

Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого

Институт энергетики и транспортных систем

На правах рукописи



Ву Куанг Ши

Новые методы и оптимизации режимов работы трехфазных сетей

Направление подготовки 13.06.01 Электро- и теплотехника

Код и наименование

Направленность 13.06.01 04 Теоретическая электротехника

Код и наименование

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

об основных результатах научно-квалификационной работы (диссертации)

Автор работы: Ву Куанг Ши
Научный руководитель: проф.,
д.т.н., Коровкин Н.В.

Санкт Петербург – 2018

Научно-квалификационная работа выполнена в ВШ/на кафедре «Теоретическая электротехника и электромеханика» Института Энергетики и Транспортных Систем федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Директор ВШ/зав. кафедрой: – *Коровкин Николай Владимирович* –
профессор, доктор технических наук

Научный руководитель: – *Коровкин Николай Владимирович* –
профессор, доктор технических наук

Рецензент: – *Нетребя Кирилл Иванович* –
Ген. Директор ООО Айдис Технологии

С научным докладом можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте Электронной библиотеки СПбПУ по адресу: <http://elib.spbstu.ru>

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Типичной причиной неуравновешенности трехфазных систем является неравномерное распределение нагрузок по фазам. Обеспечить равномерное распределение нагрузок достаточно сложно уже на этапе рабочего проекта питания энергообъекта из-за нагрузок, непредсказуемо изменяющихся во времени. Ситуация усложняется постоянным ростом спроса на электроэнергию, усложнением систем распределения и их постоянной модификацией. Изменения режима потребления некоторыми нагрузками могут привести к ухудшению качества электроэнергии, поставляемой другим потребителям. Чрезмерный дисбаланс (здесь - значительная доля нулевой и обратной последовательностей в напряжениях и токах трехфазной сети) в напряжениях и(или) токах трехфазной системы всегда был предметом озабоченности энергетиков. Последствия дисбаланса могут быть отрицательными как для однофазных, так и для трехфазных электрических приемников. Фактически, уровни нулевой и обратной последовательностей являются одними из основных показателей качества электроэнергии.

Еще одно важное следствие дисбаланса – появление так называемой несбалансированной мощности, порождающей пульсации электромагнитного момента двойной частоты на валах вращающихся электрических машин, существенно сокращающего, в частности, время между необходимыми процедурами их обслуживания

Существенные изменения степени несимметричности трехфазной системы может происходить достаточно часто во времени. Например, раз в несколько минут, как это происходит в рассматриваемом далее энергетическом объекте. Поэтому актуальна разработка таких подходов и устройств, которые смогут осуществлять симметризацию трехфазной сети в реальном масштабе времени.

Современной тенденцией в развитии электроэнергетического оборудования является широкое использование в нем микропроцессоров, позволяющее, в частности, за счет повышения «интеллектуальности» устройств существенно снизить их габариты и стоимость при одновременном повышении и функциональности, и надежности. Это направление поддерживается в настоящей работе, где значительное усложнение алгоритма управления устройством, требующее использования мощного микропроцессора, учет при управлении «системного эффекта» дает возможность упростить и удешевить его силовую часть.

Цель и задачи исследования состоит в развитии методов и средств управления качеством электроэнергии в трехфазных системах электроснабжения промышленных и гражданских объектов.

Научная новизна

Введении дробно-полиномиальных функции, описывающих зависимости основных величин трехфазных электрических систем (токи и напряжения) от параметров схем замещения этих систем, в которых порядки полиномов числителя и знаменателя совпадают с числом используемых компенсирующих устройств;

Алгоритмах симметризации, использующих для компенсации несимметрии двухфазное устройство, улучшающее симметричность режима всей рассматриваемой трехфазной системы, а не только нагрузки, вблизи которой оно установлено.

Теоретическая и практическая значимость

1. На основе предложенного подхода решена задача симметризации трехфазной сети стекольного завода.

2. Предложенный подход позволяет уменьшить количество компенсирующих устройств в каждом узле, тем самым снижая затраты на систему компенсации по сравнению с традиционными методами, а также снизить затраты на техническое обслуживание.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на:

1. Международной научно–практической конференции Recent Advances in Mathematical Methods in Applied Sciences, 2014, СПб.
2. Международной научно–практической конференции IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIconRusNW), 2016, СПб.

Публикации

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 5 печатных работах, в том числе в периодических рецензируемых российских изданиях, входящих в список ВАК – 2 работы и в список Scopus – 2 работы.

Представление научного доклада: основные положения

1. Метод теоретического анализа несимметричных режимов работы трехфазных систем.
2. Анализ соотношений для быстрого вычисления зависимостей токов и напряжений трехфазной системы от реактанса компенсаторов;
3. Проверку точности этих соотношений.
4. Применение этих соотношений в оптимизации режимов работы трехфазных систем.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении раскрыта актуальность темы, сформулирована цель и задачи исследования, представлены основные положения, выносимые на защиту диссертации.

В первой главе выполнили анализ соотношений для быстрого вычисления зависимостей токов и напряжений трехфазной системы от реактанса компенсаторов и проверку точности этих соотношений

В второй главе применение этих соотношений в оптимизации режимов работы трехфазных систем.

Объекты, (предмет) и методы исследования

Объект исследования

Распределительные трехфазные сети 10/0.4 кВ.

Предметом исследования

Способы симметризации трехфазных систем электроснабжения промышленных и гражданских объектов.

Метод исследования

При выполнении работы были использованы методы теоретической электротехники, теории многокритериальной оптимизации, недоминируемая сортировка и генетический алгоритм. Теоретические исследования сочетались с измерениями и компьютерным моделированием с помощью пакета прикладных программ Matlab.

Результаты и их обсуждение

Основным прикладным объектом исследования в настоящей работе являются распределительные сети 10/0.4 кВ стекольного завода, упрощенная схема трехфазной сети которого представлена на рис. 1. Амплитуды прямой, обратной и нулевой последовательностей токов, которые появляются в трехфазной сети завода при работе мощных однофазных нагрузок (печей),

рассматриваются нами как целевые функции (критерии) при оптимизации режима сети. При этом амплитуда прямой последовательности максимизируется, а амплитуды обратной и нулевой последовательностей минимизируются. При многокритериальной оптимизации мы использовали модификацию NSGA (non-dominated sorting genetic algorithm) многоцелевого генетического алгоритма, аналогичные результаты могут быть поручены и с применением модификации SPEA или иных [7-13].

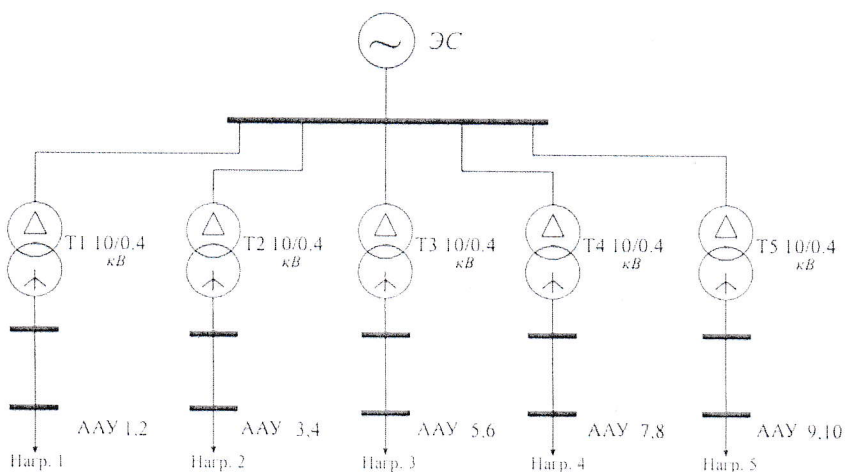


Рис. 1 Электрическая система стекольного завода.

Многокритериальная оптимизация с использованием NSGA ресурснозатратная процедура, реализация которой даже для относительно простых трехфазных систем в реальном масштабе времени невозможны на современных микропроцессорах (и, маловероятно, что такая возможность появится в ближайшее десятилетие). Поэтому в начале статьи мы приводим ряд соотношений, позволяющих на несколько порядков ускорить оценивание целевых функций. Так как эти соотношения новые, мы включили в статью краткое исследование их погрешности, выполненное для достаточно сложной трехфазной системы и подтверждающее корректность их использования.

В следующем разделе статьи мы применяем эти исследованные выше соотношения для многокритериальной оптимизации режима работы трехфазной сети стекольного завода. Оптимизация выполняется в два этапа. На первом определяется наилучшие места для установки однофазных компенсаторов (устройств с переменным реактансом). На втором, предлагается алгоритм управления этими устройствами, обеспечивающий наилучший с точки зрения выбранных критериев режим.

В заключении мы приводим результаты изменения (в течении суток) токов и напряжений прямой, обратной и нулевой последовательностей до и после компенсации для упомянутого выше стекольного завода. Эти результаты наглядно показывают, что для удовлетворительной симметризации достаточно двух однофазных компенсаторов.

Соотношения для быстрого вычисления зависимостей токов и напряжений трехфазной системы от реактанса компенсаторов

Пусть, для определенности, в трехфазной системе установлено два однофазных компенсатора. Для вычисления (оценивания) значений выбранных нами критериев (напомним, это амплитуды прямой, обратной и нулевой последовательностей токов) при произвольных значениях реактансов x_1, x_2 компенсаторов необходимо определить токи и напряжения в трехфазной системе. В работах [10, 11] обоснован следующий вид этих зависимостей:

$$\dot{U}_n^{(k)}(x_1, x_2) = \frac{a_{u,n}^{(k)} + b_{u,n}^{(k)}x_1 + c_{u,n}^{(k)}x_2 + d_{u,n}^{(k)}x_1x_2}{1 + \alpha x_1 + \beta x_2 + \gamma x_1x_2}, \quad (1)$$

$$\dot{I}_n^{(k)}(x_1, x_2) = \frac{a_{i,n}^{(k)} + b_{i,n}^{(k)}x_1 + c_{i,n}^{(k)}x_2 + d_{i,n}^{(k)}x_1x_2}{1 + \alpha x_1 + \beta x_2 + \gamma x_1x_2}, \quad (2)$$

где $k = \overline{1, N}$, N – количество узлов трехфазной системы $n = A, B, C$ – индексы фазы, и $\alpha, \beta, \gamma, a_{u,n}^{(k)}, b_{u,n}^{(k)}, c_{u,n}^{(k)}, d_{u,n}^{(k)}, a_{i,n}^{(k)}, b_{i,n}^{(k)}, c_{i,n}^{(k)}, d_{i,n}^{(k)}$ – константы, зависящие от чисел k . Коэффициенты α, β и γ в выражении напряжения и тока является одинаковым для всех ветвей системы. Все константы являются комплексными числами.

Определение констант $\alpha, \beta, \gamma, a_{u,n}^{(k)}, \dots, d_{i,n}^{(k)}$, выполняется в реальном масштабе времени. В силу того, что x_1, x_2 постоянно изменяются выделим из множества их значений семь попарно линейно-независимых наборов $\{x_{1,s}, x_{2,s}\} \quad s = \overline{1, 7}$ и измерим им токи $\dot{I}_{n,\varnothing,s}^{(k)} \quad k = \overline{1, N}$ и напряжения $\dot{U}_{n,\varnothing,s}^{(k)} \quad k = \overline{1, N}$. Предполагаем, что варьируемые реактансы размещены в некоторых ветвях с номерами p и q , одинаковыми для всех $s = \overline{1, 7}$. Далее для определения констант $\alpha, \beta, \gamma, a_{u,n}^{(k)}, \dots, d_{i,n}^{(k)}$ необходимо решить N систем линейных уравнений 7-го порядка, одна из которых показана ниже для некоторого тока $\dot{I}_n^{(k)}$.

$$\begin{bmatrix} 1 & x_{1,1}^{(p)} & x_{2,1}^{(q)} & x_{1,1}^{(p)} x_{2,1}^{(q)} & -\dot{I}_{n,\mathcal{D},1}^{(k)} x_{1,1}^{(p)} & -\dot{I}_{n,\mathcal{D},1}^{(k)} x_{2,1}^{(q)} & -\dot{I}_{n,\mathcal{D},1}^{(k)} x_{1,1}^{(p)} x_{2,1}^{(q)} \\ 1 & x_{1,2}^{(p)} & x_{2,2}^{(q)} & x_{1,2}^{(p)} x_{2,2}^{(q)} & -\dot{I}_{n,\mathcal{D},2}^{(k)} x_{1,2}^{(p)} & -\dot{I}_{n,\mathcal{D},2}^{(k)} x_{2,2}^{(q)} & -\dot{I}_{n,\mathcal{D},2}^{(k)} x_{1,2}^{(p)} x_{2,2}^{(q)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_{1,7}^{(p)} & x_{2,7}^{(q)} & x_{1,7}^{(p)} x_{2,7}^{(q)} & -\dot{I}_{n,\mathcal{D},7}^{(k)} x_{1,7}^{(p)} & -\dot{I}_{n,\mathcal{D},7}^{(k)} x_{2,7}^{(q)} & -\dot{I}_{n,\mathcal{D},7}^{(k)} x_{1,7}^{(p)} x_{2,7}^{(q)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_{i,n}^{(k)} \\ b_{i,n}^{(k)} \\ c_{i,n}^{(k)} \\ d_{i,n}^{(k)} \\ \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{I}_{n,\mathcal{D},1}^{(k)} \\ \dot{I}_{n,\mathcal{D},2}^{(k)} \\ \vdots \\ \dot{I}_{n,\mathcal{D},7}^{(k)} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Аналогично, можно найти коэффициенты $a_{u,n}^{(k)}$, $b_{u,n}^{(k)}$, $c_{u,n}^{(k)}$, $d_{u,n}^{(k)}$:

$$\begin{bmatrix} 1 & x_{1,1}^{(p)}(1-\alpha\dot{U}_{n,\mathcal{D},1}^{(k)}) & x_{2,1}^{(q)}(1-\beta\dot{U}_{n,\mathcal{D},1}^{(k)}) & x_{1,1}^{(p)}x_{2,1}^{(q)}(1-\gamma\dot{U}_{n,\mathcal{D},1}^{(k)}) \\ 1 & x_{1,2}^{(p)}(1-\alpha\dot{U}_{n,\mathcal{D},2}^{(k)}) & x_{2,2}^{(q)}(1-\beta\dot{U}_{n,\mathcal{D},2}^{(k)}) & x_{1,2}^{(p)}x_{2,2}^{(q)}(1-\gamma\dot{U}_{n,\mathcal{D},2}^{(k)}) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_{1,4}^{(p)}(1-\alpha\dot{U}_{n,\mathcal{D},4}^{(k)}) & x_{2,4}^{(q)}(1-\beta\dot{U}_{n,\mathcal{D},4}^{(k)}) & x_{1,4}^{(p)}x_{2,4}^{(q)}(1-\gamma\dot{U}_{n,\mathcal{D},4}^{(k)}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_{u,n}^{(k)} \\ b_{u,n}^{(k)} \\ c_{u,n}^{(k)} \\ d_{u,n}^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{U}_{n,\mathcal{D},1}^{(k)} \\ \dot{U}_{n,\mathcal{D},2}^{(k)} \\ \vdots \\ \dot{U}_{n,\mathcal{D},4}^{(k)} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Определение констант $a_{u,n}^{(k)}$, $b_{u,n}^{(k)}$, $c_{u,n}^{(k)}$, $d_{u,n}^{(k)}$ из (4) не является единственно возможным. Действительно, выражения (2) для токов уже получены, поэтому константы $a_{u,n}^{(k)}$, $b_{u,n}^{(k)}$, $c_{u,n}^{(k)}$, $d_{u,n}^{(k)}$ могут быть найдены из законов Кирхгофа без решения систем уравнений, но алгоритм их определения в общем случае производимой трехфазной системы несколько усложнится. Использование (4), по нашему мнению, разумная альтернатива усложнению алгоритма.

Отметим, что формально, выражения (1) и (2) являются точными в том смысле, что токи и напряжения, вычисленные по ним, совпадают с точностью машинной арифметики с токами и напряжениями, вычисленными из уравнений Кирхгофа. Однако, процедура измерений на практике такова, что каждое новое значение $x_{1,s}$, $x_{2,s}$ измеряется, вообще говоря, при новом значении нагрузок трехфазной системы. Современные средства измерений позволяют определять действующие значения токов и напряжений 50-200 раз в секунду и мы далее предполагаем, что за время, необходимое для получения семи попарно линейно-независимых наборов нагрузки меняются несущественно. Тем не менее, даже эти их изменения переводят соотношения (1), (2) в разряд приближенных, что, в свою очередь, требует оценки их потности.

Проверка точности соотношений

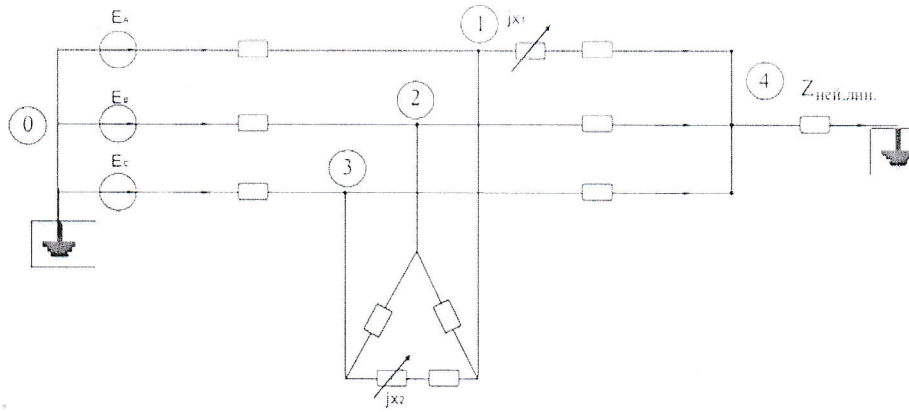


Рис. 2 Схема для оценки точности соотношений (1)-(2)

В трехфазной цепи, представленной на рис. 2 токи и напряжения ветвей определялись двумя способами: из законов Кирхгофа (точный расчет трехфазной цепи – способ 1) и из соотношений (1)-(2) – способ 2.

Введем в рассмотрение функции $g_l(x_1, x_2) = \{i_{l,n}^{(k)}(x_1, x_2) \text{ или } \dot{U}_{l,n}^{(k)}(x_1, x_2)\}$; $k = \overline{1, N}$; $l = 1, 2$ – номер способа вычисления и относительную погрешность $\varepsilon(x_1, x_2)$ их вычислений различными способами:

$$\varepsilon(x_1, x_2) = \left| \frac{|g_1(x_1, x_2)| - |g_2(x_1, x_2)|}{|g_1(x_1, x_2)|} \right| \cdot 100\%.$$

Опишем далее «способ 2». Рассмотрим некоторую модель поведения нагрузок во времени. Пусть некоторая нагрузка имеет в момент времени $t=t_0$ модуль комплексного сопротивления $z_0 = z_0(t_0) = |Z(t_0)|$ (см. рис. 3), далее эта величина изменяется во времени, принимая последовательно случайные, но ограниченные сверху и снизу значения $z_1 = |Z(t_1)|, z_2, z_3, \dots, z_Q, Q > 7$.

При этом обозначим через

$$Dz = \max_{k=1, Q} \{z_k - z_0\}.$$

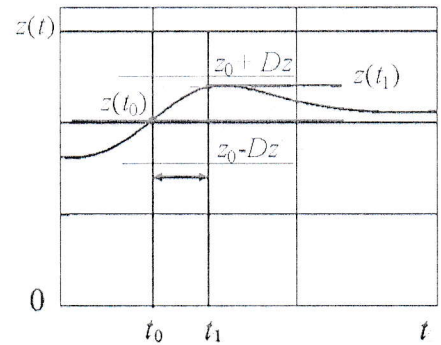


Рис. 3 Изменение нагрузки во времени

Независимо от изменений нагрузок в некоторые моменты времени случайно выбранные из набора моментов времени $t_k, (0 < k < Q)$ будем изменять x_1 и x_2 так, чтобы получить семь попарно линейно независимых наборов $\{x_{1,s}, x_{2,s}\} s = \overline{1, 7}$, необходимых для определения констант $\alpha, \beta, \gamma, a_{u,n}^{(k)}, \dots, d_{i,n}^{(k)}$. Запишем уравнения (3)-(4) и определим все константы,

включая и $a_{u,n}^{(k)}, b_{u,n}^{(k)}, c_{u,n}^{(k)}, d_{u,n}^{(k)}$. Далее по соотношениям (1)-(2) найдем $g_2(x_1, x_2)$.

Для определения $g_1(x_1, x_2)$, как уже отмечалось, достаточно воспользоваться уравнениями Кирхгофа. Поэтому дальнейшее определение $\varepsilon(x_1, x_2)$ не вызывает проблем. Однократное вычисление $\varepsilon(x_1, x_2)$ в силу случайности нагрузок не дает адекватной характеристики точности соотношений (1)-(2). Однако, в вычислительном эксперименте можно выполнить многократное вычисление $\varepsilon(x_1, x_2)$ (например, 10^5 раз) с последующим усреднением результата и получением среднеквадратичной погрешности. Именно такой подход позволил нам получить связь динамических характеристик нагрузки (фактически, это величина Dz) с погрешностью соотношений (1)-(2). Эти зависимости представлены на рисунках 4-6 для токов $\varepsilon_{RMS,I}$, напряжений $\varepsilon_{RMS,U}$, для различных Dz и для различных x_1 и x_2 .

Интерес представляет и среднее значение погрешности ε_{RMS} , приведенное в таблице 1 отдельно для токов $\varepsilon_{RMS,I}$ и напряжений $\varepsilon_{RMS,U}$.

$$\varepsilon_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{p} \frac{1}{q} \sum_{h=1}^p \sum_{k=1}^q \varepsilon^2(x_1^{(h)}, x_2^{(k)})}, \quad dz = \frac{Dz}{z_0} \cdot 100\%.$$

Таблица 1. Погрешности соотношений (1)-(2) при различных уровнях dz

	$dz, \%$		
	0	0.5	1
$\varepsilon_{RMS,I}, \%$	$3.36 \cdot 10^{-8}$	1.26	2.57
$\varepsilon_{RMS,U}, \%$	$2.18 \cdot 10^{-10}$	1.53	3.04

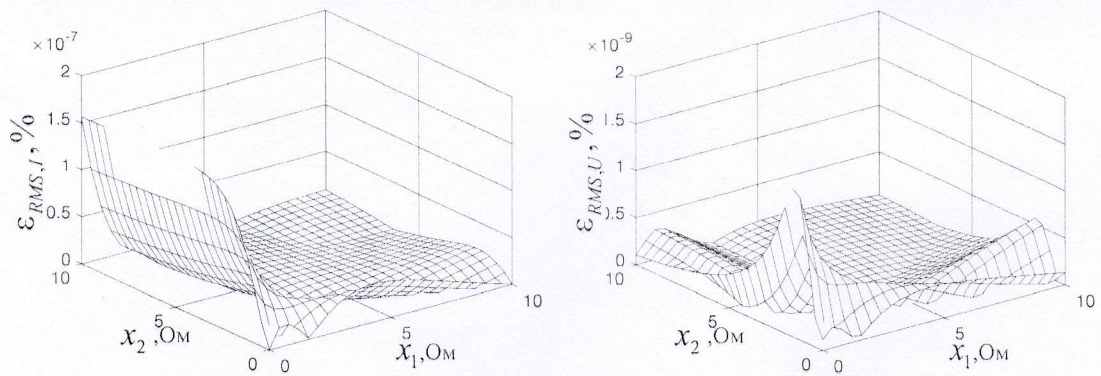


Рис. 4 Зависимости средних погрешностей $\varepsilon_{RMS,I}$ и $\varepsilon_{RMS,U}$ от значений реактивности x_1, x_2 ,

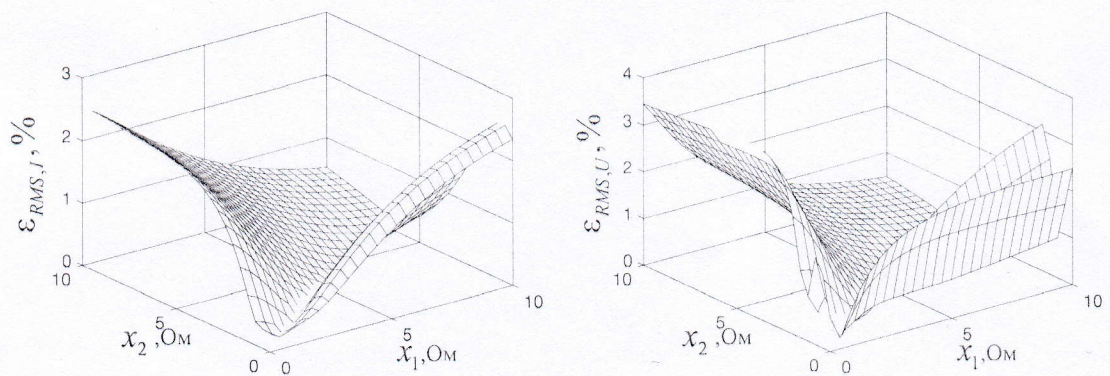


Рис. 5 Зависимости средних погрешностей $\varepsilon_{RMS,I}$ и $\varepsilon_{RMS,U}$ от значений реактивности x_1, x_2 , при $dz = 0,5\%$.

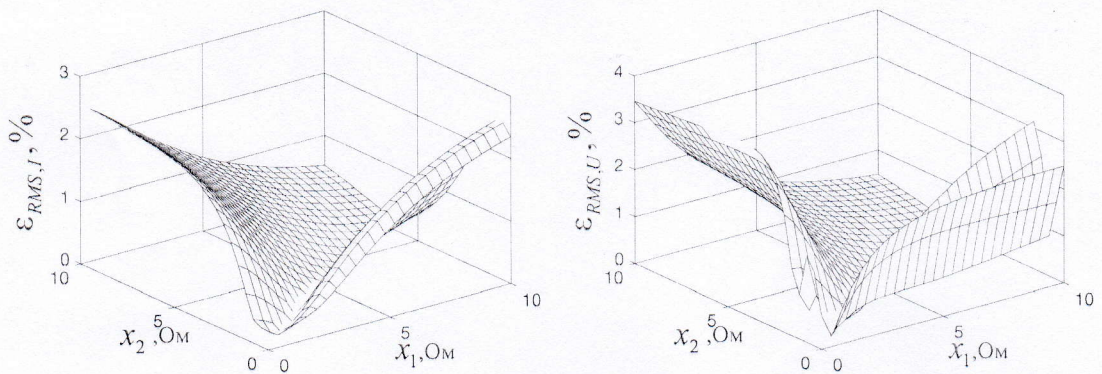


Рис. 6 Зависимости средних погрешностей $\varepsilon_{RMS,I}$ и $\varepsilon_{RMS,U}$ от значений реактивности x_1, x_2 , при $dz = 1\%$.

Исследование точности соотношений (1)-(2) показывают, что она сильно зависит от того, на сколько в процессе измерений изменяются величины нагрузок. Как уже отмечалось, современные средства измерений позволяют выполнять измерение действующих значений токов и напряжений, а с ними и величин нагрузок, с частотой до 200 раз в секунду.

Соответственно, оценка времени для всего цикла измерений, необходимого для определения констант – 0.1 сек. Мы предполагаем далее, что за это время нагрузки не изменяются более чем на 1%. Это допущение не исключает учет резко изменяющихся нагрузок фаз, например, включения мощного однофазного потребителя – плавильной печи. При выявлении такой ситуации алгоритм определения констант стартует заново. Фактически, принятое допущение исключает весьма маловероятные, по нашему мнению, режимы, при которых мощные нагрузки многократно включаются и выключаются с частотой 10 Гц.

Рассмотренная нами тестовая схема содержит все характерные элементы трехфазных систем. По результатам проведенного исследования можно сделать вывод о том, что при использовании современных измерительных средств достижимая величина средней относительной погрешности соотношений (1)-(2) составит (3-5)%, что вполне допустимо в инженерной практике.

Многоцелевая оптимизация

Воспользуемся методом симметричных составляющих [10-11], [14-15]. Разложим звезду токов $\dot{I}_A^{(k)}(x_1, x_2)$, $\dot{I}_B^{(k)}(x_1, x_2)$, $\dot{I}_C^{(k)}(x_1, x_2)$ произвольной k -ой нагрузки на сумму прямой (индекс – 1), обратной (индекс – 2) и нулевой (индекс – 0) последовательностей.

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_1^{(k)}(x_1, x_2) \\ \dot{I}_2^{(k)}(x_1, x_2) \\ \dot{I}_0^{(k)}(x_1, x_2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{I}_A^{(k)}(x_1, x_2) \\ \dot{I}_B^{(k)}(x_1, x_2) \\ \dot{I}_C^{(k)}(x_1, x_2) \end{bmatrix}, \quad a = e^{j\frac{2\pi}{3}}. \quad (5)$$

Подставим в (5) выражения (2) для фазных токов рассматриваемой нагрузки. Как не сложно видеть, выражения для амплитуд симметричных последовательностей будут иметь ту же структуру, что и выражения для фазных токов:

$$\dot{I}_m^{(k)}(x_1, x_2) = \frac{a_{i,m}^{(k)} + b_{i,m}^{(k)}x_1 + c_{i,m}^{(k)}x_2 + d_{i,m}^{(k)}x_1x_2}{1 + \alpha x_1 + \beta x_2 + \gamma x_1x_2}. \quad (6)$$

Константы $a_{i,m}^{(j,k)}$, $b_{i,m}^{(j,k)}$, $c_{i,m}^{(j,k)}$, $d_{i,m}^{(j,k)}$, входящие в (6), могут быть легко определены по известным константам, входящим в выражения для фазных токов и не приводятся здесь только для краткости изложения. То есть для произвольных x_1 и x_2 амплитуды токов симметричных составляющих любой трехфазной нагрузки или любого трехфазного источника в трехфазной цепи произвольной сложности могут быть вычислены за 6 комплексных умножений, 1 комплексное деление и 5 комплексных сложений каждая.

Последующие амплитуды будут вычисляться еще быстрее, так как знаменатель у всех выражений общий.

Очевидно, что аналогичное рассуждение можно провести и для амплитуд симметричных составляющих напряжений. Амплитуды симметричных составляющих могут быть использованы для вычисления критериев оптимальности. В начале настоящей статьи в качестве критериев оптимальности были предложены амплитуды прямой, обратной и нулевой последовательностей токов нагрузок трехфазной сети. При этом амплитуда прямой последовательности максимизируется, а амплитуды обратной и нулевой последовательностей минимизируются. Для таких критериев многоцелевая задача симметризации трехфазной сети имеет вид:

$$\begin{cases} f_1 = \left(\sum_{k=1}^{k=5} |i_1^{(k)}(x_1, x_2)| \right)^{-1} \xrightarrow{x_1, x_2} \min, \\ f_2 = \sum_{k=1}^{k=5} |i_2^{(k)}(x_1, x_2)| \xrightarrow{x_1, x_2} \min, \\ f_0 = \sum_{k=1}^{k=5} |i_0^{(k)}(x_1, x_2)| \xrightarrow{x_1, x_2} \min. \end{cases} \quad (7)$$

Отметим также, что мы не исчерпали весь запас возможного ускорения вычисления критериев. Действительно, слагаемые сумм в (7) имеют одинаковую структуру и для них также могут быть однократно получены выражения, не содержащие сумм, что дополнительно в несколько раз ускорит вычисления.

Могут быть предложены и другие критерии. Здесь мы хотим показать, что, благодаря соотношениям (1)-(2) вычисление (строго говоря, оценивание) критериев выполняется чрезвычайно быстро и задача (7) может быть решена в реальном масштабе времени. Характерное число вычислений критериев необходимое для удовлетворительного решения задачи типа (7) по нашему опыту составляет 10^5 . При 10^3 операциях с плавающей точкой, с избытком достаточных для оценивания критериев в (7) получаем, что для решения (7) достаточно 10^8 операций с плавающей точкой. Следовательно, процессор с производительностью 24 Гигафлопа (Core 2 Duo, 2006 г.) решит задачу (7) за десятые доли секунды (с учетом «медленных» операций ввода-вывода).

Таким образом, мы, благодаря (1)-(2), получили возможность решать задачу (7) в реальном масштабе времени. Осталась, однако, не рассмотренной задача определения наилучших мест размещения однофазных устройств компенсации. Решение этой задачи не предполагается выполнять в реальном масштабе времени. Пусть компенсирующие устройства находятся в

ветвях p и q . По типичному графику (набору типичных графиков) суточной загрузки трехфазной системы для каждого момента времени, имеющегося в графике нагрузки, решается задача (7). Далее полученные минимальные значения критериев f_1 , f_2 и f_0 , усредняются по времени и складываются. Таким образом, получаем $f_{1,ave}(p,q)$, $f_{2,ave}(p,q)$, $f_{3,ave}(p,q)$: Далее p и q определяются из решения задачи:

$$\begin{cases} f_{1,ave} = \min_{p,q}, \\ f_{2,ave} = \min_{p,q}, \\ f_{0,ave} = \min_{p,q}, \end{cases} \quad (8)$$

выполняемого также с помощью NGSА [7-14], [17-22]. Задача (8) характеризуется значительно большей трудоемкостью в сравнении с (7), что, однако, как уже отмечалось, не имеет принципиального значения.

Рассмотрим далее применение этого подхода для симметризации режима работы трехфазной сети реального технического объекта.

Результат применения описанного подхода

В следующем разделе мы используем приведенные выше выражения для оптимизации несбалансированные системы питания стекольного завода, упрощенная схема которого представлена на рис.1. Так как питание всего завода осуществляется от группы достаточно мощных трансформаторов, можно считать, что трансформаторы, питающие однофазные печи подключены к шинам бесконечной мощности. Решение (8) для каждого трансформаторов из дало для наилучшего размещения компенсирующих устройств ветви, номера которых сведены в Таблицу 2. Решение задачи (8) выполнялось по суточным графикам загрузки оборудования.

Таблица 2. Фазы наилучшего расположения компенсаторов

	T1	T2	T3	T4	T5
x_1	Фаза В	Фаза В	Фаза А	Фаза А	Фаза А
x_2	Фаза С	Фаза С	Фаза С	Фаза В	Фаза В

Графики суточного изменения фазных напряжений, токов и мощностей для каждого из трансформаторов до компенсации представлены в Таблице 3. Как мы можем видеть, почасовые напряжения фаз шин различаются незначительно. Фазные токи, напротив, сильно различаются из-за несбалансированной нагрузки фаз, полные мощности фаз также различаются.

На рис .7 представлены амплитуды прямой, обратной и нулевой последовательностей на шинах трансформаторов T1-T5. Как можно видеть,

амплитуды обратной и нулевой последовательности составляют около 40% от амплитуды прямой последовательности.

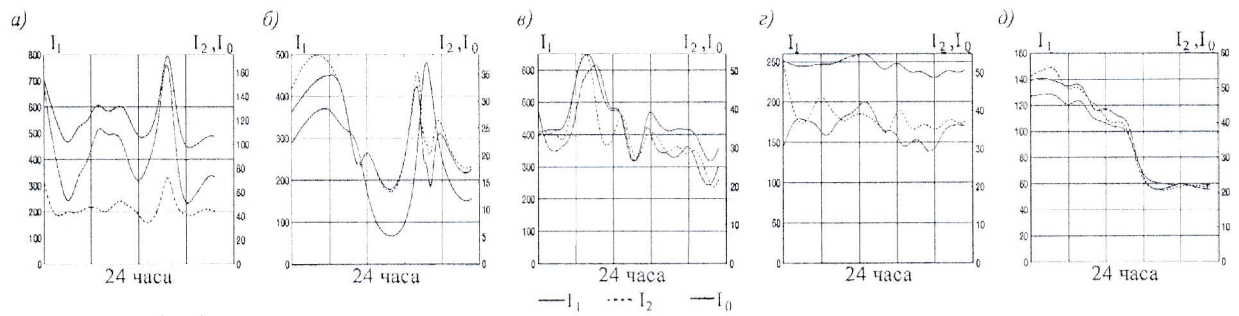
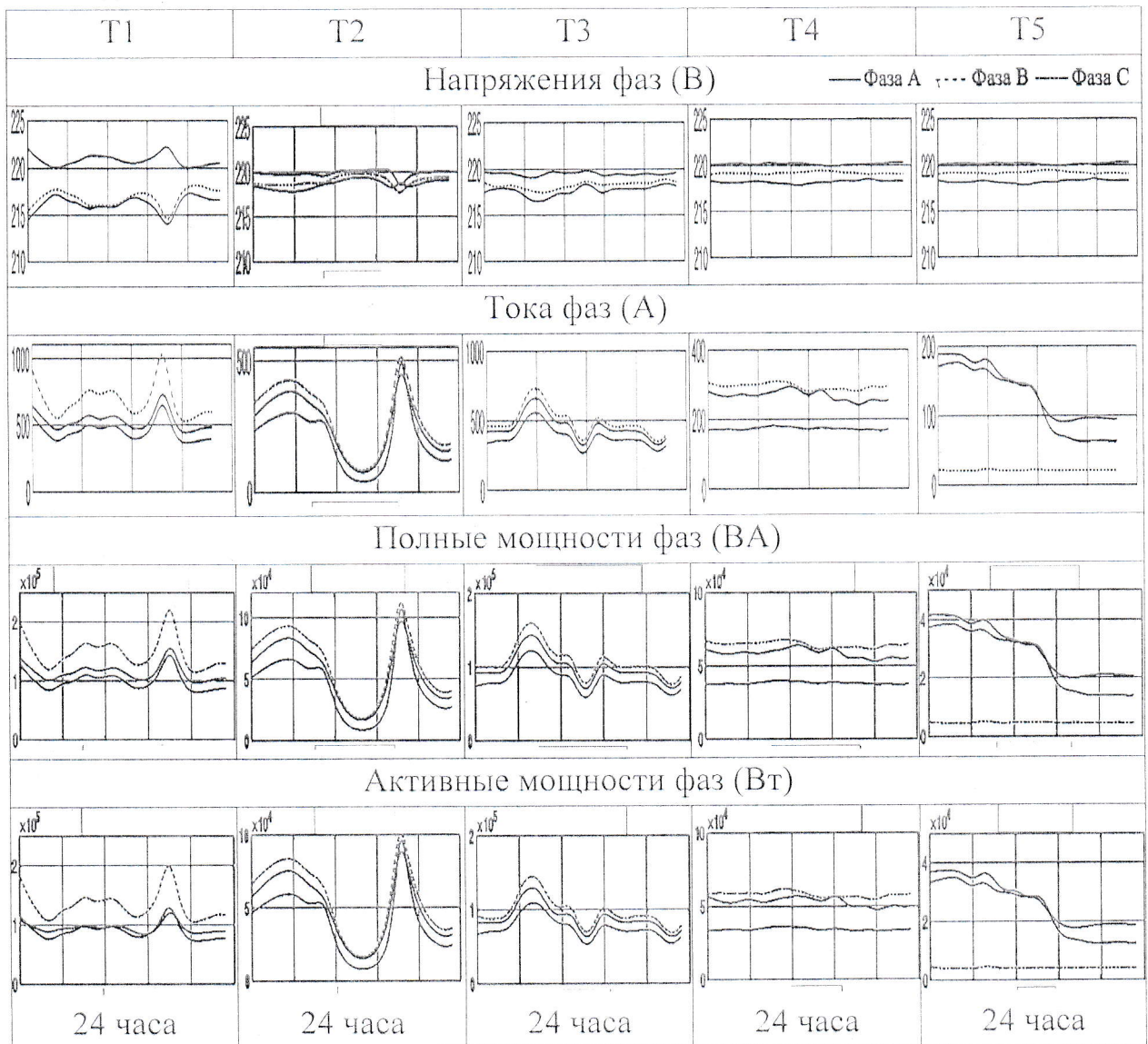


Рис. 7 Амплитуды прямой, обратной и нулевой последовательностей на шинах трансформаторов T1-T5 до компенсации.

Таблица 3. Фазные напряжения, токи и мощности на шинах трансформаторов T1-T5 до компенсации



Результаты оптимизации, включающие напряжения, токи полные мощности фаз представлены в Таблице 4. Сопоставляя таблицы 3 и 4, можно сделать только качественный вывод о том, что амплитуды напряжений, токов и мощностей фаз стали ближе друг к другу. Объективную характеристику симметрии до и после коммутации дают данные, представленные на рисунках 7 и 8. На этих рисунках представлены амплитуды прямой, обратной и нулевой последовательностей до и после коррекции. Как можно видеть, доли обратной и нулевой последовательностей после компенсации значительно уменьшились на всем интервале эксплуатации (24 часа).

Естественно, что полной компенсации обратной и нулевой последовательностей получить не удалось. Причина этого в том, что в общем случае, невозможно выполнить симметризацию несбалансированной трехфазной системы только двумя однофазными компенсационными устройствами. Во-вторых, как мы упоминали выше, имеет место учитываемая нами погрешностью измерения из-за непрерывного изменения нагрузки.

На рис. 9 представлено изменение реактивного сопротивления компенсаторов во времени. Как можно видеть, характер изменения во времени изменение реактивного сопротивления компенсаторов существенно отличается от характера изменения во времени фазных токов и напряжений. Это объясняется тем, что в нашем подходе к симметризации учитываются не только амплитуды токов, но и их фазы.

Таблица 4. Фазные напряжения, токи и мощности на шинах трансформаторов Т1-Т5 после компенсации

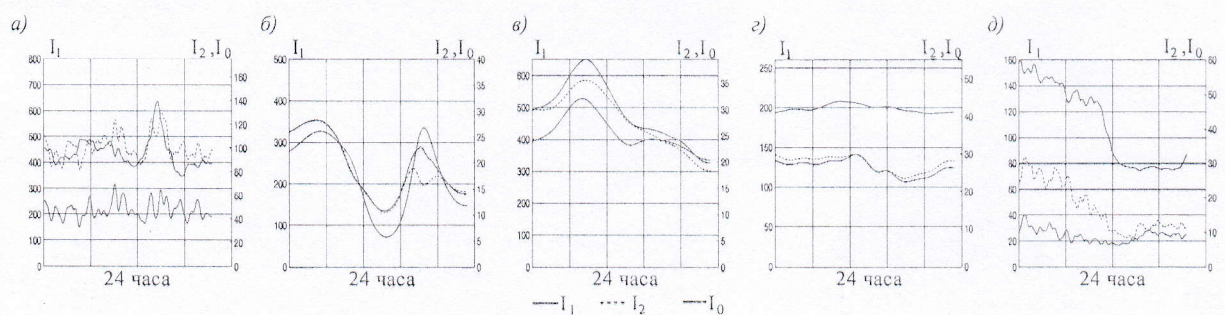
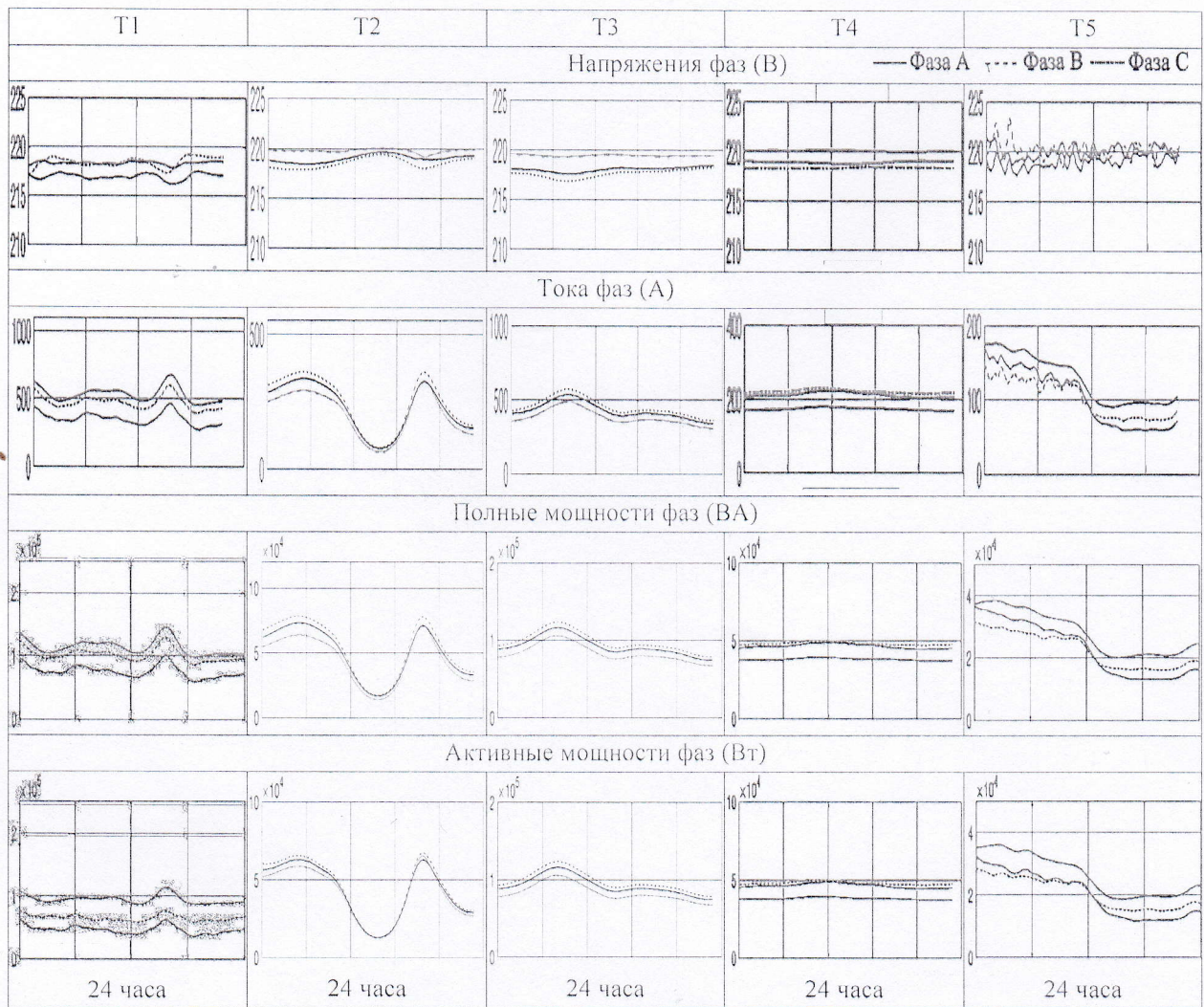


Рис. 8 Симметричные составляющие токов на шинах трансформаторов Т1-Т5 после компенсации

Таблица. 5 Средние значения отношения I_0/I_1 до и после компенсации

		Т1	Т2	Т3	Т4	Т5
До компенсации		0.159	0.115	0.074	0.145	0.388
После компенсации	Без оптимизации местоположения	0.142	0.095	0.074	0.132	0.300
	С оптимизацией	0.109	0.080	0.069	0.080	0.088

	местоположения					
--	----------------	--	--	--	--	--

Реактивные сопротивления [Ом]

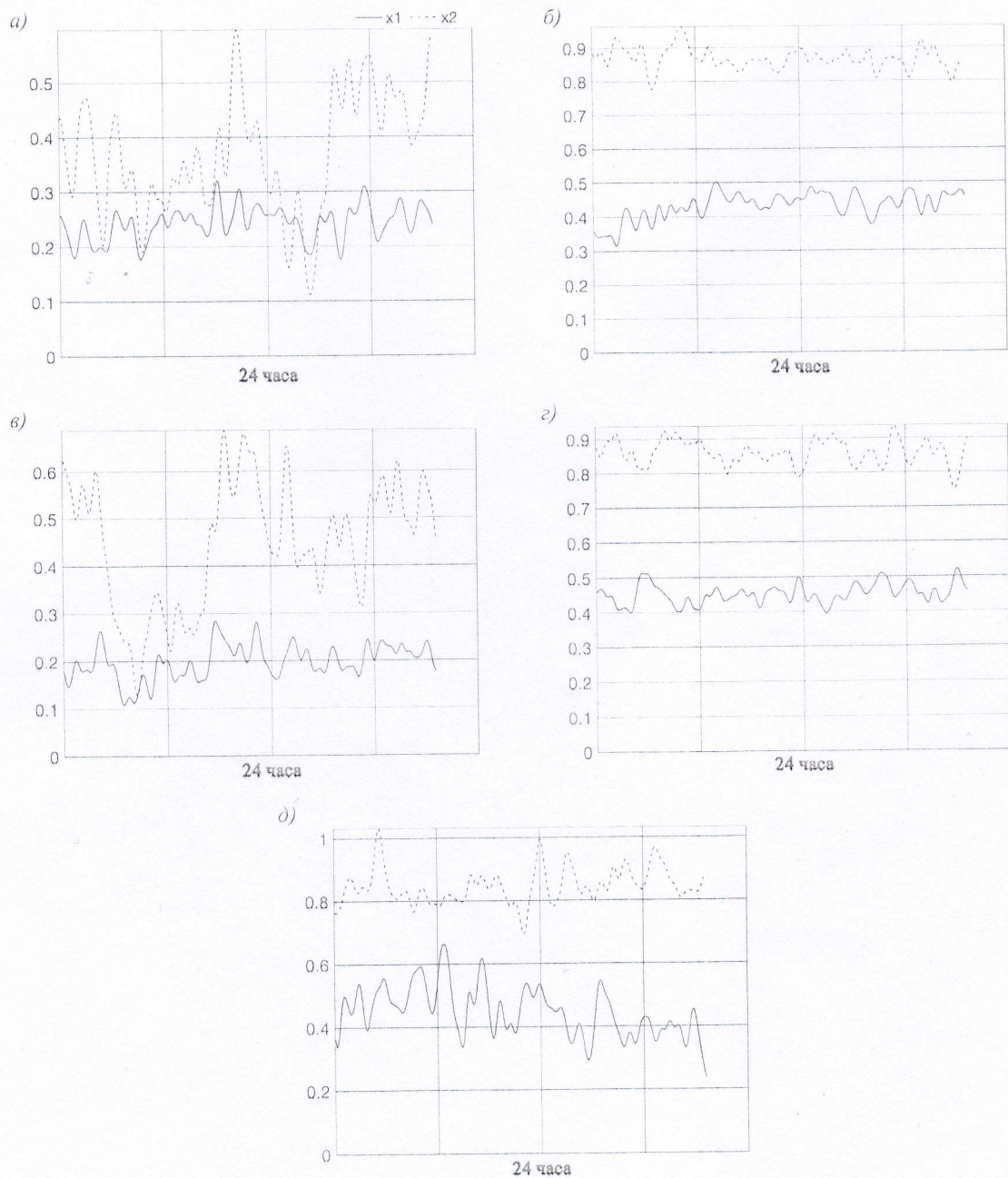


Рис. 9 Значения реактивности компенсаторов

Заключение

Преимуществами предложенного способа балансировки с использованием устройств с управляемой реактивностью являются относительная простота его установки, определяемая компактностью необходимого оборудования, низкая в сравнении с симметрирующим трансформатором стоимость системы симметризации и низкие эксплуатационные расходы.

Подход хорошо вписывается в концепцию интеллектуальной сети, которая декларирует возрастание роли потребителя в процессе производства и поставки электроэнергии. Информационно-измерительное оборудование интеллектуальной сети, в целом, достаточно для функционирования предложенной системы симметризации. Достаточно дополнить его необходимым программным обеспечением и устройствами с управляемой реактивностью.

По нашему мнению, наиболее перспективная область применения предложенного метода - трехфазные потребители с незначительным (суммарная доля нулевой и обратной последовательностей до 30% от прямой последовательности) дисбалансом.

Предлагаемый подход может быть применен для решения других задач, в том числе: повышения качества электроэнергии в наиболее чувствительных к нему частях трехфазной системы, минимизации потерь активной мощности, стабилизации трехфазных напряжений, повышения стабильности работы вращающихся машин и уменьшения ошибок измерений потребляемой мощности.

Список работ, опубликованных по теме научно-квалификационной работы (диссертации)

Публикации в изданиях, рецензируемых ВАК

1. Ву К.Ш., Коровкин Н.В., Минимизация степени неуравновешенности режима в трехфазных системах с использованием генетического алгоритма // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2018. Т. 24, № 2. С. 82–93. DOI: 10.18721/JEST.24.2.7
2. Коровкин Н.В, Ву К.Ш, Симметризация трехфазной цепи как задача многоцелевой оптимизации // (в периодических рецензируемых)

Публикации в других изданиях

3. Korovkin Nikolay, Quang Sy Vu, Yazenin Roman, Frolov Oleg, Silin Nikolay, Method of unbalanced power minimization in three-phase systems // Recent Advances in Mathematical Methods in Applied Sciences, Year: 2014, Pages: 134–137 / INASE Conferences
4. N. V. Korovkin, Q. S. Vu, R. A. Yazenin, A method for minimization of unbalanced mode in three-phase power systems // 2016 IEEE NW Russia

Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIConRusNW) Year: 2016 Pages: 611–614 / IEEE Conferences.

5. Q.S. Vu, N.V. Korovkin, N.V. Silin, A new approach to overcome the imbalance in three-phase systems using the new proposed fractional-polynomial functions // (в периодических рецензируемых)

Аспирант _____
(подпись)  _____
Бу Куанг Ши