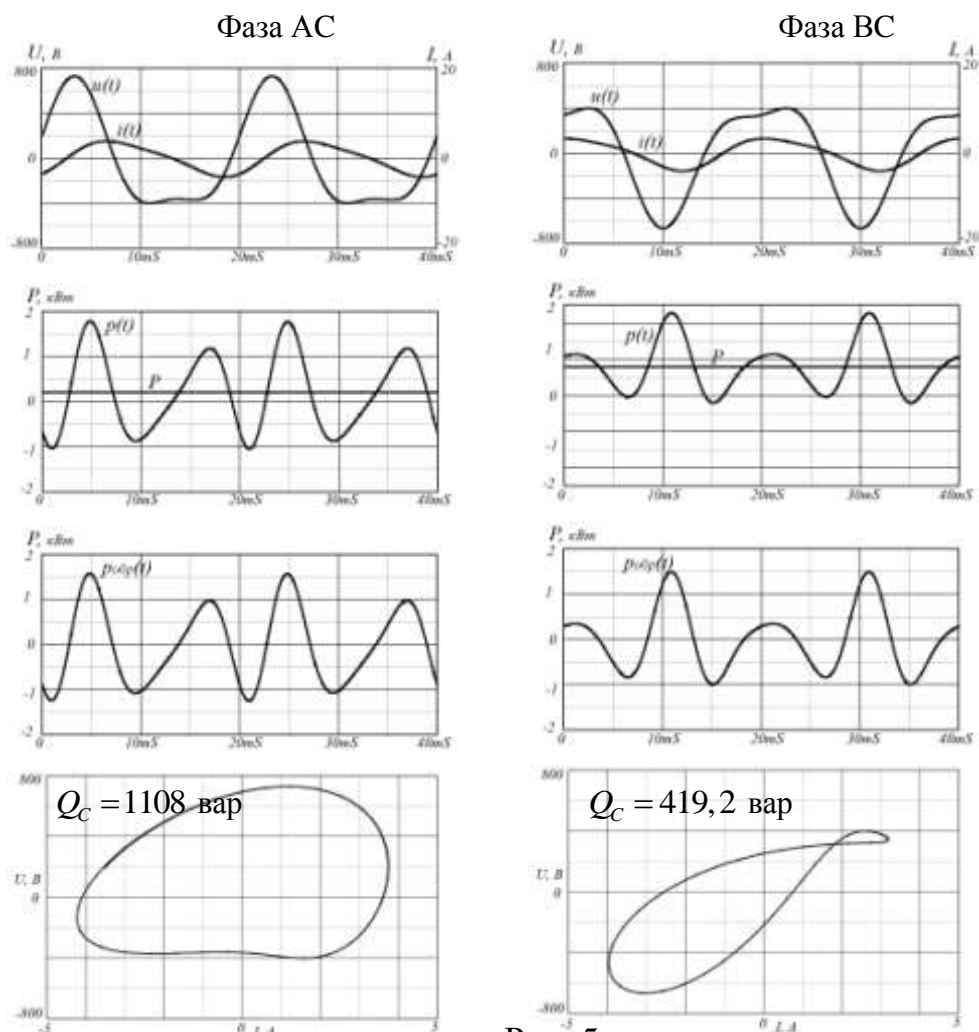


Рис. 5.

Таблица 3.

	Р	Qn	Qc	Qi
	Вт	вар	вар	вар
Фаза АС	206,4	754,6	1108	353,4
Фаза ВС	795,5	726,3	419,2	-307,1
Для трехфазной системы	1001,9	1480,9	1527,2	46,3

По результатам экспериментов были сделаны выводы:

1. При определении неактивной мощности подход, когда трехфазная трехпроводная цепь представляется как двухфазная трехпроводная, применим: при синусоидальном режиме как при симметрии, так и при несимметрии напряжений и токов по фазам; при наличии нечетных гармоник в токе и напряжении – при симметрии по фазам.

2. При наличии нечетных гармоник в токе и напряжении и наличии несимметрии по фазам, а также когда в токе и напряжении присутствуют четные гармоники, данный подход для определения неактивной мощности, не применим.

3. При определении мощности сдвига, такой подход во всех случаях (как при наличии, так и при отсутствии гармонических составляющих в

токах и напряжениях, а также при симметрии и несимметрии токов и напряжений по фазам) дает правильный результат.

В четвертом разделе приведены примеры использования разработанных методик определения неактивной мощности и ее составляющих в энергосистемах и проектно-конструкторских организациях. Здесь же обосновывается вывод о том, что в случаях, когда требуется определять один параметр, заменяющий параметр “реактивная мощность” предпочтительно использовать методику определения реактивной мощности сдвига по вольт-амперной характеристике.

Для современных счетчиков и измерительных преобразователей, имеющих общую, в некотором смысле унифицированную микропроцессорную структуру, выполнена программная реализация предложенных методик определения неактивной мощности, мощности сдвига и мощности искажения. Она представлена в виде исходного кода программы на языке C (Си):

```

const N;
double u[N], i[N];

double Ud() // Действующее значение
напряжения
{
    double Ud;
    Ud = 0;
    for(int k=0;k<N;++k)
    { Ud = Ud + u(k)*u(k);
    }
    Ud = sqrt(Ud/N);
    return Ud;
}

double Id() // Действующее значение тока
{
    double Id;
    Id = 0;
    for(int k=0;k<N;++k)
    { Id = Id + i(k)*i(k);
    }
    Id = sqrt(Id/N);
    return Id;
}

double P() // Активная мощность
{ double Pa;
    Pa = 0;
    for(int k=0;k<N;++k)
    { Pa = Pa + u(k)*i(k);
    }
    Pa = Pa/N;
    return Pa;
}

double Qn() // Неактивная мощность
{ double Q1, Q2, Q3, Q4;
    Q1=Q2=Q3=Q4= 0;
    for(int k=0;k<N;++k)
    {
        if(k<N/4)
            Q1 = Q1 + u(k)*i(k)-P;
        else
            if(k<N/2)
                Q2 = Q2 + u(k)*i(k)-P;
            else
                if(k<3*N/2)
                    Q3 = Q3 + u(k)*i(k)-P;
                else
                    if(k<N)
                        Q4 = Q4 + u(k)*i(k)-P;
    }
    Q1 = 2*(Q1+Q3)/N;
    Q2 = 2*(Q2+Q4)/N;
    return Q1;
}

double Qc() // Мощность сдвига
{ double Qc1;
    Qc1=0;
    for(int k=0;k<N;++k)
    {
        Qc1=Qc1+(u(k)-u(k+1))/(i(k)-i(k+1));
    }
    Qc1 = Qc1/(4*PI);
    return Qc1;
}

double Qi() // Мощность искажения
{
    return (Qn -Qc);
}

```

Приведена функциональная схема устройства для реализации предложенных методик с применением аналоговой измерительной техники.

Проведен сравнительный анализ получаемых значений: при использовании предлагаемых методик в счетчиках электрической энергии и при использовании традиционных решений (РМ первой гармоники, сдвига на 90 градусов). Показано, что разница между получаемыми значениями может достигать 50 %.

Рассмотрены вопросы использования предложенных методик определения неактивной мощности и ее составляющих при определении потерь мощности в линиях электропередач. Предложено определять потери очевидным образом – сравнением “входных” и “выходных” активных и неактивных мощностей

$$\begin{aligned} P_{\text{пот}} &= P_{\text{вх}} - P_{\text{вых}}; \\ Q_{\text{пот}} &= Q_{\text{вх}} - Q_{\text{вых}}. \end{aligned} \quad (17)$$

В работе приведены примеры использования такого подхода при оценке состояния ЛЭП и проведено сравнение со значениями, рассчитанными по классической формуле

$$\Delta P_{\text{ЛЭП}} = R_L \frac{P^2 + Q^2}{U^2}. \quad (18)$$

Аналогичный подход предлагается использовать для определения потерь в силовых трансформаторах. Приведены примеры использования такого подхода к определению потерь в силовых трансформаторах.

Примеры, приведенные в работе показывают, что данный подход к определению потерь мощности в ЛЭП и силовых трансформаторах полно и качественно отражает процессы в этих устройствах и его можно использовать при их функциональной диагностике. Учет мощности искажения, при определении потерь, позволяет повысить точность определения потерь на 5-10%.

В работе рассматриваются вопросы контроля уровня компенсации сети, под которым понимают отношение мощности установленных компенсирующих устройств к фактическому значению реактивной мощности определенному для данного режима. Такую оценку можно вести по коэффициенту мощности

$$\lambda = \cos \varphi = \frac{P}{S}; \quad (19)$$

или по коэффициенту реактивной мощности

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{Q}{P}. \quad (20)$$

Возможность реализации такого подхода покажем по экспериментальным данным, полученным для подстанции нефтяной магистрали. На рис. 6 приведены осциллограммы токов и напряжений трех фаз подстанции, здесь же построены их вольт-амперные характеристики.

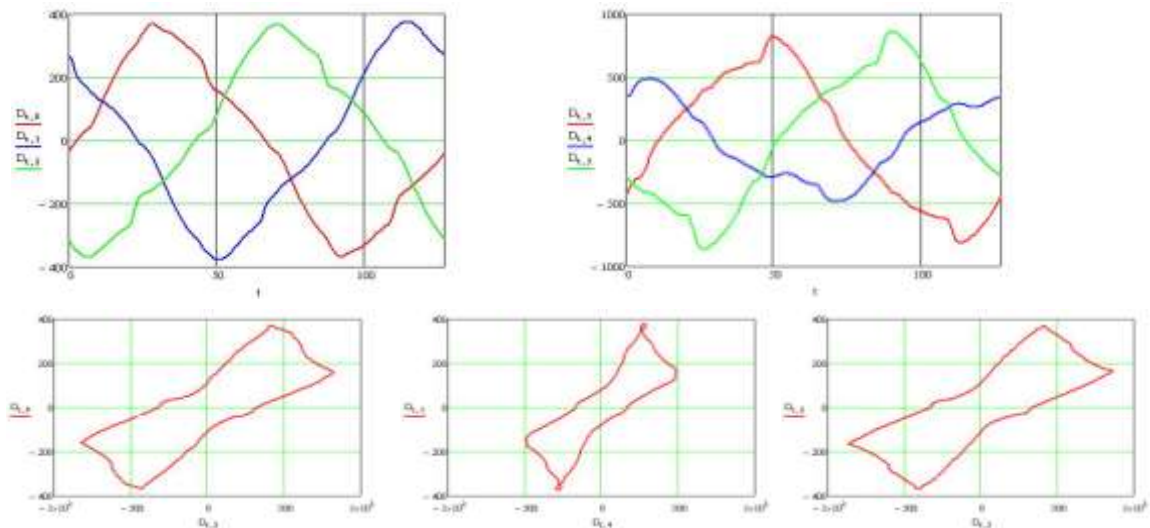


Рис. 6.

В таблице 4 приведены результаты расчетов мощностей. В таблице 5 приведены результаты расчетов коэффициентов мощности и коэффициентов реактивной мощности, определенных: через полную мощность ($\cos\varphi_1$ и $\operatorname{tg}\varphi_1$), через неактивную мощность ($\cos\varphi_2$ и $\operatorname{tg}\varphi_2$) и через реактивную мощность сдвига ($\cos\varphi_3$ и $\operatorname{tg}\varphi_3$) по формулам (21), (22), (23).

$$\cos\varphi_1 = S/P; \operatorname{tg}\varphi_1 = Q/P \quad (21)$$

$$\cos\varphi_2 = \frac{\sqrt{P^2 + Q_H^2}}{P}; \operatorname{tg}\varphi_2 = Q_H/P \quad (22)$$

$$\cos\varphi_3 = \frac{\sqrt{P^2 + Q_C^2}}{P}; \operatorname{tg}\varphi_3 = Q_C/P \quad (23)$$

Для трехфазной системы были рассчитаны усредненные значения коэффициентов мощности и коэффициентов реактивной мощности по формулам:

$$\cos\varphi_{cp} = \frac{S_A + S_B + S_C}{P_A + P_B + P_C}; \operatorname{tg}\varphi_{cp} = \frac{Q_A + Q_B + Q_C}{P_A + P_B + P_C} \quad (24)$$

Таблица 4.

	U В	I А	P кВт	S кВА	Q квар	Qн квар	Qс квар	Qi квар
Фаза А	229,5	503,3	90,6	115,5	71,6	32,3	61,1	-28,8
Фаза В	233,7	302,3	56,7	70,7	42,1	13,5	29,6	-16,1
Фаза С	230,1	504,8	87,6	116,6	76,9	41,6	62,2	-20,6
Три Фазы			234,9	302,8	190,6	87,4	152,9	-65,5

Таблица 5.

	$\text{tg}\varphi_1$	$\text{Cos}\varphi_1$	$\text{tg}\varphi_2$	$\text{Cos}\varphi_2$	$\text{tg}\varphi_3$	$\text{Cos}\varphi_2$
Фаза А	0,79	0,784	0,357	0,784	0,674	0,829
Фаза В	0,743	0,802	0,238	0,972	0,522	0,886
Фаза С	0,878	0,751	0,475	0,903	0,71	0,815
Усредненные значения	0,811	0,776	0,372	0,937	0,65	0,838

Полученные по предлагаемой методике значения уровня компенсации сети отличаются от полученных традиционным путем на 10%, а в отдельных случаях на 20 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

1. Проведен анализ существующих методов определения неактивной, в том числе и реактивной мощности при синусоидальных и(или) несинусоидальных токах и напряжениях. Обращено внимание на отсутствие строгих и достаточно универсальных подходов к решению всего круга задач по определению неактивной мощности и ее составляющих.

2. Обосновано теоретически и экспериментально подтверждена методика определения мощности искажения в однофазной цепи как разность между неактивной мощностью и реактивной мощностью сдвига, рассчитанной по площади вольтамперной характеристики, построенной по мгновенным значениям токов и напряжений.

3. Предложена и экспериментально подтверждена методика определения неактивной мощности, реактивной мощность сдвига и мощности искажения в четырехпроводной трехфазной цепи как сумма соответствующих составляющих для каждой из трех фаз.

4. Разработана и экспериментально подтверждена методика определения суммарных неактивной мощности, реактивной мощность сдвига и мощности искажения в трехпроводных трехфазных цепях как соответствующие мощности в трехпроводных двухфазных цепях.

5. Разработана программная реализация всех предложенных процедур в микропроцессорных измерительных устройствах и разработана функциональная структура аналогового измерительного устройства.

6. Предложены и проверены, на большом количестве реальных примеров, процедуры определения потерь мощностей в ЛЭП и силовых трансформаторах как разности соответствующих входных и выходных мощностей. Показано, что полученные при этом значения являются более достоверными, а отличие от значений, полученных классическим расчетом, может достигать десяти процентов.

7. Показано, что использованием предложенных методик определения неактивной мощности и ее составляющих для определения уровня компенсации реактивной мощности позволяет повысить точность определения данного параметра в среднем на 10 %.

Основное содержание диссертации изложено в следующих публикациях

Статьи в рецензируемых периодических изданиях по перечню ВАК.

1. Сулайманов А.О., Гольдштейн Е.И. Определение неактивной мощности и ее составляющих по массивам мгновенных значений токов и напряжений. // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308. – № 7. – С. 82–86.
2. Гольдштейн Е.И., Сулайманов А.О., Бацева Н.Л. Спектральный анализ токов (напряжений) в однофазных и трехфазных цепях с помощью вольт-амперных характеристик. // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308. – № 7. – С. 80–82.

Патенты РФ на изобретения, патенты РФ на полезные модели.

3. Пат. 2223509 РФ, МПК7 G01R 21/06. Способ измерения мощности искажения в однофазной цепи переменного тока / Гольдштейн Е.И., Сулайманов А.О.. Заявлено 29.04.2002; Оpubл. 02.10.2004. – Бюл № 4 – 2004 – 4 с.: ил.
4. Пат. РФ 2263322, МПК7 G 01 R 21/00. Способ определения коэффициента мощности с трехфазной трехпроводной цепи переменного тока/ Гольдштейн Е.И., Сулайманов А.О. С приоритетом от 07.06.2004. Оpubл. 27.10.2005, Бюл. № 31.
5. Пат. РФ 2264630 РФ, МПК7 G 01 R 25/00. Способ определения сдвига фаз между двумя синусоидальными сигналами/ Гольдштейн Е.И., Сулайманов А.О., Бацева Н.Л. С приоритетом от 31.03.2004. Оpubл. 20.11.2005, Бюл. № 32.
6. Пат. РФ 2264631 РФ, МПК7 G 01 R 25/00. Способ определения сдвига фаз между двумя синусоидальными сигналами/ Гольдштейн Е.И., Сулайманов А.О., Бацева Н.Л. С приоритетом от 31.03.2004. Оpubл. 20.11.2005, Бюл. № 32.
7. Св-во на полезную модель № 27340 РФ, 7 G 01 R 21/00, 22/00. Устройство для измерения мощности искажения в однофазной цепи переменного тока/ Гольдштейн Е.И., Сулайманов А.О. Заявлено 29.04.2002; Оpubл. 20.10.2004. – БИПМ № 29(III г.). – 2004.
8. Пат. на ПМ 39407 РФ, МПК7 G 01 R 25/00. Устройство для измерения сдвига фаз между двумя синусоидальными сигналами/ Гольдштейн Е.И., Сулайманов А.О., Бацева Н.Л., Панкратов А.В. Заявлено 31.03.2004; Оpubл. 27.07.2004, БИПМ. № 21(III г.) – 2004.
9. Пат. на ПМ 39408 РФ, МПК7 G 01 R 25/00. Устройство для измерения сдвига фаз между двумя синусоидальными сигналами/ Гольдштейн Е.И., Сулайманов А.О., Бацева Н.Л., Панкратов А.В. Заявлено 31.03.2004; Оpubл. 27.07.2004, БИПМ, № 21(III г.) – 2004.

10. Пат. на ПМ 41158 РФ, МПК7 G 01 R 21/00. Устройство для измерения коэффициента мощности в трехфазной трехпроводной цепи переменного тока./ Гольдштейн Е.И., Сулайманов А.О. Заявлено 07.06.2004; Опубл. 10.10.2004, БИПМ, № 28(III г.) – 2004.
11. Пат. на ПМ 41373 РФ, МПК7 G 01 R 21/00. Устройство для измерения реактивной мощности сдвига в трехфазной трехпроводной цепи переменного тока./ Гольдштейн Е.И., Сулайманов А.О. Заявлено 07.06.2004; Опубл. 20.10.2004, БИПМ, № 29(III г.) – 2004.

Другие публикации

12. Сулайманов А.О. Реактивная мощность в несинусоидальных режимах однофазной цепи. // Современные техника и технологии: Труды восьмой международной научно практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск: ТПУ.– 2002. – Т. 1. С. 62–63.
13. Гольдштейн Е.И., Сулайманов А.О., Бацева Н.Л. Использование циклической вольт-амперной характеристики при экспериментальных исследованиях электротехнических устройств и систем // Проблемы современной радиоэлектроники и систем управления: Труды Всеросс. научно-практ. конф. – Томск. – 2002. – С. 42–44.
14. Гольдштейн Е.И., Сулайманов А.О., Ли Д.В. Определение периода и реактивной мощности в электромеханических устройствах при несинусоидальных токах и напряжениях. // Вестник УГТУ – УПИ №5 (25). Электромеханические и электромагнитные преобразователи энергии и управляемые электромеханические системы. Сборник статей. – Екатеринбург. – 2003. – Часть 1. С. 330–333.
15. Goldshtein E., Batseva N., Sulaimanov A., Valov B. Ein Berechnungsverfahren von Lastcharakteristika durch Momentanwerte von Stroumen und Spannungen // Tagungsband 48. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium (Ilmenau, 22-25 sept. 2003). – Ilmenau: Technische Universitaet Ilmenau, 2003. – p. 575–576.
Перевод: Е.И. Гольдштейн, Н.Л. Бацева, А.О. Сулайманов, Б.М. Валов. Использование массивов мгновенных значений тока и напряжения при расчете мощностей нагрузок // Сборник тезисов докладов 48-го Международного научного коллоквиума (Ильменау, 22–25 сентября, 2003). – Ильменау: Технический университет Ильменау. – 2003. – С. 575–576.
16. Функциональный контроль и диагностика электротехнических и электромеханических систем и устройств по цифровым отсчетам мгновенных значений тока и напряжения. / В.С. Авраамчук, Н.Л. Бацева, Е.И. Гольдштейн, И.Н. Исаченко, Д.В. Ли, А.О. Сулайманов, И.В. Цапко // Под ред. Е.И. Гольдштейна. Томск: Печатная мануфактура. – 2003.

17. Гольдштейн Е.И., Сулайманов А.О. Определение потерь энергии в мощных трансформаторах электрических сетей. // “Электроэнергия и будущее цивилизации”, материалы международной научно-технической конференции. Томск – 2004. – с. 313-316
18. Сулайманов А.О. Моделирование процедур определения реактивной мощности при несинусоидальных режимах. // “Состояние и перспективы развития энерготехнологий”, материалы международной научно-технической конференции. Иваново. – 2005. – Том 1. – С. 83–84.
19. Сулайманов А.О., Гольдштейн Е.И. Определение неактивной мощности и ее составляющих по массивам мгновенных значений токов и напряжений. // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308. – № 7. – С. 82–86.
20. Гольдштейн Е.И., Сулайманов А.О., Бацева Н.Л. Спектральный анализ токов (напряжений) в однофазных и трехфазных цепях с помощью вольт-амперных характеристик. // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308. – № 7. – С. 80–82.
21. Джумик Д.В., Гольдштейн Е.И., Бацева Н.Л., Кац И.М., Панкратов А.В., Радаев Е.В., Сулайманов А.О. Функциональный контроль и диагностирование электроэнергетических систем и их элементов // Системы электроснабжения с возобновляемыми источниками энергии: Матер. Междунар. научно-техн. семинара. – Томск: Изд-во ТПУ. – 2006. – С. 98–108.
22. Гольдштейн Е.И., Сулайманов А.О., Гурин Т.С. Мощностные характеристики электрических цепей при несинусоидальных токах и напряжениях. ТПУ, – Томск, 2009, Деп. в ВИНТИ, 06.04.09, № 193 – 2009. – 146 с.
23. Гольдштейн Е.И., Сулайманов А.О. Вопросы технического учета мощностей и энергий по массивам мгновенных значений токов и напряжений, собираемых с помощью регистраторов электрических процессов // Энергетика. Инновационные направления в энергетике. CALS-технологии в энергетике: Матер. II Всеросс. Научно-тех. Интернет-конференции. – Изд-во Пермского ГТУ. – 2009. – С. 142–144.