

На правах рукописи



Лушников Иван Леонидович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ
НЕЛИНЕЙНЫХ НАГРУЗОК В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ**

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном образовательном бюджетном учреждении высшего профессионального образования «Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики»

Научный руководитель: кандидат технических наук, профессор
Козляев Юрий Дмитриевич

Официальные оппоненты: Дмитриков Владимир Федорович,
доктор технических наук, профессор,
Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций, профессор
кафедры теории электрических цепей.

Щуров Николай Иванович,
доктор технических наук, профессор,
Новосибирский государственный технический университет, заведующий кафедрой
электротехнических комплексов.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники».

Защита состоится «13» июня 2013 года в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 212.173.04 при Новосибирском государственном техническом университете по адресу: 630073, г. Новосибирск, проспект Карла Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета.

Автореферат разослан «07» мая 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д.т.н., профессор



Нейман Владимир Юрьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Одна из тенденций развития мирового сообщества – создание единого информационного пространства – обуславливает широкое внедрение во всех сферах информационно-вычислительных и телекоммуникационных устройств и систем, представляющих для электропитающих систем и сетей специфический класс потребителей, получивших название «электронных нагрузок» (ЭН). Типичными примерами подобных систем являются компьютерные кластеры (учебные классы, инфокоммуникационные сервисные службы, центры обработки данных и др.).

Особенностью данных потребителей является их существенный нелинейный характер энергопотребления, обусловленный рядом факторов и, в первую очередь, особенностями построения звена преобразования параметров электрической энергии первичного источника в структуре ЭН.

Эмиссия гармонических составляющих тока ЭН способна стать причиной отклонения от нормативных требований качества энергопотребления и, в ряде случаев, источником аварий из-за перегрузок токораспределительных сетей (ТРС) и (или) ее фрагментов. Потенциальные угрозы на предприятиях, не адаптированных к особенностям ЭН возникают при суммарной доле их энергопотребления порядка 25% от общей нагрузки предприятия.

Следует отметить, что современные стандарты допускают единичные ЭН с мощностью до 600 Вт, ограничивая специфику их энергопотребления определенными нормами. С другой стороны, стандартами определены жесткие показатели качества энергопотребления (ПКЭ) от сети общего назначения (СОН), однако, групповой характер ЭН и особенности ТРС, часто не адаптированных к особенностям ЭН, вызывают проблемы надежного функционирования систем электроснабжения ответственных потребителей. В частности, поведение единичных и особенно групповых потребителей существенно зависит от качества исходного напряжения СОН.

Перечисленные проблемы и пути их разрешения широко обсуждаются в технической литературе. Из работ, посвященных вопросам данной проблемы следует отметить Абрамовича Б.Н., Дмитрикова В.Ф., Сергеева В.В., Самылина И.Н., группы под руководством Григорьева О.Г., а также Добрусина Л.А. и его группы. Ведущее место в этих работах занимают исследования, связанные с повышением эффективности преобразовательных устройств и оценки влияния преобразователей электрической энергии на сети.

Вместе с тем, получивший широкое распространение существующий парк ЭН остается источником нарушения норм, эффективности энергопотребления и потенциальных угроз для энергетической инфраструктуры.

Таким образом, продолжающаяся тенденция роста ЭН обуславливает актуальность проблемы и повышающийся интерес со стороны энергопоставляющих и потребляющих организаций с целью разрешения сложившейся ситуации по минимуму технико-экономических затрат.

Целью работы является повышение качества и эффективности энергопотребления ЭН в одно- и трехфазных сетях переменного тока без вмешательства в структуру ЭН.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Разработка математических моделей электрических цепей с ЭН;
2. Получение аналитических решений для вычисления показателей качества энергопотребления в цепях переменного тока;
3. Выявление количественных и качественных закономерностей при вариации параметров цепей с ЭН;
4. Оценка искажения напряжения сети в точке подключения ЭН;
5. Оценка эффективности энергопотребления в цепях с ЭН с учетом потерь в ТРС;
6. Оценка эффективности пассивных и активных методов коррекции в одно- и трехфазных сетях переменного тока без вмешательства в структуру ЭН;
7. Разработка технических решений по повышению качества и эффективности энергопотребления единичных и групповых ЭН;
8. Проведение экспериментальных исследований.

Методы исследования. При решении поставленных задач использовались численные и интегральные методы расчета, прямые методы анализа схем, преобразование Фурье и Лапласа, методы теории мощности Фризе и Кваде, метод декомпозиции полной мощности по Будаану, методы математического моделирования электрических процессов, методы теории линейных и нелинейных цепей и теории сигналов.

Научная новизна заключается в следующем:

1. Разработаны уточненные математические модели электрических цепей с ЭН второго порядка, учитывающие в отличие от известных моделей значения фильтровой емкости в структуре ЭН;
2. Разработано новое устройство компенсации тока искажений, адаптированное в отличие от известных для систем с преобладанием 3-й гармоники и низким коэффициентом мощности 0,5-0,6.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Разработанные уточненные математические модели электрических цепей с ЭН второго порядка учитывают величину фильтровой емкости в структуре ЭН;
2. Предложенная методика оценки искажения напряжения в точке подключения ЭН позволяет с достаточной точностью для практики определить коэффициент искажения по гармоникам низкого порядка;
3. Приведенная методика оценки показателей эффективности энергопотребления в цепях с ЭН позволяет их спрогнозировать в зависимости от коэффициента мощности;
4. Приведенные оценки эффективности рассмотренных методов пассивной и активной коррекции в одно- и трехфазных сетях с ЭН позволяют определить границы их возможностей по коррекции коэффициента мощности;

5. Предложенное устройство компенсации тока искажений (активный фильтр тока), адаптированное для сетей с преобладанием 3-й гармоники, повышает коэффициент мощности до значения 0,96..0,99.

Практическая ценность. В результате проведенного исследования получены методики для инженерного расчета ПКЭ, определены «возможности» пассивных и активных методов коррекции потребляемого тока в однофазных и трехфазных сетях с ЭН без вмешательства в их структуру. Предложены схмотехнические варианты устройств компенсации тока искажений в сетях с ЭН. Применение предложенных методов обеспечивает оперативную оценку показателей качества энергопотребления в условиях сложившихся ТРС предприятий, а также решить проблемы обеспечения нормативных показателей энергопотребления и повышения энергоэффективности.

Практические результаты. Диссертационная работа выполнялась в соответствии с госбюджетной НИР по теме «Исследование условий загрузки ТРС учебного предприятия», хоздоговорной НИР «Разработка и исследование выпрямительных устройств на современной элементной базе». Получены акты о внедрении результатов работы в учебный процесс на кафедре БИСС и отраслевой лаборатории ОНИЛ-1 ФГОБУ ВПО «СибГУТИ».

Достоверность полученных результатов подтверждается теоретическим обоснованием разработанных моделей, методов и данными, полученными моделированием и экспериментальными исследованиями.

Личный вклад автора состоит в разработке математических моделей цепей с ЭН, методик оценки искажения напряжения в точке подключения ЭН и оценки потерь; в проведении теоретических и экспериментальных исследований, анализе и обобщении полученных результатов.

Апробация работы. Основные научные результаты и положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях и семинарах: российской научно-технической конференции «Информатика и проблемы телекоммуникаций», Новосибирск, СибГУТИ, 2004 – 2012 гг.; региональной научно-технической школы-семинара студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные проблемы радиотехники», Новосибирск, НГТУ, 2003, 2005; всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации», Новосибирск, НГТУ, 2007; международной конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП», Новосибирск, НГТУ, 2007, 2008, 2010 гг.

Публикации. По основным научным результатам исследования опубликовано 19 печатных работ, в том числе, пять статей в рецензируемых научных журналах и изданиях, рекомендованных ВАК РФ, и 14 публикаций в сборниках материалов международных и всероссийских конференций.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Работа изложена на 132 страницах основного текста, содержит 58 рисунков, 14 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы исследования диссертационной работы, сформулирована цель работы, научная новизна и практическая значимость полученных результатов, дается краткое содержание глав работы.

В первой главе рассмотрены факторы нелинейности энергопотребления ЭН, их состав и основные характеристики энергопотребления.

Коммерческая привлекательность импульсных технологий преобразования электрической энергии в диапазоне мощностей единичных потребителей от десятков Вт до единиц кВт привела к их широкому распространению и на определенном этапе породила проблему энергетической эффективности систем электропитания. Значительная часть устройств инфокоммуникаций, как потребителей электрической энергии, проявляет нелинейный характер энергопотребления в силу специфики и особенностей вторичных блоков питания.

Рассмотрены вопросы нормирования качества электроэнергии и энергопотребления. Приведен обзор существующих стандартов на качество электроэнергии и энергопотребления и нормы показателей, предъявляемых к ЭН. Основу нормативной базы относительно показателей качества энергопотребления и электроэнергии и их норм составляют:

1. ГОСТ 13109-97 устанавливает показатели и нормы качества электроэнергии в электрических сетях общего назначения переменного трехфазного и однофазного тока частотой 50 Гц.

2. ГОСТ Р 51317.3.2-99 (МЭК 61000-3-2-95) устанавливает нормы эмиссии гармонических составляющих тока техническими средствами с потребляемым током не более 16 А (в одной фазе).

В соответствии с классификацией ГОСТ Р 51317.3.2-99 единичные ЭН относятся к классу D как технические средства с потребляемым током, характеризующимся «специальной формой кривой» и активной мощностью, не превышающей 600 Вт и формально отвечают требованиям данного стандарта. На практике единичные устройства, как правило, объединены в группы и должны соответствовать ГОСТ 13109-97. В ряде отраслей введены дополнительные стандарты, нормирующие другие определенные показатели качества энергопотребления. Например, в области инфокоммуникаций в соответствии с отраслевым стандартом ОСТ 45.183-2001, распространяющимся на стационарные установки электропитания аппаратуры электросвязи, электроснабжение которых осуществляется от электрической сети общего назначения, коэффициент мощности установки электропитания должен быть не менее 0,95 для устройств с корректором мощности и не менее 0,7 для устройств без коррекции. При этом установки электропитания переменного тока должна быть рассчитана на питание нагрузки с коэффициентом амплитуды переменного тока не менее 2,5.

Рассмотрены вопросы определения полной мощности и ее составляющих при нелинейных потребителях, характеризующихся несинусоидальными формами токов и напряжений. Как показывает обзор научно-технической литературы, в настоящее время еще не выработано единого подхода к определению всех составляющих полной мощности и известны многообразные способы разложения мощности на ортогональные составляющие. Существенный вклад в теорию мощности был внесен работами Фризе и Кваде.

Понятия активной, реактивной и полной мощности в работах Кваде определены на основе теорий о функциональном и векторном пространствах, из которых, в частности, следует возможность представления полной мощности

$$S = \sqrt{S_0^2 + \sum_{k=1}^{\infty} S_k^2} = \sqrt{U_0^2 I_0^2 + \sum_{k=1}^{\infty} \left((U_k I_k \cos \varphi_k)^2 + (U_k I_k \sin \varphi_k)^2 \right)} = \sqrt{P_0^2 + \sum_{k=1}^{\infty} (P_k^2 + Q_k^2)}, \text{ где } S =$$

IU – полная мощность, определяемая произведением действующих величин тока и напряжения, P_k и Q_k – активная и реактивная мощности от каждой k -й гармоники соответственно, I_k и U_k – действующие значения тока и напряжения k -х гармоник соответственно.

Из основополагающих принципов теории мощности Кваде следует, что в приложении к сетям переменного тока полную мощность можно представить суммой трех ортогональных составляющих $S = \sqrt{P_{(1)}^2 + Q_{(1)}^2 + T^2}$, где

$P_{(1)} = U_{(1)} I_{(1)} \cos \varphi_{(1)}$ – активная мощность по основной гармонике,

$Q_{(1)} = U_{(1)} I_{(1)} \sin \varphi_{(1)}$ – реактивная мощность по основной гармонике,

$\varphi_{(1)} = \arccos(P_{(1)} / U_{(1)} I_{(1)})$ – угол сдвига между $P_{(1)}$ и $Q_{(1)}$, $T = \sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} U_k^2 I_k^2}$ –

мощность искажения или высших гармоник, что геометрически можно интерпретировать векторной диаграммой как показано на рис. 1, а.

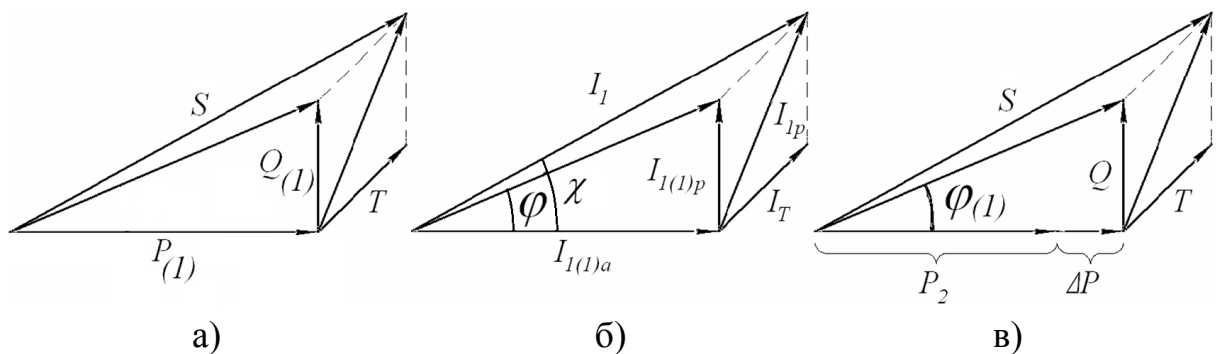


Рис. 1. Векторные диаграммы токов и мощностей

В приложении к сетям постоянного тока полную мощность можно представить суммой двух ортогональных составляющих активной мощности постоянного тока и мощности искажения $T = \sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} U_k^2 I_k^2}$. При допущении

«моногоармоничности» напряжения первичного источника для приведенных случаев векторные диаграммы токов и мощностей коллинеарны (рис. 1, б, в), а через соотношения их векторов могут быть выражены показатели качества энергопотребления и эффективности энергопередачи, основным из которых является коэффициент мощности K_M .

Отмечена целесообразность введения рядом исследователей дополнительных показателей качества энергопотребления коэффициентом амплитуды по первой гармонике $K_{A1} = I_m / I_1$ и обобщенным показателем эффективности использования полной мощности как соотношение полезной мощности в нагрузке к полной мощности: $K_{\mathcal{E}} = P_2 / S = \eta K_M$.

В конце главы отмечены основные тенденции повышения КЭ в системах с ЭН и, в частности, направление исследования данной работы как поиск технологических решений, способных без вмешательства в структуру ЭН и без потери качества работы ЭН уменьшить составляющие тока/мощности искажения в однофазных и трехфазных цепях питания нелинейных потребителей электрической энергии кластерного типа.

Во второй главе определены связи между качественными показателями напряжения и тока, контролируемых в точке присоединения ЭН к сети, показаны особенности, общая структура и специфика ЭН, разработаны математические модели с целью получения расчетных соотношений для оценки показателей качества энергопотребления, полной мощности и ее составляющих в квазиустановившемся режиме при условии синусоидальности напряжения первичного источника и получены приближенные аналитические решения для оценки основных показателей тока ЭН малой и средней мощности при вариации импеданса цепи.

По ряду основных показателей аналитические решения сопоставлены с результатами, полученными численным способом на основе метода пространства состояний с использованием ЭВМ.

Отмечено, что дискретно-переменная структура цепи ЭН требует введения набора определенных состояний цепей, условий их чередования и описания поведения в каждом состоянии. В квазиустановившемся режиме особенности структуры эквивалентной схемы ЭН определяют два состояния протекающих процессов в цепи передачи энергии от сети к нагрузке: интервал проводимости ψ выпрямительных диодов и интервал отсечки тока $\pi - \psi$. В частности, при анализе учитывались условия сопряжения решений двух состояний по напряжению при переходе от одного состояния к другому.

На интервале проводимости диодов протекание электромагнитных процессов в цепи описывается системой дифференциальных уравнений:

$$|u_1(t)| = R_d i_d(t) + L \frac{di_d(t)}{dt} + u_C(t), \quad i_d(t) = i_C(t) + \frac{u_C(t)}{R_{\mathcal{D}}},$$

где $u_1(t)$ – воздействующее напряжение, $i_d(t)$ и $u_C(t)$ – ток цепи и напряжение конденсатора, R_d , L и $R_{\mathcal{D}}$ – параметры цепи.

Операторным методом получены аналитические решения для мгновенных значений тока и напряжения на интервале проводимости:

$$\left. \begin{aligned} i(t) &= \sum_{k=1}^4 i_k(t) \\ i_1(t) &= \frac{\cos \psi_1}{\rho} \left[\frac{K_{\omega}}{K_{\mu}^2} \cos(\omega t + \psi) + \frac{1}{K_{\mu}^2} (1 - \xi_0^2) e^{-\alpha t} \cos(\omega_C t + \psi_C) \right] \\ i_2(t) &= \frac{\cos \psi_1}{\rho} \left[\frac{1}{K_{\mu}^2} \left(\frac{1}{R_2} \cos \psi_1 + \frac{1}{\omega C} \sin \psi_1 \right) \cos(\omega t - \psi) + \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{\sqrt{1 - \eta \xi_0^2}} e^{-\alpha t} \cos(\omega_C t - \psi_C) \right] \\ i_3(t) &= \frac{1}{R_2 K_{\mu}^2} \left[\sin(\omega t - \psi) + \frac{K_{\omega}}{\sqrt{1/\eta - \xi_0^2}} e^{-\alpha t} \sin(\omega_C t - \psi_C) \right] \\ i_4(t) &= -\frac{U_{C0}}{\rho \sqrt{1/\eta - \xi_0^2}} e^{-\alpha t} \sin(\omega_C t) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} u_C(t) &= \sum_{k=1}^4 u_k(t) \\ u_1(t) &= \frac{\omega_0^2 \cos \psi_1}{\mu} \left[\cos(\omega t - \psi) + \frac{\beta}{\omega_C} e^{-\alpha t} \cos(\omega_C t - \psi_C) \right] \\ u_2(t) &= \frac{\omega \omega_0^2 \sin \psi_1}{\mu} \left[\frac{1}{\omega} \sin(\omega t - \psi) + \frac{1}{\omega_C} e^{-\alpha t} \sin(\omega_C t - \psi_C) \right] \\ u_3(t) &= -\frac{U_{C0} \beta}{\omega_C} e^{-\alpha t} \cos(\omega_C t + \psi_C) \\ u_4(t) &= \frac{U_{C0} a}{\omega_C} e^{-\alpha t} \sin(\omega_C t) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где: ω – частота питающей сети, $\omega_0^2 = 1/LC$ – резонансная частота колебаний контура, образованного суммарной индуктивностью цепи и емкостью фильтра единичной или групповой ЭН; $\alpha = \omega_0 \xi_0$; $\beta = \frac{\omega_0^2}{\sqrt{\eta}}$; $a = \frac{R_1}{L}$;

$\eta = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$; $\omega_C = \sqrt{\beta_0^2 - \alpha^2}$ – частота собственных затухающих колебаний;

$\xi_0 = 0,5(\frac{R_1}{\rho} + \frac{\rho}{R_2})$ – коэффициент затухания цепи; $\rho = \sqrt{L/C}$ – волновое

сопротивление цепи; $\mu = \sqrt{(\omega^2 - \beta^2)^2 + 4\alpha^2\omega^2}$; $K_\mu^2 = \mu/\omega_0^2$; $K_\omega = \omega/\omega_0$;

$$\psi = \arctg\left[\frac{2\alpha\omega}{\beta^2 - \omega^2}\right]; \psi_C = \arctg\left[\frac{-2\alpha\omega_C}{\omega^2 - \omega_C^2 + \alpha^2}\right] - \arctg\left[\frac{\alpha}{\omega_C}\right].$$

Примеры решения в среде Mathcad для тока $i(t)$ и напряжения на конденсаторе $u_C(t)$ на интервале проводимости тока приведены на рис. 2 (а, б) для двух значений величины индуктивности контура цепи передачи $L1 = 2$ мГн и $L2 = 0$ при $U_m = 311$ В, $\omega = 414$ рад/с, $C = 500$ мкФ, $R1 = 2$ Ом, $R2 = 200$ Ом.

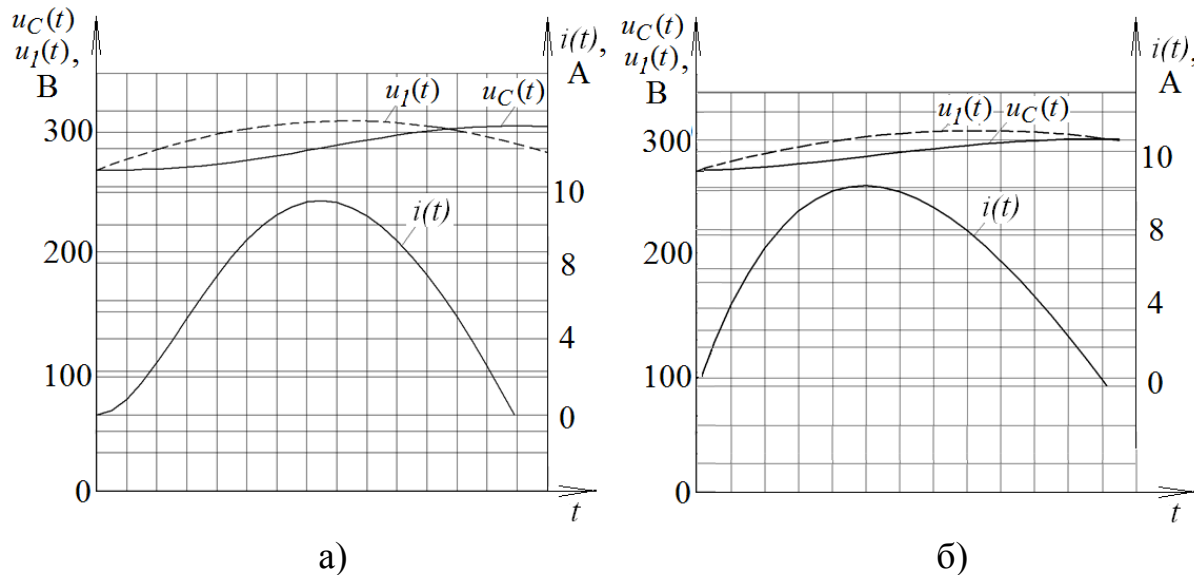


Рис. 2. Кривые тока $i(t)$ и напряжения на конденсаторе $u_C(t)$

Из выражений (1) и (2) при соответствующей группировке слагаемых следует обобщенная форма решений для тока и напряжения в виде:

$$x(t) = A \cos(\omega t + \varphi_1) + B e^{-\alpha t} \cos(\omega_c t + \varphi_2). \quad (3)$$

Из (3), в частности, следует, что интервал проводимости тока и его форма определяются затухающей гармоникой сигнала с собственной частотой цепи ω_C , смещенной относительно оси ординат меняющимся во времени низкочастотным сигналом с частотой ω .

Предложенные математические модели ЭН, в отличие от известных (Берга, Макарова), учитывают величину емкости конденсатора и размах пульсаций.

Для оценки качественных показателей целесообразно применение «упрощенных» математических моделей тока с достаточной для инженерной практики точностью. В работе рассмотрены три аппроксимирующие функции тока: треугольная, усеченный косинус (функции Берга), «синус с кратностью частоты N ». Последний вариант предполагает модификацию – «сумма синусов с кратностью частоты N и $2N$ » или так называемая аппроксимация тригонометрическим полиномом. Приведены сравнительные характеристики аппроксимирующих функций тока.

В третьей главе выявлены особенности поведения комплекса, включающего синусоидальный источник напряжения, фрагменты ТРС и k эквивалентов ЭН, объединяющих группы из N числа ЭН.

В общем, анализ показал, что индуктивная составляющая импеданса ТРС существенно уменьшает амплитуду импульса тока при одновременном увеличении интервала проводимости тока, что улучшает спектральные характеристики и показатели качества энергопотребления. Изменение формы тока за счет индуктивной составляющей цепи ТРС можно рассматривать как элемент пассивной коррекции тока.

Получены зависимости показателей качества энергопотребления от угла проводимости, из которых виден характер изменения показателей качества от воздействия индуктивной составляющей цепи ТРС. В частности, для комплекса ЭН из $N = 20$ шт. с суммарной потребляемой мощностью 4 кВт амплитудное значение тока при общей индуктивности ТРС порядка 0,05 мГн составляет 37..50 А против 60..80 А без индуктивной составляющей.

Рассмотрены общие закономерности формирования напряжения в точке подключения ЭН как источника эмиссии высших гармонических составляющих тока при отсутствии «предыскажений» и при условии, что до подключения к сети ЭН сеть была загружена нелинейной нагрузкой.

Приведена методика оценки факторов искажения напряжения сети в точке подключения ЭН как функции от параметров сети и спектральных характеристик тока. Показано, что импеданс цепи питания ЭН (рис. 3) определяется сопротивлением токораспределительного участка ($Z_{1-1} + Z_{1-2}$) и элементами ограничения тока Z_i в структуре ЭН.

На практике важным являются качество напряжения U_x , фиксируемого в точке подключения группового потребителя и разделяющего импеданс цепи на магистральную Z_{1-1} и локальную составляющие Z_{1-2} .

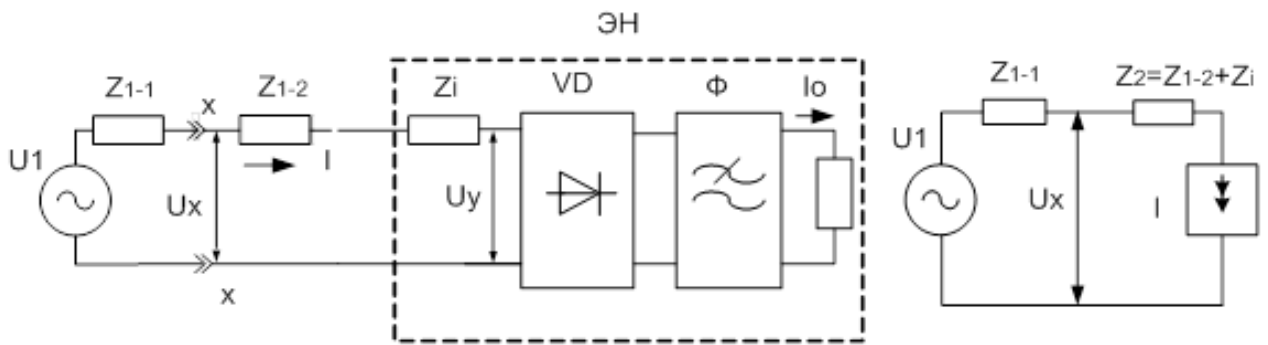


Рис. 3. Цепь питания ЭН однофазным током и схема замещения

Получено аналитическое выражение для оценки коэффициента искажения напряжения сети в точке подключения ЭН как функция от параметров сети и спектральных характеристик тока:

$$K_{И(X)} = A \cdot i_{кз} \sqrt{K_i^2 + B \cdot F_i^2} \approx C \cdot i_{кз} \cdot F_i ,$$

где: A, B, C – масштабные коэффициенты, зависящие от параметров сети,

$i_{кз}$ – кратность тока короткого замыкания, $K_i = \sqrt{\sum_{k>1}^N i_k^2}$ – коэффициент

искажения тока; $F_i = \sqrt{\sum_{k>1}^N k^2 i_k^2}$ – фактор реактивной составляющей искажения

напряжения. Для ряда типовых функций тока ЭН показаны зависимости $F_i(k)$, позволяющие обосновать верхние значения N на уровне 7...15.

Изложенный подход позволил сформулировать закономерность «ухудшения» коэффициента искажения $K_{И(X)}$ с подключением ЭН при условии существования предыскажения $K_{И(X)0}$ до подключения ЭН.

Рассмотрены вопросы оценки эффективности энергопотребления в цепях переменного тока с ЭН с учетом потерь в ТРС.

Энергетическая эффективность в системах с ЭН существенно зависит от величины коэффициента мощности, коррекция которого изменяет полную мощность, связанную с действующим значением полного тока и, соответственно, величину потерь мощности энергии в системе, которая, в свою очередь, определяет КПД системы. Таким образом, КПД и величина потерь мощности системы является функцией коэффициента мощности. С другой стороны, вышеотмеченный объективный показатель – коэффициент энергетической эффективности, определяется произведением коэффициента мощности и КПД. Исходя из данных тезисов, на основе разложения полного тока ортогональные составляющие в структуре энергопередачи в системе с ЭН получены аналитические выражения для мощности потерь, КПД и коэффициента энергетической эффективности и их зависимости от величины коэффициента мощности.

В четвертой главе предложены технические приемы, обеспечивающие соответствие нормативным требованиям показателей качества энергопотребления ЭН в одно- и трехфазных сетях.

Отмечено, что мировая практика повышения энергоэффективности систем электропитания нелинейных потребителей развивается по двум направлениям: построение систем питания электронных устройств со встроенным корректором коэффициента мощности (ККМ) и организации групповых корректоров (кондиционеров тока или фильтров гармоник тока сети) для ЭН «кластерного» типа.

Рассмотрен пассивный метод коррекции для цепи однофазного тока введением индуктивности в контур энергопередачи. Эффект коррекции обеспечивается за счет увеличения угла проводимости тока, улучшая тем самым спектральные характеристики потребляемого тока (снижается величина коэффициента гармоник K_G).

Предложена диаграмма ожидаемой области значений коэффициента мощности K_M при вариации коэффициента сдвига $\cos \varphi_1$ и коэффициента гармоник K_G . Из кривых видны «эффекты» от возможных воздействий на характеристики формирования тока, на его гармонический состав и фазовый сдвиг основной гармоники тока. Ожидаемый коэффициент мощности K_M может достигнуть значения 0,8 против 0,54...0,56 без введения индуктивностей.

Отрицательный эффект, связанный со снижением выходного напряжения, при необходимости может быть ослаблен введением «вольтдобавки» (15...20%) с помощью повышающего автотрансформатора.

Рассмотрены варианты цепей трехфазного тока с равномерным распределением нагрузки по фазам сети:

1) ТРС с «жесткой» нейтралью приведены зависимости основных параметров цепи питания ЭН от величины корректирующей индуктивности, из которых видно, что с ростом величины корректирующих индуктивностей снижается кратность токовой перегрузки нейтрального провода.

2) трехпроводной ТРС, т.е. без нейтрального провода меняется структура цепи передачи энергии и комплекс ЭН в этом режиме может рассматриваться эквивалентом трехфазного мостового выпрямителя. Физически это приводит к аналогично рассмотренной выше зависимости длительности каждого импульса от величины индуктивности фазного провода.

3) трехпроводной ТРС с индуктивным реактором в нейтральном проводе режим работы цепи определяется соотношением уровня напряжения $U_{OM} = 2U_{0ЭН}$ по отношению к амплитуде линейного напряжения сети $U_{mЛ}$. В случае $2U_{0ЭН} \geq U_{mЛ}$ система ведет аналогично рассмотренному выше случаю (1). Если $2U_{0ЭН} < U_{mЛ}$, то в системе протекают два процесса, «межфазовый», рассмотренный в пункте (2), и «фазовый», диктуемый напряжением $U_{N-NЭЭ}$, порождающим в цепи ток третьей гармоники, с амплитудой, зависящей от величины индуктивного сопротивления шлейфа

«фаза – ноль». С ростом величины индуктивности L_N ток нейтрали снижается, достигая величины, равной действующему значению фазного тока. Таким образом, положительным эффектом является снижение токовой загрузки нейтрального провода.

Рассмотрены активные методы коррекции, ориентированные на увеличение угла проводимости тока в ЭН путем изменения формы напряжения, воздействующего на вход ЭН. Эффект коррекции обеспечивается введением в контур цепи питания ЭН группы гармоник напряжения ($k = 3, 5, 7, \dots$) с определенным фазовым сдвигом.

Изменение фазовых характеристик гармонических составляющих и результирующей формы тока требует дополнительного внешнего воздействия. Получение напряжения с формой, близкой к трапецеидальной, возможно суммированием напряжения сети с корректирующими напряжениями с частотами, кратными нечетному числу. Отношение амплитуд суммируемых сигналов близко к значению кратности частот и может варьироваться для получения определенного эффекта (получение «минимума» коэффициента гармоник K_G и $\cos \varphi_1 \approx 1$).

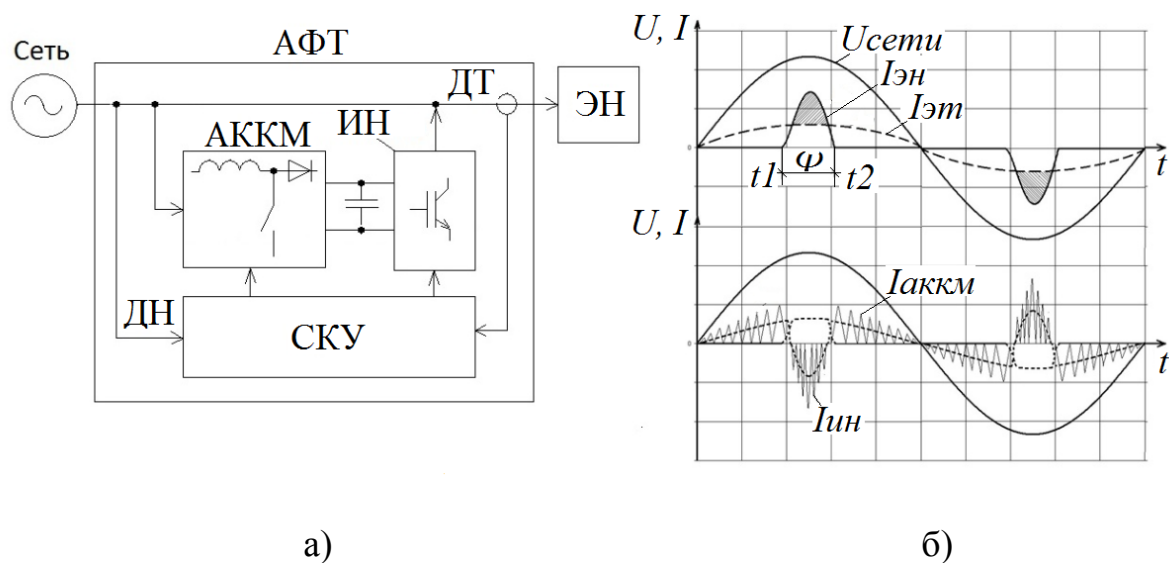
Приведены функциональная схема преобразования формы напряжения и результат суммирования трех гармоник с $U_1 = 220$ В, $U_3 = 50$ В, $U_5 = 12$ В.

Рассмотрен вариант активной коррекции тока в трехфазных системах питания ЭН, основанная на введении в цепь нейтрали третьей гармоники. Приведены схема замещения, диаграмма напряжения и диаграмма формирования фазного тока. Показано, что форма тока и возможность приближения её к симметричной трапецеидальной форме, с углом проводимости, близким к значению $2\pi/3$, зависит от ряда факторов: амплитуды и фазы корректирующего напряжения, величин индуктивности в «фазах» и нейтральном проводе. Показаны примеры диаграмм фазного тока, полученных методом моделирования рабочих процессов в трехфазной цепи питания ЭН. Диаграммы получены для случая $\varphi_1 \leq \pi/20$ ($\cos \varphi_1 \geq 0,987$). Значение коэффициента гармоник $K_G \approx 0,5$. Соответственно, величина коэффициента мощности K_M близка к значению 0,9. Попутным эффектом является снижение токовой загрузки нейтрального провода до уровня загрузки фазных проводов

Разработана и предложена базовая структура устройства компенсации тока искажения (активный фильтр тока АФТ) на основе генерации тока искажений в контур энергопередачи с ЭН (рис. 4, а). В отличие от известных устройств, анализирующих гармонический состав и генерирующих эти гармоники в противофазе, АФТ формирует (имитирует) ток сети по эталону (заданию) на интервалах когда ЭН не потребляет ток, накапливая энергию в конденсатор и генерирует ток искажений в противофазе, отклоняющийся от эталона (рис. 4, б).

Приведены варианты схемотехнической реализации, основные расчетные соотношения, функциональная структура и особенности системы управления и

контроля, результаты моделирования в режимах непрерывного и предельно-непрерывного тока дросселя.



а) б)
Рис. 4. Структура АФТ и временные диаграммы работы

Методами моделирования рабочих процессов полученный коэффициент мощности составил 0,96..0,98.

Экспериментальная часть включала:

а) исследования качества формы напряжения сети, а также измерение токовой загрузки ТРС и фиксация формы тока в разное время суток действующего учебного заведения (ориентировочное число ЭН 1000 шт. с суммарной мощностью 100..300 кВА);

б) исследования пассивных методов коррекции в системах с ЭН на основе введения индуктивного реактора в фазный и нейтральный провод трехфазной сети.

В заключении подведены основные выводы и результаты теоретических и экспериментальных исследований.

В приложениях представлены:

- аналитические решения для тока и напряжения (детальный анализ математических моделей цепей с ЭН);
- расчеты параметров функций аппроксимации тока;
- акты о внедрении.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Специфика энергопотребления ЭН определяется диодным звеном с емкостной фильтром и характеризуется относительно низким значением коэффициента мощности за счет существенной составляющей мощности искажения. ГОСТ Р 51317.3.2 допускает единичные ЭН с мощностью не более 600 Вт, ограничивая форму потребляемого тока определенными границами. В

случае кластерного характера ЭН показатели регламентируются ГОСТ 13109-97.

2. Анализ ПКЭ действующего учебного заведения с суммарной долей энергопотребления ЭН свыше 40% от общего объема энергопотребления показал, что в ряде фрагментов ТРС пиковые мощности ослаблены из-за искажения формы напряжения сети. Причем, измеренное значение коэффициента искажения напряжения находится на предельно допускаемом уровне нормативного показателя (8%).

3. Разработанные уточненные математические модели цепей с ЭН учитывают величину емкости фильтрового конденсатора в структуре ЭН. Для оценки ПКЭ цепей с ЭН предложены аппроксимирующие функции кривых тока, рассмотрены их сравнительные характеристики.

4. Искажение формы напряжения в произвольной точке ТРС определяется суммой парциальных искажений, обусловленных полным сопротивлением различных фрагментов шлейфа от источника до рассматриваемой точки и параметрами тока в каждом из фрагментов ТРС.

5. Мощность потерь и КПД в системах с ЭН существенно зависит от величины коэффициента мощности. Объективным показателем является обобщенный коэффициент эффективности (энергетический КПД), определяемый произведением коэффициента мощности и КПД.

6. Полученные зависимости ПКЭ в системах с ЭН от параметров цепи позволяют определить границы применимости относительно «простых» методов пассивной коррекции.

7. Метод пассивной коррекции на основе введения индуктивности в цепь с ЭН улучшает ПКЭ, однако снижает величину выпрямленного напряжения, увеличивает реактивную мощность сдвига. При некотором значении индуктивной составляющей реактивный ток первой гармоники и связанная с ним мощность сдвига близки к нулю (для единичных ЭН 300-500 Вт – 1...2 мГн). Существенный эффект, сопровождаемый значительным снижением 3-й гармоники, достигается пассивной коррекцией в трехфазных системах методом введения индуктивности в нейтральный провод. Вместе с тем, значительно снижается ток третьей гармоники в нейтрали. В целом, возможности методов пассивной коррекции ограничены, в частности, позволяют увеличить коэффициент мощности до уровня 0,8. Проведенные экспериментальные исследования подтверждают спрогнозированные оценки эффективности пассивной коррекции.

8. Активная коррекция методом генерации в контур энергопередачи с ЭН противофазных токов/напряжений низких гармоник позволяет повысить коэффициент мощности выше 0,9.

9. Разработанное устройство компенсации тока искажений основано на принципе формирования тока сети по эталону на интервалах, когда ЭН не потребляет ток, накапливая энергию в конденсатор и генерации тока искажений в противофазе на интервале проводимости ЭН. Методами моделирования рабочих процессов полученный коэффициент мощности составил 0,96..0,98.

Основные научные результаты диссертации опубликованы в следующих рецензируемых научных журналах и изданиях:

1. Козляев Ю.Д., Лушников И.Л. Расчет показателей энергопотребления электронных нагрузок // Научный вестник НГТУ. – 2007. – № 3 (28). с. 121-128.
2. Козляев Ю.Д., Лушников И.Л. Оценка факторов искажения напряжения сети в точке подключения нелинейного потребителя // Вестник СибГУТИ. – 2010. – № 4. С. 13-14.
3. Козляев Ю.Д., Лушников И.Л. Факторы искажения напряжения сети в точке подключения электронных нагрузок // Научный вестник НГТУ. – 2011. – № 1(42). С. 163-168.
4. Козляев Ю.Д., Лушников И.Л. Оценка эффективности энергопотребления в цепях переменного тока с нелинейными нагрузками // Электросвязь. – 2011. – № 7. С. 26-27.
5. Козляев Ю.Д., Лушников И.Л. Оценка факторов искажения напряжения сети в точке подключения нелинейного потребителя // Электросвязь. – 2011. – № 7. С. 28-30.

Публикации в других журналах, сборниках научных трудов, материалах международных и всероссийских научных конференций:

6. Лушников И.Л. Оценка энергетических показателей устройств и систем с электронными нагрузками // Материалы российской научно-технической конференции «Информатика и проблемы телекоммуникаций», Новосибирск, СибГУТИ, 2007. С. 259-261.
7. Лушников И.Л. Способ решения проблемы ЭМС систем электроснабжения с электронными нагрузками // Материалы российской научно-технической конференции «Информатика и проблемы телекоммуникаций», Новосибирск, СибГУТИ, 2007. С. 261-262.
8. Лушников И.Л. Оценка показателей энергопотребления электронных нагрузок // Материалы всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации», Новосибирск, НГТУ, 2007. С. 228-230.
9. Козляев Ю.Д., Лушников И.Л. Оценка показателей энергопотребления электронных нагрузок // Материалы российской научно-технической конференции «Информатика и проблемы телекоммуникаций», Новосибирск, СибГУТИ, 2008. С. 173-174.
10. Козляев Ю.Д., Михеенко А.М., Лушников И.Л. Оценка загрузки сети переменного тока предприятия при массовом подключении электронных нагрузок // Материалы российской научно-технической конференции «Информатика и проблемы телекоммуникаций», Новосибирск, СибГУТИ, 2008. С. 172-173.
11. Козляев Ю.Д., Михеенко А.М., Лушников И.Л. Особенности энергопотребления нелинейных нагрузок // Материалы IX международной

конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП-2008», Новосибирск, НГТУ, 2008. С. 116-121.

12. Лушников И.Л. Коррекция тока в сети с нелинейными нагрузками // Материалы всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации», Новосибирск, НГТУ, 2008. С. 174-176.

13. Козляев Ю.Д., Лушников И.Л. Коррекция тока в сети с нелинейными нагрузками // Материалы российской научно-технической конференции «Информатика и проблемы телекоммуникаций», Новосибирск, СибГУТИ, 2009. С. 138-139.

14. Лушников И.Л. Экспериментальные исследования пассивных методов коррекции потребляемого тока в одно- и трехфазных сетях с электронными нагрузками // Материалы российской научно-технической конференции «Информатика и проблемы телекоммуникаций», Новосибирск, СибГУТИ, 2010. С. 186-188.

15. Лушников И.Л. Математические модели электронных нагрузок // Материалы российской научно-технической конференции «Информатика и проблемы телекоммуникаций», Новосибирск, СибГУТИ, 2010. С. 188-190.

16. Козляев Ю.Д., Лушников И.Л. Энергетическая эффективность устройств с несинусоидальной формой потребляемого тока // Материалы российской научно-технической конференции «Информатика и проблемы телекоммуникаций», Новосибирск, СибГУТИ, 2010. С. 178-179.

17. Косулина Н.Ю., Лушников И.Л. Аппроксимация тока потребления электронных нагрузок // Материалы российской научно-технической конференции «Информатика и проблемы телекоммуникаций», Новосибирск, СибГУТИ, 2010. С. 183-185.

18. Козляев Ю.Д., Лушников И.Л. Оценка эффективности энергопотребления в цепях переменного тока с нелинейными нагрузками // Материалы X международной конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП-2010», Новосибирск, НГТУ, 2010. С. 189-191.

19. Козляев Ю.Д., Лушников И.Л. Математические модели электронных нагрузок и характеристики тока потребления // Материалы X международной конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП-2010», Новосибирск, НГТУ, 2010. С. 185-188.

Подписано в печать 29.04.2013, формат бумаги 60x84/16, отпечатано на ризографе, шрифт №10, изд.л. 1,5, заказ № 37, тираж 100.

Отпечатано в типографии Сибирского государственного университета телекоммуникаций и информатики, 630102, г. Новосибирск, ул. Кирова, 86.