

А. К. ШИДЛОВСКИЙ, А. Ф. ЖАРКИН

# ВЫСШЕ ГАРМОНИКИ

В НИЗКОВОЛЬТНЫХ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ  
СЕТЯХ



ВЫСШЕ ГАРМОНИКИ В НИЗКОВОЛЬТНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

А. К. ШИДЛОВСКИЙ  
А. Ф. ЖАРКИН

# ВЫСШЕ ГАРМОНИКИ

В НИЗКОВОЛЬТНЫХ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ  
СЕТЯХ

Slavajm BookScan

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ  
ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ

А.К. ШИДЛОВСКИЙ  
А.Ф. ЖАРКИН

# **ВЫСШИЕ ГАРМОНИКИ В НИЗКОВОЛЬТНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ**

---

*ПРОЕКТ  
«НАУКОВА КНИГА»*

---

*Slavaajm* BookScan

КИЕВ НАУКОВА ДУМКА 2005

В монографии получили дальнейшее развитие методы анализа сетей низкого напряжения с нелинейными нагрузками с использованием математических моделей. Разработаны модели электрических сетей зданий с учетом параметров их основных элементов, характерных электропотребителей и фильтров. Предложены методики определения несинусоидальности фазных напряжений в низковольтных электрических сетях. Определены количественные и качественные характеристики влияния параметров нагрузки и сети на значение высших гармоник в электрических сетях зданий. На основе полученных результатов сформулированы требования к элементам сети и разработаны рекомендации по использованию фильтрующих устройств для обеспечения электромагнитной совместимости потребителей низковольтных электрических сетей.

Для научных и инженерно-технических работников, занимающихся вопросами качества электроэнергии и электромагнитной совместимости потребителей электрических сетей и систем. Может быть полезной студентам соответствующей специальности.

У монографії одержали подальший розвиток методи аналізу мереж низької напруги з нелінійними навантаженнями з використанням математичних моделей. Розроблено моделі електричних мереж будинків з урахуванням параметрів їх основних елементів, характерних електроспоживачів і фільтрів. Запропоновано методики визначення несинусоїдальності фазних напруг у низковольтних електричних мережах. Визначено кількісні та якісні характеристики впливу параметрів навантаження і мережі на значення вищих гармонік в електричних мережах будинків. На основі отриманих результатів сформульовано вимоги до елементів мережі і розроблено рекомендації щодо використання фільтруючих пристроїв для забезпечення електромагнітної сумісності споживачів низковольтних електричних мереж.

Для наукових та інженерно-технічних працівників, які займаються питаннями якості електроенергії та електромагнітної сумісності споживачів електричних мереж і систем. Може бути корисною студентам відповідної спеціальності.

Рецензенты: член-корреспондент НАН Украины В.Ф. Евдокимов,  
член-корреспондент НАН Украины В.Г. Кузнецов

*Видання здійснене за державним контрактом  
на випуск наукової друкованої продукції*

Редакция физико-математической  
и технической литературы

Редактор И.Л. Макаренко

Ш 2202080000 - 035  
2005

ISBN 966-00-0471-0

© А.К. Шидловский,  
А.Ф. Жаркин, 2005

## Предисловие

Монография посвящена проблеме электромагнитной совместимости нелинейных потребителей (в первую очередь, с импульсным характером потребляемого тока) низковольтных электрических сетей. В настоящее время в условиях насыщенности электрических сетей зданий и сооружений такими нелинейными электроприемниками, как средства компьютерной техники, решение проблемы высших гармоник в указанных сетях является не просто актуальным, а злободневным. В монографии некоторые теоретические положения и идеи, которые были изложены в ранних публикациях авторов, получили дальнейшее развитие. Это, в первую очередь, относится к разработке новых методов анализа и усовершенствованию моделей сетей низкого напряжения с нелинейными нагрузками путем дополнительного учета параметров основных элементов электрических сетей зданий.

Предлагаемая работа является обобщением серии статей авторов (около 30), опубликованных в период 1990—2004 гг. При этом авторы, проводя исследования процессов в сетях низкого напряжения с нелинейными нагрузками, шли от простого к сложному. Сначала были рассмотрены простые модели, учитывающие параметры отдельных элементов сети и нагрузки. Закончены исследования рассмотрением более совершенных комплексных моделей, учитывающих все основные элементы электрической сети здания от питающего трансформатора до потребителей — источников высших гармоник, что позволило определить параметры несинусоидальности токов и напряжений и оценить электромагнитную совместимость потребителей низковольтных электрических сетей в различных их режимах.

Первая глава монографии посвящена анализу современного состояния исследований проблемы электромагнитной совместимости в сетях низкого напряжения с нелинейными потребителями. Рассмотрены характерные нелинейные потребители, особенности построения низковольтных сетей, примеры отрицательного влияния высших гармоник, а также подходы к оценке электромагнитной совместимости.

Вторая глава монографии посвящена анализу известных моделей нелинейных нагрузок и сетей с нелинейными нагрузками. Сделан вывод, что для проведения соответствующих исследований электрических сетей зданий необходимо усовершенствовать существующие модели путем дополнительного учета параметров основных элементов указанных сетей.

В третьей главе приведены результаты расчетов несинусоидальности токов и напряжений в электрических сетях общественных зданий с помощью разработанной модели. Проведен анализ несинусоидальности напряжений с использованием развернутых схем замещения с источниками токов высших гармоник.

В четвертой главе проанализировано влияние параметров нагрузки и сети на значение высших гармоник в низковольтных сетях. Предложена методика определения несинусоидальности фазных напряжений по известной доле нелинейной нагрузки в различных элементах сети здания.

В пятой главе монографии проведен анализ использования различных средств снижения уровня высших гармоник в сетях низкого напряжения. Более подробно рассмотрены фильтры токов гармоник нулевой последовательности, проанализирована эффективность и сформулированы рекомендации по использованию указанных фильтров в низковольтных электрических сетях.

В шестой главе рассмотрено применение на практике разных способов обеспечения электромагнитной совместимости в сетях низкого напряжения. При этом рассмотрены примеры использования фильтрующих устройств различных модификаций, а также некоторые принципы построения систем электропитания с улучшенной электромагнитной совместимостью.

Авторы выражают искреннюю благодарность В.Ф. Евдокимову и В.Г. Кузнецову, взявшим на себя нелегкий труд по рецензированию работы.

Отзывы и замечания просим направлять по адресу: 03680, Киев-57, проспект Победы, 56, Институт электродинамики НАН Украины.

ВТ	— вычислительная техника
ГРЩ	— главный распределительный щит
ИБП	— источник бесперебойного питания
ИВЭП	— источник вторичного электропитания
КЛЛ	— контактная люминесцентная лампа
КУ	— корректирующее устройство
КЭ	— качество электроэнергии
Н	— нагрузка
НН	— низкое напряжение
ОТ	— оперативный ток
ПКЭ	— показатель качества электроэнергии
ПП	— полупроводниковый преобразователь
ПУЭ	— правила устройства электроустановок
РЗ и А	— релейная защита и автоматика
РЩ	— распределительный щиток
РЭК	— радиоэлектронный комплекс
СВЭП	— система вторичного электропитания
СГЭ	— система гарантированного электропитания
С и ТМ	— связь и телемеханика
СН	— собственные нужды
СФВЧ	— специальный фильтр высоких частот
СЭС	— система электроснабжения
Ф	— фильтр
ФНЧ	— фильтр низких частот
ФТНП	— фильтр токов нулевой последовательности
ЭДС	— электродвижущая сила
ЭМО	— электромагнитная обстановка
ЭМП	— электромагнитная помеха
ЭМС	— электромагнитная совместимость
ЭПРА	— электронная пускорегулирующая аппаратура
$C, R_{\text{выпр}}$	— емкость фильтра и активное сопротивление нагрузки выпрямителя
$I^0, U^0$	— ток и напряжение нулевой последовательности
$J_{\text{эк}}$	— экономическая плотность тока

$k$	— коэффициент, учитывающий неидеальность элементов фильтра
$K_{0U}$	— коэффициент несимметрии напряжения по нулевой последовательности
$K_U$	— коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения
$K_I$	— коэффициент искажения синусоидальности кривой тока
$K_{Un}$	— коэффициент $n$ -й гармонической составляющей напряжения
$K_{In}$	— коэффициент $n$ -й гармонической составляющей тока
$n$	— номер гармонической составляющей
$Z_k, Z_T^0$	— сопротивления короткого замыкания и нулевой последовательности трансформатора
$Z_0, Z_1$	— сопротивления нулевого и фазного проводов линии
$\alpha$	— доля нелинейной нагрузки
$\beta$	— коэффициент загрузки
$\Delta U$	— потери напряжения
$\Delta U_{(n)}$	— падение напряжения от тока $n$ -й гармонической составляющей
$\gamma$	— доля осветительной нагрузки

Проблема качества электроэнергии (КЭ) и более общего понятия электромагнитной совместимости (ЭМС) потребителей в системах электроснабжения (СЭС) относится к числу важнейших проблем современной электроэнергетики. От ее решения во многом зависит решение проблемы повышения эффективности использования электроэнергии и надежности энергообеспечения потребителей [17, 68].

Проблема повышения эффективности использования электрической энергии была и остается одной из приоритетных среди задач, которые решаются в энергетике Украины. Только за счет мероприятий межотраслевого и технически возможного отраслевого характера предусматривается довести размеры экономии электроэнергии в 2005 году до 24,5—27,8 и 21,3—24,4 млрд кВт·ч, а в 2010 году до 39,1—51,0 и 24,3—32,0 млрд кВт·ч, соответственно [125]. Причем не меньше трети составит экономия за счет мероприятий по повышению энергетической эффективности в СЭС. Разработка основных направлений повышения энергоэффективности СЭС связана с определением причин неэффективного использования электроэнергии и резервов энергосбережения, в частности его потенциала. Внедрение мероприятий по энергосбережению в СЭС, которые содержат значительное количество нелинейных и нестационарных потребителей, предусматривает обеспечение заданных уровней КЭ в системах и ЭМС ее элементов. Это связано с тем, что снижение КЭ в СЭС приводит к нарушению технологических режимов, возрастанию уровней потребления активной и реактивной мощностей, потерям активной энергии, сокращению срока службы и снижению коэффициента мощности системы и, соответственно, производительности электрического оборудования.

В условиях дефицита генерирующих мощностей возрастание уровней высших гармоник тока и напряжения в СЭС приводит к еще большему обострению проблемы ЭМС элементов системы.

Это объясняется необходимостью обеспечения эффективной совместной работы электротехнического и электроэнергетического оборудования с разными характеристиками, устранения их взаимного влияния. В связи с этим следует отметить сближение сути и проявлений проблемы повышения энергоэффективности и проблемы обеспечения КЭ и ЭМС в СЭС, что делает обоснованным поиск единого подхода к их решению.

Качество электроэнергии является существенным фактором, влияющим на эффективность режимов энергосистемы и потребителей. Проблема обеспечения КЭ в электрических сетях общего и специального назначения приобрела в последнее десятилетие особую актуальность. Это вызвано широким внедрением новых прогрессивных технологических процессов и систем и, как следствие, непрерывным ростом числа и мощности нелинейных, несимметричных и быстроизменяющихся потребителей электроэнергии, средств цифровой техники, а также соответствующими режимными изменениями потокораспределения в электрических сетях. В Украине положение с КЭ ухудшается из-за недостаточной пропускной способности электрических сетей (особенно низкого напряжения, длина линий которых достигает 50 % общей длины всех линий электропередачи); устаревших методов их проектирования и эксплуатации, не учитывающих в достаточной степени показатели КЭ; отсутствия современных средств измерения КЭ и эффективных средств его улучшения. Многочисленные исследования режимных параметров в электрических сетях Украины свидетельствуют о том, что основные показатели КЭ не всегда отвечают существующим требованиям.

Круг вопросов, составляющих содержание этой проблемы, достаточно обширен и, в основном, сводится к следующим: определению влияния электромагнитных помех на электрооборудование и оценке возникающего при этом экономического ущерба, оценке значений электромагнитных помех, генерируемых различными нелинейными и резкопеременными нагрузками, прогнозированию их значений в разных узлах СЭС и, наконец, минимизации их уровней до значений, допустимых соответствующими стандартами.

Важность решаемой проблемы наиболее наглядно иллюстрирует экономическая оценка последствий снижения КЭ. Так, по данным, опубликованным в американских периодических изданиях в 2000 году, ежегодный экономический ущерб в США, обусловленный низким качеством электроэнергии, составляет (по разным публикациям) 30–50 млрд дол. США в год за счет отри-

цательного влияния главным образом высших гармоник. Широкие исследования, проведенные в Советском Союзе к началу 90-х годов XX века, позволили оценить общий ущерб суммой более 10 млрд дол. США в год, что значительно меньше, чем ущерб от низкого КЭ электроэнергетики США. Это объясняется тем, что уровень использования нелинейных нагрузок, в первую очередь устройств силовой преобразовательной техники, в 80-е годы в СССР был значительно ниже, чем в США в 2000 году [54]. По экспертным оценкам минимальный ущерб от сниженного КЭ в целом по Украине составляет не меньше 7,2 млрд грн ежегодно.

В настоящее время рост установленной мощности нелинейных нагрузок даже в развитых странах опережает внедрение мероприятий по минимизации генерируемых ими электромагнитных помех. Например, в низковольтных распределительных сетях Швейцарии содержание гармоник в течение 12 лет возросло на 30 %. Аналогичная ситуация наблюдается и в Украине. Поэтому сегодня нельзя сказать, что мы приближаемся к коренному решению проблемы КЭ и ЭМС. Это станет возможным лишь при разработке экономически и юридически обоснованных норм, методов и средств минимизации уровней показателей КЭ.

Проблема высших гармоник особенно остро проявляется и имеет свои особенности в сетях низкого напряжения (НН). С одной стороны, в настоящее время в низковольтных сетях жилых и общественных зданий широко распространены и непрерывно возрастают в количестве сравнительно маломощные нелинейные электроприемники, такие, как, средства компьютерной техники, телекоммуникационная аппаратура, аудио- и видеотехника, современные бытовые электроприборы и т.д. Несмотря на небольшую мощность каждого из этих потребителей электроэнергии, их массовое применение является причиной значительных искажений синусоидальности кривых напряжений в сетях НН. С другой стороны, именно в низковольтных сетях получили распространение ответственные электропотребители, отличающиеся повышенной чувствительностью к воздействию высших гармоник, которое приводит к существенному технико-экономическому ущербу. Причем очень часто рассматриваемые электроприемники (в первую очередь, средства компьютерной техники) являются одновременно виновниками и жертвами нарушений ЭМС. Поэтому сегодня можно утверждать, что Украина столкнулась с новой серьезнейшей проблемой, которая требует безотлагательного решения.

Очевидно, что существует потребность в проведении научных исследований по разработке практических рекомендаций, направленных на улучшение КЭ и обеспечение ЭМС потребителей низковольтных электрических сетей зданий и сооружений. В настоящее время для проведения анализа электромагнитных процессов в сетях НН с нелинейными нагрузками в целях определения их влияния на сеть используются соответствующие математические модели. Однако существующие модели не учитывают в полной мере параметры основных элементов электрической сети и не позволяют определить уровни высших гармоник токов и напряжений на зажимах отдельных электроприемников, подключенных к сети электроснабжения. Поэтому дальнейшее развитие научных исследований по разработке эффективных моделей и методик в целях определения количественных и качественных характеристик несинусоидальности токов и напряжений, а также разработка на основе результатов исследований способов и технических средств обеспечения ЭМС в низковольтных электрических сетях с нелинейными потребителями являются весьма актуальными.

## СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОСОБЕННОСТИ ПРОБЛЕМЫ ВЫСШИХ ГАРМОНИК В НИЗКОВОЛЬТНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

### 1.1. Причины образования высших гармоник в сетях низкого напряжения

В электроснабжении получил широкое распространение термин «электромагнитная помеха». Он приобрел формы, обусловленные разнообразием существующих электроприемников, которые могут быть как относительно мощными (силовыми) — синхронные и асинхронные двигатели, статические и машинные преобразователи, сварочные агрегаты и другие электротехнологические установки, так и небольшой единичной мощности — средства компьютерной техники, электробытовые приборы и др. Все указанные потребители объединены сетью электроснабжения (за исключением автономных систем), что вызывает необходимость определения степени воздействия на сеть электромагнитных помех, возникающих в результате работы отдельных электроприемников.

Под электромагнитной помехой (в дальнейшем помехой) понимаются электрическое и (или) магнитное явления (процессы), созданные любым источником в пространстве или проводящей среде и нежелательно влияющие или способные оказать нежелательное влияние на состояние электроприемника (функционирование, эффективность использования, потери, старение изоляции и т. д.). Носителями помех выступают постоянные или изменяющиеся во времени значения напряжения, тока, электрического заряда или магнитного потока.

Помехи можно классифицировать по разным признакам. В зависимости от путей распространения помехи подразделяют на пространственные и кондуктивные, по предсказуемости времени появления и формы — на случайные (вероятностные) и регулярные (систематические). Помехи из сети питания переменного тока можно подразделять на импульсные (кратковременные) и длительные. Исследование электромагнитной обстановки в рассматриваемой точке сети представляет собой определение количественных характеристик длительных и импульсных помех, характерных для данного участка сети. К длительным помехам от-



носят отклонения напряжения от номинального значения длительностью более 5 мс, превышающие допустимые пределы изменения в сторону увеличения или уменьшения. К импульсным помехам относят импульсы напряжения разной полярности, накладываемые на нормальный уровень мгновенного значения синусоиды или постоянного напряжения длительностью от долей наносекунд до единиц миллисекунд. К помехам также следует отнести провалы напряжения, вызванные, например, срабатыванием автоматического повторного включения или автоматического включения резерва. Учитывая максимально возможные задержки пуска мощных двигателей, можно предположить, что самые продолжительные длительные помехи лежат в пределах 10 с. К разряду помех не будут относиться только отключения (аварийные или рабочие), связанные с последующим ручным включением напряжения.

По характеру протекания процесса во времени различают помехи одиночные, периодические, гармонические и шумы. Одиночные помехи вызваны коммутацией сетей и электроприемников, короткими замыканиями, статическими или атмосферными разрядами либо другими процессами, вызывающими кратковременные независимые друг от друга возмущения тока и напряжения в сети. Периодические помехи связаны в основном с импульсно-циклическим характером нагрузки мощных электроприемников. Гармонические помехи (высшие гармоники) возникают с частотой сети или кратной ей и вызываются в основном мощными нелинейными электропотребителями при ограниченной мощности питающей сети. Гармонические и периодические помехи, как правило, приводят к возникновению несинусоидальности напряжения [13, 18, 29, 98, 115, 131, 174, 181, 193, 209].

Причины возникновения высших гармоник на разных участках сети также различны. Если в высоковольтных сетях появление высших гармоник обусловлено наряду с воздействием мощных нелинейных электроприемников коронными разрядами, грозовыми явлениями и аварийными режимами ЛЭП, то в низковольтных сетях они обусловлены преимущественно нестационарными процессами и нелинейными характеристиками отдельных электроприемников. При этом высшие гармоники, вызываемые низковольтными нелинейными потребителями, в соответствии с приведенной выше классификацией назовем систематическими, гармоническими, кондуктивными помехами.

Очевидно, что причиной нарушения КЭ может являться недопустимое ухудшение любого из его параметров, вызванное свой-

ствами одного из потребителей либо их группы при совместной эксплуатации. Обычно КЭ ухудшает каждый из потребителей и, при некотором их количестве, такое ухудшение достигает граничного значения, вызывающего сбои и отказы аппаратуры. В этом случае конкретного виновника просто не существует. При этом сложно привести пример электроприемника, являющегося по отношению к сети чисто активной нагрузкой. Даже обычная лампа накаливания за счет разности сопротивлений холодной и нагретой нити накаливания создает при включении заметные перегрузки. Значительно проще привести примеры явно искажающих сетевое напряжение электроприемников, таких как сварочные аппараты, управляемый электропривод, компьютерная и другая электронная техника. Значительная часть этих потребителей генерирует в сеть высшие гармоники, серьезным образом обостряя ситуацию с КЭ в низковольтных сетях [3]. Поэтому в условиях насыщенности указанных сетей нелинейными электропотребителями доминирующим фактором ухудшения КЭ становится несинусоидальность токов и напряжений.

Проведенный анализ показывает, что вызываемые такими электроприемниками искажения синусоидальности кривых токов в сетях НН могут быть весьма существенными [30, 97]. Например, для входящих быстрыми темпами в быт СВЧ-печей, которые удобны и энергоэффективны (в связи с кратковременностью работы вследствие быстрого достижения требуемого теплового эффекта) характерны коэффициенты искажения синусоидальности кривой входного тока от 15 («Электроника», СП23, ЗИЛ, 1300ВА) до 29 % (Daewoo, MOD KOR-8167, 1350ВА). Эти показатели сами по себе вроде бы и не вызывают опасения, к тому же относительные значения гармоник тока быстро убывают в зависимости от порядкового номера: в первом случае  $I_{(3)} = 13,5\%$ ,  $I_{(5)} = 3,6\%$ ,  $I_{(7)} = 2,7\%$  и т. д., а во втором —  $I_{(3)} = 25,2\%$ ,  $I_{(5)} = 11,2\%$ ,  $I_{(7)} = 5,2\%$  и т. д. Однако включение этих печей в типовых условиях приводит не только к снижению напряжения питающей сети на 2–4 %, но, что значительно серьезнее, и к увеличению коэффициента искажения синусоидальности кривой этого напряжения на 6–18 %.

Современные компактные люминесцентные лампы (КЛЛ) из-за своей высокой стоимости используются, в первую очередь, в целях демонстрации престижности и, лишь во вторую — как энергоэффективные светильники, которые различаются в 4–5



раз большей светоотдачей и в 5—6 раз большим сроком службы, чем лампы накаливания [203]. Коэффициент искажения синусоидальности кривой питающего тока ( $K_I$ ) КЛЛ с электромагнитным балластом (ЭМБ) находится, по свидетельству [203], на том же уровне, что и в СВЧ-печах: для лампы Life Look 50 фирмы NEC (Япония) — 13,1 % (здесь и далее учитываются гармоники по тринадцатую включительно), для лампы Globolux 125 фирмы TUNGSRAM (Австрия) — 18,5 %. Это подтверждают и проведенные нами исследования: для лампы NLS-18W (P) фирмы RADIUM (Германия)  $K_I = 25,4$  %, для лампы ЛЕЦ-20 (Украина)  $K_I = 12,2$  %.

Желание избавиться от естественных недостатков КЛЛ с ЭМБ (сравнительно большая масса; низкий  $\cos \phi$ ; высокое напряжение зажигания, что может не позволить им вообще зажечься при снижении питающего напряжения ниже 190—220 В; длительное время запуска) явилось причиной разработки и внедрения электронной пускорегулирующей аппаратуры (ЭПРА). Однако избавление от указанных недостатков в таких источниках было достигнуто ценой резкого ухудшения формы кривой потребляемого тока. В [83] приведены следующие данные: для лампы PLC Elektronik фирмы Philips (Голландия)  $K_I = 134,9$  %; для лампы Dulux Elektronik фирмы OSRAM (Германия)  $K_I = 162,4$  %; для лампы GP-12B фирмы ECONOLAMP (Гонконг)  $K_I = 169,4$  %. Необходимо отметить чрезвычайно широкий спектр гармоник тока, потребляемого КЛЛ с ЭПРА, и то, что снижение амплитуды гармоник при увеличении их номера происходит весьма медленно (например, для последней из упомянутых ламп  $I_{(3)}^* = 92,6$  %,  $I_{(5)}^* = 85,1$  %,  $I_{(7)}^* = 74,7$  %,  $I_{(9)}^* = 61,7$  %,  $I_{(11)}^* = 48,2$  %,  $I_{(13)}^* = 34,2$  %). С изменением значения питающего напряжения форма тока и его гармонический состав изменяются мало. Так, для лампы FLE 16 TBX/827/LC фирмы TUNGSRAM при 220 В  $K_I = 150,5$  %, а при 180 В  $K_I = 152$  %. Однако из-за наличия внутренней системы стабилизации, которая по сути поддерживает неизменным световой поток, при этом резко (примерно в полтора раза) возрастают абсолютные значения токов потребления первой и всех высших гармоник.

Следует отметить, что темпы производства КЛЛ с ЭПРА с каждым годом возрастают. Если ориентироваться на прогноз, данный в [61] о возможной замене 50 % ламп накаливания КЛЛ, то можно ожидать дальнейшего существенного ухудшения си-

туации с несинусоидальностью напряжений в сетях НН, ведь на освещение в 1994 году в Украине расходовалось около 17 % всей производимой электроэнергии.

Проведенный анализ показывает, что основными источниками высших гармоник в сетях НН являются потребители энергии, имеющие в своем составе выпрямитель с мощным емкостным фильтром. Это так называемые преобразователи с бестрансформаторным входом или, по международной терминологии, AC/DC Switch Mode Power Supply (SMPS) [172], которые реализуют ту же идеологию, что и ЭПРА. В настоящее время это самая серьезная проблема, которая порождена развитием электроники и усугубляется по мере расширения масштабов ее использования.

В 70-е годы XX века достижения в области электрофизики и технологии производства высокочастотных полупроводниковых приборов позволили повысить их рабочие напряжения до 200—600 В при токах 10—20 А. Это определило актуальность работ по созданию сетевых источников вторичного электропитания (ИВЭП) с бестрансформаторным входом, в которых преобразование параметров электроэнергии производилось на высокой частоте (10—20 кГц), а фильтрация и стабилизация напряжения осуществлялась за счет высокочастотной импульсной модуляции. Подобные работы проводились практически во всех развитых странах и привели к повышению КПД устройств электропитания до 0,75—0,9 при увеличении удельной выходной мощности до 100 Вт/дм<sup>3</sup> [7, 16, 33, 67, 112]. В середине 80-х годов XX века накопленный опыт проектирования и эксплуатации систем электропитания с широким применением ИВЭП с бестрансформаторным входом позволил выявить их некоторые негативные свойства, в первую очередь, касающиеся существенных искажений синусоидальности кривых входных токов.

В частности, трехфазные нагрузки этого типа (частотно управляемые электроприводы, различные инверторы, в том числе, сварочные выпрямители инверторного типа) генерируют мощные пятую и седьмую гармоники (до 70—80 % амплитуды основной гармоники каждая). При этом форма потребляемого тока значительно искажается и коэффициент искажения синусоидальности кривой тока  $K_I = 80—90$  % [177]. Такие однофазные выпрямительные нагрузки из-за своей массовости (компьютеры, мониторы, серверы, телевизоры, телекоммуникационная и медицинская аппаратура, и т. п.) значительно ухудшают КЭ, генерируя в сеть третью и кратные ей гармоники тока и доводя об-

ший  $K_i$  до 120—150 %. Например, в [1] приводятся относительные значения амплитуд гармоник входного тока компьютера по тринадцатую включительно, в соответствии с которыми  $K_i = 146$  %.

Таким образом, рассмотренные потребители относительно питающей сети являются существенно нелинейной нагрузкой. При этом, ограниченная магнитная связь между первичной и вторичной обмотками распределительного трансформатора препятствует распространению высших гармоник в высоковольтную питающую сеть, и они в основном циркулируют в низковольтной сети. Проблема усугубляется тем, что за счет продольного активно-индуктивного сопротивления сети несинусоидальный характер кривой входного тока указанных электроприемников вызывает искажения питающего напряжения, которые являются фактором взаимовлияния высших гармоник в сетях НН.

Известно, что подавляющее большинство электроприемников, подключаемых к сетям НН, являются однофазными и имеют случайные графики нагрузок. Поэтому в любой момент времени в сети наблюдается несимметрия нагрузок по фазам и соответствующая несимметрия токов. При этом следует различать несимметрию токов, определяемую неравномерным подключением электроприемников по фазам (неслучайная несимметрия), и несимметрию, вызванную случайными обстоятельствами (вероятностная несимметрия) [105].

Проведенные исследования показывают, что в низковольтных электрических сетях в нормальном рабочем режиме вероятностная и неслучайная несимметрии токов являются постоянно действующими факторами, а в случае подключения нелинейных электроприемников возникает так называемая несимметрия высших гармоник. Известно, что в симметричном режиме токи высших гармоник  $3k + 1$  ( $k$  — любое целое число) имеют прямой порядок следования фаз, токи высших гармоник  $3k + 2$  — обратный и  $3k$  — нулевой порядок следования фаз. Если система фазных токов каждой из гармоник становится несимметричной по амплитуде и фазе и может быть разложена в общем случае на симметричные составляющие всех трех последовательностей, будем считать, что имеется несимметрия высших гармоник тока. Тогда при разложении несимметричных гармоник наличие обратной и нулевой последовательностей будет характеризовать несимметрию гармоник  $3k + 1$ , наличие прямой и нулевой — несимметрию гармоник  $3k + 2$ , а прямой и обратной — несимметрию гармоник, кратных трем.

Следует отметить, что вопросам несимметрии нелинейных нагрузок посвящен ряд публикаций [49, 65, 87, 167, 171, 188, 216]. В работах [87, 188], в частности, показано, что сложные формы кривых фазных токов нелинейных потребителей редко имеют одинаковую конфигурацию в каждой из трех фаз. При этом система питания может иметь разные фазные соотношения и даже различную схему на каждой фазе. В первую очередь это относится к средствам преобразовательной техники, которые отличаются друг от друга мощностью, числом фаз, размещением, схемой соединения, условиями работы и др. С одной стороны, в результате их смешанных и суммирующих воздействий величины высших гармоник в сети существенно отличаются от теоретических предсказаний. С другой стороны, вследствие несимметрии нагрузок, различных задержек в работе отдельных фаз выпрямителя, расхождения в значениях коэффициента трансформации и т. д. не исчезают те гармонические составляющие, которые в соответствии с теорией должны отсутствовать.

Нетрудно понять, что возникающая несимметрия высших гармоник является нарушением КЭ в результате совместного воздействия несимметрии и несинусоидальности токов соответствующих нагрузок. Поэтому в СЭС необходимо выполнять различного рода мероприятия по устранению, а если это не удалось сделать, то по ограничению несимметрии высших гармоник. Например, в свое время Австралийский стандарт (AS 2279—1979) на содержание высших гармоник в сети [171] даже предлагал ввести ограничения на использование однополупериодного и так называемого полууправляемого оборудования, которое вследствие совместного применения диодов и тиристоров создает несимметричную ситуацию в сети. Можно предположить, что если несимметрию высших гармоник нельзя устранить организационными мероприятиями, то необходимы технические средства уменьшения высших гармонических фазных токов в условиях их несимметрии.

В настоящее время наблюдается начавшийся еще в 90-е годы прошлого века рост электропотребления коммунально-бытовым хозяйством и населением Украины. Это объясняется, с одной стороны, спадом энергопотребления промышленными отраслями национальной экономики, а с другой — значительным ростом использования разнообразных электробытовых приборов, том использования достаточно большой единичной мощности. Кроме очень часто достаточно большой единый рост количества управленческих структур, банков и финансовых организаций, учеб-

ных центров, издательских фирм и т.д., которые чрезвычайно насыщены разнообразной оргтехникой (многочисленные персональные компьютеры и компьютерные сети, множительная и контрольная техника, средства персональной связи). При этом названные потребители подключаются, как правило, к электрической сети НН соответствующего здания или сооружения. Как было отмечено, характер их электропотребления в значительной степени определяется наличием ИВЭП с бестрансформаторным входом, в качестве входного звена которого используется сетевой выпрямитель с емкостным фильтром.

Таким образом, в настоящее время в низковольтных сетях жилых и общественных зданий получили широкое распространение нелинейные электроприемники сравнительно небольшой мощности, причем существует тенденция к непрерывному увеличению их количества. Несмотря на малую мощность этих потребителей электроэнергии, их массовое применение является причиной значительных искажений синусоидальности кривых напряжений в сетях НН.

## 1.2. Влияние высших гармоник на различные виды электрооборудования

Отрицательные последствия загрузки сетей высшими гармониками хорошо изучены, этому вопросу посвящена обширная литература [52, 178, 185, 215]. Влияние несинусоидальности напряжений и токов на работу электрооборудования ощущается практически во всех странах с развитой промышленностью и, как правило, приводит, с одной стороны, к увеличению потерь напряжения и мощности в сетях, уменьшению их пропускной способности, а с другой — к нарушению нормальной работы и уменьшению срока службы электрооборудования, снижению производительности труда, а также количества и качества выпускаемой продукции. Например, известно, что при допустимых значениях несимметрии напряжения 2 % и несинусоидальности 5 % срок службы асинхронных двигателей сокращается на 21 %, синхронных — на 32 %, трансформаторов — на 8 %, конденсаторов — на 40 %.

При рассмотрении вопроса искажения формы кривой тока и напряжения сети НН следует учитывать некоторые особенности ее построения. К ним, в частности, относится то, что подавляющее большинство потребителей такой сети, в том числе и нели-

нейных, являются однофазными (см. параграф 1.1), а сеть выполняется трехфазной с нулевым проводом. В результате в нулевом проводе будут протекать токи всех высших гармоник переменной последовательности. При этом возникает проблема перегрузки нулевого провода в четырехпроводных сетях НН, вызванная неравномерной загрузкой фазных проводов при подключении к ним однофазных нелинейных потребителей. Иногда величина суммарного действующего значения тока в нулевом проводе может даже превосходить значение тока в фазном проводе [5, 64, 87, 92, 150, 184, 187]. Проведенный в работе [182] анализ свидетельствует, что теоретически максимальный ток нейтрали с учетом гармоник в 1,73, а иногда и в 3 раза превышает фазный. При резкопеременной нагрузке пульсации тока наблюдаются в каждой из фаз в разное время. Поскольку все эти токи протекают в нейтрали, о взаимной компенсации речи быть не может. В случае, если пики нагрузки не пересекаются, ток нейтрали будет равен утроенному фазному току. Эта ситуация достаточно типична для сетей с большим удельным весом электронного оборудования.

Необходимо отметить некоторые конструктивные особенности выполнения сетей НН, оказывающих существенное влияние на величины высших гармоник токов и напряжений. По установившейся практике проектирования наиболее широкое распространение в сетях НН получили распределительные трансформаторы с соединением обмоток по схеме звезда—звезда с нулем. Основным недостатком таких трансформаторов — относительно большое сопротивление нулевой последовательности  $Z_0^0$ , которое определяется конструктивными особенностями трансформатора, схемой соединения его обмоток, степенью насыщения стержней магнитопровода и др. Следует отметить, что вопросам определения активного  $R_0^0$ , индуктивного  $X_0^0$  и полного  $Z_0^0$  сопротивлений трансформатора посвящен ряд работ [69, 70, 76, 80, 129, 134, 155, 168]. При определении этих параметров различными авторами использовались различные методики, вследствие чего результаты значительно различаются между собой. Проведя анализ последних можно сделать вывод, что для типов трансформаторов ТМ, ТМА, ТСМА значение  $Z_0^0$  в 8—18 раз больше, чем сопротивление прямой последовательности. Такая особенность трансформаторов с соединением обмоток звезда—звезда с

нулем делает их весьма чувствительными к несинусоидальности фазных токов.

Необходимо указать на некоторые особенности выполнения воздушных и кабельных линий сетей НН. Это прежде всего то, что сечение нулевого провода воздушной линии в 3—9 раз меньше суммарного сечения фазных проводов, а сечение нулевой жилы кабеля в 5—14 раз меньше суммарного сечения фазных жил. В результате сопротивление нулевой последовательности воздушной линии в 4—10 раз, а кабельной — в 6—15 раз выше, чем сопротивление обратной последовательности. Кроме того, характерной особенностью сетей НН является то, что активные составляющие полных сопротивлений трансформаторов и линий весьма значительны. Это вызывает необходимость учета последних при расчетах режимов и проектировании электрооборудования, в том числе и фильтров, в сетях НН.

Таким образом, в сетях НН возникает значительная несинусоидальность фазных напряжений, обусловленная существенными токами высших гармоник и большими сопротивлениями нулевой последовательности элементов трехфазных четырехпроводных сетей. В результате в низковольтных сетях Украины коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения  $K_v$  редко бывает меньше 4—5 %. На западе, где сети более мощны, и то предлагается при расчетах функционирования электрооборудования ориентироваться на так называемые источники питания типа SP2, имеющие изначально 1 % несимметрии и 2,5 % предварительно присутствующей пятой гармоники напряжения [176]. Возникающие искажения питающего напряжения, в свою очередь, негативно сказываются на функционировании электроприемников, подключаемых к узлам с повышенным уровнем  $K_v$ , замыкая порочный круг отрицательного взаимовлияния гармоник тока и напряжения в сетях с нелинейными нагрузками.

В обзоре, выполненном в 1990 г. в США под руководством профессора Мак-Греди [186], в частности, отмечается: «Сами источники высших гармоник часто очень чувствительны к отрицательному воздействию других источников, например, мощных электронных нагрузок, т. е., они — одновременно и злодеи, и жертвы с энергетической точки зрения». В полной мере это относится к низковольтным нелинейным электроприемникам, которые были рассмотрены в предыдущем параграфе. Следствием характера тока, потребляемого импульсной нагрузкой, является искажение кривой напряжения на ее зажимах. Форма напряжения

становится плоской, так как в момент импульса тока увеличивается падение напряжения на продольном сопротивлении сети.

Напряжение плоской формы, воздействуя на импульсный источник питания, снижает уровень выпрямленного напряжения, увеличивает тепловыделение в элементах импульсного источника питания и снижает его устойчивость к кратковременным провалам напряжения. Следует отметить, что в большинстве импульсных источников питания предусмотрена система стабилизации выходного напряжения. Поэтому снижение уровня входного напряжения в допустимых пределах за счет плоской формы его кривой не вызовет снижения уровня выходного постоянного напряжения. В то же время снижение входного напряжения вызовет увеличение длительности импульсов тока высокочастотного преобразователя по отношению к длительности пауз. Это означает увеличение тока, потребляемого высокочастотным преобразователем, в среднем за период и увеличение скорости разряда конденсатора. Большой ток, потребляемый высокочастотным преобразователем, увеличивает тепловые потери в элементах импульсного источника питания. Так, снижение входного напряжения на 10 % вызовет увеличение тока на 11 %, а тепловых потерь — на 23 %.

В случае провала или даже полного исчезновения напряжения на зажимах импульсного источника питания цепи постоянного тока могут продолжать свою нормальную работу в течение некоторого, очень короткого промежутка времени. Энергия, необходимая для работы в течение этого промежутка времени, — это энергия сглаживающего конденсатора. Несмотря на то, что этот конденсатор имеет весьма большую емкость, запасаемая им энергия зависит еще и от напряжения, до которого он был первоначально заряжен. При синусоидальной форме кривой питающего напряжения конденсатор может зарядиться до напряжения большего, чем при плоской форме питающего напряжения. В случае полного исчезновения напряжения запасенной в конденсаторе энергии может не хватить для поддержания нормальной работы цепей постоянного тока до момента восстановления питающего напряжения при его кратковременном провале или исчезновении.

По данным работы [28] в случаях, когда мощность нелинейных электропотребителей не превышает 10—15 % суммарной мощности нагрузки сети, каких-либо особенностей в эксплуатации СЭС, как правило, не возникает. При превышении указанного предела следует ожидать появления различных проблем в

эксплуатации и последствий, причины которых не являются очевидными. В низковольтных сетях, имеющих долю нелинейной нагрузки свыше 25 %, отдельные проблемы могут проявиться сразу.

В результате высшие гармоники приводят к отказам систем управления и автоматики, а также к сбою компьютерных сетей и цифровых систем обработки и передачи информации, что приносит наибольший ущерб. Кроме того, гармонические составляющие являются причиной нарушений телевизионных изображений, вызывают нарушения в работе люминесцентных ламп и сокращают срок службы ламп накаливания [5, 82, 95, 216]. В последнее время отмечено негативное влияние высших гармоник на разные бытовые приборы, прежде всего радиоприемники и устройства с высококачественным воспроизведением звука, вызывающих различного рода акустические помехи.

Следует особо отметить, что даже низкие уровни высших гармоник могут вызвать нарушения режимов работы у некоторых видов контрольного, защитного и измерительного оборудования из-за искажений формы кривой измеряемых напряжений и токов на вторичных обмотках измерительных трансформаторов [14, 15, 111]. В результате, например, высшие гармоники приводят к возникновению ложных срабатываний защитных реле на трансформаторных подстанциях [78].

Гармоники, генерируемые нелинейной нагрузкой, создают дополнительные потери в распределительных трансформаторах и трансформаторах для устройств преобразовательной техники. Эти потери могут быть причиной выхода из строя трансформаторов вследствие перегрева [4, 73, 104, 180]. В частности, потери, обусловленные гистерезисом, пропорциональны частоте, а вихревыми токами — ее квадрату. В синусоидальных режимах потери на вихревые токи невелики и составляют в среднем 5 % номинальных потерь короткого замыкания трансформатора. Однако в случае протекания токов высших гармоник дополнительные потери резко возрастают и могут достигать 30—50 % потерь короткого замыкания.

В работе [127] показано, что потери в трансформаторе возрастают с увеличением мощности трансформатора и увеличения сечения проводников обмоток. При этом существенный рост потерь наблюдается при работе трансформатора на случайную нелинейную нагрузку при наличии нулевого провода, нагруженного токами гармоник нулевой последовательности. В результате, при работе трансформатора на симметричные однофазные

выпрямители потери больше, чем при работе этого же трансформатора на схему Ларионова. Это связано с наличием в первом случае гармоник тока, кратных трем, которые увеличивают потери в обмотках трансформатора.

В условиях несинусоидальности тока ухудшаются условия работы батарей конденсаторов, которые предназначены для компенсации реактивной мощности нагрузки. При этом они изменяют нормальный путь протекания тока высших гармоник от нелинейного потребителя к источнику питания, замыкая часть этого тока через себя. Так как сопротивления элементов сети имеют индуктивный характер, то при применении установок компенсации реактивной мощности и наличии нелинейных электропотребителей возникает вероятность появления резонансных режимов (как по току, так и по напряжению) на отдельных элементах СЭС.

Воздействие высших гармоник на вращающиеся машины во многом идентично воздействию несимметрии напряжений и токов. Они вызывают дополнительные потери в обмотке и стали статора. Кроме того, присутствие в кривой тока статора высших гармоник приводит к появлению в зазоре несинхронных магнитных полей, перемещающихся относительно ротора. При этом высшие гармоники 5-го и 11-го порядков создают поля обратной последовательности, вращающиеся относительно ротора в противоположном направлении, а составляющие 7-го и 13-го порядков создают поля прямой последовательности. Однако, поскольку частота их вращения выше частоты вращения ротора с кратностью порядка гармоники, поля обеих последовательностей наводят в контурах ротора токи повышенной частоты, которые протекают в верхних слоях массивных частей ротора и, замыкаясь по его торцам, вызывают местные перегревы [72, 179, 200, 201].

При несинусоидальности напряжения наблюдается ускоренное старение изоляции электрических машин, трансформаторов, конденсаторов и кабелей. При рабочих температурах в изоляционных материалах протекают химические реакции, приводящие к постепенному изменению их изоляционных и механических свойств. С увеличением температуры эти процессы ускоряются, сокращая срок службы оборудования. В конденсаторах потери энергии пропорциональны частоте, поэтому несинусоидальный ток приводит к их перегреву. Сущность электрического старения заключается в возникновении так называемых частичных разрядов, которые распространяются лишь на часть изоляционного

промежутка, например, частичные разряды в газовых включениях. Частичные разряды связаны с рассеянием энергии, следствием которого является электрическое, механическое и химическое воздействия на окружающий диэлектрик. В результате развиваются местные дефекты изоляции, что приводит к сокращению ее срока службы.

Старение изоляции проводников и кабелей обусловлено протеканием несинусоидального тока, приводящего к повышенному нагреву наружной поверхности жил кабеля вследствие поверхностного эффекта и эффекта близости. Исследования [52] показали, что при коэффициенте искажения синусоидальности кривой напряжения в пределах 6–8,5 % (преобладали пятая и седьмая гармоники) токи утечки возросли: через 2,5 года эксплуатации кабелей в среднем на 36 %, а через 3,5 года — на 43 %. Иллюстрацией сокращения срока службы изоляции электродвигателей может служить пример, заимствованный из январского номера журнала IEEE Power Engineering Review за 2000 год. В настоящее время в США установлено более 700 млн электродвигателей. При среднем сроке службы двигателя 30 лет требуется замена двигателей в объеме 23 млн единиц в год. При существующем КЭ наблюдается сокращение срока службы двигателя на 2 года, что приводит к необходимости дополнительной замены трех млн двигателей в год.

Кроме того, при несинусоидальных режимах возрастает уровень дополнительных потерь активной мощности, которые, являясь частью непроизводительных потерь в линиях [130], вызваны перетоками мощности искажения, обусловленной высшими гармониками. Проведенные в 90-х годах XX века расчеты [91] показали, что в сетях НН 40 % общего объема потерь обусловлены отклонениями напряжений, 40 % — несинусоидальностью напряжений и 20 % — несимметрией напряжений.

В низковольтных сетях иногда происходит необоснованное срабатывание предохранителей и автоматических выключателей вследствие дополнительного нагрева внутренних элементов защитных устройств. Этот процесс обусловлен протеканием несинусоидальных токов и, следовательно, действием поверхностного эффекта и эффекта близости. В практике исследований [28] встречались случаи необоснованных срабатываний выбранных в соответствии с требованиями ПУЭ автоматических выключателей, защищающих линии питания компьютерного оборудования. Срабатывание происходило при нагрузке, составляющей 80–85 % уставки теплового расцепителя автоматического выключателя.

В то же время согласно ПУЭ нулевой провод не защищается от перегрева автоматическими выключателями либо предохранителями. Существующие СЭС проектировались с учетом линейной нагрузки, когда потребляемый электроприемниками ток содержал лишь основную гармонику (50 Гц). Следовательно, ток в нулевом проводе не мог превышать ток в наиболее нагруженной фазе, т.е. защита на фазных проводах одновременно защищала от перегрева и нулевой провод. Сегодня, когда токи в нулевых проводах превосходят токи фазных проводов, а защита от токовых перегрузок в цепях нулевых проводов не предусмотрена, возможен перегрев и разрушение нулевых проводов кабельных линий вследствие их перегрузки токами нулевой последовательности.

Помехи в сетях телекоммуникаций могут возникать там, где силовые кабели и кабели телекоммуникаций расположены относительно близко. Вследствие протекания в силовых кабелях высокочастотных гармоник тока в кабелях телекоммуникаций могут наводиться помехи. Магнитные поля токов высших гармоник прямой и обратной последовательности частично компенсируют друг друга, поэтому наибольшее влияние на телекоммуникации оказывают гармоники, кратные трем. Чем выше порядок гармоник, тем больше уровень помех, наведенных ими в телекоммуникационных кабелях [217].

Таким образом, использование в низковольтных электрических сетях нелинейных электроприемников (в первую очередь, с импульсным характером потребляемого тока), вызывая искажения синусоидальности кривых питающих напряжений, приводит к значительному технико-экономическому ущербу. В течение 2000–2002 гг. Центр электромагнитной безопасности [28] исследовал в г. Москве состояние электрических сетей крупнейших зданий, имеющих компьютерные сети с количеством компьютеров от 20 до 1000 и более. В результате проведенных исследований, анализа отечественных и зарубежных публикаций, а также общения со специалистами в этой области авторы [28] пришли к выводу, что Россия столкнулась с новой серьезнейшей проблемой. Ее суть заключается в том, что в настоящее время электрические сети жилых и общественных зданий, оснащенных компьютерной техникой, подвергаются интенсивному воздействию высших гармоник тока и напряжения. Очевидно, что аналогичная ситуация существует и в Украине, что вызывает острую необходимость в улучшении КЭ в указанных низковольтных сетях.

### 1.3. Электромагнитная совместимость и ее оценка в системах электроснабжения с нелинейными нагрузками

Под электромагнитной совместимостью понимается способность электроприемника нормально функционировать в окружающей электромагнитной среде и не вносить в эту среду помех, нарушающих работу других электроприемников. Под средой понимается как сеть электроснабжения, так и электромагнитные поля [166]. При этом понятие ЭМС охватывает не только взаимное влияние электроприемников или их элементов, но и взаимное влияние электроприемников и сети, так как сеть содержит комплекс различных воздействий всех электропотребителей, подсоединенных на всем ее протяжении.

Электромагнитная совместимость электрооборудования в конкретной сети является результатом оптимизации КЭ в этой сети. Иными словами, качество электроэнергии определяется совокупностью стандартных показателей, которые характеризуют режим работы электрической сети с точки зрения более общего понятия электромагнитной совместимости потребителей электроэнергии. Задачи оптимизации показателей качества электроэнергии (ПКЭ) многие авторы решали еще до широкого распространения понятия ЭМС. Например, в [124] отмечалось, что различные ПКЭ воздействуют на разные электроустановки по-разному. Поэтому при контроле ПКЭ для получения полной картины влияния искажений должны измеряться все показатели. Для упрощения контроля предлагалось измерять и контролировать не все показатели в отдельности, а один общий критерий качества «общее искажение трехфазных напряжений  $I$ ». Он численно равен отношению действующего напряжения всех искажающих факторов к номинальному значению напряжения трехфазной сети. Таким образом, автор [124] предполагал получить полную информацию о КЭ в конкретной сети и оптимизировать его интегрально, а не по отдельным показателям. Введение общего критерия качества « $I$ » было одним из первых шагов на пути к оценке ЭМС электрооборудования.

В работах [89, 212] приведены аналитические выражения для определения дополнительных потерь мощности и снижения срока службы основного электрооборудования энергосистем (вращающиеся машины, трансформаторы, батареи конденсаторов, линии электропередачи) в функции отдельных ПКЭ. Здесь же

для определения кратности снижения срока службы указанного оборудования вводится понятие коэффициента искажения как функции отдельных ПКЭ. В работе [102] предлагается оценку влияния помех на электрооборудование предприятий выполнять по совместному воздействию несимметрии и несинусоидальности, исходя из условия суммирования температур дополнительных перегревов от указанных помех.

В работе [56] вводится обобщенный показатель несинусоидальности, который является экономически обоснованным с точки зрения ущерба от высших гармоник. При этом рассматриваются следующие составляющие ущерба: сокращение срока службы оборудования вследствие ускоренного старения изоляции, стоимость ремонта кабельных сетей вследствие повышенной аварийности и дополнительные активные потери в электрических сетях. Причем в этом случае отсутствуют нарушения нормальной работы электроприемников (повреждение оборудования, сбой в работе чувствительного оборудования и т. д.). Обобщенный показатель рассчитывается для конкретной СЭС различных отраслей народного хозяйства. Таким образом, предложенный показатель позволяет оценить КЭ в конкретной сети в том случае, если нет нарушений нормальной работы электроприемников.

Однако в условиях конкретной сети нагрузки могут оказаться несовместимыми в электромагнитном отношении даже при минимальных значениях несинусоидальности или несимметрии напряжения. Иными словами, при проектировании современных СЭС необходимо не только выдерживать все нормативные требования к КЭ, но и учитывать ЭМС разных приемников электроэнергии и влияние на нее параметров самой СЭС [158]. Так, в [79] ущерб от нарушения ПКЭ в конкретной сети рассчитывается уже с учетом фактора ЭМС, и только при этом условии функция ущерба минимизируется. Если получен экономически обоснованный оптимум ПКЭ [52], но при этом не учтена ЭМС электроприемников, то говорить о решении задачи оптимизации КЭ не представляется возможным.

В настоящее время существует потребность в оценке и нормировании ЭМС конкретных видов электрооборудования — источников электромагнитных помех и устройств, подверженных их влиянию. Говоря о нормировании, следует помнить, что вопросы влияния высших гармоник на оборудование традиционно рассматривались в рамках проблемы КЭ. Поэтому система показателей и норм, характеризующих электромагнитную обстановку в сети, при которых должно обеспечиваться нормальное функ-



ционирование электрооборудования, была установлена ГОСТ 13109—67. Анализ этого стандарта выявил ряд существенных недостатков, затрудняющих обеспечение ЭМС оборудования, особенно электронного, с сетью питания, преодолению которых способствовало внесение в новую редакцию стандарта — ГОСТ 13109—87 — изменений. Были введены новые ПКЭ, в том числе коэффициент  $n$ -й гармонической составляющей напряжения; нормированы погрешности измерения ПКЭ и установлен единый период измерения при сопоставлении с нормой. Однако эти и другие изменения не исключали полностью всех недостатков прежнего стандарта [9]. Главное то, что эти нормы по-прежнему во многих случаях не отражали требований к обеспечению ЭМС.

В действующем сегодня стандарте четко установлено, что проблема КЭ является составной частью общей проблемы ЭМС между СЭС общего назначения и СЭС потребителей электрической энергии. Это нашло отражение в наименовании стандарта, которое сформулировано следующим образом: «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения», и в очень важном положении о том, что «нормы КЭ, устанавливаемые настоящим стандартом, являются уровнями электромагнитной совместимости для кондуктивных электромагнитных помех», передаваемых по электрическим сетям. Кроме того, в ГОСТ 13109—97 подчеркнута взаимосвязь между нормами стандарта, уровнями помехоустойчивости приемников электрической энергии и уровнями кондуктивных электромагнитных помех, вносимых этими приемниками.

Межгосударственный [27] и национальный [34] стандарты устанавливают нормы допустимых значений электромагнитных помех в сетях, а также дают определения около 160 терминов, относящихся к проблеме. Так, согласно ГОСТ 13109—97 нормально и предельно допустимые значения коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения (прежнее наименование «коэффициент несинусоидальности») в сетях с напряжением 0,38 кВ установлены соответственно 8 и 12 %.

Следует отметить, что согласно ГОСТ 13109—97 нормально и предельно допустимые значения для отдельных гармонических составляющих напряжения в электрических сетях напряжением 0,38 кВ совпадают с соответствующими уровнями ЭМС, установленными в стандарте Международной электротехнической комиссии (МЭК) IEC 1000-2-2. По имеющейся у нас информации в Российской Федерации в 2001—2002 гг. должна была быть

введена серия Государственных стандартов — аналогов стандартов МЭК серии 1000 (совместимость технических средств электромагнитная). Нормы национальных стандартов многих европейских стран (Дания, Норвегия, Чехия и др.) в основном соответствуют нормам стандартов МЭК. Хотя есть исключения: например, в Польше нормы устанавливают нормально и предельно допустимые значения коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения соответственно 7 и 10 %. В Швеции, считая европейские стандарты недостаточно строгими, установили предельно допустимое значение  $K_U = 6$  % [206].

Для сравнения укажем, что длительно допустимые значения аналогичного показателя по ГОСТ 13109—67 были приняты 5 %. Согласно ГОСТ 13109—87 максимальные допустимые значения указанного коэффициента были повышены и составляли 10 %. Очевидно, что и те, и другие допуски были существенно меньше ныне действующих нормативов, т.е. нельзя не отметить четко выраженную отрицательную, на наш взгляд, тенденцию к увеличению допустимых пределов электромагнитных искажений в части формы кривой напряжения. С учетом компромисса между интересами поставщиков электроэнергии в виде электроснабжающих компаний, не имеющих достаточно средств на развитие сетей, и потребителей электроэнергии, работающих в сложных экономических условиях, можно понять указанную тенденцию, но одобрить ее все же трудно.

Для того чтобы любой стандарт был эффективным, необходимо, чтобы используемые в нем показатели имели четкий физический смысл, а методы их определения и нормирования вытекали из особенностей оценки последствий воздействия искажений напряжений на электрооборудование. Предельно допустимые или иные их значения должны быть установлены на основании технико-экономических расчетов либо экспертных оценок. При этом нормы могут быть различными и зависеть от целого ряда факторов.

Стандарты должны оказывать стимулирующее воздействие на развитие техники. Для этого они должны быть, с одной стороны, «опережающими», созданными на основе проведенных научно-исследовательских работ, с другой стороны, учитывать реальные, исторически сложившиеся особенности используемого существующего электрооборудования, системообразующих и распределительных электрических сетей разных классов напряжений действующих энергосистем и предприятий. Использование «опережающих» стандартов стимулирует развитие принципов

ТАБЛИЦА 1.1

Допустимые значения токов высших гармоник согласно стандарту IEEE 519

Номер гармоники	$20 < I_{sc}/I_L < 50$	$50 < I_{sc}/I_L < 100$	$100 < I_{sc}/I_L < 1000$	$I_{sc}/I_L > 1000$
3	7	10	12	15
5	7	10	12	15
7	7	10	12	15
9	7	10	12	15
11	3,5	4,5	5,5	7
13	3,5	4,5	5,5	7
15	3,5	4,5	5,5	7
17	2,5	4	5	6
19	2,5	4	5	6
21	2,5	4	5	6
23	1	1,5	2	2,5
25	1	1,5	2	2,5
27	1	1,5	2	2,5

ально нового оборудования и улучшение характеристик старого. Например, ГОСТ 13109—87 в определенной мере способствовал развитию технических средств улучшения КЭ, применению многофазных схем выпрямления переменного тока, разработке электротехнологических установок с меньшей степенью отрицательного воздействия на питающие сети и др.

Широкому развитию работ по созданию преобразователей с улучшенной ЭМС способствовало введение в ряде стран стандартов на качество потребляемого от сети тока [197]. Так, в США действует стандарт IEEE 519, распространяющийся на электрические системы, содержащие нелинейные потребители. Подобные стандарты введены и в странах Западной Европы:

— IEC 1000-3-2 нормирует гармонические искажения тока, поступающие в сеть от потребителей с током до 16 А;

— IEC 1000-3-4 нормирует гармонические искажения тока, поступающие в сеть от потребителей с током более 16 А.

Допустимые значения амплитуд гармоник тока по стандарту IEEE 519 зависят от соотношения тока короткого замыкания в узле подключения потребителя  $I_{sc}$  и тока основной гармоники  $I_L$ . Допустимые значения первых 27 нечетных гармоник (в процентах основной) приведены в табл. 1.1. Четные гармоники не должны превышать 25 % ближайшей нечетной.

В связи с этим в [66] обосновывается вывод о необходимости совершенствования собственной нормативно-правовой базы

электротехники в части нормирования эмиссии гармонических составляющих тока. В работе [170] также предлагается дополнить ГОСТ 13109—97 показателями несинусоидальности электрического тока для контроля работы потребителей в целях выявления эмитентов ухудшений ПКЭ и использования экономических стимулов к улучшению конкретных ситуаций в электросетях. По мнению авторов, это позволит привлечь потребителей к ответственности за эмиссию ухудшений ПКЭ. К сожалению, затруднения вызывает отсутствие научно-методической и нормативно-правовой базы, которая позволила бы выявить конкретных эмитентов ухудшений ПКЭ, определила бы их экономическую ответственность и стимулировала бы их заинтересованность в исправлении ситуации. В сетях НН ситуация еще больше усложняется в связи с тем, что низковольтные потребители очень часто являются одновременно виновниками и жертвами ухудшения ЭМС.

Решение проблемы КЭ в целом должно основываться на системном подходе к ней. Его смысл применительно к рассматриваемой проблеме заключается в том, что нельзя решать проблему КЭ вне взаимной связи и зависимости параметров ЭМС оборудования разных типов и электрических сетей. Электрооборудование должно обладать такими параметрами ЭМС, чтобы оно могло нормально выполнять присущие ему технические функции в условиях существующего КЭ в существующих электрических сетях и не ухудшать условия работы других видов электрооборудования и самих электрических сетей.

К сожалению, в настоящее время очень часто, когда говорят об улучшении ЭМС нелинейной нагрузки с сетью питания, имеют в виду простое снижение уровня высших гармоник в сети. При этом остается не выясненным значение ПКЭ, при котором действительно достигается ЭМС конкретного оборудования. Например, в работе [6] рассмотрены мероприятия по снижению уровня высших гармоник до пределов, регламентированных ГОСТ 13109—87. После достижения искомого значения ПКЭ авторы [6], не рассматривая конкретное оборудование, ущерб и т.д., утверждают, что задача ЭМС решена. Очевидно, что корректность подобных выводов вызывает определенные сомнения.

В некоторых работах по теоретической электротехнике, например [162], предлагается для оценки ЭМС использовать энергетический показатель — функцию мгновенной мощности  $p(t)$ . При этом определяется зависимость  $p(t)$  от различных ПКЭ. Зная допустимые диапазоны изменения ПКЭ, можно определить

допустимый диапазон изменения мгновенной мощности. На основании анализа полученных значений  $p(t)$  делается вывод об ЭМС сетей и потребителя, исходя из требований к ПКЭ согласно ГОСТ 13109—87. Нетрудно видеть, что этот показатель не позволяет однозначно оценить ЭМС, так как фактически при этом используется подход, рассмотренный в [6].

На основании изложенного выше можно сделать следующие выводы. Для оценки ЭМС электрооборудования и конкретной СЭС необходимо определять и контролировать ПКЭ в данной СЭС. Очевидно, что для каждого конкретного случая СЭС, в которой имеется электрооборудование-источник помех, сеть и электрооборудование, подверженное отрицательному воздействию этих помех, можно определить конкретный ущерб от нарушения КЭ. При этом легко определить вид и ущерб, который характеризует нарушение ЭМС в данном конкретном случае. Значения ПКЭ в момент указанного нарушения ЭМС (даже при соблюдении требований действующих стандартов) следует считать нормой ЭМС для этого вида электрооборудования в данной СЭС. Например, увеличение уровня высших гармоник, генерируемых нелинейными потребителями, приводит в определенный момент к сбою в работе компьютерной сети. Значение коэффициента искажения синусоидальной кривой напряжения (тока), при которой происходит сбой, является чисто техническим пределом, определяющим норму ЭМС конкретных электропотребителей.

Для оценки ЭМС на этапе проектирования СЭС или во время ее эксплуатации нагрузки следует исследовать на точной математической или физической модели той сети, к которой они будут подключены. Очевидно, что это также (как в случае решения проблемы КЭ) реализация системного подхода, при котором моделируются как электроприемники, так и электромагнитная среда [96]. При этом определяются все нежелательные последствия работы искажающего потребителя. Если уровень генерируемых электромагнитных помех удовлетворяет как чувствительное оборудование, так и персонал (который имеет право предъявить претензии к неудовлетворительному КЭ), то можно говорить об ЭМС рассматриваемого оборудования. В противном случае необходимо решать проблему ЭМС, совершенствуя все элементы СЭС.

Например, в работе [198] рассмотрена конкретная группа электробытовых приборов. При этом оговорены виды приборов, входящих в эту группу, и особенности сети, к которой они будут подключены. Кроме того, определены допустимые уровни выс-

ших гармоник, генерируемых данными электроприборами. Проанализирована схема испытаний, включающая в себя точную физическую модель сети. В результате проведенных исследований получены результаты, на основании которых предъявляются требования к данной группе электроприемников с точки зрения их ЭМС с сетью.

Следует отметить, что электрическую сеть с нелинейными нагрузками можно рассматривать как динамическую систему. Под динамической системой, как известно, понимают процессы (объекты), поведение которых подчиняется некоторой системе интегродифференциальных и конечных уравнений в обыкновенных и частных производных. Наличие интегродифференциальных уравнений является характерным признаком динамичности процесса. В работе [21] показано, что простейшей динамической человеко-машинной системой является система, в которой человеку отведена роль наблюдателя за поведением системы с помощью простейшей системы контроля. Весь необходимый объем обработки информации, полученный системой контроля, поступает в мозг человека, который оценивает текущее состояние объекта на основе собственного опыта или должностных инструкций, принимает решение по управлению и реализует это управление с помощью имеющихся исполнительных механизмов.

Там же рассмотрена разновидность системы с элементами искусственного интеллекта, в которой одновременно с объектом функционирует в том же масштабе времени его математическая модель. Это позволяет оценивать и формировать сигналы о переменных состояния, которые в объекте не могут быть непосредственно измерены, или такое измерение по какой-либо причине нецелесообразно. По последней схеме структурной модели строится большинство существующих систем мониторинга. В случае электрических сетей с нелинейными потребителями модель должна обеспечивать непрерывную оценку несинусоидальности токов и напряжений, а также информирование о недопустимых уровнях высших гармоник в целях проведения необходимых мероприятий по их снижению.

Очевидно, что усложнение математических моделей вследствие необходимости учета нелинейности большого количества электроприемников сетей НН ограничивает возможности аналитических методов. В связи с этим возникает необходимость применения методов имитационного моделирования режимов низковольтных сетей с нелинейными потребителями.

методы позволяют осуществлять численные решения поставленных задач и проводить проверку различных способов и средств обеспечения ЭМС в сопоставимых условиях.

Таким образом, проблема ЭМС является проблемой совместного функционирования различных электропотребителей в конкретной СЭС. Для прогнозирования и оценки возможных последствий роста нелинейных нагрузок, проведения работ по диагностике и анализу СЭС, а также выработки требований к нелинейным электроприемникам, параметрам сети и средствам обеспечения их ЭМС необходима разработка адекватных математических и физических моделей электрических сетей с нелинейными нагрузками.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ РЕЖИМОВ СЕТЕЙ НИЗКОГО НАПРЯЖЕНИЯ С НЕЛИНЕЙНЫМИ НАГРУЗКАМИ

### 2.1. Моделирование нелинейных нагрузок

Адекватность моделирования режима СЭС во многом определяется принятой моделью нагрузки [93]. Моделированию нелинейных нагрузок посвящен ряд работ отечественных и зарубежных ученых. Широко распространены модели, в которых нелинейные нагрузки определяются либо нелинейными вольт-амперными характеристиками, которые аппроксимируются различными функциями, либо нелинейными сопротивлениями (проводимостями), управляемыми напряжениями с заданными вольт-амперными характеристиками. Например, в работах [163, 164] анализируются и синтезируются корректирующие устройства для уравнивания режимов в цепях с нелинейными нагрузками, характеристики которых аппроксимируются степенным полиномом. В работе [159] анализируются нелинейные электрические цепи постоянного и переменного токов, в которых нелинейные зависимости сопротивления нагрузки от тока или напряжения аппроксимируются, в частности, укороченным полиномом второй степени. В работе [19] математические модели нелинейных элементов в виде нелинейных проводимостей с заданным законом изменения использованы для расчета потоков распределения электроэнергетической системы. При этом в одних случаях рассматривается сеть бесконечной мощности, а в других — учитываются параметры сети. Однако описанные в этих работах модели нелинейных нагрузок непригодны для анализа электромагнитных процессов в питающей сети.

Известно, что преобразовательная техника является главным источником высших гармоник в современных СЭС. В настоящее время широко применяются модели полупроводниковых преобразователей (ПП), позволяющие исследовать и оптимизировать электромагнитные процессы, протекающие в их силовых цепях. При этом модели и реализующие их комплексы программ могут быть как достаточно сложными, так и простыми (макромодели) [20] с точки зрения объема вычислений и затрат машинной па-

мости. Сложные универсальные модели вентильных преобразователей позволяют производить анализ установившихся и переходных процессов, вычислять значения токов и напряжений, установленные мощности во всех элементах цепи, исследовать различные режимы работы (наброс и сброс нагрузки, короткое замыкание и др.), выбирать параметры и настраивать системы авторегулирования, проводить гармонический анализ токов и напряжений на элементах и т.д.

Для проведения конкретных исследований определенного преобразователя используют макромодели полупроводниковых преобразователей, т.е. упрощенные модели, позволяющие решить задачу при сохранении достаточной для практики точности моделирования. Одной из конкретных задач является гармонический анализ кривой входного тока преобразователя. Известны модели, позволяющие определить гармоническое содержание кривой входного тока, различных видов преобразователей, в частности выпрямителей [58, 85, 161, 210]. Преимуществом подобных моделей является то, что величина высших гармоник определяется в зависимости от параметров конкретного преобразователя. Например, чаще всего встречающиеся шестипульсные выпрямительные системы образуют гармонические составляющие кривой тока порядка  $n = 6(k + 1) \pm 1$ , где  $k = 0, 1, 2, 3, \dots$ . Причем вопрос о доле этих гармонических составляющих в кривой тока, питающего выпрямитель, весьма сложный, так как она является функцией не только числа пульсаций, но и выпрямленного напряжения и параметров цепи выпрямителя. Кроме того, такие макромодели ПП позволяют анализировать электромагнитные процессы в их силовых цепях.

Одна из наиболее распространенных многофазных схем выпрямителей — это трехфазная мостовая схема. Общеизвестна проблема ухудшения КЭ, вызываемая несинусоидальным характером тока, потребляемого из сети нелинейными нагрузками типа трехфазного выпрямителя с емкостным фильтром [52]. Применительно к частотно регулируемому асинхронному электроприводу эта проблема в широком плане рассмотрена в [26]. В работе [25] приведены экспериментальные и расчетные характеристики фазных токов упомянутых выпрямителей. При этом расчеты проводились с помощью цифровой модели средствами пакета программ Microsim Design Lab 8.0 (PSPice).

В работе [118] исследована математическая (аналитическая) модель трехфазных мостовых выпрямителей с применением ком-

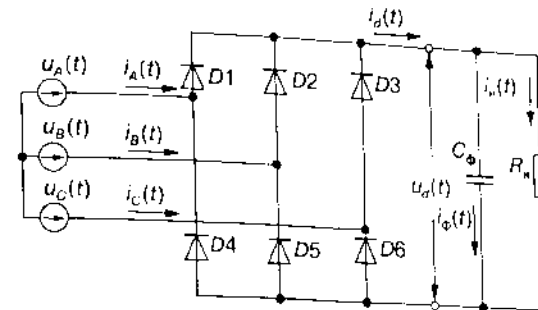


Рис. 2.1. Трехфазная мостовая схема выпрямителя с емкостным фильтром

мутационных функций. На рис. 2.1 представлена трехфазная мостовая схема выпрямления. Здесь неуправляемый выпрямитель D1...D6 подключен к сети с трехфазной системой питающих напряжений  $u_A(t)$ ,  $u_B(t)$ ,  $u_C(t)$ :

$$\begin{aligned} u_A(t) &= U\sqrt{2} \sin(\omega t); u_B(t) = U\sqrt{2} \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}); \\ u_C(t) &= U\sqrt{2} \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}), \end{aligned} \quad (2.1)$$

где  $\omega = 314$  — угловая частота;  $t$  — время;  $U = 220\text{В}$  — действующее значение фазного напряжения. Кроме того, на рисунке  $C_\phi$  — фильтрующий конденсатор;  $R_n$  — активная нагрузка;  $i_A(t)$ ,  $i_B(t)$ ,  $i_C(t)$  — мгновенные значения токов на входе выпрямителя;  $i_\phi(t)$ ,  $i_n(t)$  — мгновенные значения токов, протекающих в емкости фильтра и нагрузке;  $u_n(t)$ ,  $i_n(t)$  — мгновенные значения выпрямленного напряжения и тока на выходе выпрямителя.

Известно [108], что математическая связь между мгновенными значениями входных и выходных электрических величин вентильного коммутатора выражается с помощью коммутационных функций следующим образом:

$$u_A(t) = \rho_A(t)u_A(t) + \rho_B(t)u_B(t) + \rho_C(t)u_C(t); \quad (2.2)$$

$$i_A(t) = \rho_A(t)i_A(t); i_B(t) = \rho_B(t)i_A(t); i_C(t) = \rho_C(t)i_A(t), \quad (2.3)$$

где  $\rho_A(t)$ ,  $\rho_B(t)$ ,  $\rho_C(t)$  — коммутационные функции трехфазного выпрямителя. График изменения  $\rho_A(t)$  приведен на рис. 2.2

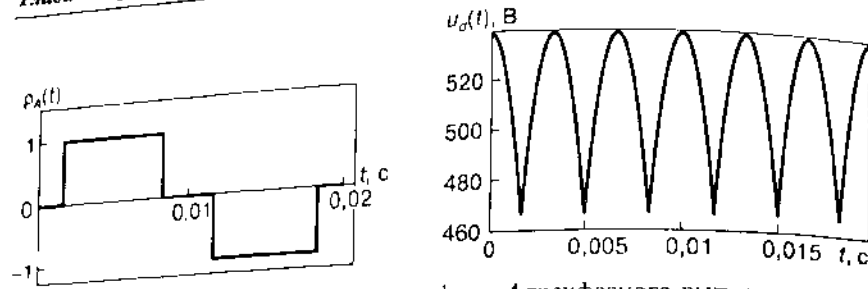


Рис. 2.2. Коммутационная функция для фазы А трехфазного выпрямителя  
Рис. 2.3. Выпрямленное напряжение на выходе трехфазного выпрямителя

для случая мгновенной коммутации вентилей и угла управления  $\alpha = 0$ .

Аналитически функции  $\rho_A, \rho_B, \rho_C$  можно аппроксимировать следующим образом:

$$\begin{aligned}\rho_A(t) &= 0,5 \operatorname{sign} \left( \cos \left( \omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \right) - 0,5 \operatorname{sign} \left( \cos \left( \omega t + \frac{2\pi}{3} \right) \right); \\ \rho_B(t) &= 0,5 \operatorname{sign} \left( \cos \left( \omega t + \frac{2\pi}{3} \right) \right) - 0,5 \operatorname{sign} (\cos(\omega t)); \\ \rho_C(t) &= 0,5 \operatorname{sign} (\cos(\omega t)) - 0,5 \operatorname{sign} \left( \cos \left( \omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \right).\end{aligned}\quad (2.4)$$

Согласно выражениям (2.1), (2.2) и (2.4) для выпрямленного напряжения  $u_d(t)$  имеем график, представленный на рис. 2.3. Функция, показанная на рисунке, аппроксимируется выражением

$$u_d(t) = 220\sqrt{2}(1,625 + 0,125 \cos 6\omega t). \quad (2.5)$$

Запишем дифференциальное уравнение для  $RC$ -цепи выпрямителя:

$$i_d(t) = i_\phi(t) + i_n(t) = C_\phi \frac{du_d(t)}{dt} + \frac{u_d(t)}{R_n}.$$

Тогда с учетом выражения (2.5) мгновенное значение выпрямленного тока такое:

## 2.1. Моделирование нелинейных нагрузок

$$i_d(t) = -C_\phi 220\sqrt{2} \cdot 0,125 \cdot 6\omega \sin 6\omega t + \frac{220\sqrt{2}(1,625 + 0,125 \cos 6\omega t)}{R_n}. \quad (2.6)$$

Мгновенные значения фазных токов, потребляемых схемой из сети, определяются с учетом формул (2.3) и (2.6):

$$i_A(t) = \rho_A(t)i_d(t) = \rho_A(t) \left[ C_\phi \frac{du_d(t)}{dt} + \frac{u_d(t)}{R_n} \right];$$

$$i_B(t) = \rho_B(t)i_d(t) = \rho_B(t) \left[ C_\phi \frac{du_d(t)}{dt} + \frac{u_d(t)}{R_n} \right];$$

$$i_C(t) = \rho_C(t)i_d(t) = \rho_C(t) \left[ C_\phi \frac{du_d(t)}{dt} + \frac{u_d(t)}{R_n} \right].$$

График изменения фазного тока  $i_A(t)$  при значениях емкости  $C_\phi = 100$  мкФ и сопротивления  $R_n = 66$  Ом приведен на рис. 2.4. Данная кривая (рис. 2.4) может быть аппроксимирована с определенной точностью (с учетом погрешности, которая возникает из-за приближенного выбора коммутационной функции) тригонометрическим полиномом вида

$$\begin{aligned}i_A(t) &= 4,92 \cos \omega t + 3,62 \sin \omega t - 2,08 \cos 5\omega t + \\ &+ 5,08 \sin 5\omega t - 1,61 \cos 7\omega t - 5,01 \sin 7\omega t.\end{aligned}\quad (2.7)$$

Из выражения (2.7) видно, что спектр гармоник потребляемого тока содержит пятую и седьмую гармоники, составляющие соответственно 90 % и 85 % основной, что соответствует результатам гармонического анализа фазных токов трехфазных мостовых выпрямителей с емкостным фильтром, полученным в работе [25]. Таким образом, корректность проведенного аналитического моделирования подтверждается результатами, полученными с помощью цифровой модели.

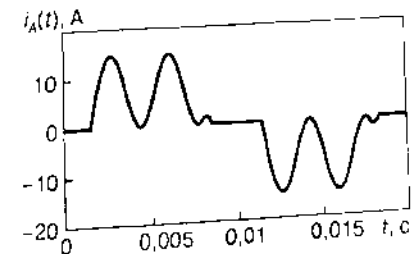


Рис. 2.4. Фазный ток на входе трехфазного выпрямителя

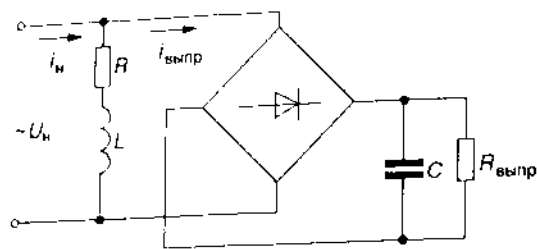


Рис. 2.5. Однофазный выпрямитель, включенный параллельно активно-индуктивной нагрузке

В сетях НН широко распространены однофазные выпрямительные нагрузки небольшой мощности, в частности, компьютеры, телекоммуникационная аппаратура, аудио- и видеотехника, бытовые электроприборы, а также источники питания различных электротехнических установок. Очевидно, что для указанных однофазных нагрузок можно построить модели (аналогичные рассмотренным трехфазным), позволяющие проводить гармонический анализ их входных токов. Например, в работе [123] предлагается аналитический способ определения входных и выходных токов однофазных мостовых преобразователей, который основывается на использовании параметров холостого хода  $T$ -образной схемы замещения преобразователя. В работе [2] представлены результаты численного моделирования средствами пакета программ PSpice ORCAD 9.2 Trial разных однофазных схем питания частотно-регулируемых приводов.

На рис. 2.5 показан однофазный выпрямитель с емкостным фильтром, включенный параллельно активно-индуктивной нагрузке и питающийся от сети бесконечной мощности напряжением  $U_{ном} = 220$  В. Пусть параметры этой суммарной нагрузки (в соответствии с вариантом, анализируемым в [48]) имеют следующие значения:  $R = 3,6$  Ом;  $L = 21,5$  мГн;  $R_{выпр} = 29,31$  Ом;  $C = 2,56 \times 10^{-3}$  Ф. При этом мощность выпрямителя  $P_{выпр} = 3,035$  кВт, а доля выпрямительной нагрузки  $\alpha = P_{выпр}/P_n = 0,5$  ( $P_n$  — суммарная активная мощность нагрузки).

Проведенные расчеты показывают, что ток выпрямителя с емкостным фильтром имеет ярко выраженный импульсный характер с большим содержанием высших гармоник. В результате коэффициент искажения синусоидальности кривой тока выпрямителя  $K_{i, выпр} = 168,53$  %. Суммарный ток нагрузки содержит все гармоники входного тока выпрямителя, но  $K_{i, n} = 70,47$  %, так как

его первая гармоника больше. Ток активно-индуктивной нагрузки имеет синусоидальную форму, поскольку при питании от сети бесконечной мощности на него не влияет выпрямительная нагрузка.

Таким образом, рассмотренные модели позволяют проводить расчет высших гармоник тока с учетом характерных параметров нелинейных электроприемников. Однако, главным с точки зрения проведения исследований ЭМС недостатком рассмотренных моделей является то, что искажение синусоидальности кривой входного тока ПП определяется при условии питания его от сети бесконечной мощности. При этом получают спектр гармоник тока без учета обратного воздействия на них параметров сети, а искажение синусоидальности кривой питающего напряжения не рассматривают.

## 2.2. Моделирование и расчет токов и напряжений сетей НН с нелинейными нагрузками

Традиционно для определения искажения синусоидальности кривой напряжения в трехпроводных сетях используются модели, в которых нелинейные нагрузки задаются источниками токов высших гармоник [52, 86, 88]. В схемах замещения сети для частот высших гармоник элементы сети задаются полными сопротивлениями, рассчитанными для данной частоты. Падение напряжения на эквивалентном полном сопротивлении сети от тока определенной гармоники, величина которого известна заранее, дает значение напряжения данной гармоники. Рассчитав необходимое количество схем замещения (по числу учитываемых гармоник), определяют коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения сети.

Очевидно, что подобные модели имеют ряд недостатков. Во-первых, они не позволяют исследовать электромагнитные процессы в сети с нелинейной нагрузкой вследствие формального характера построения схем замещения. Во-вторых, значение токов высших гармоник определено, очевидно, при условии питания нелинейной нагрузки от сети бесконечной мощности и без учета влияния параметров конкретной сети. В-третьих, параметры схем замещения элементов сети для частот высших гармоник в настоящее время определяются по-разному с существенными расхождениями в результатах у разных авторов.



Все эти недостатки особенно остро проявляются при моделировании сетей НН с нелинейными нагрузками. Характерные особенности сетей НН, а именно, наличие нулевого провода и относительно низкие значения мощностей короткого замыкания, оказывают существенное влияние на протекание электромагнитных процессов. Это, в свою очередь, приводит к значительному изменению значений высших гармоник тока в конкретной сети НН по сравнению с посчитанными при условии питания нелинейной нагрузки от сети бесконечной мощности. Поэтому модели, в которых нелинейные нагрузки задаются источниками токов высших гармоник, непосредственно, если их не адаптировать, нельзя использовать в сетях НН. В связи с этим, существует потребность в создании математических моделей для исследования электромагнитных процессов в сетях НН с нелинейными нагрузками в целях определения их влияния на сеть с учетом конкретных параметров сети и нагрузки.

Следует отметить, что в настоящее время известны работы, посвященные анализу процессов на входе нелинейных электроприемников, в частности, выпрямителей с учетом параметров их входной цепи. Например, в [10] рассмотрены искажения синусоидальности кривых напряжений в СЭС ЭВМ с трехфазными ИВЭП с бестрансформаторным входом. При этом получены аналитические зависимости коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения от угла коммутации, который, в свою очередь, меняется при изменении нагрузки, параметров генераторов и мощности короткого замыкания. В работе [100] выполнено моделирование системы «питающий кабель—неуправляемый однофазный выпрямитель, нагруженный на  $RC$ -цепь» с помощью программного пакета OrCAD 9.2 и получены зависимости интегральных характеристик этой системы, в частности, искажений синусоидальности кривых входных тока и напряжения от параметров системы. В работе [77] приведены результаты анализа процессов в локальной распределительной сети, к которой подключена выпрямительная нагрузка. При этом рассматривается упрощенная однофазная схема замещения сети, которая формируется на выходе агрегата бесперебойного питания. Таким образом, в упомянутых работах при моделировании рассматриваются лишь отдельные элементы сети НН, которые не отражают особенностей ее построения, что, в результате, не позволяет адекватно оценить влияние нелинейных электроприемников на сеть.

При разработке математической модели сети НН с нелинейной нагрузкой необходимо учитывать следующие обстоятельства.

## 2.2. Моделирование и расчет токов и напряжений сетей НН с нелинейными

С одной стороны, она должна обеспечивать моделирование электромагнитных процессов с необходимой точностью и не быть при этом чрезмерно сложной. С другой стороны, при относительной простоте модели в схемах замещения должно быть представлено достаточное количество элементов сети и нагрузки в целях определения их влияния на величину высших гармоник.

Как известно, в сетях НН получили широкое распространение импульсные источники электропитания электронной техники. В качестве входного звена таких источников питания используется сетевой выпрямитель, обычно неуправляемый, параметры которого наряду с параметрами низкочастотного емкостного фильтра в наибольшей степени определяют характер и форму потребляемого тока. Сетевой выпрямитель может быть однофазным или трехфазным, причем однофазные выпрямители более характерны для сетей НН. Результаты анализа режимов работы однофазных сетевых выпрямителей с емкостным фильтром [33] показывают, что потребляемый из сети ток имеет импульсный характер, форма которого зависит не только от параметров емкостного фильтра, но и от параметров питающей сети, т.е. однофазный выпрямитель с емкостным фильтром является характерной нелинейной нагрузкой низковольтных сетей. При этом его макромодель при относительной простоте позволяет проводить анализ электромагнитных процессов с учетом параметров выпрямителя и питающей сети. В связи с этим представляется возможным в модели сети НН рассмотреть в качестве нелинейного элемента нагрузки однофазный выпрямитель, нагруженный на  $RC$ -цепь (рис. 2.5).

В реальных условиях эксплуатации средства электронной техники подключаются к конкретной сети НН. Как было отмечено выше, параметры сети оказывают влияние на значения токов и напряжений нагрузки. Поэтому для определения истинного влияния нелинейной нагрузки на сеть питания необходимо моделировать не только нагрузку, но и сеть, к которой она будет подключена. С учетом отмеченных выше требований можно построить математическую модель сети НН с нелинейной нагрузкой на основе двух известных: модели трехфазной четырехпроводной сети с линейной нагрузкой и модели нелинейной нагрузки. При этом основными допущениями будут следующие: подводенные напряжения образуют симметричную и неизменную систему прямой последовательности, все элементы сети за исключением нагрузки линейны и симметричны, диоды выпрямителей идеальны.

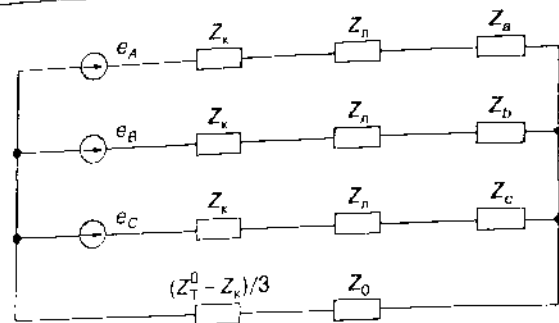


Рис. 2.6. Схема замещения сети НН

С учетом особенностей построения сети НН (сеть выполняется трехфазной с нулевым проводом, а большинство потребителей — однофазные), ее схема замещения имеет вид, показанный на рис. 2.6 [167]. Здесь  $e_A, e_B, e_C$  — трехфазная симметричная система ЭДС;  $Z_k, Z_T^0$  — сопротивления короткого замыкания и нулевой последовательности трансформатора;  $Z_0, Z_n$  — сопротивления нулевого и фазного проводов линии;  $Z_a, Z_b, Z_c$  — три произвольных нагрузочных сопротивления, параллельно которым подключаются упомянутые нелинейные элементы нагрузки.

Разработанная модель трехфазной четырехпроводной сети с выпрямительной нагрузкой позволяет провести расчет всех токов и напряжений конкретной сети НН [48]. Данная модель учитывает параметры сетей НН, а именно мощность и схему соединения обмоток трансформатора, исполнение, длину и сечение линии, коэффициент мощности, а также параметры выпрямительной нагрузки. В результате в схеме замещения элементы сети и нагрузки представляются соответствующими сопротивлениями, причем расчет проводится на основной частоте. Значения токов и напряжений данной сети определяются одновременно решением дифференциальных уравнений, описывающих линейные схемы, формируемые по этапам проводимости ключевых элементов (диодов) однофазных выпрямителей.

Полученные значения токов и напряжений используются для определения соответствующих коэффициентов рядов Фурье, с помощью которых рассчитываются коэффициенты  $n$ -х гармонических составляющих тока (напряжения)  $K_{I(n)} = I_{(n)} / I_{(1)}$  ( $K_{U(n)} = U_{(n)} / U_{(1)}$ ), коэффициенты искажения синусоидальности кривой

## 2.2. Моделирование и расчет токов и напряжений сетей НН с нелинейными

тока  $K_I = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_{(n)}^2} / I_{(1)}$  и коэффициенты искажения синусои-

дальности кривой напряжения  $K_U = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_{(n)}^2} / U_{(1)}$  ( $I_{(1)}, I_{(n)}, U_{(1)}, U_{(n)}$  — действующие значения составляющих основной частоты и  $n$ -х гармонических составляющих токов и напряжений соответственно).

Результаты проведенных расчетов для конкретных вариантов исполнения сети НН позволяют анализировать влияние выпрямительной нагрузки на форму кривых токов и напряжений. Пусть мощность трансформатора 10/0,4 кВ  $S_{Tp} = 25$  кВ·А; схема соединения обмоток звезда—звезда с нулем;  $\cos \varphi = 0,8$ ; линия выполнена кабелем  $3 \times 25 + 1 \times 10$  мм<sup>2</sup>; на фазные напряжения сети НН подключены три одинаковые нагрузки, одна из которых показана на рис. 2.5. При этом параметры однофазной нагрузки остались такими, как в предыдущем параграфе. В результате расчета получаем измененные по сравнению с вариантом питания от сети бесконечной мощности значения коэффициентов искажения синусоидальности кривых тока. Величина гармоник тока выпрямителя сильно уменьшилась, при этом  $K_{h_{\text{вып}}} = 56,78$  %. Форма тока в линейной части нагрузки несколько отличается от синусоидальной. В сети ограниченной мощности сказывается влияние выпрямительной нагрузки. В результате суммарный фазный ток сети НН будет существенно отличаться от теоретического, рассчитанного для сети бесконечной мощности. Его коэффициент искажения синусоидальности кривой  $K_h = 13,57$  %. Наконец, получено конкретное значение несинусоидальности фазного напряжения. Коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения в данном случае равен 18,66 %.

Очевидно, что при изменении варианта исполнения сети (другие схема соединения обмоток трансформатора, исполнение линии 0,4 кВ,  $\cos \varphi$ ,  $\alpha$  и т.д.) изменится и значение несинусоидальности токов и напряжений [139]. Рассмотрим, как влияет доля выпрямительной нагрузки  $\alpha$  на форму кривой напряжения. Проведенные расчеты подтверждают тот факт, что значение  $\alpha$  в значительной мере определяет несинусоидальность фазного напряжения сети. На рис. 2.7 даны зависимости коэффициентов искажения синусоидальности кривой  $K_U$  и  $n$ -й гармонической составляющей  $K_{U(n)}$  напряжения от значения  $\alpha$ . Очевидно, что с

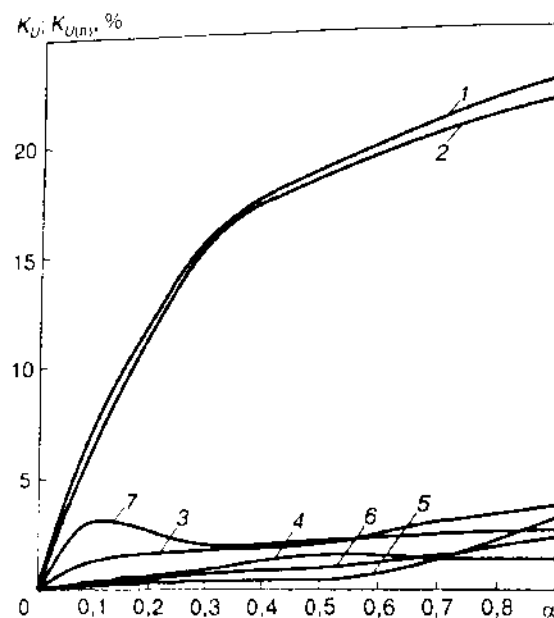


Рис. 2.7. Зависимости коэффициентов искажения синусоидальности кривой  $K_U$  и  $n$ -й гармонической составляющей  $K_{U(n)}$  напряжения от значения доли выпрямительной нагрузки

1 —  $K_U$ ; 2 —  $K_{U(3)}$ ; 3 —  $K_{U(5)}$ ; 4 —  $K_{U(7)}$ ; 5 —  $K_{U(9)}$ ; 6 —  $K_{U(11)}$ ; 7 —  $K_{U(13)}$ .

увеличением доли выпрямительной нагрузки возрастает несинусоидальность напряжения. Причем кривые, описывающие изменения  $K_U$  и  $K_{U(3)}$ , имеют характер степенной функции. Остальные зависимости  $K_{U(n)}$  от  $\alpha$  носят сложный характер при общей тенденции возрастания с ростом  $\alpha$ .

Нетрудно видеть, что искажение формы кривой напряжения определяется в основном напряжением третьей гармоники. Остальные гармоники вносят незначительный вклад. Причем напряжения гармоник нулевой последовательности (кроме третьей) сравнимы по значению с напряжениями гармоник прямой и обратной последовательностей, хотя, как показывают расчеты, токи гармоник, кратных трем (кроме третьей), невелики. Доминирующее влияние напряжений гармоник, кратных трем, можно объяснить большим эквивалентным сопротивлением нулевой последовательности сетей с нулевым проводом.

В продолжение анализа влияния изменения варианта исполнения сети НН в работе [41] проведено сравнение результатов

расчета высших гармоник сети при использовании трансформаторов со схемой соединения обмоток звезда—зигзаг с нулем. Как известно, основным недостатком трансформаторов со схемой соединения обмоток звезда—звезда с нулем является относительно большое  $Z_0$ , которое определяется конструктивными особенностями трансформатора, схемой соединения его обмоток, степенью насыщения стержней магнитопровода и др. Такая особенность указанных трансформаторов делает их чувствительными к несинусоидальности фазных токов в сетях НН с нелинейными нагрузками. В результате проведенных расчетов было определено, что по сравнению с трансформатором, обмотки которого соединены по схеме звезда—звезда с нулем, использование трансформатора с соединением обмоток по схеме звезда—зигзаг с нулем приводит, в частности, к снижению  $K_U$  на 20—50 % (в зависимости от доли и параметров выпрямительной нагрузки) при некотором ухудшении гармонического состава фазного тока.

В работе [39] рассмотрено влияние параметров нагрузочных режимов трансформатора на несинусоидальность токов и напряжений в сети НН. В результате проведенного анализа было установлено, что известное технико-экономическое требование о том, что во всех случаях необходимо стремиться к наиболее полному использованию номинальной мощности трансформатора и даже целесообразно работать в режиме систематической перегрузки, в случае нелинейных нагрузок получает дополнительную аргументацию. Снижение коэффициента загрузки трансформатора в упомянутом случае, с одной стороны, не приводит к существенному снижению уровня высших гармоник, а с другой — может привести к временным перенапряжениям в сетях НН.

Очевидно, что рассмотренная математическая модель низковольтной сети с выпрямительной нагрузкой позволяет определить искажение синусоидальности кривых токов и напряжений сетей НН с сосредоточенной в одном узле нагрузкой. Это могут быть либо неразветвленные автономные сети с нагрузкой, имеющей в своем составе радиоэлектронную аппаратуру с ИВЭП с бестрансформаторным входом, либо распределительные (городские или сельские) сети НН, питающие нагрузку крупных объектов (зданий, предприятий), которая имеет в своем составе нелинейные электроприемники.

Если предположить, что данная нагрузка является, например, эквивалентной нагрузкой всех электроприемников жилого или об-

шественного здания, то тогда полученное искажение синусоидальности кривой напряжения на нагрузке будет соответствовать несинусоидальности фазного напряжения на вводе в здание, а искажения синусоидальности кривой тока в линии — несинусоидальности фазного тока внешней питающей сети. В действительности каждый электроприемник сети НН подключается в какой-то конкретной точке к внутренней сети здания и имеет ток и напряжение, форма кривых которых отличается от формы кривой фазного тока внешней питающей сети и напряжения на вводе в здание, соответственно. Очевидно, что рассмотренная модель не позволяет определить значения высших гармоник токов и напряжений внутренней сети электроснабжения здания и, соответственно, искажения синусоидальности их кривых на зажимах подключенных к ней электроприемников, а полученные значения несинусоидальности токов и напряжений из-за погрешности эквивалентирования всей нагрузки сети в одном узле могут быть неточными. Кроме того, при проведении сравнительного анализа режимов рассматриваемой сети НН в различных вариантах ее исполнения такие параметры, как доля нелинейной нагрузки или коэффициент загрузки трансформатора, определяются формально, без конкретизации состава и графиков нагрузок отдельных групп электроприемников. В связи с этим данную модель следует рассматривать как упрощенную, и актуальна задача ее усовершенствования путем дополнительного учета конкретных параметров всех основных элементов электрической сети здания.

### 2.3. Модели низковольтных сетей, в которых нелинейные нагрузки задаются источниками токов

Несмотря на указанные ограничения, касающиеся области применения рассмотренной в предыдущем параграфе математической модели, полученные с ее помощью результаты достаточно точны, а достоверность их проверена на физической модели и не вызывает сомнения. Однако в инженерной практике часто возникает необходимость проведения оценочных, довольно приближенных, но удовлетворяющих по точности и, в то же время, не требующих разработки сложных математических моделей и привлечения компьютерной техники расчетов. В этом смысле традиционные модели, в которых нелинейная нагрузка задается источником тока  $n$ -й гармоники, представляют несомненный интерес.

### 2.3. Модели низковольтных сетей, в которых нелинейные нагрузки

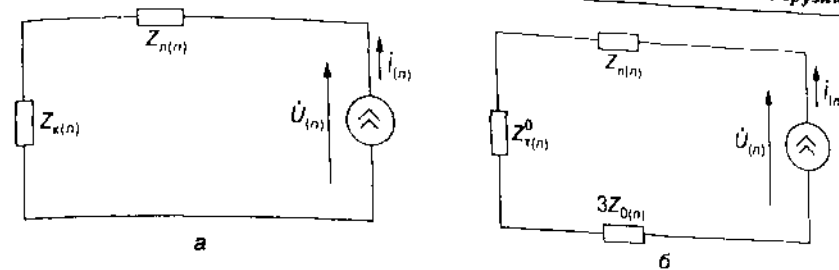


Рис. 2.8. Однолинейные схемы замещения сети НН с источником тока  $n$ -й гармоники: а — для  $n \neq 3k$ , б — для  $n = 3k$

Рассмотрим возможность использования подобных моделей для сетей НН. Как было отмечено в параграфе 2.2, при использовании этих моделей в трехпроводных сетях значение тока  $n$ -й гармоники находится при условии подключения данной нелинейной нагрузки к сети бесконечной мощности. Искажение синусоидальности кривой напряжения при этом определяется падениями напряжения от соответствующих токов высших гармоник на сопротивлениях продольных элементов сети. В случае трехфазной четырехпроводной сети путь протекания токов гармоник, кратных трем, отличается от пути протекания токов остальных гармоник. В соответствии с этим при условии симметрии нагрузок однолинейные схемы замещения могут быть двух видов. На рис. 2.8,а показана схема замещения сети для гармоник, некратных трем,  $n \neq 3k$ ,  $k = 1, 2, \dots$ , а на рис. 2.8,б — для гармоник, кратных трем,  $n = 3k$ ,  $k = 1, 2, \dots$ . В этих схемах нелинейная нагрузка представлена источником тока  $n$ -й гармоники. Здесь  $Z_{k(n)}$  и  $Z_{r(n)}^0$  — сопротивления короткого замыкания и нулевой последовательности трансформатора для  $n$ -й гармоники;  $Z_{n(n)}$  и  $Z_{0(n)}$  — сопротивления фазного и нулевого проводов линии для  $n$ -й гармоники;  $i_{(n)}$  и  $\dot{U}_{(n)}$  — ток и напряжение сети  $n$ -й гармоники, причем

$$\dot{U}_{(n)} = -\dot{I}_{(n)} Z_{(n)}, \quad (2.8)$$

где  $Z_{(n)}$  — эквивалентное сопротивление сети для  $n$ -й гармоники. Очевидно, что напряжение гармоник, некратных трем, имеет вид

$$\dot{U}_{(n)} = -\dot{I}_{(n)} Z_{(n)} = -\dot{I}_{(n)} [Z_{k(n)} + Z_{n(n)}] = -\dot{I}_{(n)} (R_k + R_n + jX_k n + jX_n n), \quad (2.9)$$

$$Z_{(n \neq 3k)} = R_k + R_n + j(X_k + X_n)n,$$

а напряжение гармоник, кратных трем, представлено в виде

$$\dot{U}_{(n)} = -\dot{I}_{(n)} [Z_{\tau(n)}^0 + Z_{\lambda(n)} + 3Z_{0(n)}], \quad (2.10)$$

$$Z_{(n=3k)} = R_k^0 + R_n + 3R_0 + j(X_k^0 + X_n + 3X_0)n.$$

Вначале убедимся, что без адаптации традиционных моделей к особенностям сетей НН, их применение для анализа рассматриваемой низковольтной сети невозможно. Зная токи высших гармоник, полученные при условии питания выпрямителя от сети бесконечной мощности, и значения соответствующих эквивалентных сопротивлений сети, с помощью выражений (2.9) и (2.10) можно определить значения напряжений этих гармоник и  $K_U$ . На рис. 2.9 показаны зависимости  $K_{U(n)}$  и  $K_U$  от  $\alpha$  для выпрямителя с постоянной времени  $RC$ -цепи  $\tau = 0,075$  с и параметров рассматриваемого в параграфе 2.2 варианта сети НН, полученные с помощью традиционного подхода. Из рисунка видно, что напряжения рассматриваемых гармоник весьма значительны. В результате коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения достигает при  $\alpha = 0,9$  значения 289,6 %. Очевидно, что этот уровень гармоник напряжения в реальной сети невозможен, т.е. такой расчет гармоник напряжения в сетях НН с помощью традиционных моделей приводит к неверным результатам.

Внесем определенные коррективы в расчетный механизм, чтобы адаптировать данные модели к особенностям сетей НН и получить возможность применения традиционных схем замещения для инженерных расчетов. Как уже отмечалось, при подключении выпрямителя к конкретной сети НН значение высших гармоник уменьшается по сравнению с посчитанными при условии питания от сети бесконечной мощности. Предположим, что в схемах замещения (рис. 2.8) источник тока  $n$ -й гармоники генерирует токи высших гармоник, значение которых соответствует посчитанным с учетом параметров сети; при этом эквивалентное сопротивление сети для  $n$ -й гармоники остается прежней. Определим напряжения высших гармоник с помощью выражений (2.9) и (2.10). Полученные в результате расчета значения напряжений

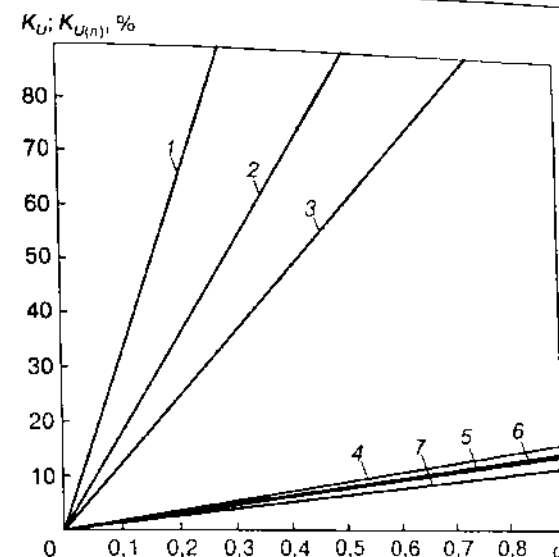


Рис. 2.9. Зависимости  $K_U$  и  $K_{U(n)}$  от  $\alpha$  в случае использования традиционных моделей без адаптации к особенностям сети НН:

1 —  $K_U$ ; 2 —  $K_{U(9)}$ ; 3 —  $K_{U(3)}$ ; 4 —  $K_{U(7)}$ ; 5 —  $K_{U(5)}$ ; 6 —  $K_{U(11)}$ ; 7 —  $K_{U(13)}$

высших гармоник с высокой точностью совпадают со значениями соответствующих напряжений, полученных с помощью модели, учитывающей параметры нагрузки и сети.

Следует отметить, что наилучшее совпадение наблюдается для напряжений гармоник с  $n < 13$ , для которых относительная погрешность составляет менее 5 %. Таким образом, традиционные однолинейные схемы замещения, в которых нелинейная нагрузка задается источниками тока высших гармоник, можно использовать для определения с достаточной для инженерных расчетов точностью напряжений высших гармоник в сетях НН. Для этого токи высших гармоник или форму их кривых (которую, в частности, можно получить экспериментально) необходимо приводить в соответствие с конкретной сетью НН.

Аналогично можно использовать и трехфазные схемы замещения сети НН, которые учитывают указанные ранее особенности ее построения. В работе [121] рассмотрена такая схема замещения сети НН с нелинейными нагрузками, представленными источниками тока произвольной формы (рис. 2.10). При этом для простоты индуктивные элементы сети и нагрузки не учитываются. На рисунке  $e_A(t)$ ,  $e_B(t)$ ,  $e_C(t)$  — трехфазная симметричная

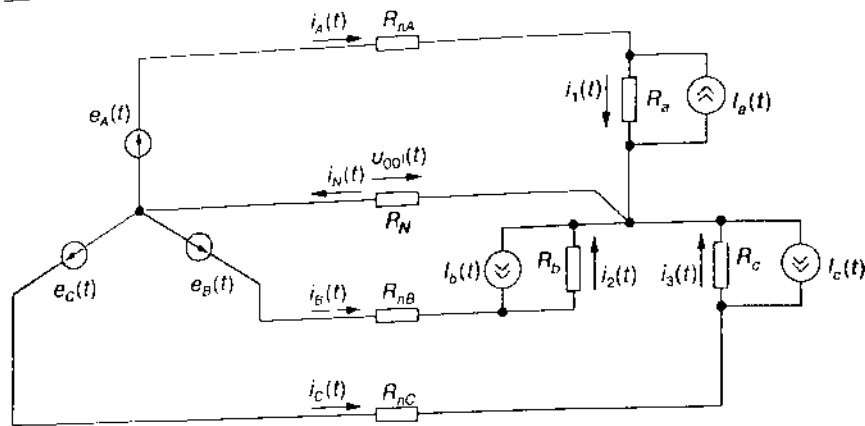


Рис. 2.10. Трехфазная схема замещения сети НН с источниками токов нелинейных нагрузок

система ЭДС,  $R_{лА}$ ,  $R_{лВ}$ ,  $R_{лС}$ ,  $R_N$  — сопротивления фазных и нулевого проводов линии;  $R_a$ ,  $R_b$ ,  $R_c$  — три произвольных нагрузочных сопротивления, параллельно которым подключаются нелинейные нагрузки (источники тока);  $i_A(t)$ ,  $i_B(t)$ ,  $i_C(t)$ ,  $i_N(t)$  — токи в фазных и нулевом проводе линии;  $I_a(t)$ ,  $I_b(t)$ ,  $I_c(t)$  — фазные токи нелинейных нагрузок;  $i_1(t)$ ,  $i_2(t)$ ,  $i_3(t)$  — фазные токи в нагрузочных сопротивлениях.

Математическая модель, рассмотренная в предыдущем параграфе, использовалась для численного расчета токов и напряжений в сети НН. В работе [121] были получены аналитические выражения для режимных параметров низковольтной сети с нелинейными нагрузками без учета индуктивности элементов.

Для схемы (рис. 2.10) по методу узловых напряжений (при эквивалентной замене источников тока источниками ЭДС) запишем уравнение в виде [128]:

$$\left( \frac{1}{R_{лА} + R_a} + \frac{1}{R_{лВ} + R_b} + \frac{1}{R_{лС} + R_c} + \frac{1}{R_N} \right) u_{00}(t) =$$

$$= \frac{1}{R_{лА} + R_a} [e_A(t) + R_a I_a(t)] +$$

$$+ \frac{1}{R_{лВ} + R_b} [e_B(t) + R_b I_b(t)] + \frac{1}{R_{лС} + R_c} [e_C(t) + R_c I_c(t)].$$

### 2.3. Модели низковольтных сетей, в которых нелинейные нагрузки

Из приведенного уравнения находим падение напряжения в нулевом проводе:

$$u_{00}(t) = \frac{\left( \frac{e_A(t) + R_a I_a(t)}{R_{лА} + R_a} + \frac{e_B(t) + R_b I_b(t)}{R_{лВ} + R_b} + \frac{e_C(t) + R_c I_c(t)}{R_{лС} + R_c} \right)}{\left( \frac{1}{R_{лА} + R_a} + \frac{1}{R_{лВ} + R_b} + \frac{1}{R_{лС} + R_c} + \frac{1}{R_N} \right)}. \quad (2.11)$$

Тогда токи в фазных проводах линии имеют вид

$$i_A(t) = \frac{e_A(t) + R_a I_a(t) - u_{00}(t)}{R_{лА} + R_a};$$

$$i_B(t) = \frac{e_B(t) + R_b I_b(t) - u_{00}(t)}{R_{лВ} + R_b}; \quad (2.12)$$

$$i_C(t) = \frac{e_C(t) + R_c I_c(t) - u_{00}(t)}{R_{лС} + R_c},$$

а ток в нулевом проводе представлен так:

$$i_N(t) = \frac{u_{00}(t)}{R_N}. \quad (2.13)$$

Токи в нагрузочных сопротивлениях следующие:

$$i_1(t) = i_A(t) - I_a(t);$$

$$i_2(t) = i_B(t) - I_b(t);$$

$$i_3(t) = i_C(t) - I_c(t).$$

Как и прежде, в качестве нелинейной нагрузки в схеме замещения сети НН рассматриваем идеализированный однофазный выпрямитель, схема которого приведена на рис. 2.5. Известно, что поведение этой схемы, обусловленное процессами заряда и разряда конденсатора фильтра, характеризуется импульсным режимом работы выпрямителя. Это означает, что если на вход указанной схемы подается напряжение  $u(t) = U_m \sin \omega t$ , то ее входной ток  $I(t)$  будет иметь импульсный характер с большим

содержанием высших гармоник. В связи с этим представим входной ток рассматриваемого нелинейного электроприемника в виде [60]:

$$I(t) = \frac{I_m}{\pi} \sum_{n=1}^N \cos \left[ (2n-1) \left( \omega t - \frac{\pi}{2} \right) \right] \quad (2.14)$$

или

$$I(t) = \frac{I_m}{\pi} (\sin \omega t - \sin 3\omega t + \sin 5\omega t - \sin 7\omega t + \dots).$$

Следует отметить, что выражение (2.14) лишь отражает импульсный характер рассматриваемого входного тока, гармонический спектр которого, как известно, содержит нечетные гармоники, соизмеримые по значению с первой. Поэтому данное представление его кривой не претендует на высокую точность, но с методической точки зрения представляется вполне корректным. Например, в работе [117] такое же представление входного тока выпрямителя с емкостным фильтром используется при моделировании его выходного напряжения в установившихся и переходных режимах.

Тогда с учетом (2.14) для фазных составляющих источника тока принимаем

$$\begin{aligned} I_a(t) &= \frac{I_m}{\pi} \sum_{n=1}^N \cos \left[ (2n-1) \left( \omega t - \frac{\pi}{2} \right) \right]; \\ I_b(t) &= \frac{I_m}{\pi} \sum_{n=1}^N \cos \left[ (2n-1) \left( \omega t - \frac{7\pi}{6} \right) \right]; \\ I_c(t) &= \frac{I_m}{\pi} \sum_{n=1}^N \cos \left[ (2n-1) \left( \omega t + \frac{\pi}{6} \right) \right]. \end{aligned} \quad (2.15)$$

Трехфазная система ЭДС задается в виде

$$\begin{aligned} e_A(t) &= 220\sqrt{2} \sin \omega t; \\ e_B(t) &= 220\sqrt{2} \sin \left( \omega t - \frac{2\pi}{3} \right); \end{aligned} \quad (2.16)$$

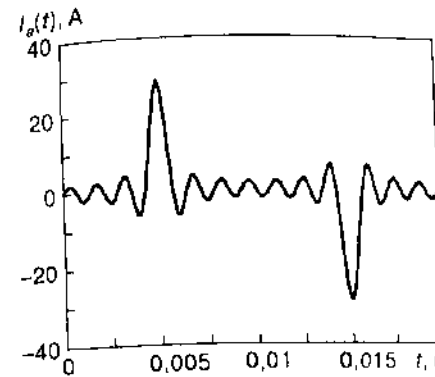


Рис. 2.11. Входной ток однофазного выпрямителя

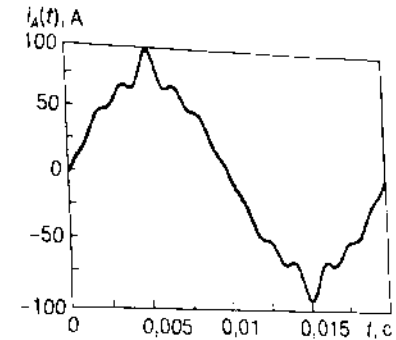


Рис. 2.12. Ток в фазном проводе линии

$$e_c(t) = 220\sqrt{2} \sin \left( \omega t + \frac{2\pi}{3} \right).$$

В соответствии с параметрами рассматриваемого варианта сети НН с помощью формул (2.11)–(2.16) были проведены расчеты режимных параметров, графики которых приведены на рис. 2.11 (входной ток выпрямителя), на рис. 2.12 (ток в фазном проводе линии), на рис. 2.13 (ток в нулевом проводе линии).

Анализ данных результатов показал их определенное отличие от результатов, полученных с помощью точной модели. Очевидно, что это отличие определяется точностью представления тока нелинейной нагрузки в виде определенного аналитического выражения или точностью его приведения в соответствие с конкретной сетью НН. Более точные результаты можно ожидать при использовании экспериментально полученных осциллограмм кривых токов нелинейных нагрузок. Поэтому найденные аналитические характеристики можно использовать в дальнейших исследованиях для приближенного анализа электромагнитных процессов в сетях НН с нелинейными нагрузками.

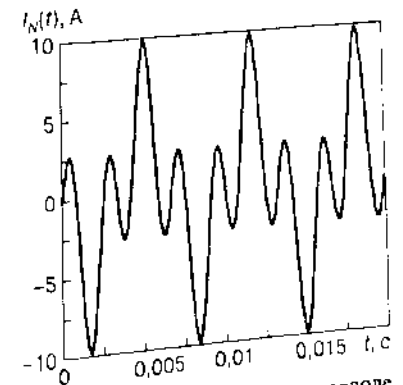


Рис. 2.13. Ток в нулевом проводе линии



## 2.4. Анализ зависимостей высших гармоник тока и напряжения с помощью традиционных моделей

Рассмотрим несколько режимов, каждый из которых определяется конкретными схемой соединения обмоток трансформатора, исполнением линии, нагрузкой трансформатора и т.д. Для каждого из рассматриваемых режимов изменяется спектр высших гармоник тока и соответствующий ему спектр высших гармоник напряжения. Кроме того, изменяется эквивалентное сопротивление сети для  $n$ -й гармоники  $Z_{(n)}$ , которая определяется сопротивлениями конкретных элементов сети. Очевидно, что в сетях НН точно определить значения коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения  $K_U$ , не зная значения гармоник тока, генерируемых конкретной нелинейной нагрузкой в конкретном режиме, не представляется возможным.

В работе [40] рассмотрено, как изменяются высшие гармоники при изменении схемы соединения обмоток трансформатора. Если мы рассчитаем с помощью точной модели значения  $K_U$  для сети НН с трансформатором, обмотки которого соединены по схеме звезда—зигзаг с нулем, то увидим, что они будут соответствовать верхней кривой (расчет), показанной на рис. 2.14. Известно, что при соединении обмоток по такой схеме сопротивление нулевой последовательности трансформатора  $Z_T^0$  на порядок меньше соответствующего сопротивления при соединении обмоток по схеме звезда—звезда с нулем. В результате уменьшается значение  $Z_{(n-3k)}$  для данного режима. Если мы используем выражения (2.9) и (2.10) для определения напряжений высших гармоник, подставляя известные значения  $I_{(n)}$ , посчитанные для сети НН с трансформатором, обмотки которого соединены по схеме звезда—звезда с нулем, и вновь рассчитанные значения  $Z_{(n)}$ , то получаем значения  $K_U$ , зависимость которых от  $\alpha$  показана на рис. 2.14 кривой 2 (предположение).

Из рисунка видно, что расчетные значения  $K_U$  превышают предполагаемые в 1,6–1,8 раза. Это вызвано возросшей амплитудой токов высших гармоник (особенно кратных трем) при использовании трансформатора со схемой соединения обмоток звезда—зигзаг с нулем. Таким образом, применение традиционных моделей для определения напряжений высших гармоник в сети НН с трансформатором, обмотки которого соединены по этой схеме, на основании имеющейся информации о значениях выс-

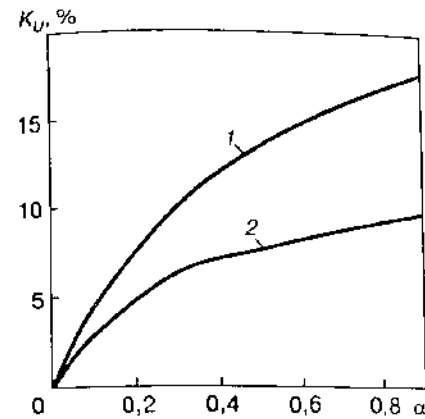


Рис. 2.14. Уменьшение значения  $K_U$  в случае неправильного учета изменения схемы соединения обмоток трансформатора:

1 — расчет; 2 — предположение

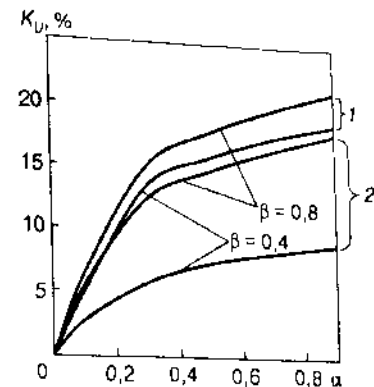


Рис. 2.15. Уменьшение значения  $K_U$  в случае неправильного учета изменения коэффициента загрузки трансформатора:

1 — расчет; 2 — предположение

ших гармоник тока, генерируемых данной нелинейной нагрузкой в случае использования трансформатора со схемой соединения обмоток звезда—звезда с нулем, приводит к неверным результатам. При этом амплитудные значения и фазы напряжений отдельных гармоник значительно отличаются от рассчитанных с помощью точной модели.

Проанализируем возможность использования выражений (2.9) и (2.10) для определения напряжений высших гармоник при разных значениях коэффициента загрузки трансформатора  $\beta$ . На рис. 2.15 показаны зависимости  $K_U$  от  $\alpha$  при  $\beta = 0,8$  и  $\beta = 0,4$ , причем две верхние кривые (расчет) построены с учетом результатов, полученных путем точного моделирования данных нагрузочных режимов, а две нижние кривые (предположение) — с учетом значения токов высших гармоник, которое скорректировано в соответствии с  $\beta$ . При этом предположении нелинейная нагрузка представлялась источником токов высших гармоник

$$I_{(n)}^{\beta} = \beta I_{(n)}^{100\%},$$

где  $I_{(n)}^{100\%}$ ,  $I_{(n)}^{\beta}$  — ток  $n$ -й гармоники для случаев 100%-ной загрузки трансформатора и предполагаемой загрузки трансформатора, определяемой  $\beta$ .

Из рис. 2.15 видно, что при снижении  $\beta$  увеличивается ошибка от расчета с учетом предполагаемых значений  $I_{(n)}^p$ . Если при  $\beta = 0,8$  расчетные значения  $K_U$  превышают предполагаемые в 1,1–1,2 раза, то при  $\beta = 0,4$  — в 1,8–2,1 раза. Как и в предыдущем случае, амплитудные значения отдельных гармоник напряжения, рассчитанные двумя методами, различаются в несколько раз.

Полученные результаты можно объяснить следующим образом. Каждый конкретный режим определяется конкретным соотношением параметров сети и нагрузки и, как следствие, характером протекания электромагнитных процессов. В результате каждый конкретный режим подключения нелинейной нагрузки к низковольтной сети характеризуется определенным искажением форм кривых как тока, так и напряжения и, следовательно, определенным значением их высших гармоник. В связи с этим формально использовать выражения (2.9) и (2.10) для нахождения значений напряжений высших гармоник одного режима по значениям токов высших гармоник других режимов (даже очень близких) в целях проведения точного анализа не представляется возможным.

Таким образом, с учетом изложенного выше, схемы замещения сети НН с нелинейной нагрузкой, в которых данная нагрузка представляется источниками токов высших гармоник можно использовать для разработки приближенных оценочных методик. С помощью таких методик можно, в частности, проводить общий анализ влияния нелинейных нагрузок на форму кривых токов и напряжений в трехфазных сетях с нулевым проводом. Для проведения данного анализа необходимо определить зависимость между коэффициентом  $n$ -й гармонической составляющей напряжения в виде  $K_{U(n)} = U_{(n)}/U_{ном}$  и коэффициентом  $n$ -й гармонической составляющей тока в виде  $K_{I(n)} = I_{(n)}/I_{ном}$  (здесь  $I_{ном}$ ,  $U_{ном}$ ,  $I_{(n)}$ ,  $U_{(n)}$  — действующие значения тока и напряжения номинальных фазных и  $n$ -й гармоники соответственно) для конкретных значений тока и напряжения (2.8) переходом к действующим значениям тока и напряжения и подставив в него  $I_{(n)}$  и  $U_{(n)}$ , выраженные через  $K_{I(n)}$  и  $K_{U(n)}$ , получим

$$U_{ном} K_{U(n)} = I_{ном} K_{I(n)} Z_{(n)}.$$

Разделив левую и правую части на  $I_{ном}$ , найдем

$$K_{U(n)} = Z_{(n)} / Z_n K_{I(n)},$$

где  $Z_n$  — полное сопротивление нагрузки,  $Z_{(n)}$  — полное сопротивление сети для  $n$ -й гармоники.

Для определения полного сопротивления нагрузки находим:

1. Полное, активное и индуктивное сопротивления фазы сети

$$Z_\phi = 3U_{\max}^2 / S_{\text{тр}}, \quad U_{\max} = 1,1 U_{ном},$$

$$R_\phi = Z_\phi \cos \varphi, \quad X_\phi = Z_\phi \sin \varphi.$$

2. Активное и индуктивное сопротивления фазных продольных элементов сети

$$R_{\text{кл}} = R_\phi + R_n,$$

$$X_{\text{кл}} = X_\phi + X_n.$$

3. Активное, индуктивное и полное сопротивления нагрузки

$$R_n = R_\phi - R_{\text{кл}}, \quad X_n = X_\phi - X_{\text{кл}}, \quad Z_n = \sqrt{R_n^2 + X_n^2}.$$

Обозначив  $Z_{(n)}/Z_n = A_{(n)}$ , получим

$$K_{U(n)} = A_{(n)} K_{I(n)}.$$

Таким образом, зная значения  $Z_{(n)}$  и  $Z_n$  для конкретной сети, мы можем определять зависимость  $K_{U(n)}$  от  $K_{I(n)}$  в этой сети, не конкретизируя нелинейную нагрузку.

В качестве примера рассмотрим сеть НН, которая представлена трансформатором мощностью 25 кВ·А (схема соединения обмоток звезда—звезда с нулем), кабельной линией сечением  $3 \times 25 + 1 \times 10$  мм<sup>2</sup> длиной 0,2 км и нагрузкой, являющейся источником токов высших гармоник, причем  $\cos \varphi = 0,95$ . Тогда сопротивления элементов схемы замещения (Ом) такие:

$$R_\phi = 0,1539, \quad R_\tau^0 = 1,65, \quad R_n = 0,2455, \quad R_0 = 0,6138,$$

$$X_\phi = 0,2436, \quad X_\tau^0 = 1,93, \quad X_n = 0,0131, \quad X_0 = 0,00145.$$

В результате расчета получаем  $Z_n = 5,941$  Ом, а значения  $Z_{(n)}$  можно найти из выражений (2.9) и (2.10). Тогда для данного ва-

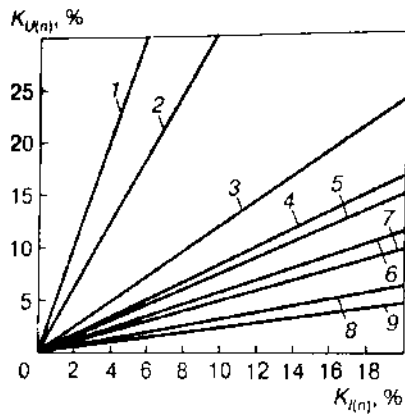


Рис. 2.16. Зависимости  $K_{U(n)}$  от  $K_{I(n)}$  для одного из конкретных вариантов исполнения сети НН:

1 —  $n = 15$ ; 2 —  $n = 9$ ; 3 —  $n = 3$ ; 4 —  $n = 19$ ; 5 —  $n = 17$ ; 6 —  $n = 13$ ; 7 —  $n = 11$ ; 8 —  $n = 7$ ; 9 —  $n = 5$

рианта сети НН получаем следующие значения коэффициентов  $A_{(n)}$  для одного из вариантов сети НН:

$n$	3	5	7	9	11	13	15	17	19
$A_{(n)}$	1,184	0,226	0,309	3,074	0,48	0,566	5,055	0,738	0,824

Очевидно, что значения  $A_{(n=3k)}$  в общем случае существенно превышают  $A_{(n \neq 3k)}$ . В соответствии с этим, напряжения гармоник, кратных трем, являются определяющими для суммарного напряжения высших гармоник даже при небольших значениях соответствующих составляющих токов. При одинаковом относительном увеличении токов всех гармоник напряжения  $U_{(n=3k)}$  возрастают значительно быстрее напряжений  $U_{(n \neq 3k)}$ . На рис. 2.16 показаны зависимости  $K_{U(n)} = f[K_{I(n)}]$  для рассматриваемых гармоник. Из представленных графиков видно, что при  $K_{I(3)} = 10\%$   $K_{U(3)} = 11,84\%$ , а при  $K_{I(5)} = 10\%$   $K_{U(5)} = 2,26\%$ . Если соответствующий  $K_{I(n)}$  возрастает до 20%, то  $K_{U(3)}$  увеличивается до 23,68%, а  $K_{U(5)}$  — только до 4,52%. Согласно ГОСТ 13109–97 нормально допустимое значение  $K_{U(n)}$  при  $n = 3$  равно 5%, а при  $n = 5$  — 6%. Из графиков (рис. 2.16) видно, что для выполнения этого условия в рассматриваемой сети  $K_{I(3)}$  не должен превышать 4,22%. Для сравнения: требования ГОСТ 13109–97 для высших гармоник с  $n = 5$  в этом случае выполняются при  $K_{I(5)} \leq 26,51\%$ .

Таким образом, полученные кривые наглядно показывают, что даже низкий уровень токов гармоник, кратных трем (единицы процентов), может привести к значительным искажениям напряжений. Вместе с тем даже большие значения токов гармоник с  $n \neq 3k$  (десятки процентов) часто не приводят к нарушению требований ГОСТ 13109–97 к значению  $K_{U(n)}$ .

Наличие гармоник с  $n = 3k$  в спектре высших гармоник тока является определяющим фактором для коэффициента искажения

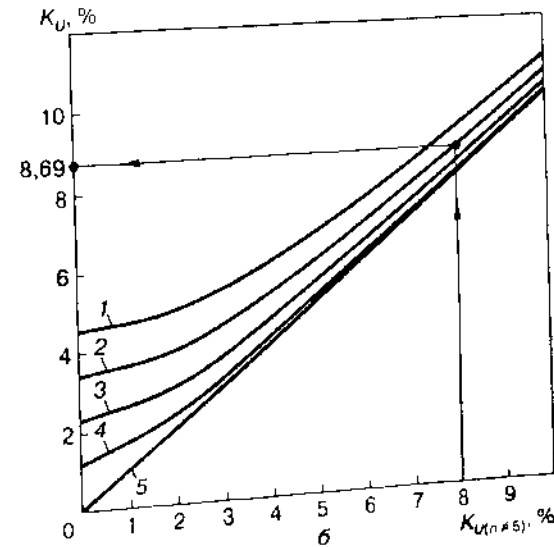
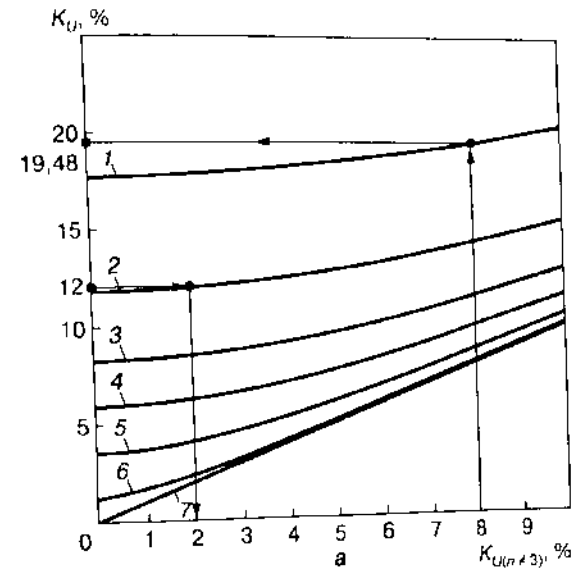


Рис. 2.17. Зависимости  $K_U$  от  $K_{I(n=m)}$ ,  $K_{U(n=m)}$  для одного из вариантов исполнения сети НН:

а: 1 —  $K_{I(3)} = 15\%$ ; 2 —  $K_{I(3)} = 10\%$ ; 3 —  $K_{I(3)} = 7\%$ ; 4 —  $K_{I(3)} = 5\%$ ; 5 —  $K_{I(3)} = 3\%$ ; 6 —  $K_{I(3)} = 1\%$ ; 7 —  $K_{I(3)} = 0$ , при  $m = 3$ ;  
б: 1 —  $K_{I(5)} = 20\%$ ; 2 —  $K_{I(5)} = 15\%$ ; 3 —  $K_{I(5)} = 10\%$ ; 4 —  $K_{I(5)} = 5\%$ ; 5 —  $K_{I(5)} = 0$ , при  $m = 5$

синусоидальности кривой напряжения  $K_U$ . На рис. 2.17, а, б показаны зависимости  $K_U = f[K_{I(n)}, K_{U(n \neq m)}]$  соответственно для случаев  $m = 3$  и  $m = 5$ , где  $K_{U(n \neq m)}$  — коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения с учетом всех гармоник, кроме  $n = m$ . Семейство кривых для заданных гармоник описывается выражением

$$K_U = \sqrt{[K_{U(n \neq m)}]^2 + A_{(m)}^2 K_{I(m)}^2}.$$

С помощью указанных графиков легко определить, как токи разных гармоник влияют на значение  $K_U$ . Анализ графиков показывает, что, например, увеличение коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения за счет третьей гармоники тока при  $K_{I(3)} = 3\%$  (рис. 2.17, а) можно сравнить с увеличением  $K_U$  за счет пятой гармоники тока при  $K_{I(5)} = 15\%$  (рис. 2.17, б). Продолжая анализ, можно легко показать на графиках, что за счет третьей гармоники тока ( $K_{I(3)} = 15\%$ )  $K_U$  увеличивается от 8 до 19,48% (рис. 2.17, а), а за счет пятой гармоники тока ( $K_{I(5)} = 15\%$ )  $K_U$  изменяется от 8 до 8,69%, т.е. увеличение составляет только 0,69% (рис. 2.17, б). Рассмотрим случай (рис. 2.17, а), когда  $K_U = 12\%$ , причем известно, что  $K_{I(3)} = 10\%$ . Из рисунка видно, что несинусоидальность напряжения, вызываемая остальными гармониками, будет определяться значением  $K_{U(n \neq 3)} = 2\%$ . Из рис. 2.17, б следует, что при  $K_U > 8\%$  пятая гармоника тока ( $K_{I(5)} = 10\%$ ) почти не влияет на коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения.

Покажем с помощью рассматриваемых графиков, как это свойство трехфазных четырехпроводных сетей, которое заключается в преобладающем влиянии гармоник, кратных трем, можно использовать на практике. Очевидно, что, фильтруя токи указанных гармоник, можно значительно снизить несинусоидальность напряжения. Это предполагает применение фильтров токов гармоник, кратных трем, в качестве эффективного средства снижения искажений формы кривых напряжений в трехфазных сетях с нулевым проводом. Следует отметить, что для конкретной сети всегда можно построить графики, аналогичные показанным на рис. 2.17, и с их помощью, зная значения  $K_U$  и  $K_{I(n=3k)}$ , определить значение  $K_{U(n \neq 3k)}$ . В результате можно заранее сделать вывод об эффективности фильтрации высших гармоник с помощью упомянутых фильтров в данной сети. Например, для рассматри-

ваемого варианта сети (см. рис. 2.17, а) при  $K_{I(3)} = 15\%$  полная фильтрация тока третьей гармоники может привести к значению  $K_{U(n \neq 3)} \leq 8\%$  (по ГОСТ 13109—97) в случае, если до фильтрации коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения был не больше 19,5%.

Очевидно, что искажение формы кривой тока, вызываемое нелинейной нагрузкой, можно определять коэффициентом искажения синусоидальности кривой тока  $K_I$ , выражая его через коэффициенты  $n$ -х гармонических составляющих тока:

$$K_I = \sqrt{\sum_{n=2}^N K_{I(n)}^2},$$

где  $N$  — порядок последней из учитываемых гармоник тока.

Исходя из предыдущих выводов, можно предположить, что  $K_I$  не является показателем, который однозначно характеризует влияние нелинейной нагрузки на форму кривой напряжения сети. Очевидно, что при постоянном  $K_I$  значение  $K_{I(n)}$  в каждом конкретном случае для различных гармоник может существенно различаться, что в свою очередь приведет к разным значениям  $K_U$ .

Покажем это на примере рассматриваемого варианта сети НН. Для простоты считаем, что нелинейная нагрузка вызывает появление только третьей, пятой и седьмой гармоник тока. Пусть  $K_I = \text{const} = 14,14\%$ , а значение  $K_{I(n)}$  для этих трех гармоник изменяется и может принимать одно из значений: 6,8 или 10%. В результате  $K_U$  при различных значениях  $K_{I(n)}$  изменяет свое значение от 7,86 до 12,17%.

Зависимости  $K_U$  от значения  $K_{I(n)}$  для гармоник с  $n = 3, 5, 7$  описываются выражением

$$K_U = \sqrt{A_{(3)}^2 K_{I(3)}^2 + A_{(5)}^2 K_{I(5)}^2 + A_{(7)}^2 K_{I(7)}^2}.$$

Поскольку  $K_I = \text{const}$ , то, например, для каждой пары значений  $K_{I(5)}$  и  $K_{I(7)}$  однозначно находится  $K_{I(3)}$  из выражения

$$K_I = \sqrt{K_{I(3)}^2 + K_{I(5)}^2 + K_{I(7)}^2}.$$

Аналогично по имеющимся значениям  $K_{I(3)}$  и  $K_{I(7)}$  можно находить  $K_{I(5)}$ . Очевидно, что при постоянном  $K_I = 14,14\%$  и изме-

няющихся в широких пределах  $K_{(n)}$  (от 0 до 14,14 %) интервал изменения  $K_U$  очень велик — от 3,2 до 16,8 %. Меньшему значению  $K_U$  соответствует вариант, когда все искажение формы кривой напряжения вызвано током пятой гармоники при  $K_{(5)} = 14,14 \%$ . Большее значение  $K_U = 16,8 \%$  получается при  $K_{(3)} = 14,14 \%$ ;  $K_{(5)} = 0$  и  $K_{(7)} = 0$ .

Таким образом, показано, что при одном и том же значении  $K_f$  значение  $K_U$  определяется количественным и качественным составом спектра высших гармоник тока нелинейной нагрузки и может принимать самые разные значения. При этом, как отмечалось ранее, определяющим фактором является значение токов гармоник, кратных трем. Это обстоятельство следует учитывать как при разработке фильтрующих устройств, так и при проектировании оборудования, которое является источником высших гармоник тока. Следовательно, при минимизации  $K_f$  входного тока данной нелинейной нагрузки необходимо в первую очередь (если есть такая возможность) снижать уровень гармоник, кратных трем, причем в этом случае можно допустить увеличение уровня других гармоник и даже  $K_f$ .

На основании изложенного выше можно сделать вывод, что с помощью моделей сетей НН, в которых нелинейная нагрузка задается источниками токов высших гармоник, удобно проводить анализ зависимостей высших гармоник тока и напряжения. При этом, не конкретизируя нелинейную нагрузку, можно рассматривать конкретную низковольтную сеть с определенными параметрами. Предложенный метод даст возможность готовить демонстрационные или учебные материалы, а также разрабатывать соответствующие методики, позволяющие оценить уровень высших гармоник и определить некоторые закономерности для трехфазных сетей с нулевым проводом, например, наглядно показать доминирующее влияние гармоник, кратных трем. При этом можно, в частности, предложить направление оптимизации и рекомендовать средства снижения уровня высших гармоник.

## УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ И РАСЧЕТ НЕСИНУСОИДАЛЬНОСТИ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ НИЗКОВОЛЬТНЫХ СЕТЕЙ

### 3.1. Математическая модель электрической сети здания с учетом параметров ее основных элементов и характерных электроприемников

Во второй главе рассмотрены математические модели низковольтных сетей с нелинейными нагрузками, которые позволяют определить искажения синусоидальности кривых токов и напряжений в зависимости от доли нелинейной нагрузки и параметров моделируемых нелинейных потребителей для сетей НН различного исполнения. Данные модели можно использовать для анализа электромагнитных процессов в автономных и распределительных сетях НН при условии, что нагрузка сосредоточена в одном узле. При этом для городских распределительных сетей такой нагрузкой является эквивалентная нагрузка всех электроприемников крупного объекта (здания, предприятия). Очевидно, что с помощью рассмотренных моделей нельзя определить значение высших гармоник токов и напряжений внутренней электрической сети объекта и, соответственно, искажения синусоидальности их кривых на зажимах подключенных к ней электроприемников. Поэтому данные модели необходимо усовершенствовать путем дополнительного учета параметров элементов внутренней сети здания и определения характерных нагрузочных узлов подключения отдельных групп электроприемников.

Как правило, основными элементами электрической сети жилого или общественного здания являются трансформатор 10/0,4 кВ, внешние питающие линии от шин НН трансформатора к главному распределительному щиту (ГРЩ) здания, внутренние питающие линии (стояки) от ГРЩ здания к распределительным щитам (РЩ), линии от РЩ силовой сети к силовым электроприемникам (распределительная сеть), линии от РЩ осветительной сети к светильникам и/или розеткам (групповая сеть).

Очевидно, что усовершенствованная схема замещения сети НН станет более сложной из-за дополнительного учета не только указанных элементов сети, но и соответствующих групп электроприемников, которые подключаются к ГРЩ, РЩ и розеткам.

Иными словами, в схеме замещения станет больше ветвей и узлов. При этом количество нагрузочных узлов будет определяться назначением здания, его размерами, этажностью, количеством помещений и составом электроприемников, и, в соответствии с этим, схемой сети (магистральная, радиальная, смешанная), количеством стояков, РЩ и розеток.

Понятно, что при учете всех узлов схема замещения сети будет чрезмерно сложной. Поэтому необходимо ее упростить путем эквивалентирования нагрузок в целях получения оптимального количества нагрузочных узлов, к которым подключаются характерные группы электроприемников с их конкретными параметрами. В результате указанного эквивалентирования в схеме замещения должны быть представлены основные элементы сети, а суммарная мощность ее электроприемников, напряжение в эквивалентных узлах и токи в примыкающих к ним сетевых элементах не должны существенно измениться.

Очевидно, что эквивалентирование нелинейных нагрузок будет иметь свои особенности. Суть их состоит в том, что в зависимости от поставленной задачи относительно определения параметров несинусоидальности тока и напряжения в каком-либо узле эквивалентная схема замещения сети должна включать в себя фрагменты сетевых элементов (участки линий), которые формируют путь протекания тока нагрузки этого узла. При этом в схеме замещения сети всегда должны быть представлены узел ГРЩ (в различных вариантах при эквивалентировании нагрузок изменяться будет только мощность присоединяемых к ГРЩ электроприемников), а также узел соседнего сетевого элемента, ближайший к рассматриваемому, и участок линии между ними. Например, при построении эквивалентной схемы замещения для определения токов и напряжений в узле групповой (распределительной) сети следует учесть, кроме внешней питающей сети и ГРЩ, участок (участки) стояка и участок (участки) линии групповой (распределительной) сети с соответствующим количеством их узлов.

На основании изложенного выше можно сформулировать основные положения метода эквивалентирования нелинейных нагрузок и построения эквивалентных схем замещения сети.

1. Суммарная мощность электроприемников, подключенных к нагрузочным узлам схемы замещения сети, после эквивалентирования не должна измениться.

2. Схема замещения сети строится по принципу формирования пути протекания тока рассматриваемой нагрузки. При этом,

### 3.1. Математическая модель электрической сети здания

в общем случае, в схеме замещения должны быть представлены все основные элементы сети: внешняя питающая сеть, участок (участки) стояка и участок (участки) линии групповой (распределительной) сети с соответствующим количеством нагрузочных узлов.

3. В пределах каждого элемента сети выделяется один эквивалентируемый узел, к которому подключается дополнительная нагрузка других узлов этого элемента. В этих эквивалентируемых узлах его собственная нагрузка суммируется с нагрузкой электроприемников, подключенных вне пути протекания тока рассматриваемого нагрузочного узла, а именно:

а) в узле ГРЩ суммируется нагрузка всех стояков, кроме рассматриваемого;

б) в узле РЩ суммируется нагрузка соответствующих РЩ, а также всех линий групповой (распределительной) сети данного РЩ, кроме рассматриваемой;

в) в узле групповой (распределительной) сети суммируется нагрузка соответствующих электроприемников данной линии, кроме рассматриваемой группы электроприемников.

4. При эквивалентировании нагрузок в узлах исключаются продольные сопротивления соответствующих сетевых фрагментов, расположенных вне пути протекания тока рассматриваемого узла, а эквивалентная нагрузка представляется активными и реактивными элементами, значение которых определяется ее суммарной мощностью.

Проведенный анализ показал, что, с учетом сказанного, оптимальной для проведения моделирования и анализа режимов электрической сети здания с несимметричными нелинейными электроприемниками будет схема замещения, которая учитывает четыре характерных нагрузочных узла (ГРЩ, РЩ и два узла (розетки) групповой сети).

Поэтому в работе [38] был рассмотрен вариант развернутой схемы замещения сети НН, который приведен на рис. 3.1. Здесь схема замещения сети НН, который приведен на рис. 3.1. Здесь  $e_A, e_B, e_C$  — трехфазная симметричная система ЭДС;  $Z_1 = Z_2 = Z_3 = Z_K + Z_n$ ,  $Z_4 = (Z_1^0 - Z_K + 3Z_n)/3$  — продольные сопротивления внешней питающей сети ( $Z_1^0, Z_K$  — сопротивления короткого замыкания и нулевой последовательности трансформатора 10/0,4 кВ;  $Z_n$  — сопротивления нулевого и фазного проводов внешней питающей линии от шин НН трансформатора к главному распределительному щиту (ГРЩ) здания);  $Z_5, Z_6, Z_7, Z_8$  — сопротивления фазных и нулевой жил кабеля внутренней питающей ли-

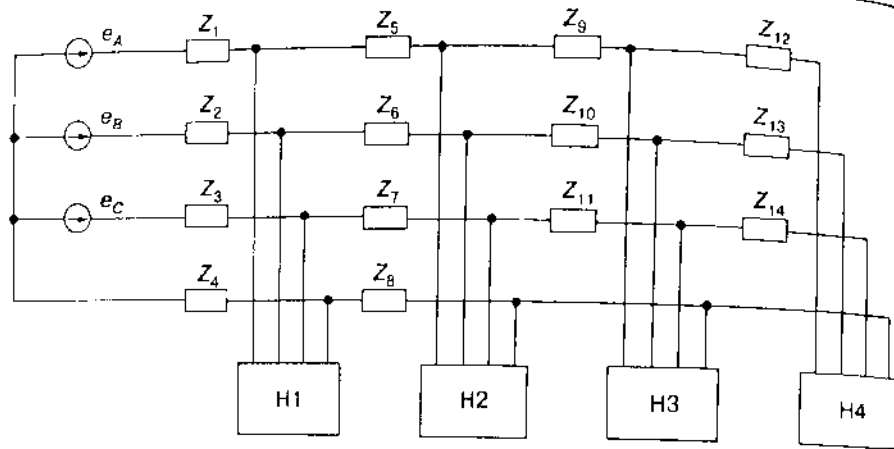


Рис. 3.1. Развернутая схема замещения сети НН

нии (стояка) от ГРЩ к РЩ осветительной сети здания;  $Z_9, Z_{10}, Z_{11}, Z_{12}, Z_{13}, Z_{14}$  — суммарные (соответствующая фаза—нуль) сопротивления отдельных участков линий от РЩ осветительной сети к конкретным электроприемникам (групповая сеть); Н1 — нагрузочный блок, в который входят вся силовая нагрузка здания и нагрузка всех осветительных стояков кроме одного; Н2 — нагрузочный блок, в который входит вся нагрузка одного стояка, кроме нагрузки одной линии групповой сети; Н3 — нагрузка одной линии групповой сети, кроме нагрузки одной отдельной группы электроприемников; Н4 — нагрузка одной отдельной группы электроприемников.

Из развернутой схемы замещения видно, что внешняя питающая сеть и стояки выполняются трехфазными с нулевым проводом (сопротивления  $Z_4$  и  $Z_8$ ), а нагрузка групповой сети (Н3, Н4) подключается к РЩ двужильным (фаза—нуль) проводом. Следует отметить, что нагрузочные блоки Н1—Н4 идентичны по своему составу и подобны нагрузке рассмотренной выше упрощенной модели сети НН. Каждый нагрузочный блок состоит из трех однофазных нагрузок, включенных на фазные напряжения (рис. 2.5). Изменяя соответствующие сопротивления, можно изменять как мощность, так и соотношения линейной и нелинейной составляющих этих нагрузок.

Нетрудно видеть, что развернутую схему замещения сети можно условно разделить на четыре подобные подсистемы, каждую из которых можно описать подобной системой дифференциальных уравнений. Для простоты рассмотрим дифференциальные уравнения, которые описывают одну подсистему замещения, в состав

## 3.1. Математическая модель электрической сети здания

которой входят  $e_A, e_B, e_C$  — система ЭДС;  $Z_1, Z_2, Z_3, Z_4$  — продольные линейные сопротивления сети и элементы нагрузки Н1. При этом можно выделить три группы уравнений. Первая группа уравнений описывает токи и напряжения линейной части подсистемы замещения и имеет следующий вид:

$$\begin{cases} e_A = i_1 R_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + u_1 + i_4 R_4 + L_4 \frac{di_4}{dt}; \\ e_B = i_2 R_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + u_2 + i_4 R_4 + L_4 \frac{di_4}{dt}; \\ e_C = i_3 R_3 + L_3 \frac{di_3}{dt} + u_3 + i_4 R_4 + L_4 \frac{di_4}{dt}; \\ i_1 = i'_1 + i_5; \\ i_2 = i'_2 + i_6; \\ i_3 = i'_3 + i_7; \\ i_4 = i'_1 + i'_2 + i'_3 + i_8, \end{cases}$$

где  $i_1, i_2, i_3, i_4, i_5, i_6, i_7, i_8$  — мгновенные значения токов в соответствующих сопротивлениях подсистемы замещения;  $i'_1, i'_2, i'_3$  — мгновенные значения фазных токов нагрузки Н1;  $u_1, u_2, u_3$  — мгновенные значения фазных напряжений на нагрузке Н1. Очевидно, что для третьей и четвертой подсистем замещения уравнения будут более простыми из-за отсутствия токов нулевого провода.

Вторая группа уравнений описывает токи и напряжения нагрузочной части подсистемы замещения и имеет следующий вид:

$$\begin{cases} u_1 = i''_1 R''_1 + L''_1 \frac{di''_1}{dt}; \\ u_2 = i''_2 R''_2 + L''_2 \frac{di''_2}{dt}; \\ u_3 = i''_3 R''_3 + L''_3 \frac{di''_3}{dt}; \\ i'_1 = i''_1 + i''_1; \\ i'_2 = i''_2 + i''_2; \\ i'_3 = i''_3 + i''_3, \end{cases}$$

где  $i''_1, i''_2, i''_3$  — мгновенные значения фазных токов линейной части нагрузки Н1;  $i''_1, i''_2, i''_3$  — мгновенные значения фазных то-



ков нелинейной (выпрямительной) части нагрузки Н1;  $R_1''$ ,  $R_2''$ ,  $R_3''$ ,  $L_1''$ ,  $L_2''$ ,  $L_3''$  — фазные активные сопротивления и индуктивности линейной части нагрузки Н1.

Третья группа уравнений описывает фазные токи выпрямительной части нагрузки. Уравнения для определения тока однофазного выпрямителя нагрузки Н1 имеет следующий вид:

$$i_1'' = \begin{cases} 0; & -\frac{T}{2} + t_2^1 < t < t_1^1; \\ C_1'' \frac{du_1}{dt} + \frac{u_1}{R_1''}; & t_1^1 < t < t_2^1; \\ 0; & t_2^1 < t < t_1^1 + \frac{T}{2}, \end{cases}$$

где  $C_1''$ ,  $R_1''$  — емкость фильтра и активное сопротивление нагрузки однофазного выпрямителя;  $t_1^1$ ,  $t_2^1$  — моменты времени изменения состояния (отпирание-запирание) диодов указанного выпрямителя;  $T$  — период. При этом момент времени  $t_2^1$  определяется из условия равенства нулю тока, потребляемого выпрямителем рассматриваемой фазы:

$$C_1'' \frac{du_1}{dt} + \frac{u_1}{R_1''} = 0.$$

Момент времени  $t_1^1$  определяется из условия равенства напряжения  $u_1(t)$  и напряжения на нагрузке выпрямителя  $R_1''$ , поддерживаемого за счет запаса энергии в емкости  $C_1''$ , которая была заряжена в предыдущий полупериод:

$$u_1(t) = u_1(t_2^1) e^{-(t-t_2^1)/R_1'' C_1''}.$$

Аналогично записываются уравнения для остальных трех подсистем развернутой схемы замещения. Решив представленные дифференциальные уравнения, получим значения всех токов и напряжений моделируемой сети НН.

Таким образом, разработанная модель низковольтной сети с нелинейными нагрузками позволяет, в отличие от известных, оп-

ределить значения искажений синусоидальности кривых токов и напряжений на зажимах электроприемников, подключенных в любой точке моделируемой сети НН. Результаты расчетов позволяют оценить и сопоставить уровень высших гармоник токов и напряжений на любом предусмотренном схемой замещения элементе сети в различных вариантах ее исполнения и состава электроприемников.

### 3.2. Методология определения параметров схемы замещения сети

Для получения соответствующих количественных характеристик в целях проведения анализа несинусоидальности токов и напряжений низковольтной сети с несимметричными нелинейными электроприемниками нужно определить параметры схемы замещения конкретной сети НН. В работе [46] рассмотрены методики определения параметров сети и нагрузки для схемы замещения, показанной на рис.3.1. Известно, что на этапе проектирования сети, как правило, не учитывается несимметрия и нелинейность нагрузок. Поэтому расчет параметров схемы замещения проводится, исходя из первоначального предположения, что все элементы сети и нагрузки симметричны и линейны. При этом расчет можно разделить на два этапа.

На первом этапе определяются параметры элементов сети. При этом исходными величинами являются  $S_{тр}$ ,  $Z_T^0$ ,  $Z_K$  — мощность трансформатора и его параметры;  $U_{ном}$  — номинальное фазное напряжение сети;  $j_{эк}$  — экономическая плотность тока;  $\Delta U_{(0)}$  — располагаемые потери напряжения в основных элементах сети НН. Кроме того, исходными являются этажность здания, количество и длина внешних питающих линий (расстояние от ТП до здания); количество и длина стояков, количество помещений и длины линий групповой сети (расстояния от РЩ до электроприемников).

С учетом общепринятых подходов к проектированию предлагается методика определения параметров элементов низковольтной сети.

1. Определяются параметры внешней питающей сети с учетом известных параметров трансформатора.

1.1. Рассчитывается экономическое сечение питающей линии:

$$F_{\text{экл}} = \frac{S_{\text{тр}}}{3U_{\text{ном}} j_{\text{эк}} a},$$

где  $a$  — количество питающих линий.

1.2. Проверяется по допустимой потере напряжения и выбирается сечение фазных и нулевой жил кабельной (нулевого провода воздушной) линии.

1.3. Определяются сопротивления питающей линии:

$$R_{\text{л}} = R_{0,\text{л}} l_1 / a; \quad X_{\text{л}} = X_{0,\text{л}} l_1 / a;$$

$$R_{\text{л}}^0 = R_{0,0} l_1 / a; \quad X_{\text{л}}^0 = X_{0,0} l_1 / a,$$

где  $R_{0,\text{л}}$ ;  $X_{0,\text{л}}$ ;  $R_{0,0}$ ;  $X_{0,0}$  — погонные сопротивления фазного и нулевого проводов (жил кабеля) питающей линии (Ом/км);  $l_1$  — длина питающей линии.

1.4. Находятся продольные сопротивления внешней питающей сети:

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_{\text{к}} + R_{\text{л}}; \quad X_1 = X_2 = X_3 = X_{\text{к}} + X_{\text{л}};$$

$$L_1 = L_2 = L_3 = \frac{X_{\text{к}} + X_{\text{л}}}{\omega}; \quad \omega = 2\pi/T;$$

$$R_4 = (R_{\text{л}}^0 - R_{\text{к}} + 3R_{0,\text{л}}^0) / 3; \quad X_4 = (X_{\text{л}}^0 - X_{\text{к}} + 3X_{0,\text{л}}^0) / 3; \quad L_4 = X_4 / \omega.$$

2. Вычисляются параметры внутренней питающей линии (стояка) с учетом доли осветительной нагрузки

$$\gamma = S_{\text{осв}} / S_{\text{тр}}.$$

2.1. Рассчитывается экономическое сечение

$$F_{\text{эк.ст}} = \frac{S_{\text{осв}}}{3U_{\text{ном}} j_{\text{эк}} b},$$

где  $b$  — количество стояков.

2.2. Проверяется по допустимой потере напряжения и выбирается сечение фазных и нулевой жил кабеля и уточняется количество стояков, исходя из этажности, количества и расположения помещений здания.

2.3. Определяются сопротивления фазных и нулевой жил кабеля стояка:

$$R_5 = R_6 = R_7 = R_{0,\text{ст}} l_2; \quad X_5 = X_6 = X_7 = X_{0,\text{ст}} l_2;$$

$$L_5 = L_6 = L_7 = \frac{X_{0,\text{ст}} l_2}{\omega};$$

$$R_8 = R_{0,\text{ст}}^0 l_2; \quad X_8 = X_{0,\text{ст}}^0 l_2; \quad L_8 = X_8 / \omega,$$

где  $R_{0,\text{ст}}$ ;  $X_{0,\text{ст}}$ ;  $R_{0,\text{ст}}^0$ ;  $X_{0,\text{ст}}^0$  — погонные сопротивления фазных и нулевой жил кабеля стояков (Ом/км);  $l_2$  — длина рассматриваемого стояка.

3. Находятся параметры участков линии групповой сети с учетом традиционного ее выполнения двужильным алюминиевым проводом сечением 2,5 мм<sup>2</sup>;  $R_{0,\text{гр}} = 12,6$  Ом/км;  $X_{0,\text{гр}} = 0,1$  Ом/км:

$$R_9 = R_{10} = R_{11} = 2R_{0,\text{гр}} l_3; \quad L_9 = L_{10} = L_{11} = \frac{2X_{0,\text{гр}} l_3}{\omega};$$

$$R_{12} = R_{13} = R_{14} = 2R_{0,\text{гр}} l_4; \quad L_{12} = L_{13} = L_{14} = \frac{2X_{0,\text{гр}} l_4}{\omega},$$

где  $l_3$ ,  $l_4$  — длины соответствующих участков групповой сети.

На втором этапе расчета определяются конкретные параметры элементов нагрузки. При этом, кроме уже указанных, исходными являются  $S_{(1)} = S_{\text{осв}} / 3bc$  ( $c$  — количество этажей здания) — мощность электроприемников, подключенных к одной фазе РЩ групповой сети, а также информация о наполнении помещений здания электроприемниками, очередности и типе их подключения (непосредственно или через розетки), характеристика электроприемников (удельные параметры, единичная мощность,  $\cos \phi$  и т.д.).

Напомним, что нагрузочные блоки Н1—Н4 идентичны по своему составу, в который входят три однофазные нагрузки (одна из них показана на рис.3.2), включенные на фазные напряжения сети НН. На рисунке  $R$ ,  $L$  — фазные активное сопротивление и индуктивность линейной составляющей нагрузки;  $C$ ,  $R_{\text{выпр}}$  — емкость фильтра и активное сопротивление нагрузки од-

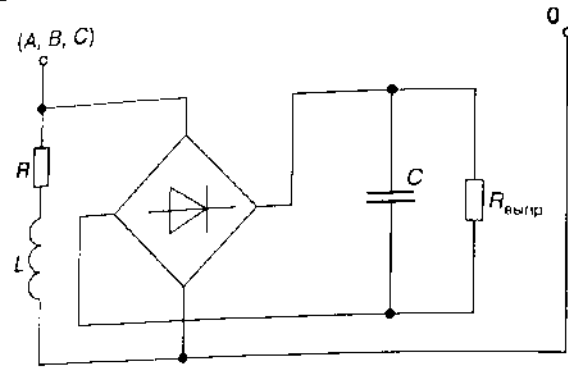


Рис. 3.2. Однофазный элемент нагрузочного блока схемы замещения

нофазного выпрямителя, который рассмотрен в качестве нелинейной составляющей нагрузки. Изменяя параметры соответствующих элементов нагрузки, можно изменять как мощность, так и соотношение линейной и нелинейной составляющих этих нагрузок.

Следует отметить, что все электроприемники жилых и общественных зданий могут быть условно разделены на две большие группы: осветительные и силовые. К силовым электроприемникам в первую очередь относятся электродвигатели и другие электроприемники лифтовых установок, а также электродвигатели вентиляторов и насосов, работающих в системах санитарно-технических и противопожарных устройств зданий. В общественных зданиях в зависимости от выполняемых технологических операций к силовым относятся электроприемники разного вида технологического (механического, электротеплового, холодильного, подъемно-транспортного и др.) оборудования. Большинство механизмов оборудовано асинхронными электродвигателями с короткозамкнутыми роторами без регулирования частоты вращения. Коэффициент мощности в силовых сетях определяется в зависимости от типа и назначения здания, вида подключаемого электрооборудования. В схеме замещения силовая нагрузка будет представляться активно-индуктивным сопротивлением, значение которого определяется значением  $\cos \varphi_{\text{сил}}$  и суммарной мощности силовых электроприемников  $S_{\text{сил}}$ .

К осветительным электроприемникам относятся собственно лампы и светильники, а также все остальные электроприемники, которые подключаются к групповой сети. При этом линейной нагрузкой будем считать осветительную нагрузку, а также на-

грузку таких электробытовых приборов, как обогреватели, кондиционеры, чайники, печи и т.д. В схеме замещения данные электроприемники будем представлять активно-индуктивными сопротивлениями, значение которых определяется суммарной мощностью соответствующих групп данных электроприемников ( $S_{\text{осв}}$  и  $S_{\text{обогр}}$ ), а также значением  $\cos \varphi_{\text{осв}}$  и  $\cos \varphi_{\text{обогр}}$ .

В качестве характерных нелинейных электроприемников рассмотрим персональные компьютеры и принтеры. При этом в схеме замещения данные электроприемники представим в виде однофазных выпрямителей (в соответствии с рис.3.2) с учетом параметров  $RC$ -цепи единичного компьютера  $C_{1к}$ ,  $R_{1\text{ выпр.к}}$  и единичного принтера  $C_{1\text{ выпр.п}}$ ,  $R_{1\text{ выпр.п}}$ .

Следует отметить, что к одной фазе РЩ групповой сети в общем случае могут подключаться электроприемники всех рассмотренных выше характерных групп. Тогда  $S_{(1)} = S_{(1)\text{осв}} + S_{(1)\text{обогр}} + S_{(1)к} + S_{(1)пр}$ , где  $S_{(1)\text{осв}}$ ,  $S_{(1)\text{обогр}}$ ,  $S_{(1)к}$ ,  $S_{(1)пр}$  — мощность подключенных к одной фазе РЩ осветительных и обогревательных приборов, компьютеров и принтеров соответственно.

При этом мощность электроприемников каждой из групп определяется как структурой здания и схемой построения электрической сети, так и техническими и финансовыми возможностями пользователей.

С учетом изложенного выше предлагается методика определения параметров элементов нагрузки.

1. Определяются параметры одной из однофазных нагрузок, входящих в состав нагрузочного блока Н4. Предполагается, что в состав указанной однофазной нагрузки входят обогревательные приборы мощностью  $S_{(1)\text{обогр}}^{\text{Н4}}$ , а также  $n_2$  компьютеров суммарной мощностью  $S_{(1)к}^{\text{Н4}}$  и  $m_2$  принтеров суммарной мощностью  $S_{(1)пр}^{\text{Н4}}$ .

1.1. Определяются параметры линейной составляющей нагрузки:

$$R^{\text{Н4}} = \frac{U_{\text{ном}}^2}{S_{(1)\text{обогр}}^{\text{Н4}}} \cos \varphi_{\text{обогр}}; \quad L^{\text{Н4}} = \frac{U_{\text{ном}}^2}{S_{(1)\text{обогр}}^{\text{Н4}} \omega} \sin \varphi_{\text{обогр}}.$$

1.2. Вычисляются параметры нелинейной составляющей нагрузки:

$$C_k^{\text{Н4}} = n_2 C_{1к}; \quad R_{\text{выпр.к}}^{\text{Н4}} = \frac{R_{1\text{ выпр.к}}}{n_2};$$

$$C_{\text{пр}}^{\text{H4}} = m_2 C_{1\text{пр}}; R_{\text{выпр.пр}}^{\text{H4}} = \frac{R_{1\text{выпр.пр}}}{m_2}.$$

Тогда

$$C^{\text{H4}} = C_{\kappa}^{\text{H4}} + C_{\text{пр}}^{\text{H4}} = n_2 C_{1\kappa} + m_2 C_{1\text{пр}};$$

$$R_{\text{выпр}}^{\text{H4}} = \frac{R_{\text{выпр.к}}^{\text{H4}} R_{\text{выпр.пр}}^{\text{H4}}}{R_{\text{выпр.к}}^{\text{H4}} + R_{\text{выпр.пр}}^{\text{H4}}} = \frac{R_{1\text{выпр.к}} R_{1\text{выпр.пр}}}{m_2 R_{1\text{выпр.к}} + n_2 R_{1\text{выпр.пр}}}.$$

2. Находятся параметры одной из однофазных нагрузок, входящих в состав нагрузочного блока НЗ. Предполагается, что в состав указанной однофазной нагрузки входят обогревательные приборы мощностью  $S_{(1)\text{обогр}}^{\text{H3}}$ , а также  $n_1$  компьютеров суммарной мощностью  $S_{(1)\kappa}^{\text{H3}}$  и  $m_1$  принтеров суммарной мощностью  $S_{(1)\text{пр}}^{\text{H3}}$ .

2.1. Вычисляются параметры линейной составляющей нагрузки:

$$R^{\text{H3}} = \frac{U_{\text{ном}}^2}{S_{(1)\text{обогр}}^{\text{H3}}} \cos \varphi_{\text{обогр}}; L^{\text{H3}} = \frac{U_{\text{ном}}^2}{S_{(1)\text{обогр}}^{\text{H3}} \omega} \sin \varphi_{\text{обогр}}.$$

2.2. Рассчитываются параметры нелинейной составляющей нагрузки:

$$C^{\text{H3}} = n_1 C_{1\kappa} + m_1 C_{1\text{пр}};$$

$$R_{\text{выпр}}^{\text{H3}} = \frac{R_{1\text{выпр.к}} R_{1\text{выпр.пр}}}{m_1 R_{1\text{выпр.к}} + n_1 R_{1\text{выпр.пр}}}.$$

3. Определяются параметры одной из однофазных нагрузок, входящих в состав нагрузочного блока Н2. Предполагается, что в состав указанной однофазной нагрузки входят осветительная нагрузка мощностью  $S_{\text{осв}}^{\text{H2}} = c S_{(1)\text{осв}}$ , обогревательные приборы мощностью  $S_{\text{обогр}}^{\text{H2}} = (c-1) S_{(1)\text{обогр}}$ , а также  $(c-1)n$  компьютеров суммарной мощностью  $S_{\kappa}^{\text{H2}} = (c-1) S_{(1)\kappa}$ ,  $(c-1)m$  принтеров суммарной мощностью  $S_{\text{пр}}^{\text{H2}} = (c-1) S_{(1)\text{пр}}$ , где  $S_{(1)\text{обогр}} = S_{(1)\text{обогр}}^{\text{H3}} + S_{(1)\text{обогр}}^{\text{H4}}$ ;  $S_{(1)\kappa} = S_{(1)\kappa}^{\text{H3}} + S_{(1)\kappa}^{\text{H4}}$ ;  $S_{(1)\text{пр}} = S_{(1)\text{пр}}^{\text{H3}} + S_{(1)\text{пр}}^{\text{H4}}$ ;  $n = n_1 + n_2$ ;  $m = m_1 + m_2$ .

3.1. Вычисляются параметры линейной составляющей нагрузки.  $R^{\text{H2}}$  и  $L^{\text{H2}}$  определяются в результате эквивалентирования параллельного соединения однофазной осветительной нагрузки с параметрами:

$$R_{\text{осв}}^{\text{H2}} = \frac{U_{\text{ном}}^2}{c S_{(1)\text{осв}}} \cos \varphi_{\text{осв}}; L_{\text{осв}}^{\text{H2}} = \frac{U_{\text{ном}}^2}{c S_{(1)\text{осв}} \omega} \sin \varphi_{\text{осв}}$$

и однофазной нагрузки обогревательных приборов с параметрами:

$$R_{\text{обогр}}^{\text{H2}} = \frac{U_{\text{ном}}^2}{(c-1) S_{(1)\text{обогр}}} \cos \varphi_{\text{обогр}}; L_{\text{обогр}}^{\text{H2}} = \frac{U_{\text{ном}}^2}{(c-1) S_{(1)\text{обогр}} \omega} \sin \varphi_{\text{обогр}}.$$

3.2. Определяются параметры нелинейной составляющей нагрузки:

$$C^{\text{H2}} = (c-1)(n C_{1\kappa} + m C_{1\text{пр}});$$

$$R_{\text{выпр}}^{\text{H2}} = \frac{R_{1\text{выпр.к}} R_{1\text{выпр.пр}}}{(c-1)(m R_{1\text{выпр.к}} + n R_{1\text{выпр.пр}})}.$$

4. Определяются параметры одной из однофазных нагрузок, входящих в состав нагрузочного блока Н1. Предполагается, что в состав указанной однофазной нагрузки входят силовая нагрузка  $S_{\text{сил}} = (1-\gamma) S_{\text{тр}}$ , осветительная нагрузка мощностью  $S_{\text{осв}}^{\text{H1}} = (b-1) c S_{(1)\text{осв}}$ , нагрузка обогревательных приборов мощностью  $S_{\text{обогр}}^{\text{H1}} = (b-1) c S_{(1)\text{обогр}}$ , а также  $(b-1)cn$  компьютеров суммарной мощностью  $S_{\kappa}^{\text{H1}} = (b-1) c S_{(1)\kappa}$  и  $(b-1)cm$  принтеров суммарной мощностью  $S_{\text{пр}}^{\text{H1}} = (b-1) c S_{(1)\text{пр}}$ .

4.1. Находятся параметры линейной составляющей нагрузки.  $R^{\text{H1}}$  и  $L^{\text{H1}}$  определяются в результате эквивалентирования параллельного соединения однофазной силовой нагрузки с параметрами:

$$R_{\text{сил}}^{\text{H1}} = \frac{U_{\text{ном}}^2}{(1-\gamma) S_{\text{тр}}} \cos \varphi_{\text{сил}}; L_{\text{сил}}^{\text{H1}} = \frac{U_{\text{ном}}^2}{(1-\gamma) S_{\text{тр}} \omega} \sin \varphi_{\text{сил}},$$

однофазной осветительной нагрузки с параметрами:

$$R_{\text{осв}}^{\text{НН}} = \frac{U_{\text{ном}}^2}{(b-1)cS_{(1)\text{осв}}} \cos \varphi_{\text{осв}}; \quad L_{\text{осв}}^{\text{НН}} = \frac{U_{\text{ном}}^2}{(b-1)cS_{(1)\text{осв}}\omega} \sin \varphi_{\text{осв}}$$

и однофазной нагрузки обогревательных приборов с параметрами:

$$R_{\text{обогр}}^{\text{НН}} = \frac{U_{\text{ном}}^2}{(b-1)cS_{(1)\text{обогр}}} \cos \varphi_{\text{обогр}}; \quad L_{\text{обогр}}^{\text{НН}} = \frac{U_{\text{ном}}^2}{(b-1)cS_{(1)\text{обогр}}\omega} \sin \varphi_{\text{обогр}}$$

4.2. Определяются параметры нелинейной составляющей нагрузки:

$$C^{\text{НН}} = (b-1)c(nC_{\text{лк}} + mC_{\text{лпр}});$$

$$R_{\text{выпр}}^{\text{НН}} = \frac{R_{\text{I выпр.к}} R_{\text{I выпр.пр}}}{(b-1)c(mR_{\text{I выпр.к}} + nR_{\text{I выпр.пр}})}.$$

Таким образом, предложенная методология позволяет определить параметры схемы замещения конкретной сети НН и подключенных к ней электроприемников (в том числе и нелинейных), основываясь на общепринятых нормах и подходах к проектированию подобных электрических сетей. С учетом полученных параметров можно провести расчет искажений несинусоидальности кривых токов и напряжений на любом предусмотренном схемой замещения элементе сети жилого или общественного здания.

### 3.3. Расчет несинусоидальности токов и напряжений в электрических сетях общественных зданий

Для расчета параметров несинусоидальности токов и напряжений, которые определяют степень влияния нелинейных электроприемников на рассматриваемую сеть НН, необходимо решить дифференциальные уравнения, полученные в параграфе 3.1. Очевидно, что усложнение схемы замещения сети привело к увеличению объема вычислений. Однако применение современных методов моделирования и средств компьютерной техники позволи-

ло максимально сократить временные затраты на проведение расчетов.

Следует отметить, что модели, рассмотренные во второй главе, были разработаны еще в 80-е годы XX века и, соответственно, ориентированы на ЭВМ того времени. В процессе разработки этих моделей исследователи сталкивались с такими проблемами, как недостаток оперативной памяти и малое быстродействие ЭВМ. Поэтому, несмотря на применение эффективных методов решения систем дифференциальных уравнений и проведение исследований в этой области, указанные модели имели весьма сложные алгоритмы [22, 44, 154, 169]. Современные средние персональные компьютеры имеют 64 и более мегабайт оперативной памяти и тактовую частоту 500 и более мегагерц, что во много раз больше, чем у самой совершенной ЕС ЭВМ. Очевидно, что математическое и программное обеспечение персональных компьютеров также получило значительное развитие. В связи с этим использование старых программ для расчета более сложных схем на персональных компьютерах представляется неэффективным.

В настоящее время мощность и программное обеспечение персональных компьютеров стали такими, что пользователю уже не нужно вынужденно становиться программистом, а можно сосредоточиться на решении собственно электротехнических задач, грамотно используя профессиональные программные пакеты. Поэтому в современных работах, посвященных моделированию и расчету электрических схем с нелинейными нагрузками [2, 25, 100, 148], уже представлены результаты, которые получены с помощью соответствующих пакетов программ. В данной работе был использован пакет моделирования, современная версия которого известна как OrCAD 9.2 [140]. Основу этого программного пакета составляет программа схемотехнического моделирования PSpice. С помощью программы PSpice было проведено моделирование режимов и расчет токов и напряжений низковольтной сети, схема замещения которой приведена на рис.3.1. При этом время расчета для одного любого варианта параметров ее элементов составляло меньше одной минуты. Для сравнения, время расчета токов и напряжений сети НН, схема замещения которой примерно в 4 раза проще, с помощью модели, рассмотренной в [44], составляло около одного часа.

Очевидно, что для проведения указанных расчетов необходимо определить количественные характеристики элементов схемы замещения анализируемой сети НН. В работе [50] представлены результаты расчета для рассматриваемого варианта схемы заме-

шения, параметры которой определены с помощью методики, предложенной в работе [46]. При расчете параметров схемы замещения сети использовались данные из справочной литературы [74, 75, 107, 151, 156]. Пусть мощность и параметры трансформатора 10/0,4 кВ такие:  $S_{тр} = 100$  кВ·А; схема соединения обмоток звезда—звезда с нулем;  $R_k = 0,032$  Ом;  $X_k = 0,065$  Ом;  $R_t^0 = 0,105$  Ом;  $X_t^0 = 0,695$  Ом; номинальное фазное напряжение сети  $U_{ном} = 220$  В. По экономической плотности тока рассчитывается, по допустимой потере напряжения проверяется и выбирается внешняя питающая кабельная линия длиной 0,1 км и сечением  $3 \times 120 + 1 \times 35$  мм<sup>2</sup>. В результате получаем суммарные (трансформатор—линия) значения сопротивлений и индуктивностей продольных элементов внешней питающей сети:

$$R_{тл} = 0,059 \text{ Ом}; \quad L_{тл} = 226,1 \text{ мкГн};$$

$$R_{тл}^0 = 0,116 \text{ Ом}; \quad L_{тл}^0 = 687,8 \text{ мкГн}.$$

Пусть мощность осветительной нагрузки  $S_{осв} = 50$  кВ·А (т. е. доля осветительной нагрузки  $\gamma = 0,5$ ). Предположим, что рассматривается вариант 4-этажного здания с одним осветительным стояком. Тогда по экономической плотности тока рассчитывается, по допустимой потере напряжения проверяется и выбирается кабель стояка сечением  $3 \times 50 + 1 \times 16$  мм<sup>2</sup>. В результате с учетом длин этажных участков стояка получаем значения сопротивлений и индуктивностей фазных и нулевой жил кабеля внутренней питающей линии (стояка) от ГРЩ к рассматриваемому РЩ осветительной сети здания:

$$R_{ст} = 0,0256 \text{ Ом}; \quad L_{ст} = 7,643 \text{ мкГн};$$

$$R_{ст}^0 = 0,0792 \text{ Ом}; \quad L_{ст}^0 = 7,643 \text{ мкГн}.$$

Наконец, суммарные (соответствующая фаза—нуль) сопротивления отдельных участков линий от РЩ к конкретным электроприемникам (групповая сеть) определяются, исходя из длины этих участков и традиционного исполнения проводки алюминиевым проводом сечением 2,5 мм<sup>2</sup>. В результате искомые значения сопротивлений и индуктивностей для двух рассматриваемых участков линии будут следующими:

$$R_{гр} = 0,882 \text{ Ом}; \quad L_{гр} = 22,294 \text{ мкГн};$$

$$R_{гр} = 0,252 \text{ Ом}; \quad L_{гр} = 6,37 \text{ мкГн}.$$

При определении параметров элементов нагрузки рассматриваем следующие характерные группы электроприемников общественного здания.

**Осветительные приборы.** Предположим, что освещение помещений, коридоров, лестничных клеток и т. д. осуществляется люминесцентными лампами типа ЛБ-40 или ЛДЦ-40, мощность потребления которых составляет 40 Вт, а  $\cos \varphi = 0,8$ —0,9 при наличии компенсирующего конденсатора. С определенной погрешностью (см. первую главу) будем считать данную нагрузку линейной, поэтому в схеме замещения ее можно представлять линейными активно-индуктивными сопротивлениями, значение которых определяется суммарной мощностью рассматриваемых групп ламп и  $\cos \varphi_{осв} = 0,85$ .

**Электробытовые приборы** (обогреватели, чайники, кофеварки, печи и т. д.) единичной мощностью 500 Вт и выше. Данные электроприемники (назовем их обогревательные приборы), как и люминесцентные лампы можно считать линейной нагрузкой, коэффициент мощности которой примем  $\cos \varphi_{обогр} = 0,98$ . В соответствии со значением  $\cos \varphi_{обогр}$  и суммарной мощностью соответствующих групп обогревательных приборов определяется значение эквивалентных активно-индуктивных сопротивлений, которыми они будут представлены в схеме замещения.

В качестве характерных нелинейных электроприемников будем рассматривать персональные компьютеры и принтеры.

**Персональные компьютеры.** Мощность потребления компьютерного системного блока АТХ-формата (при осуществлении записи с лазерного диска) составляет около 100 Вт, а мощность потребления монитора с диагональю экрана 15 или 17 дюймов (как и соответствующего современного телевизора с импульсным источником питания) — 80—90 Вт. Емкость конденсатора фильтра источника питания системного блока, как правило, составляет 165 мкФ, а аналогичная емкость конденсатора в мониторе — 220 мкФ. Так как системный блок и монитор подключаются к сети электропитания параллельно, то эквивалентные параметры схемы замещения единичного персонального компьютера (в соответствии с рис. 3.2)  $C_{1к} = 385$  мкФ;  $R_{1к\text{выпр.к}} = 500$  Ом, что примерно соответствует его мощности  $P_{1к} = 185$  Вт при  $\cos \varphi_k =$

$= 0,98$  ( $\varphi_k$  — угол сдвига между первыми гармониками потребляемого компьютером тока и напряжения).

**Принтеры.** Мощность потребления лазерного принтера типа HP 5L или 6L составляет 250—350 Вт, емкость конденсатора фильтра его источника питания — 100 мкФ. Принимаем следующие эквивалентные параметры схемы замещения единичного принтера:  $C_{1пр} = 100$  мкФ;  $R_{1выпр.пр} = 250$  Ом, что примерно соответствует мощности  $P_{1пр} = 300$  Вт при  $\cos\varphi_{пр} = 0,9$  ( $\varphi_{пр}$  — угол сдвига между первыми гармониками потребляемого принтером тока и напряжения).

Определяем мощность электроприемников, подключенных к одной фазе РЩ групповой сети при 100 % загрузке трансформатора,  $S_{(1)} = 4166,7$  В·А. Рассмотрим вариант, при котором упомянутые электроприемники расположены в двух соседних комнатах и прилегающей к ним части коридора. При этом к одной фазе РЩ подключена осветительная нагрузка мощностью  $S_{(1)осв} = 1868,2$  В·А, а через розетки — два обогревательных прибора суммарной мощностью  $S_{(1)обогр} = 1400,2$  В·А, а также три компьютера и один принтер суммарной мощностью  $S_{(1)к.пр} = 898,3$  В·А.

Находим параметры элементов нагрузки, а именно, однофазных нагрузок, входящих в состав нагрузочных блоков Н1, Н2, Н3, Н4 (нумерация нагрузочных блоков в соответствии с рис.3.1). В состав однофазной нагрузки нагрузочного блока Н4 входит нагрузка одного обогревательного прибора и одного компьютера, подключенных к розеткам дальней по отношению к РЩ комнаты. Тогда параметры схемы замещения однофазной нагрузки нагрузочного блока Н4 такие:

$$R^{H4} = 67,76 \text{ Ом}; L^{H4} = 43,82 \text{ мГн}; C^{H4} = 385 \text{ мкФ}; R_{выпр}^{H4} = 500 \text{ Ом}.$$

В состав однофазной нагрузки нагрузочного блока Н3 входит нагрузка одного обогревательного прибора, двух компьютеров и одного принтера, подключенных к розеткам ближней по отношению к РЩ комнаты. Тогда параметры схемы замещения однофазной нагрузки нагрузочного блока Н3 такие:

$$R^{H3} = 67,76 \text{ Ом}; L^{H3} = 43,82 \text{ мГн}; C^{H3} = 385 \text{ мкФ}; R_{выпр}^{H3} = 125 \text{ Ом}.$$

В состав однофазной нагрузки нагрузочного блока Н2 входит осветительная нагрузка одной фазы всего стояка (в рассматриваемом варианте — всего здания) мощностью  $S_{осв}^{H2} = 7472,8$  В·А, а

также нагрузка шести обогревательных приборов суммарной мощностью  $S_{обогр}^{H2} = 4200,6$  В·А, девяти компьютеров и трех принтеров суммарной мощностью  $S_{к.пр}^{H2} = 2694,8$  В·А. Тогда параметры схемы замещения однофазной нагрузки нагрузочного блока Н2 имеют вид

$$R^{H2} = 3,828 \text{ Ом}; L^{H2} = 5,559 \text{ мГн};$$

$$C^{H2} = 3765 \text{ мкФ}; R_{выпр}^{H2} = 33,333 \text{ Ом}.$$

В состав трехфазного нагрузочного блока Н1 входит только силовая нагрузка здания (т.к. рассматриваемый расчетный вариант предполагает наличие одного осветительного стояка) мощностью  $S_{сил} = 50$  кВ·А. Как было отмечено выше, к силовым электроприемникам относятся электродвигатели и другие электроприемники лифтовых установок, вентиляторов и насосов, а также электроприемники разного вида технологического оборудования. При этом большинство механизмов оборудовано асинхронными электродвигателями с короткозамкнутыми роторами без регулирования частоты. Поэтому в схеме замещения силовую нагрузку представим активно-индуктивными сопротивлениями, значение которых определяется суммарной мощностью силовых электроприемников и их коэффициентом мощности. Коэффициент мощности в силовых сетях определяется типом и назначением здания, видом подключаемого электрооборудования. Например, для учреждений управления, финансирования, проектных, конструкторских и научных организаций в силовых сетях принимается  $\cos\varphi_{сил} = 0,85$  [37]. Тогда параметры схемы замещения однофазной нагрузки нагрузочного блока Н1 такие:

$$R^{H1} = 2,468 \text{ Ом}; L^{H1} = 4,874 \text{ мГн}.$$

При этом для рассматриваемого варианта схемы замещения можно рассчитать долю нелинейной составляющей нагрузки,  $\alpha = P_{нл}/P_{\Sigma}$  ( $P_{нл}$  — активная мощность нелинейной составляющей нагрузки,  $P_{\Sigma}$  — суммарная активная мощность нагрузки) в разных нагрузочных узлах данной сети. В результате получаем долю нелинейной нагрузки рассматриваемых линии групповой сети  $\alpha_3 = 0,384$  и стояка  $\alpha_2 = 0,224$ , а также всей сети здания  $\alpha_1 = 0,116$ . Очевидно, что  $\alpha_2 < \alpha_3$  за счет учета в суммарной активной мощности на-

грузки стояка составляющей осветительной нагрузки здания, а  $\alpha_1 < \alpha_2$  за счет учета в суммарной активной мощности всей сети составляющей силовой нагрузки здания.

Напомним, что для получения количественных характеристик несинусоидальности потребляемого тока и напряжения на зажимах конкретного электроприемника, подключенного в определенной точке электрической сети здания, рассчитываются соответствующие коэффициенты  $n$ -й гармонической составляющей тока (напряжения)  $K_{I(n)} = I_{(n)}/I_{(1)}$  ( $K_{U(n)} = U_{(n)}/U_{(1)}$ ) и коэффициенты искажения синусоидальности кривой тока (напряжения)

$$K_I = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_{(n)}^2 / I_{(1)}^2} \quad (K_U = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_{(n)}^2 / U_{(1)}^2}), \text{ где } I_{(1)}, I_{(n)}, U_{(1)}, U_{(n)} — \text{дей-}$$

ствующие значения составляющих основной частоты и  $n$ -х гармонических составляющих тока и напряжения соответственно.

В результате расчета получаем, в частности, значения коэффициента искажения синусоидальности кривой фазного тока участка линии питания розеток дальней по отношению к РЩ комнаты  $K_d = 22,11\%$ , участка линии питания розеток обеих комнат  $K_n = 29,54\%$ , этажного участка стояка  $K_{12} = 17,87\%$  и внешней питающей линии (всей сети)  $K_l = 7,29\%$ . Следует отметить, что  $K_n > K_d$ , в основном, за счет того, что доля нелинейной нагрузки розеток обеих комнат (три компьютера и один принтер при двух обогревательных приборах) больше доли нелинейной нагрузки дальних розеток (один компьютер при одном обогревательном приборе). Очевидно, что по мере приближения к источнику питания абсолютные значения высших гармоник тока увеличиваются, а  $K_I$  уменьшается, так как амплитудные значения первой гармоники тока в соответствующих элементах сети возрастают быстрее:

$$I_{m(1)} = 5,3 \text{ А}; I_{m(13)} = 13,67 \text{ А}; I_{m(12)} = 102,4 \text{ А}; I_{m(11)} = 207,7 \text{ А}.$$

На рис.3.3 показаны спектральные характеристики токов внешней питающей линии и участка линии питания дальних розеток. При этом на рисунке приведены доминирующие (определяющие значение  $K_I$ ), а именно, третья, пятая, седьмая, в меньшей степени девятая, одиннадцатая, тринадцатая гармоники. Очевидно, что можно построить спектральную характеристику любого тока, с помощью которой можно оценить и сопоставить уровень, а также определить закономерности изменения высших гармоник токов в разных элементах анализируемой сети НН. В

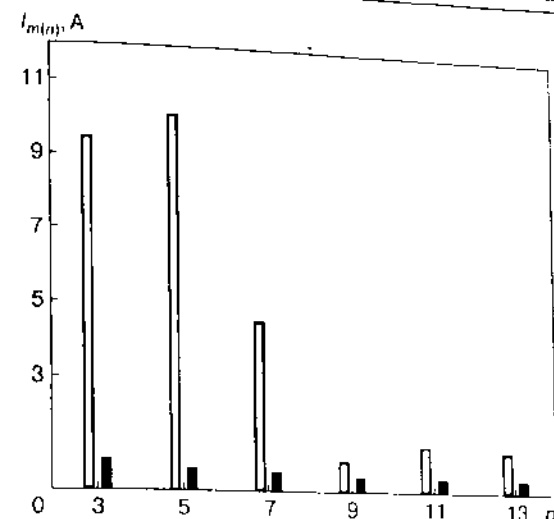


Рис.3.3. Спектральные характеристики токов внешней питающей линии ( $K_I = 7,29\%$ ) и участка линии питания дальних розеток ( $K_I = 22,11\%$ ):

□ —  $K_I = 7,29\%$ ;  $I_{m(1)} = 207,7 \text{ А}$ ; ■ —  $K_I = 22,11\%$ ;  $I_{m(1)} = 5,3 \text{ А}$

то же время, с учетом полученных результатов можно сделать вывод, что провести анализ и оценить степень влияния нелинейной нагрузки на сеть, сравнивая только значение  $K_I$  элементов сети, не представляется возможным.

Следует отметить, что токи гармоник, кратных трем, определяют ток в нулевом проводе. В рассматриваемом расчетном варианте сети НН ток в нейтрали трансформатора и нулевом проводе внешней питающей линии достигает 15 % фазного тока внешней питающей сети, а ток в нулевой жиле кабеля стояка превышает 40 % фазного тока кабеля стояка.

Для определения степени влияния нелинейных электроприемников на сеть с учетом конкретных параметров ее элементов находим значения  $K_U$  в некоторых характерных нагрузочных узлах. В результате расчета, в частности, получаем значения коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения на фидере  $K_{U1} = 7,38\%$ , на РЩ групповой сети  $K_{U2} = 7,96\%$ , в розетках ближней комнаты  $K_{U3} = 8,60\%$ , в розетках дальней комнаты  $K_{U4} = 8,62\%$ . Таким образом, в рассматриваемом варианте сети НН с нелинейными нагрузками  $K_U$  в разных ее точках колеблется около и даже превышает 8 %, что соответствует нормальному значению согласно ГОСТ 13109–97 [27]. Из приведенных результатов видно, что основной вклад (более 85 %) в



грузки стояка составляющей осветительной нагрузки здания, а  $\alpha_1 < \alpha_2$  за счет учета в суммарной активной мощности всей сети составляющей силовой нагрузки здания.

Напомним, что для получения количественных характеристик несинусоидальности потребляемого тока и напряжения на зажимах конкретного электроприемника, подключенного в определенной точке электрической сети здания, рассчитываются соответствующие коэффициенты  $n$ -й гармонической составляющей тока (напряжения)  $K_{In(n)} = I_{n(n)} / I_{(1)}$  ( $K_{Un(n)} = U_{n(n)} / U_{(1)}$ ) и коэффициенты искажения синусоидальности кривой тока (напряжения)

$$K_I = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_{n(n)}^2} / I_{(1)} \quad (K_U = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_{n(n)}^2} / U_{(1)}), \text{ где } I_{(1)}, I_{n(n)}, U_{(1)}, U_{n(n)} — дей-$$

ствующие значения составляющих основной частоты и  $n$ -х гармонических составляющих тока и напряжения соответственно.

В результате расчета получаем, в частности, значения коэффициента искажения синусоидальности кривой фазного тока участка линии питания розеток дальней по отношению к РЩ комнаты  $K_d = 22,11\%$ , участка линии питания розеток обеих комнат  $K_D = 29,54\%$ , этажного участка стояка  $K_{f2} = 17,87\%$  и внешней питающей линии (всей сети)  $K_L = 7,29\%$ . Следует отметить, что  $K_D > K_d$ , в основном, за счет того, что доля нелинейной нагрузки розеток обеих комнат (три компьютера и один принтер при двух обогревательных приборах) больше доли нелинейной нагрузки дальних розеток (один компьютер при одном обогревательном приборе). Очевидно, что по мере приближения к источнику питания абсолютные значения высших гармоник тока увеличиваются, а  $K_I$  уменьшается, так как амплитудные значения первой гармоники тока в соответствующих элементах сети возрастают быстрее:

$$I_{m(1)} = 5,3 \text{ А}; I_{m(11)} = 13,67 \text{ А}; I_{m(12)} = 102,4 \text{ А}; I_{m(13)} = 207,7 \text{ А}.$$

На рис.3.3 показаны спектральные характеристики токов внешней питающей линии и участка линии питания дальних розеток. При этом на рисунке приведены доминирующие (определяющие значение  $K_I$ ), а именно, третья, пятая, седьмая, в меньшей степени девятая, одиннадцатая, тринадцатая гармоники. Очевидно, что можно построить спектральную характеристику любого тока, с помощью которой можно оценить и сопоставить уровень, а также определить закономерности изменения высших гармоник токов в разных элементах анализируемой сети НН. В

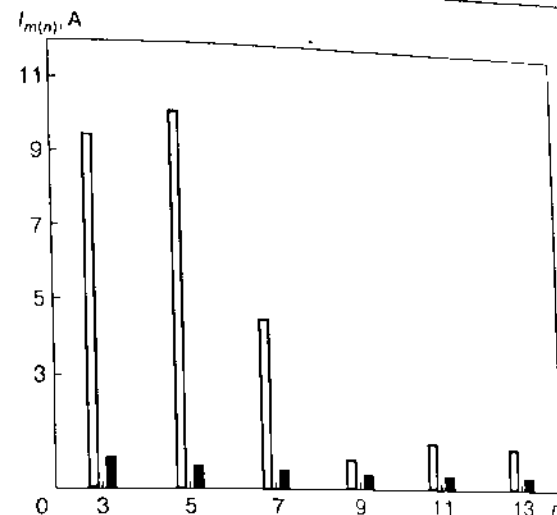


Рис.3.3. Спектральные характеристики токов внешней питающей линии ( $K_I = 7,29\%$ ) и участка линии питания дальних розеток ( $K_I = 22,11\%$ ):

□ —  $K_I = 7,29\%$ ;  $I_{m(1)} = 207,7 \text{ А}$ ; ■ —  $K_I = 22,11\%$ ;  $I_{m(1)} = 5,3 \text{ А}$

то же время, с учетом полученных результатов можно сделать вывод, что провести анализ и оценить степень влияния нелинейной нагрузки на сеть, сравнивая только значение  $K_I$  элементов сети, не представляется возможным.

Следует отметить, что токи гармоник, кратных трем, определяют ток в нулевом проводе. В рассматриваемом расчетном варианте сети НН ток в нейтрали трансформатора и нулевом проводе внешней питающей линии достигает 15 % фазного тока внешней питающей сети, а ток в нулевой жиле кабеля стояка превышает 40 % фазного тока кабеля стояка.

Для определения степени влияния нелинейных электроприемников на сеть с учетом конкретных параметров ее элементов находим значения  $K_U$  в некоторых характерных нагрузочных коэффициентах. В результате расчета, в частности, получаем значения коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения на ГРЩ  $K_{U1} = 7,38\%$ , на РЩ групповой сети  $K_{U2} = 7,96\%$ , в розетках ближней комнаты  $K_{U3} = 8,60\%$ , в розетках дальней комнаты  $K_{U4} = 8,62\%$ . Таким образом, в рассматриваемом варианте сети НН с нелинейными нагрузками  $K_U$  в разных ее точках колеблется около и даже превышает 8 %, что соответствует нормальному допустимому значению согласно ГОСТ 13109–97 [27]. Из приведенных результатов видно, что основной вклад (более 85 %) в

несинусоидальность напряжения на зажимах электроприемников, подключенных через розетки к электрической сети здания, вносит составляющая несинусоидальности напряжения на вводе в здание (на ГРЩ). Это можно объяснить, в частности, большими значениями эквивалентных (фаза—нуль) сопротивлений продольных элементов внешней питающей сети (в первую очередь за счет индуктивного сопротивления трансформатора), например, по сравнению с аналогичными сопротивлениями стояка. В результате падение напряжения от токов высших гармоник на элементах внешней питающей сети  $\Delta U_{эл(n)}$  больше, чем на порядок превышает аналогичное падение напряжения на стояке  $\Delta U_{ст(n)}$ , несмотря на то, что  $I_{(n)}$  стояка больше, чем  $I_{(n)}$  внешней питающей линии. При этом падение напряжения от токов высших гармоник на линии групповой сети  $\Delta U_{гр(n)}$  примерно равно  $\Delta U_{ст(n)}$  за счет больших значений  $R_{гр}$  и  $R_{нр}$  (в соответствии со значением погонных сопротивлений алюминиевого провода сечением  $2,5 \text{ мм}^2$ ), хотя  $I_{(n)}$  участков линии групповой сети в несколько раз меньше  $I_{(n)}$  стояка.

На рис.3.4 показаны спектральные характеристики напряжений на ГРЩ и в розетках дальней комнаты. При этом на рисунке приведены, как и для токов, доминирующие (определяющие значение  $K_U$ ), а именно, третья, пятая, седьмая, девятая, одиннадцатая, тринадцатая гармоники. Из рисунка видно, что несинусоидальность напряжения в нагрузочных узлах рассматриваемой сети НН определяется значением суммарного напряжения гармоник, кратных трем  $U_{(3k)}$  (в первую очередь третьей). Проведенный анализ показал, что интегральный коэффициент напряжения гармоник, кратных трем,  $K_{U(3k)}$  составляет более 95 % соответствующего  $K_U$  на зажимах электроприемников, подключенных в любой точке электрической сети здания. Это вызвано относительно большим значением сопротивлений нулевой последовательности определяющих (как было отмечено выше) несинусоидальность напряжения элементов сети НН, а именно, трансформатора 10/0,4 кВ с традиционной схемой соединения обмоток звезда—звезда с нулем, а также внешней питающей линии и стояка, выполненных трехфазными с нулевым проводом. В результате  $K_{U(3)}$  в рассматриваемых нагрузочных узлах изменяется от 6,9 до 8,2 %, что существенно превышает 5 %, а  $K_{U(9)}$  в некоторых точках незначительно превышает 1,5 %. Как известно, данные значения  $K_{U(n)}$  являются нормально допустимыми согласно ГОСТ 13109—97.

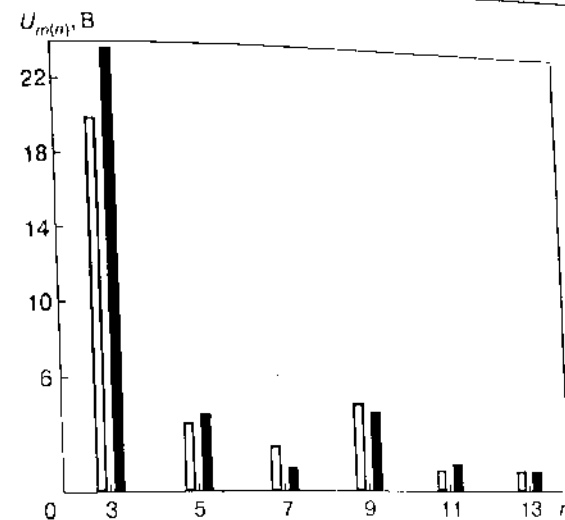


Рис.3.4. Спектральные характеристики напряжений на ГРЩ ( $K_U = 7,38 \%$ ) и в розетках дальней комнаты ( $K_U = 8,62 \%$ ):

□ —  $K_U = 7,38 \%$ ;  $U_{m(1)} = 309,1 \text{ В}$ ; ■ —  $K_U = 8,62 \%$ ;  $U_{m(1)} = 293,4 \text{ В}$

Очевидно, что полученные значения  $K_U$ ,  $K_{U(n)}$  позволяют однозначно оценить степень влияния нелинейных электроприемников на сеть с учетом особенностей выполнения низковольтной сети, параметров рассматриваемых электроприемников, а также места их подключения.

### 3.4. Анализ несинусоидальности напряжений с помощью схем замещения с источниками токов высших гармоник

Во второй главе определена принципиальная возможность и основные правила использования традиционных моделей для расчета напряжений высших гармоник в сетях НН. При этом в схемах замещения значение токов высших гармоник необходимо приводить в соответствие с конкретной сетью НН с учетом результатов расчета соответствующего режима с помощью точной модели. На рис. 3.5 показана однолинейная схема замещения сети с источником тока  $n$ -й гармоники. Здесь  $I_{(n)}$ ,  $U_{(n)}$ ,  $Z_{(n)}$  — фазные ток, напряжение и эквивалентное сопротивление сети для  $n$ -й гармоники, причем

несинусоидальность напряжения на зажимах электроприемников, подключенных через розетки к электрической сети здания, вносит составляющая несинусоидальности напряжения на вводе в здание (на ГРЩ). Это можно объяснить, в частности, большими значениями эквивалентных (фаза—нуль) сопротивлений продольных элементов внешней питающей сети (в первую очередь за счет индуктивного сопротивления трансформатора), например, по сравнению с аналогичными сопротивлениями стояка. В результате падение напряжения от токов высших гармоник на элементах внешней питающей сети  $\Delta U_{\text{л}(n)}$  более, чем на порядок превышает аналогичное падение напряжения на стояке  $\Delta U_{\text{ст}(n)}$ , несмотря на то, что  $I_{(n)}$  стояка больше, чем  $I_{(n)}$  внешней питающей линии. При этом падение напряжения от токов высших гармоник на линии групповой сети  $\Delta U_{\text{гр}(n)}$  примерно равно  $\Delta U_{\text{ст}(n)}$  за счет больших значений  $R_{\text{гр}}$  и  $R_{\text{лр}}$  (в соответствии со значением погонных сопротивлений алюминиевого провода сечением  $2,5 \text{ мм}^2$ ), хотя  $I_{(n)}$  участков линии групповой сети в несколько раз меньше  $I_{(n)}$  стояка.

На рис. 3.4 показаны спектральные характеристики напряжений на ГРЩ и в розетках дальней комнаты. При этом на рисунке приведены, как и для токов, доминирующие (определяющие значение  $K_U$ ), а именно, третья, пятая, седьмая, девятая, одиннадцатая, тринадцатая гармоники. Из рисунка видно, что несинусоидальность напряжения в нагрузочных узлах рассматриваемой сети НН определяется значением суммарного напряжения гармоник, кратных трем  $U_{(3k)}$ , (в первую очередь третьей). Проведенный анализ показал, что интегральный коэффициент напряжения гармоник, кратных трем,  $K_{U(3k)}$  составляет более 95 % соответствующего  $K_U$  на зажимах электроприемников, подключенных в любой точке электрической сети здания. Это вызвано относительно большим значением сопротивлений нулевой последовательности определяющих (как было отмечено выше) несинусоидальность напряжения элементов сети НН, а именно, трансформатора 10/0,4 кВ с традиционной схемой соединения обмоток звезда—звезда с нулем, а также внешней питающей линии и стояка, выполненных трехфазными с нулевым проводом. В результате  $K_{U(3)}$  в рассматриваемых нагрузочных узлах изменяется от 6,9 до 8,2 %, что существенно превышает 5 %, а  $K_{U(9)}$  в некоторых точках незначительно превышает 1,5 %. Как известно, данные значения  $K_{U(n)}$  являются нормально допустимыми согласно ГОСТ 13109—97.

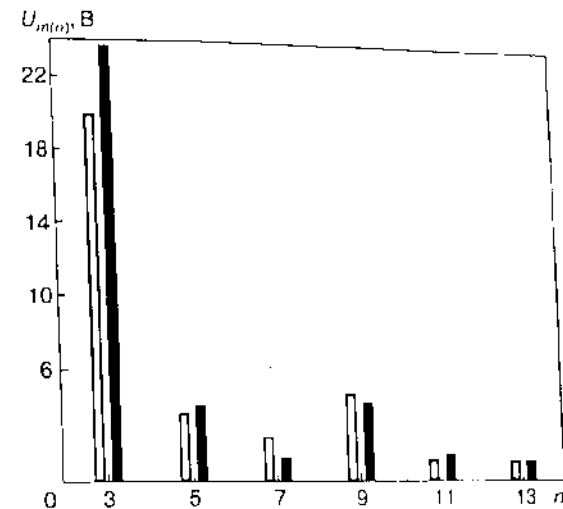


Рис. 3.4. Спектральные характеристики напряжений на ГРЩ ( $K_U = 7,38 \%$ ) и в розетках дальней комнаты ( $K_U = 8,62 \%$ ):

□ —  $K_U = 7,38 \%$ ;  $U_{m(1)} = 309,1 \text{ В}$ ; ■ —  $K_U = 8,62 \%$ ;  $U_{m(1)} = 293,4 \text{ В}$

Очевидно, что полученные значения  $K_U$ ,  $K_{U(n)}$  позволяют однозначно оценить степень влияния нелинейных электроприемников на сеть с учетом особенностей выполнения низковольтной сети, параметров рассматриваемых электроприемников, а также места их подключения.

### 3.4. Анализ несинусоидальности напряжений с помощью схем замещения с источниками токов высших гармоник

Во второй главе определена принципиальная возможность и основные правила использования традиционных моделей для расчета напряжений высших гармоник в сетях НН. При этом в схемах замещения значение токов высших гармоник необходимо приводить в соответствие с конкретной сетью НН с учетом результатов расчета соответствующего режима с помощью точной модели. На рис. 3.5 показана однолинейная схема замещения сети с источником тока  $i$ -й гармоники. Здесь  $I_{(n)}$ ,  $U_{(n)}$ ,  $Z_{(n)}$  — фазные ток, напряжение и эквивалентное сопротивление сети для  $i$ -й гармоники, причем

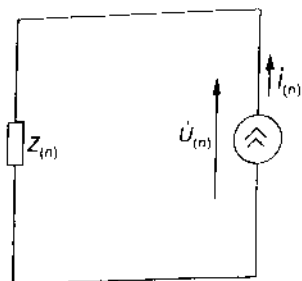


Рис. 3.5. Схема замещения сети с источником тока  $n$ -й гармоники

$$\dot{U}_{(n)} = -\dot{I}_{(n)} Z_{(n)}.$$

Известно, что в случае низковольтной сети, которая выполняется трехфазной четырехпроводной, путь протекания токов гармоник, кратных трем, отличается от пути протекания токов остальных гармоник. Поэтому эквивалентное сопротивление сети для  $n$ -й гармоники будет определяться по-разному: в первом случае, с учетом сопротивлений нулевой, а во втором — прямой последовательности элементов сети НН.

Напомним, что в параграфе 2.4, в частности, предложен метод, с помощью которого, не конкретизируя нелинейную нагрузку, можно проводить общий анализ зависимостей значений высших гармоник тока и напряжения в конкретной низковольтной сети с определенными параметрами. Полученные при этом результаты можно использовать как в учебном процессе, так и при разработке соответствующих инженерных методик.

Рассмотрим возможность использования традиционных моделей, в которых нелинейные нагрузки задаются источниками токов высших гармоник, для проведения анализа несинусоидальности токов и напряжений сетей НН с учетом конкретных параметров основных элементов электрической сети и соответствующих электроприемников жилого или общественного здания.

Очевидно, что при указанном усовершенствовании расчетной модели сети схемы замещения с источниками токов высших гармоник несколько усложнятся и приобретут вид, показанный на рис. 3.6. Здесь  $\dot{I}_{1(n)}, \dot{I}_{2(n)}, \dot{I}_{3(n)}$  — фазные токи  $n$ -й гармоники силовой нагрузки здания и нагрузки всех осветительных стояков, кроме одного, нагрузки одного осветительного стояка, кроме нагрузки одной линии групповой сети и нагрузки одной линии групповой сети соответственно;  $\dot{U}_{1(n)}, \dot{U}_{2(n)}, \dot{U}_{3(n)}$  — фазные напряжения  $n$ -й гармоники на главном распределительном щите (ГРЩ) здания, на распределительном щитке (РЩ) осветительной сети и на зажимах рассматриваемой группы электроприемников соответственно;  $Z_{1(n)}, Z_{2(n)}, Z_{3(n)}$  — эквивалентное сопро-

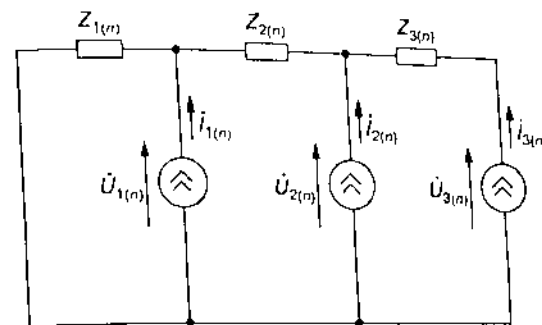


Рис. 3.6. Развернутая схема замещения сети с источниками токов  $n$ -й гармоники

тивление для  $n$ -й гармоники внешней питающей сети (трансформатор—линия), соответствующих участков стояка и линии групповой сети соответственно.

В работе [36] проведен анализ несинусоидальности токов и напряжений в сетях НН с использованием представленной схемы замещения, в которой учитываются конкретные параметры основных элементов сети. При этом следует отметить, что рассмотренная схема замещения для простоты и наглядности приведена в однофазном варианте при принятых допущениях о симметричности элементов сети и нагрузки. Кроме того, следует учитывать, что фазное эквивалентное сопротивление для  $n$ -й гармоники четырехпроводных элементов трехфазной сети (внешняя питающая сеть и стояки) определяется по-разному для гармоник, кратных и не кратных трем, а для двухпроводных (групповая сеть) — единообразно для всех гармоник, только с учетом их номера.

Развернутую схему замещения, представленную на рис. 3.6, можно описать системой уравнений, составленных на основании второго закона Кирхгофа:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{1(n)} &= -[\dot{I}_{1(n)} + \dot{I}_{2(n)} + \dot{I}_{3(n)}] Z_{1(n)}; \\ \dot{U}_{2(n)} &= -[\dot{I}_{1(n)} + \dot{I}_{2(n)} + \dot{I}_{3(n)}] Z_{1(n)} - [\dot{I}_{2(n)} + \dot{I}_{3(n)}] Z_{2(n)}; \\ \dot{U}_{3(n)} &= -[\dot{I}_{1(n)} + \dot{I}_{2(n)} + \dot{I}_{3(n)}] Z_{1(n)} - [\dot{I}_{2(n)} + \dot{I}_{3(n)}] Z_{2(n)} - \dot{I}_{3(n)} Z_{3(n)}. \end{aligned} \quad (3.1)$$

Перегруппировав члены, входящие в правые части второго и третьего уравнений системы (3.1), получим

$$\dot{U}_{1(n)} = -[\dot{I}_{1(n)} + \dot{I}_{2(n)} + \dot{I}_{3(n)}] Z_{1(n)};$$

$$\dot{U}_{2(n)} = -\dot{I}_{1(n)} Z_{1(n)} - [\dot{I}_{2(n)} + \dot{I}_{3(n)}] [Z_{1(n)} + Z_{2(n)}];$$

$$\dot{U}_{3(n)} = -\dot{I}_{1(n)} Z_{1(n)} - \dot{I}_{2(n)} [Z_{1(n)} + Z_{2(n)}] - \dot{I}_{3(n)} [Z_{1(n)} + Z_{2(n)} + Z_{3(n)}].$$

Анализ представленных выражений позволяет определить механизм и составляющие формирования искажений синусоидальности кривых напряжений в любом нагрузочном узле электрической сети с учетом предусмотренных ее схемой замещения элементов. Из первого выражения видно, что искажение синусоидальности кривой напряжения на ГРЩ определяется падениями напряжения от токов высших гармоник всех нелинейных электроприемников здания на продольном сопротивлении внешней питающей сети. Из второго выражения следует, что искажение синусоидальности кривой напряжения на РЩ определяется падениями напряжения от токов высших гармоник всех нелинейных электроприемников здания, кроме рассматриваемого стояка на продольном сопротивлении внешней питающей сети и падениями напряжения от токов высших гармоник нелинейных электроприемников рассматриваемого стояка на суммарном продольном сопротивлении внешней питающей сети и соответствующего участка стояка. Из третьего выражения видно, что искажение синусоидальности кривой напряжения на зажимах группы электроприемников определяется падениями напряжения от токов высших гармоник всех нелинейных электроприемников здания, кроме рассматриваемого стояка на продольном сопротивлении внешней питающей сети, падениями напряжения от токов высших гармоник всех нелинейных электроприемников рассматриваемого стояка, кроме данной группы на суммарном продольном сопротивлении внешней питающей сети и соответствующего участка стояка, а также падениями напряжения от токов высших гармоник рассматриваемой группы электроприемников на суммарном продольном сопротивлении внешней питающей сети и соответствующих участков стояка и линии групповой сети.

Обобщив сказанное, можно сформулировать основные положения и описать механизм формирования искажения синусоидальности кривых напряжений на зажимах любого электроприемника.

1. Искажение синусоидальности кривой напряжения на зажимах любого электроприемника состоит из собственного и приобретенного искажений.

2. Собственное искажение синусоидальности кривой напряжения определяется падением напряжения от суммы токов высших гармоник рассматриваемого и всех включенных после него (если таковые имеются) электроприемников на суммарном продольном сопротивлении всех элементов сети от источника питания до данного электроприемника.

3. Приобретенное искажение синусоидальности кривой напряжения определяется суммой падений напряжения от токов высших гармоник всех электроприемников, включенных перед рассматриваемым (если таковые имеются), на соответствующих продольных сопротивлениях участков сети от источника питания до каждого из этих электроприемников.

Следует отметить, что полученные выводы носят в основном теоретический характер. В связи с этим рассмотрим с точки зрения получения практических результатов еще одно из возможных направлений проведения анализа несинусоидальности напряжений с помощью традиционных схем замещения с источниками токов высших гармоник. Для этого запишем уравнения системы (3.1) в более компактной форме:

$$\dot{U}_{1(n)} = -[\dot{I}_{1(n)} + \dot{I}_{2(n)} + \dot{I}_{3(n)}] Z_{1(n)};$$

$$\dot{U}_{2(n)} = \dot{U}_{1(n)} - [\dot{I}_{2(n)} + \dot{I}_{3(n)}] Z_{2(n)};$$

$$\dot{U}_{3(n)} = \dot{U}_{2(n)} - \dot{I}_{3(n)} Z_{3(n)}.$$

Данная запись позволяет несколько иначе описать механизм формирования несинусоидальности напряжений в характерных нагрузочных узлах сети. Из первого выражения (как и в предыдущем случае) видно, что искажение синусоидальности кривой напряжения на ГРЩ определяется исключительно падениями напряжения от токов высших гармоник нелинейных электроприемников всего здания на продольном сопротивлении внешней питающей сети. Из второго выражения на РЩ определяется искажение синусоидальности кривой напряжения на ГРЩ и искажением синусоидальности кривой напряжения на ГРЩ и падением напряжения от токов высших гармоник нелинейных электроприемников рассматриваемого стояка на продольном сопротивлении соответствующего участка стояка. Из третьего выражения видно, что искажение синусоидальности кривой напряжения

жения на зажимах рассматриваемой группы электроприемников определяется искажением синусоидальности кривой напряжения на РПЦ и падениями напряжения от токов высших гармоник этой группы электроприемников на продольном сопротивлении соответствующего участка линии групповой сети.

Следовательно, используя терминологию метода эквивалентирования нелинейных нагрузок и построения эквивалентных схем замещения, можно сформулировать основные положения формирования искажения синусоидальности кривых напряжений в нагрузочных узлах сети ИН.

1. Искажение синусоидальности кривой напряжения в любом нагрузочном узле состоит из искажения источника и искажения нагрузки.

2. Искажение синусоидальности кривой напряжения источника определяется приобретенным искажением синусоидальности кривой напряжения электроприемников рассматриваемого узла и падением напряжения от суммы токов высших гармоник данных электроприемников на суммарном продольном сопротивлении всех элементов сети от источника питания до ближайшего к рассматриваемому эквивалентуемого узла.

3. Искажение синусоидальности кривой напряжения нагрузки определяется падением напряжения от суммы токов высших гармоник электроприемников рассматриваемого узла на продольном сопротивлении участка сети от ближайшего эквивалентуемого до рассматриваемого узла.

4. Электроприемниками рассматриваемого узла являются электроприемники, собственное искажение синусоидальности кривой напряжения которых определяется падением напряжения от суммы их токов высших гармоник на суммарном продольном сопротивлении всех элементов сети от источника питания до данного узла.

С учетом полученных выводов можем построить математическую модель любого нагрузочного узла с нелинейными электроприемниками конкретной электрической сети и перейти от численных расчетов к аналитическому описанию режимных параметров рассматриваемых электроприемников. Полученные аналитические выражения позволят, в свою очередь, перейти к разработке методики определения несинусоидальности напряжений в характерных нагрузочных узлах сети ИН, которая будет рассмотрена в четвертой главе.

Таким образом, предложенный во второй главе метод получил дальнейшее развитие. Результаты, полученные с помощью раз-

вернутых схем замещения с источниками токов высших гармоник, позволяют определить механизм и составляющие формирования несинусоидальности напряжений в любом нагрузочном узле сети ИН. Наглядность указанных результатов позволяет, в частности, использовать их в процессе обучения как студентов, так и инженерно-технических работников, занятых проектированием и эксплуатацией электрических сетей зданий. Кроме того, полученные с помощью традиционных схем замещения значения падений напряжения от токов высших гармоник в разных элементах сети можно выразить с помощью общепринятых показателей, которые учитываются на этапе проектирования сети. Получив такие выражения, сможем их применить, в частности, при разработке методов оценки влияния общепринятых проектных параметров сети на несинусоидальность напряжений.

### 3.5. Метод оценки влияния потерь напряжения в линиях на значение несинусоидальности напряжения в узлах

Электрическая сеть общественного или жилого здания обычно проектируется с учетом оптимальных значений допустимых потерь напряжения и их распределения по элементам сети. При определении допустимой потери напряжения принимается, что напряжение на стороне 0,4 кВ трансформаторов подстанции городского типа в период максимума нагрузок при холостом ходе трансформатора составляет  $105\% U_{ном}$  (231 В). При расчете по потере напряжения возникает вопрос о допустимой (располагаемой) потере напряжения. Из [150] следует, что для распределительной сети жилых и общественных зданий с трансформаторной мощностью от 100 до 1000 кВ·А при изменении коэффициента загрузки трансформатора от 1 до 0,6, а коэффициента мощности от 1 до 0,8 наибольшие располагаемые потери напряжения от шин ТП до наиболее удаленного электроприемника находятся в пределах от 5,9 до 9,3 %. При этом требуемое для сетей общественных и жилых зданий напряжение на зажимах наиболее удаленного электроприемника не должно быть меньше  $95\% U_{ном}$  (209 В).

Проведенный анализ возможных значений располагаемых потерь напряжения в основных элементах рассматриваемых сетей показал, что потери напряжения в трансформаторах 10/0,4 кВ мощностью от 100 до 1000 кВ·А при изменении коэффициента

мощности от 1 до 0,8 и при номинальной нагрузке могут составлять 1,2—4,2 % [74]. Значение потерь напряжения во внешних питающих линиях, которое в основном определяется расстоянием от ТП до ГРЩ здания, находится в диапазоне 0,1—3 %. При этом выбор места для размещения ТП является одним из важных вопросов при проектировании сетей. С одной стороны, наиболее экономичным представляется встраивание подстанции непосредственно в здание ( $\Delta U \approx 0,1$  %). Весьма перспективным является размещение ТП в подземном пространстве в непосредственной близости от зданий или даже под зданиями. С другой стороны, анализ показывает, что при длине кабеля 100—150 м потери напряжения составляют 2—3 %.

Для внутренних электрических сетей характерны магистральные схемы, при которых к одной питающей линии (стояку) с учетом удобной трассировки присоединяется несколько РЩ. Потери напряжения в этом элементе сети определяются долей осветительной нагрузки (до 50 % суммарной нагрузки сети здания) и длиной магистральной линии, которая зависит от расстояния между ГРЩ и кабельным каналом, по которому она поднимается из подвала здания на этажи, и количества этажей. С учетом указанных факторов возможные потери напряжения в стояках составляют 0,2—1,5 %. Линии групповой сети, идущие от осветительных щитков к светильникам и розеткам, как правило, выполняются двужильным алюминиевым проводом сечением 2,5 мм<sup>2</sup>. При этом потери напряжения определяются длиной линий, т.е. расстоянием от щитка до помещения, в котором расположены электроприемники, и мощностью этих электроприемников. Следует отметить, что в групповой сети возможны случаи бесконтрольного подключения, при котором завышаются как длины линий, так и мощности подключаемых электроприемников, что может привести к весьма большим значениям потерь напряжения в этом элементе сети здания. Однако при нормальной схеме и равномерном подключении электроприемников в разных помещениях значение потерь напряжения здесь не должно превышать 4—5 %.

Пусть потеря напряжения в любом однофазном элементе сети определяется выражением, В:

$$\Delta U = I_{(1)}(R \cos \varphi + X \sin \varphi),$$

где  $I_{(1)}$ ,  $R$ ,  $X$  — ток основной частоты, активное и реактивное сопротивление рассматриваемого элемента сети;  $\cos \varphi$  — коэффи-

циент мощности нагрузки, подключенной к данному элементу сети.

Падение напряжения от токов высших гармоник (в комплексной форме) в рассматриваемом элементе сети (без учета нулевого провода) определяется выражением, В:

$$\Delta \dot{U}_{(n)} = \dot{I}_{(n)}(R + jnX).$$

С учетом  $\dot{K}_{I(n)} = \frac{\dot{I}_{(n)}}{\dot{I}_{(1)}}$  ( $\dot{K}_{I(n)}$  — комплекс коэффициента искажения синусоидальности кривой рассматриваемого тока) получаем

$$\Delta \dot{U}_{(n)} = \dot{K}_{I(n)}(\dot{I}_{(1)}R + jn\dot{I}_{(1)}X).$$

Обозначив  $\dot{I}_{(1)}R \cos \varphi = \Delta U_R$ ,  $\dot{I}_{(1)}X \sin \varphi = \Delta U_X$ , разделив левую и правую часть на  $U_{ном}/100$ , имеем следующее значение, %:

$$\Delta \dot{U}_{(n)} = \dot{K}_{I(n)} \left( \frac{\Delta U_R}{\cos \varphi} + jn \frac{\Delta U_X}{\sin \varphi} \right), \text{ при } \cos \varphi \neq 0, \sin \varphi \neq 0, \quad (3.2)$$

где  $\Delta U_R$ ,  $\Delta U_X$  — активная и реактивная составляющие потери напряжения в рассматриваемом элементе сети, %.

Следует отметить, что требование о ненулевых значениях  $\cos \varphi$  и  $\sin \varphi$  практически всегда выполнимо, так как соответствует характеристикам реальных электроприемников.

В связи с тем, что эквивалентное сопротивление внешней питающей сети и стояка для токов гармоник, кратных трем, включает в себя составляющую нулевого провода, выражение (3.2) можно использовать для определения падений напряжения от токов гармоник, не кратных трем, на продольных сопротивлениях всех элементов сети НН и токов гармоник, кратных трем, только на продольных сопротивлениях линий групповой сети.

Проведя несложные преобразования, получим выражения для определения падений напряжения от токов гармоник, кратных трем, на продольном сопротивлении трансформатора, а также внешней питающей линии и стояка соответственно:

$$\Delta \dot{U}_{(n)} = \dot{K}_{I(n)} \left( \frac{\Delta U_R}{\cos \varphi} \cdot \frac{R_t^0}{R_t} + jn \frac{\Delta U_X}{\sin \varphi} \cdot \frac{X_t^0}{X_t} \right);$$

$$\Delta \dot{U}_{(n)} = \dot{K}_{I(n)} \left[ \frac{\Delta U_R}{\cos \varphi} \cdot \left( 1 + \frac{3R_n^0}{R_n} \right) + jn \frac{\Delta U_X}{\sin \varphi} \cdot \left( 1 + \frac{3X_n^0}{X_n} \right) \right],$$

где  $R_n^0, X_n^0, R_n, X_n$  — активное и индуктивное сопротивления нулевой и прямой последовательности трансформатора соответственно;  $R_n^0, X_n^0, R_n, X_n$  — активное и индуктивное сопротивления нулевого и фазного проводов рассматриваемой линии соответственно.

Очевидно, что для разработки соответствующих методик следует упростить приведенные выражения с учетом результатов расчета с помощью точной модели. При этом следует определить оптимальное число учитываемых гармоник и конкретизировать некоторые члены (или уменьшить их количество), стоящие в скобках, с учетом допустимой погрешности вычислений. Для проведения процедуры упрощения будем использовать результаты расчетного варианта, рассмотренного в параграфе 3.3. Анализ указанных результатов показывает, что с достаточной для инженерных расчетов точностью при определении  $K_U$  можно ограничиться учетом третьей, пятой, седьмой и девятой гармоник.

В результате проведения расчетов и сравнения полученных результатов было установлено, что значение падений напряжения от токов высших гармоник в трансформаторе определяется, в основном, составляющей, которая включает в себя номер гармоники, индуктивную составляющую потери напряжения и (для гармоник, кратных трем) индуктивные сопротивления. Тогда, исключив в соответствующих выражениях неопределяющие члены, для простоты и наглядности перейдя от комплексных к действительным значениям и заменив  $\frac{\Delta U_X}{\sin \varphi}$  на  $\frac{\Delta U}{\cos \varphi}$ , получим для токов гармоник, кратных (третья, девятая) и не кратных (пятая, седьмая) трем соответственно

$$\Delta K_{U(n=3k)}^* = K_{I(n)} n \frac{\Delta U}{\cos \varphi} \cdot \frac{X_n^0}{X_n};$$

$$\Delta K_{U(n \neq 3k)}^* = K_{I(n)} n \frac{\Delta U}{\cos \varphi},$$

где  $\Delta K_{U(n=3k)}^*, \Delta K_{U(n \neq 3k)}^*$  — приращение  $K_{U(n)}$  за счет падения на-

пряжения в трансформаторе от токов гармоник, кратных и не кратных трем соответственно.

Проведенный анализ показал, что значение падений напряжения от токов гармоник, кратных трем, во внешней питающей линии и стояке определяется, в основном, активными составляющими соответствующих элементов сети. Тогда, с учетом проведенных упрощений, выражение для определения приращения  $K_{U(n)}$  за счет падения напряжения во внешней питающей линии или стояке от токов гармоник, кратных трем, будет иметь следующий вид:

$$\Delta K_{U(n=3k)}^* = K_{I(n)} \cdot \frac{\Delta U}{\cos \varphi} \cdot \left( 1 + \frac{3R_n^0}{R_n} \right).$$

Следует отметить, что падение напряжения в упомянутых элементах сети от токов гармоник, не кратных трем, определяет не только соответствующая активная составляющая потери напряжения, но и номер гармоники. Поэтому в упрощенные выражения для определения соответствующего приращения  $K_{U(n)}$  вводится коэффициент, учитывающий номер гармоники:

$$\Delta K_{U(n \neq 3k)}^* = K_{I(n)} \frac{\Delta U}{\cos \varphi} 2 \lg n;$$

$$\Delta K_{U(n \neq 3k)}^{\text{ст}} = K_{I(n)} \frac{\Delta U}{\cos \varphi} 1,43 \lg n.$$

Наконец, с высокой точностью (относительная погрешность — десятые доли процентов) получаем упрощенное выражение для определения приращения  $K_{U(n)}$  за счет падений напряжения от токов высших гармоник в линии групповой сети:

$$\Delta K_{U(n)}^* = K_{I(n)} \frac{\Delta U}{\cos \varphi}.$$

Как было отмечено выше, значение  $K_{U(n)}$  в характерных нагрузочных узлах определяется соответствующими падениями напряжения от токов высших гармоник. Тогда для узлов ГРЩ, РЩ и группы электроприемников имеем



$$K_{U(n)}^{\text{ГРЩ}} = C_{(n)}(K_{U(n)}^{\text{Г}} + \Delta K_{U(n)}^{\text{н}});$$

$$K_{U(n)}^{\text{РЩ}} = D_{(n)}(K_{U(n)}^{\text{ГРЩ}} + \Delta K_{U(n)}^{\text{ст}});$$

$$K_{U(n)}^{\text{ГР}} = G_{(n)}(K_{U(n)}^{\text{РЩ}} + \Delta K_{U(n)}^{\text{ГР}}),$$

где  $C_{(n)}$ ,  $D_{(n)}$ ,  $G_{(n)}$  — коэффициенты, компенсирующие погрешность от неучета комплексного характера  $\Delta K_{U(n)}$ . Например, для рассматриваемого расчетного варианта  $C_{(3)} = D_{(3)} = 0,9$ ;  $C_{(5,7,9)} = D_{(5,7,9)} = 0,96-0,97$ ;  $G_{(3)} = 0,95$ ;  $G_{(5)} = 0,8$ ;  $G_{(7)} = 0,6$ ;  $G_{(9)} = 0,7$ .

В результате для характерных нагрузочных узлов можно определить значение  $K_U = \sqrt{\sum_{n=3}^9 (K_{U(n)})^2}$ . При этом результаты расчетов, проведенных с помощью разработанного метода, не отличаются от результатов, полученных в параграфе 3.3, более чем на 5 %.

Для оценки влияния потерь на несинусоидальность напряжения и установления конкретных зависимостей следует рассмотреть количественные характеристики и показатели анализируемой электрической сети, задаваемые на этапе проектирования и полученные в результате расчета с помощью приведенных выше выражений. Для этого рассмотрим, как влияет изменение потерь напряжения в основных элементах сети НН на значение  $\Delta K_U$  в характерных нагрузочных узлах. Очевидно, что потери напряжения в трансформаторе нельзя изменить, не изменив параметры нагрузочного режима. Поэтому в рамках рассматриваемого нагрузочного режима проведем упомянутый анализ, изменяя значение потерь напряжения путем изменения длин линейных элементов сети.

В результате проведенного расчета получаем, что при увеличении  $\Delta U$  во внешней питающей линии от 1,8 до 2,8 % коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения на ГРЩ  $K_{U1}$  возрастает от 7,38 до 7,92 %, на РЩ групповой сети  $K_{U2}$  — от 7,84 до 8,33 %, а на зажимах рассматриваемой группы электроприемников  $K_{U3}$  — от 8,24 до 8,7 %. При увеличении  $\Delta U$  в стояке от 0,8 до 1,8 % значение  $K_{U1}$  остается 7,38 %,  $K_{U2}$  возрастает от 7,84 до 9,2 %, а  $K_{U3}$  — от 8,24 до 9,51 %. При увеличении  $\Delta U$

в линии групповой сети от 4 до 5 % значение  $K_{U1}$  остается 7,38 %,  $K_{U2}$  — 7,84 %, а  $K_{U3}$  возрастает от 8,24 до 8,49 %. Наконец, при одновременном увеличении  $\Delta U$  во всех элементах сети на 1 % (в указанных выше пределах, в сумме — на 3 %) значение  $K_{U1}$  возрастает от 7,38 до 7,92 %,  $K_{U2}$  — от 7,84 до 9,69 %, а  $K_{U3}$  — от 8,24 до 10,22 %.

Приведенные результаты позволяют определить закономерности изменения рассматриваемых параметров для конкретного нагрузочного режима. Очевидно, что обобщающий анализ и оценку взаимного влияния потерь и несинусоидальности напряжения можно провести с учетом результатов расчета других нагрузочных режимов, определяемых составом и графиками нагрузок отдельных групп электроприемников.

## АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ НАГРУЗКИ И СЕТИ НА ЗНАЧЕНИЯ ВЫСШИХ ГАРМОНИК В СЕТЯХ НИЗКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

В третьей главе были представлены результаты расчета несинусоидальности токов и напряжений для одного из вариантов исполнения электрической сети общественного здания. При этом установлены характерные нелинейные электроприемники и особенности построения низковольтных сетей, которые приводят к значительным искажениям синусоидальности кривых токов и напряжений во всех элементах сети НН. Очевидно, что изменение варианта исполнения сети (другие мощность и параметры трансформатора, количество, длина и сечение внешних питающих линий, стояков и линий групповой сети, наполнение помещений здания электроприемниками, очередность и тип их подключения, параметры электроприемников, доля осветительной нагрузки, доля нелинейной нагрузки и т.д.) влияет на значение искажений синусоидальности кривых токов и напряжений. В данной главе рассмотрены параметры нагрузки и сети, которые оказывают наиболее существенное влияние на форму кривых токов и напряжений сети НН.

### 4.1. Анализ влияния доли нелинейной нагрузки

В предыдущей главе было определено значение несинусоидальности токов и напряжений при сравнительно небольшой доле нелинейной нагрузки всей сети здания  $\alpha_1$  (в рассмотренном варианте  $\alpha_1 = 0,116$ ). Проанализируем, как изменятся значения высших гармоник тока и напряжения некоторых характерных элементов рассматриваемой сети НН при изменении доли нелинейной нагрузки [35]. Как и ранее, примем мощность трансформатора 10/0,4 кВ  $S_{tr} = 100$  кВ·А и долю осветительной нагрузки  $\gamma = 0,5$ , а также те же параметры питающих линий, стояков и линий групповой сети. Очевидно, что предполагаемое увеличение или уменьшение количества и суммарной установленной мощ-

### 4.1. Анализ влияния доли нелинейной нагрузки

ности устройств компьютерной техники (нелинейных электроприемников), подключенных к электрической сети здания, определяется как производственной необходимостью, так и техническими и финансовыми возможностями пользователей. Для проведения сравнительного анализа рассмотрим два варианта размеров здания, количества помещений и наполнения их разными электроприемниками и, соответственно, доли нелинейной нагрузки.

В первом варианте в трехэтажном здании с одним осветительным стояком к каждой фазе этажного РЩ с помощью одной линии групповой сети подключена осветительная нагрузка мощностью 1868,2 В·А, а с помощью двух линий групповой сети через розетки — два обогревательных прибора суммарной мощностью 1400,2 В·А, а также восемь компьютеров и два принтера суммарной мощностью 2174,2 В·А. При этом предположим, что дополнительная, по сравнению с рассмотренным в третьей главе расчетным вариантом, группа нелинейных электроприемников (пять компьютеров и один принтер) выделена и подключена отдельно к одной из линий розеток. В соответствии с этим изменятся параметры элементов нагрузки в характерных узлах анализируемой сети (согласно рис. 3.1). В результате получаем для каждой фазы значения доли нелинейной нагрузки рассматриваемых линий групповой сети  $\alpha_3 = 0,384$  и стояка  $\alpha_2 = 0,413$ , а также всей сети здания  $\alpha_1 = 0,211$ . Очевидно, что  $\alpha_2 > \alpha_3$  за счет учета в активной мощности нелинейной составляющей нагрузки стояка активной мощности упомянутой дополнительной группы нелинейных электроприемников. В итоге наличие этих нелинейных электроприемников приводит к возрастанию доли нелинейной нагрузки всей сети здания до указанного значения  $\alpha_1$ .

Во втором варианте в двухэтажном здании с одним осветительным стояком к каждой фазе РЩ кроме осветительной нагрузки на первом этаже с помощью двух линий групповой сети через розетки подключены два обогревательных прибора суммарной мощностью 1460 В·А и двадцать шесть компьютеров и шесть принтеров суммарной мощностью 6900 В·А, а на втором этаже с помощью одной линии — один обогревательный прибор мощностью 730 В·А и тринадцать компьютеров и три принтера суммарной мощностью 3450 В·А. В результате получаем для каждой фазы еще большие по сравнению с первым вариантом значения доли нелинейной нагрузки рассматриваемых линий групповой сети  $\alpha_3 = 0,822$  и стояка  $\alpha_2 = 0,637$ , а также всей сети зда-

ния  $\alpha_1 = 0,333$ . Отметим, что в рассматриваемом варианте предполагается подключение к линиям розеток электроприемников мощностью, которая является максимальной с точки зрения допустимой длительной токовой нагрузки для провода сечением  $2,5 \text{ мм}^2$ . При этом насыщение помещений здания средствами компьютерной техники весьма значительно. Поэтому полученное в данном расчетном варианте значение  $\alpha_1$  можно считать максимально возможным для выбранного состава нелинейных электроприемников (только компьютеры и принтеры), а также принятых неизменными параметров сети и доли осветительной нагрузки.

В результате расчетов получаем для двух вариантов значения коэффициента искажения синусоидальности кривой фазного тока двух участков линии питания розеток  $K_d$  и  $K_{\text{д}}$ , этажного участка стояка  $K_{\text{л}}$  и внешней питающей линии  $K_{\text{л}(n)}$ . Как известно, каждый нелинейный электроприемник, с одной стороны, вносит свой вклад в искажение синусоидальности кривых токов и напряжений всей сети, а с другой — сам находится под влиянием других нелинейных электроприемников этой сети. В результате с увеличением  $\alpha_1$  за счет увеличения суммарной установленной мощности нелинейных электроприемников искажение синусоидальности кривых напряжений в нагрузочных узлах увеличивается, а  $K_{\text{л}}$  единичного компьютера или принтера уменьшается. Поэтому характер изменения  $K_d$  и  $K_{\text{д}}$  при увеличении  $\alpha_1$  будет зависеть в каждом конкретном случае от количества и очередности подключения электроприемников к линиям групповой сети. В то же время значения  $K_{\text{л}}$  и  $K_{\text{л}(n)}$  с ростом доли нелинейной нагрузки возрастают.

Как было отмечено выше, ток внешней питающей сети является определяющим с точки зрения формирования искажений синусоидальности кривых напряжений во всех элементах сети НН. По изменению искажения синусоидальности кривой данного тока при изменении доли нелинейной нагрузки можно судить об общем уровне и определять закономерности изменения значения высших гармоник токов и напряжений рассматриваемой сети. На рис. 4.1 показаны зависимости  $K_{\text{л}}$  и коэффициента  $n$ -й гармонической составляющей (для доминирующих гармоник) тока внешней питающей линии  $K_{\text{л}(n)}$  от значения  $\alpha_1$ . Очевидно, что с увеличением  $\alpha_1$  значение  $K_{\text{л}}$  возрастает, причем основной вклад (98–99 %) в искажение синусоидальности кривой фазного тока внешней питающей сети вносят третья, пятая и седьмая гармоники, а наименьший — девятая. Из рисунка видно, что закон изменения  $K_{\text{л}(n)}$  в зависимости от  $\alpha_1$  различный для

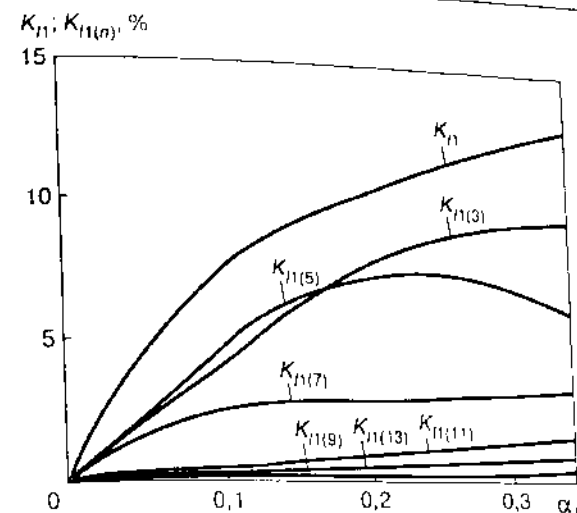


Рис. 4.1. Зависимости коэффициентов искажения синусоидальности кривой  $K_{\text{л}}$  и  $n$ -й гармонической составляющей  $K_{\text{л}(n)}$  тока внешней питающей сети от  $\alpha_1$

разных гармоник. Это связано с тем, что в условиях конкретной сети изменение доли нелинейной нагрузки оказывает существенное влияние на сложность характера формирования кривых токов и напряжений и, следовательно, зависимостей значений высших гармоник от  $\alpha_1$ . Следует отметить лишь очевидную тенденцию возрастания рассматриваемых коэффициентов с ростом  $\alpha_1$ . В то же время, как было отмечено в третьей главе, однозначно оценить степень влияния нелинейной нагрузки на сеть НН, сравнивая значение  $K_{\text{л}}$  и  $K_{\text{л}(n)}$  ее элементов, не представляется возможным. Поэтому продолжать подобный анализ для фазных токов остальных элементов низковольтной сети представляется нецелесообразным.

Как известно, в четырехпроводных сетях токи гармоник, кратных трем, определяют ток в нулевом проводе. Поэтому ток в нейтрали трансформатора и в нулевом проводе внешней питающей линии в первом расчетном варианте ( $\alpha_1 = 0,211$ ) составляет 23–24 %, а во втором ( $\alpha_1 = 0,333$ ) — достигает 30 % фазного тока внешней питающей сети. Иными словами, в рассматриваемых нагрузочных режимах нарушается известное техническое требование о том, что для трансформаторов со схемой соединения обмоток звезда—звезда с нулем допускается ток в нейтрали трансформатора не более 25 % номинального. В связи с этим возни-

кает необходимость замены таких трансформаторов на трансформаторы с соединением обмоток треугольник—звезда с нулем. В этом случае допускается ток в нейтрали до 75 % номинального. Кроме того, ток в нулевой жиле кабеля стояка в первом расчетном варианте достигает 70 %, а во втором — 90 % фазного тока кабеля стояка. При этом действующее значение рассматриваемого тока достигает допустимой длительной токовой нагрузки для кабеля сечением 16 мм<sup>2</sup> (принятое сечение нулевой жилы). Поэтому при проектировании электрической сети здания необходимо учитывать наличие токов высших гармоник и принимать сечения нулевых жил кабелей стояков равными сечениям соответствующих фазных жил.

Для определения степени влияния нелинейных электроприемников на сеть при изменении доли нелинейной нагрузки находим значения  $K_U$  в известных характерных узлах низковольтной сети. В результате расчета получаем, что при изменении  $\alpha_1$  от 0,116 до 0,333 коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения на ГРЩ  $K_{U1}$  возрастает от 7,38 до 14,21 %, на РЩ групповой сети  $K_{U2}$  — от 7,96 до 15,37 %, в розетках дальней комнаты здания  $K_{U4}$  — от 8,62 до 17,4 %. Следует отметить, что уже при  $\alpha_1 > 0,211$   $K_U$  в разных точках электрической сети здания превышает предельно допустимое значение 12 % согласно ГОСТ 13109—97. Кроме того, из приведенных результатов видно, что во втором расчетном варианте за счет перегрузки линии групповой сети токами высших гармоник значение несинусоидальности напряжения на ГРЩ составляет меньшую часть несинусоидальности напряжения на зажимах электроприемников (около 80 %) по сравнению с первым вариантом (около 88 %).

На рис. 4.2 приведены зависимости  $K_{U4}$  и коэффициента  $n$ -й гармонической составляющей напряжения в розетках дальней комнаты  $K_{U4(n)}$  от значения  $\alpha_1$ . При этом из-за небольших значений отдельных гармоник напряжения и для упрощения анализа рассматриваем интегральные коэффициенты  $K_{U4(n)}$  нескольких гармоник. Например, для пятой и седьмой гармоник  $K_{U4(5,7)} = \sqrt{K_{U4(5)}^2 + K_{U4(7)}^2}$ . Нетрудно видеть, что искажение формы кривой напряжения на зажимах электроприемников определяется в основном напряжением третьей гармоники. В результате  $K_{U4(3)}$ , изменяясь в рассматриваемых расчетных вариантах от 8,2 до 17,2 %, существенно превышает предельно допустимое значение 7,5 %

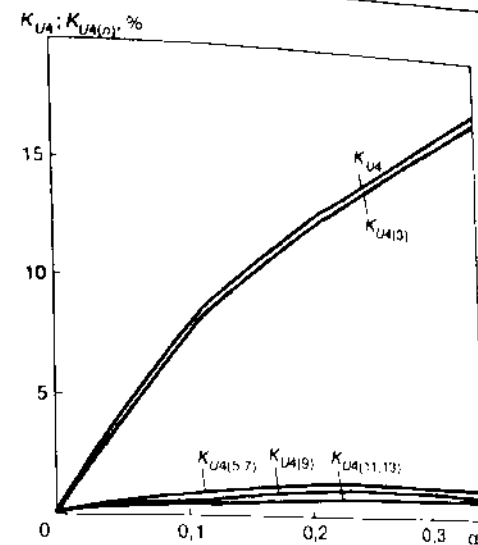


Рис. 4.2. Зависимости коэффициентов искажения синусоидальности кривой  $K_{U4}$  и  $n$ -й гармонической составляющей  $K_{U4(n)}$  напряжения в розетках дальней комнаты от  $\alpha_1$

согласно ГОСТ 13109—97. Остальные гармоники вносят незначительный вклад. Причем напряжение девятой гармоники сравнимо по значению с напряжениями пятой и седьмой гармоник. Хотя, как отмечалось ранее, значение тока девятой гармоники невелико. Доминирующее влияние напряжений гармоник, кратных трем, можно объяснить большим эквивалентным сопротивлением нулевой последовательности сетей НН.

С помощью метода оценки влияния потерь на несинусоидальность напряжения (см. третью главу) получаем количественные характеристики указанного влияния при разных значениях  $\alpha_1$ . В результате при увеличении потерь напряжения  $\Delta U$  в сети на 3 % (равномерно во всех основных линейных элементах)  $K_U$  на зажимах электроприемников рассматриваемой линии групповой сети увеличивается в первом расчетном варианте ( $\alpha_1 = 0,211$ ) на 3,1 %, а во втором ( $\alpha_1 = 0,333$ ) — на 3,9 %. При этом часть указанного увеличения  $K_U$ , которая определяется увеличением на 1 %  $\Delta U$  в стояке, возрастает по сравнению с расчетным вариантом предыдущей главы ( $\alpha_1 = 0,116$ ) примерно до 75 %. Это можно объяснить, в частности, опережающим увеличением токов высших гармоник стояка по сравнению, например, с аналогичными токами внешней питающей сети при возрастании доли нелинейной нагрузки.

Очевидно, что в рамках конкретного нагрузочного режима потери напряжения в линиях определяются их длиной (и сечением). В результате проведенных расчетов установлено, что в рассматриваемых расчетных вариантах увеличению  $\Delta U$  во внешней питающей линии на 1 % соответствует увеличение ее длины примерно на 55 м. Соответствующее увеличение длины стояка составляет примерно 50 м, а длины линии групповой сети — 10 м при  $\alpha_1 = 0,221$  и 5 м при  $\alpha_1 = 0,333$  (различие вызвано увеличением тока линии групповой сети во втором расчетном варианте). Таким образом, с помощью разработанного метода, кроме того, можно оценить влияние изменения длины рассматриваемых линейных элементов сети на несинусоидальность напряжения.

В заключение следует отметить, что в данном параграфе представлены результаты влияния на форму кривых токов и напряжений доли нелинейной нагрузки, которая определяется суммарной установленной мощностью только устройств компьютерной техники, рассмотренных в качестве характерных нелинейных электроприемников сетей НН. Очевидно, что при учете в расчетных вариантах существующей нелинейности других электроприемников, например, СВЧ-печей, люминесцентных ламп (особенно с электронной пускорегулирующей аппаратурой, см. первую главу), можно получить еще более высокий уровень высших гармоник в низковольтных сетях.

#### 4.2. Влияние мощности и схемы соединения обмоток трансформатора

Рассмотрим, как влияет мощность трансформатора 10/0,4 кВ на несинусоидальность токов и напряжений сети НН. Проведем расчеты высших гармоник для вариантов построения сети, которые предусматривают использование трансформаторов мощностью 250 и 1000 кВ·А. Очевидно, что по сравнению с вариантом построения сети с трансформатором мощностью 100 кВ·А, учитывая возросшую мощность и соответствующее увеличение токов в элементах сети, пересмотрим в расчетных вариантах параметры питающих линий и стояков, количество и мощность электроприемников, а также количество помещений и размеры здания, оставив неизменными значения доли нелинейной нагрузки. Кроме того, следует учесть, что, благодаря конструктивным особенностям, схеме соединения обмоток, степени насыщения стержней магнитопровода и др., трансформатор мощностью 250 кВ·А

#### 4.2. Влияние мощности и схемы соединения обмоток трансформатора

со схемой соединения обмоток звезда—звезда с нулем имеет относительно небольшое сопротивление нулевой последовательности по сравнению с аналогичным трансформатором мощностью 100 кВ·А. Как было отмечено выше, значение сопротивления нулевой последовательности трансформатора 10/0,4 кВ во многом определяет несинусоидальность напряжения элементов сетей НН. В результате количественные характеристики несинусоидальности токов и напряжений сети с трансформатором мощностью 250 кВ·А отличаются от соответствующих характеристик сети с трансформатором мощностью 100 кВ·А.

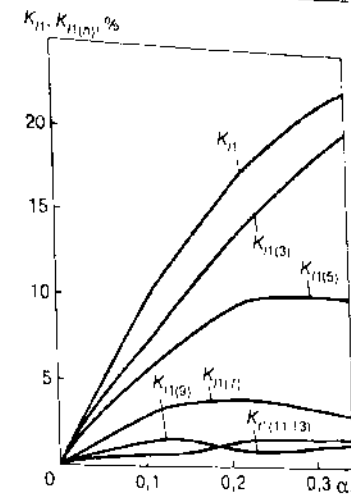


Рис. 4.3. Зависимости  $K_L$  и  $K_{L(n)}$  от  $\alpha_1$  для сети с трансформатором мощностью 250 кВ·А

На рис. 4.3 показаны полученные для этого варианта исполнения сети зависимости  $K_L$  и  $K_{L(n)}$  от  $\alpha_1$ . Сравним данные кривые с кривыми, представленными на рис. 4.1. Очевидно, что  $K_L$  существенно увеличивается, достигая значения  $K_L = 23$  % при  $\alpha_1 = 0,355$ . Из рисунка видно, что изменение  $K_L$  вызвано изменением значений отдельных гармоник, в первую очередь третьей, а также пятой и седьмой.

Зависимость  $K_{L(3)} = f(\alpha_1)$  круто возрастает, причем скорость возрастания практически одинакова при всех  $\alpha_1$ , что во многом определяет изменившийся характер зависимости  $K_L = f(\alpha_1)$ . Значение девятой гармоники возросло, в данном случае оно соизмеримо с одиннадцатой и тринадцатой гармониками. Таким образом, увеличение  $K_L$  в случае питания от трансформатора мощностью 250 кВ·А определяется в основном возросшими токами гармоник, кратных трем. Поэтому, например, при  $\alpha_1 = 0,355$  ток гармоник, кратных трем. Поэтому, например, при  $\alpha_1 = 0,355$  ток в нейтрали трансформатора и нулевом проводе внешней питающей линии превышает 60 % фазного тока внешней питающей сети, а ток в нулевой жиле кабеля стояка (по той же причине) — 112 % фазного тока кабеля стояка со всеми вытекающими отрицательными последствиями.

В результате расчета получаем, что в различных нагрузочных режимах  $K_{UL}$  сети с трансформатором мощностью 250 кВ·А приблизительно в два раза меньше  $K_{UL}$  сети с трансформатором мощ-

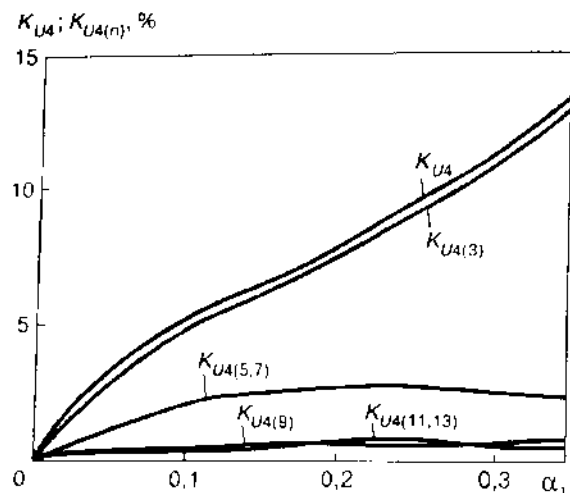


Рис. 4.4. Зависимости  $K_{U4}$  и  $K_{U4(n)}$  от  $\alpha_1$  для сети с трансформатором мощностью 250 кВ·А

ностью 100 кВ·А. Это приводит к уменьшению  $K_{U4}$  в соответствующих режимах, так как (как было отмечено выше) основной вклад в несинусоидальность напряжения на зажимах электроприемников вносит составляющая несинусоидальности напряжения на ГРЩ. Несмотря на это, уже при  $\alpha_1 > 0,224$   $K_U$  в разных нагрузочных узлах электрической сети здания превышает нормально или предельно допустимые значения согласно ГОСТ 13109—97. На рис. 4.4 представлены зависимости  $K_{U4}$  и  $K_{U4(n)}$  от  $\alpha_1$ . Из сравнения зависимостей, показанных на рис. 4.2 и 4.4, видно, что при использовании трансформатора мощностью 250 кВ·А значения  $K_{U4}$  уменьшились на 30–40 % соответствующих значений  $K_{U4}$  при использовании трансформатора мощностью 100 кВ·А. Очевидно, что это уменьшение связано с уменьшением напряжения гармоник, кратных трем, которое вызвано относительным уменьшением сопротивления нулевой последовательности трансформатора. Тем не менее,  $K_{U4(3)}$  в рассматриваемых нагрузочных режимах превышает либо нормально, либо предельно допустимые значения согласно ГОСТ 13109—97.

Продолжая анализ, проводим аналогичные расчеты для вариантов построения сети с трансформатором мощностью 1000 кВ·А. В результате получаем относительные значения высших гармоник токов и напряжений, которые мало отличаются от соответствующих значений для сети с трансформатором мощностью 100 кВ·А.

#### 4.2. Влияние мощности и схемы соединения обмоток трансформатора

Проведенный анализ показал, что это вызвано вновь начинающимся постепенным увеличением сопротивления нулевой последовательности трансформатора (за счет индуктивной составляющей) относительно его сопротивления короткого замыкания, которое происходит при увеличении его мощности  $S_{тр} > 250$  кВ·А. При этом на значение высших гармоник токов и напряжений электрической сети отдельного здания практически не влияет вариант размещения электроприемников (например, для сети с трансформатором мощностью 1000 кВ·А — в одном 16-этажном или четырех 4-этажных зданиях) и схема питания (радиальная или магистральная).

Проведенный анализ влияния мощности трансформатора на несинусоидальность токов и напряжений показал, что на значение высших гармоник влияют конструктивные особенности, в частности, схема соединения обмоток трансформатора. Однако для точного определения количественных характеристик указанного влияния необходимо рассмотреть расчетные варианты построения сети, в которых при изменении схемы соединения обмоток мощность трансформатора остается неизменной. В предыдущем параграфе представлены результаты расчета несинусоидальности токов и напряжений при изменении значения  $\alpha$  для расчетных вариантов построения сети НН с трансформатором мощностью 100 кВ·А со схемой соединения обмоток звезда—звезда с нулем. Для проведения сравнительного анализа влияния схемы соединения обмоток рассмотрим соответствующие варианты использования трансформатора мощностью 100 кВ·А с соединением обмоток по схеме треугольник—звезда с нулем.

В схеме замещения данный трансформатор представим сопротивлениями  $R_k = 0,035$  Ом;  $X_k = 0,065$  Ом;  $R_0^0 = 0,035$  Ом;  $X_0^0 = 0,065$  Ом [48], а параметры линейных элементов сети и электроприемников оставим прежними. Очевидно, что при этом значительно уменьшится сопротивление нулевой последовательности внешней питающей сети. Проведенные расчеты показывают, что по сравнению с вариантами использования трансформатора, обмотки которого соединены по схеме звезда—звезда с нулем, в рассмотренных вариантах существенно изменяются значения высших гармоник тока и напряжения в элементах сети. В первую очередь это относится к увеличению несинусоидальности токов внешней питающей сети, а также стояка. В результате, например,  $K_L$  существенно увеличивается, достигая значения  $\approx 21,01$  % при  $\alpha_1 = 0,333$  (для сравнения, при использовании

трансформатора со схемой соединения обмоток звезда—звезда с нулем соответствующий  $K_{\text{л}} = 12,28 \%$ ).

Из полученных результатов видно, что увеличение  $K_{\text{л}}$  и  $K_{\text{г}}$  в случае питания от трансформатора со схемой соединения обмоток треугольник—звезда с нулем определяется в основном возросшими токами гармоник, кратных трем. По этой причине, например, при  $\alpha_1 = 0,333$  ток в нейтрали трансформатора составляет около 55 % его фазного тока, а ток в нулевой жиле кабеля стояка — около 115 % фазного тока кабеля стояка. При этом ток в нейтрали трансформатора не превышает допустимое значение для трансформаторов со схемой соединения обмоток треугольник—звезда с нулем (75 %). В то же время, действующее значение тока в нулевой жиле кабеля стояка в этом случае (85 А) существенно превышает допустимую длительную токовую нагрузку для кабеля сечением 16 мм<sup>2</sup>.

В результате расчета  $K_{\text{в}}$  в характерных нагрузочных узлах получаем, что при изменении  $\alpha_1$  от 0,116 до 0,333  $K_{\text{в}}$  изменяется в пределах от 3,13 до 5,76 %,  $K_{\text{в}2}$  — от 4,3 до 8,6 %,  $K_{\text{в}4}$  — от 5,38 до 12,2 %. Из приведенных результатов, в частности, видно, что при использовании трансформатора со схемой соединения обмоток треугольник—звезда с нулем происходит не только перераспределение токов высших гармоник, но и относительное изменение значений соответствующих падений напряжений в элементах сети. Несмотря на то, что значение токов высших гармоник возросло, значение падений напряжения от упомянутых токов на продольных сопротивлениях внешней питающей сети снизилось за счет существенного снижения величины соответствующих сопротивлений. В то же время, падения напряжения от токов высших гармоник на продольных сопротивлениях стояка и линий групповой сети возросли, т. к. параметры указанных линейных элементов сети остались неизменными. В связи с этим несинусоидальность напряжения на ГРЩ составляет меньшую часть несинусоидальности напряжения на зажимах электроприемников (менее 60 %) по сравнению с вариантом использования трансформатора со схемой соединения обмоток звезда—звезда с нулем (80—90 %). Причем в случае, когда токи высших гармоник значительны (при  $\alpha_1 = 0,333$ ), указанная часть составляет менее 50 %.

На рис.4.5 представлены зависимости  $K_{\text{в}4}$  и  $K_{\text{в}4(n)}$  (для третьей, пятой, седьмой и девятой гармоник) от  $\alpha_1$ . Из сравнения приведенных зависимостей с аналогичными зависимостями, показанными на рис.4.2, видно, что  $K_{\text{в}4}$  уменьшился на 30—40 % его зна-

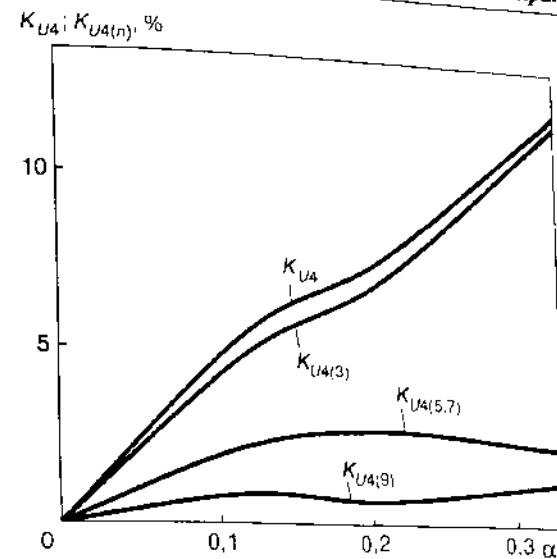


Рис.4.5. Зависимости  $K_{\text{в}4}$  и  $K_{\text{в}4(n)}$  от  $\alpha_1$  для сети с трансформатором мощностью 100 кВ·А со схемой соединения обмоток треугольник—звезда с нулем

чения при использовании трансформатора со схемой соединения обмоток звезда—звезда с нулем. При этом разброс в значениях определяется значением  $\alpha_1$  и загрузкой линий внутренней сети здания токами высших гармоник (меньшему значению снижения  $K_{\text{в}4}$  соответствует  $\alpha_1 = 0,333$ ). Таким образом, в результате использования трансформатора со схемой соединения обмоток треугольник—звезда с нулем  $K_{\text{в}}$  в характерных нагрузочных узлах электрической сети здания практически не превышает предельно допустимое значение 12 % согласно ГОСТ 13109—97.

Из рис.4.5 видно, что  $K_{\text{в}4}$  определяется в основном напряжением третьей гармоники. Тем не менее, несмотря на общее снижение несинусоидальности напряжений,  $K_{\text{в}4(3)}$  при  $\alpha_1 > 0,25$  превышает предельно допустимое значение 7,5 % согласно ГОСТ 13109—97. Остальные гармоники вносят незначительный вклад, хотя сильнее, чем в сравниваемых вариантах, проявляется влияние напряжений пятой, седьмой и девятой гармоник.

Полученные результаты показывают, что использование трансформатора со схемой соединения обмоток треугольник—звезда с нулем приводит, с одной стороны, к ощутимому снижению  $K_{\text{в}}$ , а с другой — к нежелательному увеличению токов нулевого провода в сетях НН. Известно, что для решения указанной проблемы при проектировании электрической сети здания необходимо

принимать сечения нулевых жил кабелей стояков равными сечениям соответствующих фазных жил.

Рассмотрим расчетный вариант, при котором ток в нулевом проводе максимальный ( $\alpha_1 = 0,333$ ), с учетом использования кабеля стояка сечением  $4 \times 50 \text{ мм}^2$ . Проведенные расчеты показывают, что увеличение сечения нулевой жилы кабеля стояка приводит к некоторому увеличению токов высших гармоник (в том числе, и кратных трем) в элементах сети. В результате, в частности, ток в нулевой жиле кабеля стояка составляет 120 % его фазного тока. Однако действующее значение указанного тока (90 А) при этом не превышает значение допустимой длительной токовой нагрузки для кабеля сечением  $50 \text{ мм}^2$ . Кроме того, полученные результаты показывают, что в этом случае за счет уменьшения падений напряжения от токов высших гармоник на продольных сопротивлениях стояка еще больше снижается несинусоидальность напряжений в узлах групповой сети (например,  $K_{u4} = 10,9 \%$ ). Напомним, что при использовании трансформатора со схемой соединения обмоток звезда—звезда с нулем и кабеля стояка сечением  $3 \times 50 + 1 \times 16 \text{ мм}^2$  соответствующий  $K_{u4} = 17,4 \%$ .

Таким образом, проведенный анализ причин и закономерностей роста уровня высших гармоник показывает, что несинусоидальность токов и напряжений в сетях НН в основном определяют конструктивные особенности построения трехфазных четырехпроводных сетей, соотношение сопротивлений отдельных их элементов и доля нелинейной нагрузки. Из полученных результатов видно, что при неизменной доле нелинейной нагрузки одним из основных путей решения проблемы на этапе проектирования сети может стать снижение эквивалентного сопротивления нулевой последовательности низковольтной сети. Для этого, в частности, предлагается использовать трансформаторы со схемой соединения обмоток треугольник—звезда с нулем (и звезда—зигзаг с нулем) вместо широко распространенных по установившейся практике проектирования трансформаторов со схемой соединения обмоток звезда—звезда с нулем, а также увеличивать сечение нулевого провода сети. Очевидно, что в условиях эксплуатации электрической сети здания проводить такие мероприятия затруднительно. В этой ситуации требуется применение дополнительных технических средств, уменьшающих негативное влияние нелинейных электропотребителей на КЭ в сетях НН.

### 4.3. Моделирование и анализ влияния параметров нагрузочных режимов

Известно, что потребление электроэнергии не остается постоянным, а изменяется в зависимости от вида, типа и режима работы электроприемников, времени года и часов суток. В результате, изменяется, в частности, и нагрузочный режим сети НН, а в случае подключения нелинейных потребителей — искажение синусоидальности кривых токов и напряжений. В связи с этим проведение анализа влияния параметров нагрузочных режимов на значение высших гармоник представляет несомненный интерес.

В работе [39] проведен анализ влияния коэффициента загрузки питающего трансформатора на значение высших гармоник токов и напряжений низковольтной распределительной сети с нелинейной нагрузкой. В этой работе представлены результаты расчета несинусоидальности токов и напряжений указанной сети при подключении нагрузки, сосредоточенной в одном узле. Очевидно, что используемая при этом модель сети (см. вторую главу) не позволяет определить количественные характеристики влияния различных нагрузочных режимов сети НН на искажение синусоидальности кривых токов и напряжений внутренней сети здания и на зажимах подключенных к ней электроприемников. Кроме того, в упомянутой статье [39] для характеристики нагрузочных режимов используется так называемый коэффициент загрузки трансформатора  $\beta$ , который рассчитывается формально, без конкретизации и учета, например, характерных для электрических сетей городов летних и зимних суточных графиков нагрузок отдельных групп электроприемников жилых или общественных зданий.

В связи с этим для анализа нагрузочных режимов низковольтных сетей с нелинейными электроприемниками в работе [47] предлагается использовать предложенную в третьей главе данной работы математическую модель, которая позволяет определять значения искажений синусоидальности кривых токов и напряжений на любом предусмотренном схемой замещения элементе сети, в частности, с учетом графиков электрических нагрузок. В предыдущих параграфах представлены результаты расчета несинусоидальности токов и напряжений для конкретных вариантов исполнения сети НН с питающими трансформаторами мощностью 100, 250 и 1000 кВ·А при разных долях нелинейной нагрузки  $\alpha$ . При этом полученные результаты дают информацию



об уровне высших гармоник в сети при 100%-ной загрузке указанных трансформаторов. Поэтому и с учетом того, что в рассмотренных вариантах предусмотрено подключение силовой нагрузки, осветительных и электробытовых (в первую очередь, обогревательных) приборов, а также средств компьютерной техники с полным использованием установленной мощности всех электроприемников, данные нагрузочные режимы будем считать соответствующими зимнему вечернему максимуму нагрузок, например, учреждения управления, финансирования, проектной, конструкторской или научной организации.

Очевидно, что можно определить диапазон изменения нагрузок в течение суток для каждой группы электроприемников, затем аргументированно выбрать несколько нагрузочных режимов в этом диапазоне и, рассчитав для них параметры схемы замещения электроприемников и интегральный коэффициент  $\beta$ , провести расчет несинусоидальности токов и напряжений сети НН при разных значениях  $\alpha$  и  $\beta$ . При этом для оценки и учета графиков нагрузок отдельных групп электроприемников введем соответствующие коэффициенты загрузки:

$$\beta^j = S_{\beta}^j / S_{100\%}^j,$$

где  $S_{\beta}^j, S_{100\%}^j$  — суммарная мощность  $j$ -й группы электроприемников для случаев их фактической загрузки, определяемой значением  $\beta^j$ , и 100%-ной загрузки (установленная мощность) соответственно.

Предположим, что в течение зимнего рабочего дня  $\beta^j$  для осветительных и обогревательных приборов, силовой и компьютерной нагрузок изменяется в следующих пределах:

$$\beta^{\text{сил}} = 0,8-1,0; \beta^{\text{осв}} = 0,132-1,0; \beta^{\text{обогр}} = 0-1,0; \beta^{\text{комп}} = 0-1,0.$$

Начальные ненулевые значения  $\beta^j$  для силовой и осветительной нагрузок определяются режимом работы силовых электроприемников здания и наличием нерабочего освещения коридоров и лестничных клеток соответственно. Тогда интегральный коэффициент загрузки всех электроприемников здания (коэффициент загрузки трансформатора)  $\beta = \sum_j S_{\beta}^j / \sum_j S_{100\%}^j = S_{\beta} / S_{\text{тр}}$  ( $S_{\beta}$  — суммарная мощность электроприемников здания, определяемая

#### 4.3. Моделирование и анализ влияния параметров нагрузочных режимов

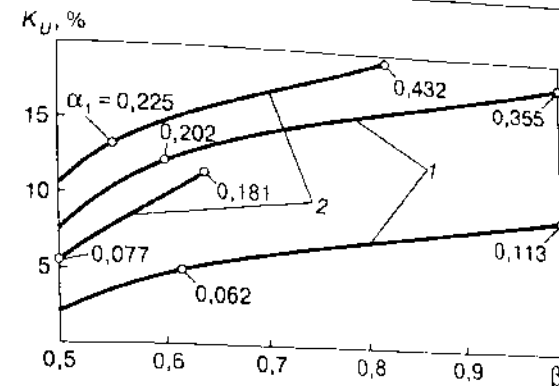


Рис. 4.6. Изменение  $K_U$  на зажимах наиболее удаленного электроприемника от  $\beta$  в течение зимнего (1) и летнего (2) рабочего дня

графиком нагрузок) при выбранной доле силовой нагрузки  $\gamma = 0,5$  будет изменяться от 0,43 до 1,0. При этом  $K_U$  на зажимах электроприемников, подключенных в любой точке электрической сети здания, будет изменяться от 0 до значения, определяемого долей нелинейной нагрузки во время зимнего вечернего максимума нагрузок рассматриваемой сети НН.

На рис. 4.6 кривые 1 показывают, как изменяется значение  $K_U$  на зажимах наиболее удаленного электроприемника сети НН с трансформатором мощностью 1000 кВ·А в течение зимнего рабочего дня. При этом нижняя кривая отражает изменение  $K_U$  от  $\beta$  для варианта, в котором во время вечернего максимума нагрузок, т. е. при  $\beta = 1,0$ , доля нелинейной нагрузки всей сети здания  $\alpha_1 = 0,113$ , а верхняя — для варианта, в котором при  $\beta = 1,0$ ,  $\alpha_1 = 0,355$ . Так как элементы сети рассчитывались, исходя из 100%-ной загрузки, то при уменьшении  $\beta$  увеличивается уровень фазного напряжения и, соответственно, изменяются амплитудные значения первых гармоник напряжения в нагрузочных узлах сети. Поэтому при построении рассматриваемых зависимостей для проведения сравнительного анализа высших гармоник при разных  $\beta$  значение  $K_U$  было приведено к первой гармонике соответствующего напряжения при  $\beta = 1,0$ .

Очевидно, что в течение рабочего дня значение  $\alpha_1$  изменяется в широких пределах, что вызвано непропорциональным изменением мощности подключаемых электроприемников отдельных групп. В частности, силовая нагрузка, которая является наиболее существенной линейной составляющей суммарной нагрузки сети здания, изменяется в течение рабочего дня незначительно, а не

линейная компьютерная нагрузка изменяется при этом в широких пределах. Например, при подключении третьей части электроприемников групповой сети и соответствующего приращения силовой нагрузки  $\alpha_1 = 0,062$  (нижняя кривая 1) и 0,202 (верхняя кривая 1). При этом  $K_U = 5,08\%$  и  $K_U = 12,06\%$  соответственно, что меньше на 4,06 и 6,26 % соответствующего  $K_U$  для вечернего максимума нагрузок. Реально можно ожидать в течение дня двукратного изменения значения  $K_U$  (при этом не рассматриваются кратковременные нагрузочные режимы).

Аналогично, если исключить из состава электроприемников, подключаемых в течение зимнего рабочего дня, нагрузку осветительную (за исключением освещения коридоров и лестничных клеток) и обогревательных приборов, можно смоделировать нагрузочные режимы летнего рабочего дня. При этом в течение летнего рабочего дня  $\beta^j$  для отдельных групп электроприемников будет изменяться в следующих пределах:

$$\beta^{\text{сдл}} = 0,8-1,0; \beta^{\text{осв}} = 0,132; \beta^{\text{обогр}} = 0; \beta^{\text{комп}} = 0-1,0.$$

Тогда  $\beta$  для рассматриваемых вариантов исполнения сети в течение летнего рабочего дня будет изменяться от 0,43 до 0,64 или 0,82 для вариантов сети НН, в которых во время зимнего вечернего максимума нагрузок  $\alpha_1 = 0,113$  или  $\alpha_1 = 0,355$  соответственно.

Очевидно, что в связи с отсутствием большей части осветительной, а также обогревательной нагрузки уменьшается линейная составляющая суммарной нагрузки сети здания, что приводит летом к увеличению  $\alpha_1$  по сравнению с соответствующими зимними нагрузочными режимами. Например, во время летнего вечернего максимума  $\alpha_1 = 0,181$  и  $\alpha_1 = 0,432$  соответственно. Назовем указанное увеличение  $\alpha_1$  скрытым увеличением доли нелинейной нагрузки, так как оно происходит из-за неравномерного подключения в течение суток отдельных групп электроприемников, а не увеличения установленной мощности нелинейных электроприемников здания.

На рис. 4.6 кривые 2 показывают, как изменяется значение  $K_U$  в течение летнего рабочего дня. При этом представленные кривые (верхняя и нижняя) отражают изменение  $K_U$  от  $\beta$  для тех же вариантов сети НН, что и кривые 1. Из рисунка видно, что при подключении третьей части электроприемников групповой сети и соответствующего приращения силовой нагрузки в обоих рассматриваемых вариантах ( $\alpha_1 = 0,077$  и 0,225 соответственно)  $K_U$  в

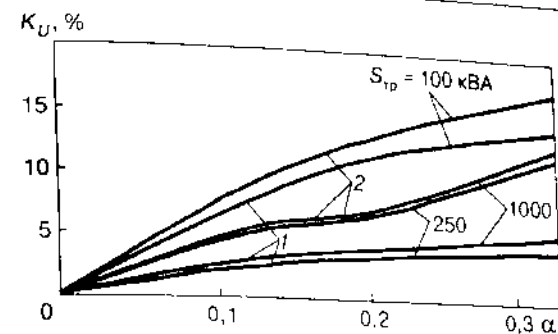


Рис. 4.7. Зависимости  $K_U$  на ГРЩ (1) и зажимах удаленного электроприемника (2) от  $\alpha_1$  при изменении мощности трансформатора и неизменной мощности нагрузки

два раза меньше соответствующих  $K_U$  при 100%-ном подключении электроприемников. Кроме того, следует отметить, что абсолютные значения высших гармоник напряжения рассматриваемой сети летом на 5–20 % больше соответствующих (по времени суток) значений высших гармоник напряжения для зимнего рабочего дня (большие значения приращения соответствуют меньшим значениям  $\alpha_1$ ). Данное обстоятельство можно объяснить отмеченным выше летним скрытым увеличением доли нелинейной нагрузки всей сети здания.

Таким образом, можно утверждать, что в течение рабочего дня в сети НН определенного исполнения значение  $K_U$  изменяется в широких пределах в зависимости от доли нелинейной нагрузки всей сети здания  $\alpha_1$ , которая определяется в конкретном нагрузочном режиме в соответствии с сезонным суточным графиком нагрузок.

Рассмотрим, как влияет на несинусоидальность напряжений изменение нагрузочного режима путем повышения мощности питающего трансформатора. При этом определим, является ли повышение мощности питающей сети эффективным способом снижения несинусоидальности напряжений в сетях НН. На рис. 4.7 показаны зависимости  $K_U$  на ГРЩ здания (кривые 1) и зажимах удаленного электроприемника групповой сети (кривые 2) от  $\alpha_1$  для вариантов исполнения сети с трансформаторами мощностью 100, 250 и 1000 кВ·А. При этом суммарная мощность электроприемников во всех рассматриваемых вариантах составляет 100 кВ·А, а значения  $K_U$  для сети с трансформаторами мощностью 250 и 1000 кВ·А приведены к первой гармонике соответствующих на-

пряжений сети с трансформатором мощностью 100 кВ·А. Из рисунка видно, что при использовании трансформатора мощностью 250 кВ·А  $K_U$  на ГРЩ уменьшается в 3,4—3,6 раза, а при использовании трансформатора мощностью 1000 кВ·А — в 2,7—2,9 раза по сравнению с использованием трансформатора мощностью 100 кВ·А. Полученные результаты показывают, что 10-кратное завышение мощности питающего трансформатора ( $S_{тр} = 1000$  кВ·А) может обеспечить значения  $K_U$  на вводе в здание, которые удовлетворяют требованиям ГОСТ 13109—97. Большой эффект по снижению  $K_U$  в сети с трансформатором мощностью 250 кВ·А можно объяснить его относительно небольшим сопротивлением нулевой последовательности по сравнению с трансформаторами мощностью 100 и 1000 кВ·А (см. параграф 4.2). В результате при использовании трансформатора мощностью 250 кВ·А снижение  $K_U$  происходит за счет как завышения мощности, так и уменьшения сопротивления нулевой последовательности питающего трансформатора.

Следует отметить, что при повышении мощности питающего трансформатора наряду со снижением продольного сопротивления питающей сети происходит увеличение абсолютных значений токов высших гармоник (особенно кратных трем) во всех элементах сети здания. Поэтому не происходит более ощутимое (в соответствии с кратностью завышения мощности трансформатора) снижение  $K_U$  на ГРЩ. По этой же причине еще меньшим является снижение  $K_U$  на зажимах электроприемников групповой сети. Из рис. 4.7 (кривые 2) видно, что упомянутый  $K_U$  при использовании трансформаторов завышенной мощности снижается меньше, чем в 2 раза. Это объясняется тем, что во всех рассматриваемых вариантах исполнения сети параметры стояков и линий групповой сети и, соответственно, их сопротивления остаются неизменными. В результате падения напряжения от токов высших гармоник в стояках и линиях групповой сети для вариантов с трансформаторами мощностью 250 и 1000 кВ·А будут больше, чем для варианта с трансформатором мощностью 100 кВ·А. Особенно сильно это проявляется при  $\alpha_1 > 0,25$  (при высоком уровне высших гармоник тока), когда снижение  $K_U$  на зажимах электроприемников групповой сети составляет только 30—40 % значения  $K_U$  при использовании трансформатора мощностью 100 кВ·А.

Кроме того, упомянутое увеличение уровня токов гармоник, кратных трем, приведет к увеличению тока в нулевом проводе се-

ти. Анализ полученных результатов показывает, что при использовании рассматриваемых трансформаторов завышенной мощности токи гармоник, кратных трем, увеличиваются в 1,5 раза по сравнению с соответствующими токами в сети с трансформатором мощностью 100 кВ·А. В результате ток в нулевой жиле кабеля стояка превышает 100—130 % (при разных значениях  $\alpha_1$ ) фазного тока кабеля стояка со всеми вытекающими отрицательными последствиями.

Таким образом, проведенный анализ показывает, что повышение мощности питающего трансформатора приводит с одной стороны, к некоторому снижению несинусоидальности напряжений на зажимах электроприемников, а с другой — к увеличению несинусоидальности токов в элементах сети НН. Поэтому принимать решение об использовании трансформатора завышенной мощности для снижения уровня высших гармоник следует в каждом конкретном случае с учетом имеющихся возможностей дополнительного применения других способов и средств решения указанной проблемы.

#### 4.4. Анализ несимметрии нелинейных электроприемников

Очевидно, что при насыщенности однофазными нелинейными электроприемниками в электрических сетях зданий очень часто возникает несимметрия высших гармоник тока и напряжения. Причем в процессе эксплуатации данных сетей трудно качественно оценить гармоническое содержание токов электрических нагрузок с точки зрения вызываемой ими указанной несимметрии. Местные организационные мероприятия по ее устранению ограничиваются количественным равномерным распределением потребителей по фазам и часто не приносят желаемого результата. Кроме того, предварительный анализ показывает, что в условиях несимметрии высших гармоник использование симметричных фильтрующих устройств для снижения уровня гармонических составляющих токов и напряжений в низковольтных сетях имеет свои особенности.

В связи с этим проведение исследований по определению причин возникновения, количественных характеристик и зависимостей параметров несимметрии высших гармоник от режимных сетевых параметров, а также установление ее последствий с точки зрения влияния на величину несинусоидальности и не-

симметрии напряжений в сетях НН представляет несомненный интерес. Дополнительным подтверждением актуальности указанных исследований является наличие работ, например [90, 103], в которых предлагается при разработке обоснованных рекомендаций по поддержанию уровней несимметрии и несинусоидальности учитывать их совместное влияние на различные виды электрооборудования.

Для проведения указанного анализа рассчитаем токи и напряжения в рассмотренных выше вариантах исполнения сети, но с учетом несимметричного подключения электропотребителей. При этом рассмотрим четыре случая возникновения несимметрии высших гармоник.

Случай 1. Предположим, что соотношение фазных нагрузок осветительной сети здания равно  $1 : 0,8 : 0,6$ . Следует отметить, что согласно [167] указанное соотношение является типичным для городских распределительных сетей НН. Хотя при этом нарушается известное нормативное требование о том, что нагрузки между фазами сети освещения общественных зданий должны распределяться равномерно. Согласно как разрабатываемых ДБН «Проектування електрообладнання житлових та громадських будинків і споруд», так и действующих ВСН 59-88 «Электрооборудование жилых и общественных зданий. Нормы проектирования» разница в токах наиболее и наименее нагруженных фаз не должна превышать 30 % в пределах одного щитка и 15 % — в начале питающих линий. В расчетной схеме замещения сети указанные нагрузочные соотношения моделируются соответствующим пропорциональным изменением параметров элементов нагрузки стояков и групповой сети в фазах *B* и *C*. С учетом того, что силовая нагрузка принимается симметричной, соотношение фазных нагрузок всей сети здания составляет  $1 : 0,9 : 0,8$ . При этом значение  $\alpha_1$  в каждой из трех фаз остается неизменным.

В результате проведенных расчетов токов первой и высших гармоник определено, что в рассматриваемом случае несимметрии высших гармоник при  $\alpha_1 = 0,116$  соотношение действующих значений первых гармоник токов стояка и внешней питающей линии

$$I_{2A(1)} : I_{2B(1)} : I_{2C(1)} = 0,98 : 0,83 : 0,62;$$

$$I_{IA(1)} : I_{IB(1)} : I_{IC(1)} = 0,98 : 0,92 : 0,83$$

(относительно первой гармоники соответствующего тока в симметричном режиме) примерно соответствует данному случаю не-

симметричного подключения нагрузок. Что касается аналогичных соотношений для высших гармоник тока, то говорить о соответствии не представляется возможным. Например, пятой, седьмой и девятой гармоник указанных токов третьей, зом:

$$I_{2A(3)} : I_{2B(3)} : I_{2C(3)} = 1,01 : 0,86 : 0,71;$$

$$I_{2A(5)} : I_{2B(5)} : I_{2C(5)} = 0,94 : 0,86 : 0,75;$$

$$I_{2A(7)} : I_{2B(7)} : I_{2C(7)} = 0,96 : 0,9 : 0,92;$$

$$I_{2A(9)} : I_{2B(9)} : I_{2C(9)} = 1,03 : 1,22 : 1,50;$$

$$I_{1A(3)} : I_{1B(3)} : I_{1C(3)} = 1,06 : 0,87 : 0,65;$$

$$I_{1A(5)} : I_{1B(5)} : I_{1C(5)} = 0,92 : 0,87 : 0,77;$$

$$I_{1A(7)} : I_{1B(7)} : I_{1C(7)} = 0,98 : 0,87 : 0,92;$$

$$I_{1A(9)} : I_{1B(9)} : I_{1C(9)} = 1,15 : 1,32 : 1,76.$$

Как и в случае первых гармоник тока высшие гармоники приведены к значениям токов соответствующих гармоник для симметричного режима. Амплитуды гармоник более высоких порядков при такой несимметрии изменяются в еще больших пределах по сравнению со случаем симметричных нагрузок.

Из приведенных результатов видно, что искажения синусоидальности кривых анализируемых токов наиболее загруженной фазы (на 100%) примерно соответствуют симметричному режиму рассматриваемого варианта исполнения сети. В то же время в двух других фазах с уменьшением загрузки значение указанных искажений, в основном, уменьшается. Очевидно, что закон изменения для разных гармоник различается и не соответствует закону изменения первой гармоники. В результате возникшей несимметрии высших гармоник ток в нулевом проводе содержит токи нулевой последовательности всего гармонического спектра. При этом токи гармоник, кратных трем, преобладают, хотя их значение существенно меньше (примерно на 20 %) утроенного тока указанных гармоник в симметричном режиме. Кроме того, в нулевом проводе протекает ток нулевой последовательности пер-

вой гармоники, значение которого приблизительно равно значению тока нулевого провода соответствующего несимметричного режима линейных электроприемников (около 12 % тока наиболее загруженной фазы для нулевого провода внешней питающей линии и около 30 % — для нулевой жилы кабеля стояка). При этом действующее значение тока в нулевом проводе незначительно увеличивается (примерно на 15 %) при существенном изменении формы его кривой по сравнению с симметричным режимом.

Очевидно, что при несимметричном подключении нелинейных электроприемников наряду с несимметрией токов первой и высших гармоник возникает несимметрия соответствующих напряжений. При этом, в первую очередь, происходит нарушение симметрии напряжений первых гармоник. В результате коэффициент несимметрии напряжения по нулевой последовательности на ГРЩ  $K_{0\text{н}}$  превышает 2 %, а соответствующий коэффициент напряжения на зажимах электроприемников групповой сети  $K_{0\text{зд}}$  — 4 %, т. е. значения, которые являются нормально и предельно допустимыми согласно ГОСТ 13109—97.

При возникшей существенной несимметрии напряжений первых гармоник фазные напряжения высших гармоник незначительно уменьшаются с уменьшением загрузки фазы. В целом в рассматриваемом случае несимметрии значение напряжения высших гармоник меньше, чем в соответствующем симметричном режиме. За счет уменьшения напряжения третьей гармоники (напряжения остальных гармоник возрастают)  $K_{\text{зд}}$  на 10—15 % меньше  $K_{\text{зд}}$  в случае симметричных нагрузок.

Следует отметить, что аналогичные расчеты были проведены для варианта исполнения сети, при котором  $\alpha_1 = 0,333$ . Полученные результаты показывают, что при увеличении  $\alpha_1$  изменяются лишь некоторые количественные характеристики несимметрии высших гармоник, касающиеся, в частности, изменения соотношений между токами нулевой последовательности первой и высших гармоник в сторону увеличения последних, а также относительного увеличения  $K_{\text{зд}}$ . В то же время установленные ранее общие зависимости и закономерности формирования искажений синусоидальности кривых токов и напряжений в условиях несимметрии нелинейных электроприемников остаются неизменными.

Таким образом, проведенный анализ показывает, что в случае несимметричного подключения нелинейных электроприемников возникает несимметричное изменение формы кривых

фазных токов. Указанное изменение происходит в соответствии с режимом работы конкретных нелинейных электроприемников под воздействием фазного напряжения, которое также изменяет свою форму. Очевидно, что изменения в искажении синусоидальности формы кривой фазного напряжения формируются не только за счет падения напряжения в фазных проводах, но и за счет падения напряжения в нулевом проводе. При этом ток в нулевом проводе существенно изменяет форму своей кривой вследствие несимметрии нелинейных нагрузок. В результате совместного воздействия и взаимного влияния указанных режимных параметров возникает несимметрия высших гармоник.

**Случай 2.** Предположим, что соотношения фазных нагрузок электрической сети здания такие, как в случае 1. Однако при этом уменьшения загрузки соответствующих фаз происходит за счет уменьшения только линейной составляющей фазной нагрузки, а именно, части осветительной нагрузки. В этом случае происходит отмеченное в параграфе 4.3 скрытое увеличение  $\alpha_1$  в двух фазах рассматриваемой сети, т. е.  $\alpha_{1A} = 0,116$ ;  $\alpha_{1B} = 0,129$ ;  $\alpha_{1C} = 0,144$ . В результате совместного воздействия двух факторов — несимметрии нелинейных нагрузок и скрытого увеличения  $\alpha_{1B}$  и  $\alpha_{1C}$  параметры несимметрии высших гармоник тока изменяются. При этом параметры несимметрии первых гармоник примерно соответствуют анализируемому случаю несимметричного подключения нагрузок. Соотношения действующих значений токов стояка и внешней питающей сети первой и определяющих высших гармоник, приведенных к значениям соответствующих токов в симметричном режиме, выглядят следующим образом:

$$I_{2A(1)} : I_{2B(1)} : I_{2C(1)} = 0,98 : 0,81 : 0,62;$$

$$I_{2A(3)} : I_{2B(3)} : I_{2C(3)} = 0,99 : 1,05 : 1,15;$$

$$I_{2A(5)} : I_{2B(5)} : I_{2C(5)} = 0,98 : 0,99 : 1,05;$$

$$I_{2A(7)} : I_{2B(7)} : I_{2C(7)} = 1,02 : 0,95 : 1,01;$$

$$I_{2A(9)} : I_{2B(9)} : I_{2C(9)} = 0,89 : 1,09 : 1,02;$$

$$I_{1A(1)} : I_{1B(1)} : I_{1C(1)} = 0,98 : 0,91 : 0,82;$$

$$I_{1A(3)} : I_{1B(3)} : I_{1C(3)} = 0,93 : 1,06 : 1,18;$$

$$I_{1A(5)} : I_{1B(5)} : I_{1C(5)} = 0,98 : 0,99 : 1,05;$$

$$I_{1A(7)} : I_{1B(7)} : I_{1C(7)} = 1,04 : 0,95 : 0,99;$$

$$I_{1A(9)} : I_{1B(9)} : I_{1C(9)} = 0,86 : 1,18 : 1,04.$$

Из приведенных результатов видно, что в рассматриваемом случае при уменьшении загрузки фазы и уменьшении токов первой гармоники искажения синусоидальности кривых фазных токов возрастают за счет увеличения  $\alpha_1$ . Особенно это касается токов гармоник, кратных трем, которые, как известно, определяют ток в нулевом проводе. В результате при сохранившемся в тех же пределах значении тока нулевой последовательности первой гармоники (12 и 30 % соответственно) ток в нулевом проводе внешней питающей сети увеличивается примерно до 20 %, а ток в нулевой жиле кабеля стояка — до 55 % соответствующего тока наиболее загруженной фазы.

В соответствии с несимметрией токов первых гармоник возникает несимметрия напряжений первых гармоник. В результате, как и в случае 1,  $K_{0U1}$  превышает 2 %, а  $K_{0U4}$  составляет примерно 4 %. При этом фазные напряжения высших гармоник при уменьшении загрузки фазы незначительно увеличиваются, причем  $K_{U4}$  на 4–7 % больше  $K_{U4}$  в случае симметричных нагрузок.

Таким образом, в рассмотренных случаях несимметрия высших гармоник возникает за счет как несимметрии фазных нагрузок, так и скрытого изменения значения  $\alpha$  в отдельных фазах по сравнению с симметричным режимом. Причем в случае 2 наблюдается увеличение  $K_U$  по сравнению с симметричным режимом. Очевидно, что количественные характеристики возможного увеличения  $K_U$  будут определяться параметрами несимметрии и распределением нелинейных электроприемников по фазам сети НН. В связи с этим, вызывают несомненный интерес случаи возникновения несимметрии высших гармоник при еще большем скрытом возрастании  $\alpha_1$ .

Рассмотрим еще два случая распределения нелинейных нагрузок по фазам при сохранении реальной ситуации подключения конкретных электроприемников к сети здания. В одном случае (случай 3) все нелинейные электроприемники подключены к двум фазам групповой сети, а в другом (случай 4) — только к одной, причем нагрузка распределена равномерно по фазам. Можно предположить, что такая ситуация вполне может возникнуть в процессе эксплуатации электрической сети здания.

При этом персонал, с одной стороны, борясь с несимметрией, не учитывает существующую нелинейность отдельных групп электроприемников, а с другой — возможно проявляя некомпетентность и старательно освобождая одну или даже две фазы от нелинейных электроприемников, безуспешно пытается добиться абсолютного отсутствия высших гармоник на каком-то отдельном участке сети НН. Следует отметить, что в первых двух рассмотренных случаях (случаи 1 и 2) возникновения несимметрии высших гармоник в первую очередь проявлялось влияние несимметрии на несинусоидальность. В то же время во вторых двух случаях (случаи 3 и 4) с учетом равномерного распределения нагрузки по фазам следует ожидать некоторое обратное влияние несинусоидальности на несимметрию.

**Случай 3.** Предположим, что к двум фазам подключаются компьютеры, принтеры, обогреватели и небольшая часть осветительной нагрузки, а к третьей фазе — только линейная осветительная нагрузка. При этом суммарная установленная мощность всех электроприемников и доля нелинейной нагрузки  $\alpha_1$  здания остались прежними. В результате указанного перераспределения электроприемников возрастает значение  $\alpha_1$  в соответствующих фазах. Например, при  $\alpha_1 = 0,116$   $\alpha_{1A} = \alpha_{1B} = 0,171$ , а при  $\alpha_1 = 0,333$   $\alpha_{1A} = \alpha_{1B} = 0,494$ , причем в обоих случаях  $\alpha_{1C} = 0$ .

Проведенные расчеты показывают, что в рассматриваемом случае возникает несимметрия токов первых гармоник по амплитуде (больше для  $\alpha_1 = 0,333$ ) и по фазе (больше для  $\alpha_1 = 0,116$ ). Это можно объяснить тем, что при условии одинаковой мощности, но при разной форме кривой ток первой гармоники линейной и нелинейной нагрузки различается. Кроме того, за счет возрастания  $\alpha_{1A}$  и  $\alpha_{1B}$  увеличиваются соответствующие токи высших гармоник (в 1,4–1,6 раза по сравнению с симметричным режимом), а токи высших гармоник в фазе С (при линейной нагрузке) составляют 40–60 % соответствующего значения симметричного режима. В результате ток в нулевом проводе со- симметричного режима. В результате ток в нулевом проводе первой гармоники (7- держит ток нулевой последовательности фазы для нулевого провода 10 % тока наиболее загруженной фазы для нулевого провода внешней питающей сети и 20–25 % — для нулевой жилы кабеля стояка), а также соответствующие токи высших гармоник, значение которых несколько меньше, чем в симметричном режиме. Тогда действующее значение тока в нулевом проводе при различном действующем гармоническом содержании примерно равно действующему значению соответствующего тока в случае симметричных нагрузок.

Несмотря на равномерное распределение электропотребителей по фазам за счет несимметрии токов первой и высших гармоник возникает несимметрия напряжений первых гармоник. В рассматриваемом случае  $K_{0U}$  в различных нагрузочных узлах электрической сети здания составляет 1–2 %. На рис. 4.8 показаны зависимости  $K_{U4}$  от  $\alpha_1$  в симметричном режиме (кривая 1) и при несимметрии высших гармоник (кривые 2). Из рисунка видно, что в фазе В (верхняя кривая 2) за счет увеличения  $\alpha_{1B}$   $K_{U4}$  возрастает на 6–8 %  $K_{U4}$  в симметричном режиме. Кроме того, в фазе С (нижняя кривая 2) при отсутствии нелинейных электроприемников возникают довольно значительные искажения синусоидальности кривой напряжения (при  $\alpha_1 > 0,15$   $K_{U4} > 8$  %).

Следует отметить, что увеличение  $K_{U4}$  в фазе А (В) происходит за счет увеличения напряжения гармоник, некратных трем (в 2–3 раза больше, чем в случае симметричных нагрузок), при почти неизменяющемся значении напряжений гармоник  $3k$ .

**Случай 4.** Рассматриваемый случай сосредоточения всей нелинейной нагрузки в одной фазе при условии симметричной 100%-ной загрузки фаз трансформатора возможен только при  $\alpha_1 \leq 0,176$ . Тогда, например, при  $\alpha_1 = 0,116$   $\alpha_{1A} = 0,34$ , а при  $\alpha_1 = 0,176$  (максимально возможное значение)  $\alpha_{1A} = 0,519$ , причем в обоих случаях  $\alpha_{1B} = \alpha_{1C} = 0$ .

В результате за счет увеличения  $\alpha_{1A}$  значение токов высших гармоник в фазе А увеличивается в 2–3 раза (в основном за счет гармоник, кратных трем) по сравнению с соответствующими симметричными режимами. Причем при  $\alpha_{1A} = 0,34$  ( $\alpha_1 = 0,116$ ) значение токов высших гармоник увеличивается в 1,4–1,6 раза по сравнению с симметричным режимом при  $\alpha_1 = 0,333$ . При этом в фазах В и С ток приобретает незначительные искажения ( $K_I$  составляет 3–5 %). За счет повышенной амплитуды токов первой гармоники в фазах с линейными электроприемниками возникает несимметрия токов первых гармоник. В связи с этим ток нулевой последовательности первой гармоники составляет 6–8 % тока наиболее загруженной фазы для нулевого провода внешней питающей сети и 15–20 % — для нулевой жилы кабеля стояка. Тогда с учетом токов высших гармоник действующее значение тока в нулевом проводе примерно равно действующему значению соответствующего тока в симметричном режиме.

Как в случае 3  $K_{0U}$  в разных узлах сети здания составляет 1–2 %. На рис. 4.9 показаны кривые, аналогичные кривым, приведенным на рис. 4.8. Из рисунка видно, что в фазе А (верхняя

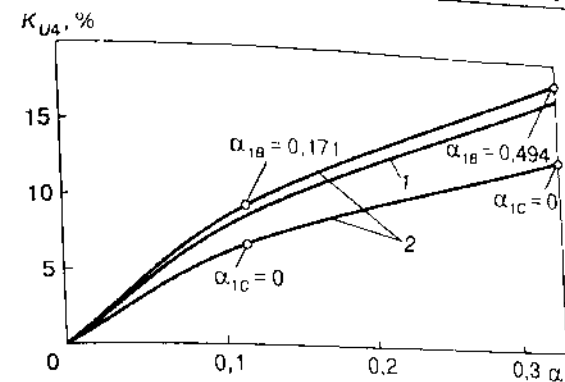


Рис. 4.8. Зависимости  $K_{U4}$  от  $\alpha_1$  в симметричном режиме (1) и при несимметрии высших гармоник (2). Случай 3

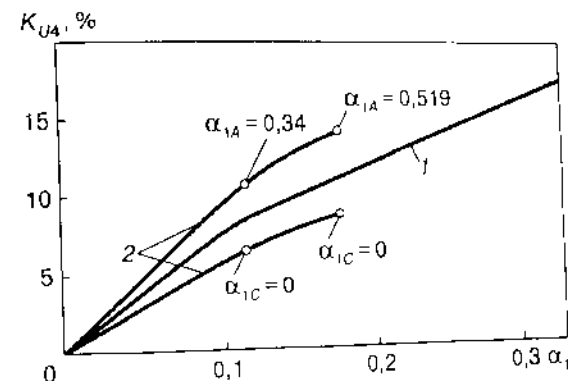


Рис. 4.9. Зависимости  $K_{U4}$  от  $\alpha_1$  в симметричном режиме (1) и при несимметрии высших гармоник (2). Случай 4

кривая 2)  $K_{U4}$  увеличивается на 20–25 % по сравнению с соответствующим  $K_{U4}$  в симметричном режиме. При этом в фазах В и С (нижняя кривая 2) при отсутствии нелинейных нагрузок возникает примерно одинаковая довольно значительная несинусоидальность напряжений (при  $\alpha_1 > 0,15$   $K_{U4} > 8$  %).

Таким образом, рассмотренные случаи возникновения несимметрии высших гармоник подтвердили тот факт, что при неравномерном распределении нелинейных потребителей по фазам может возникнуть существенное увеличение  $K_U$  (за счет скрытого увеличения  $\alpha_1$  в отдельных фазах) в различных узлах электрической сети здания. Очевидно, что в этом случае нарушение требований ГОСТ 13109–97 наступит при меньших значениях  $\alpha$ , чем

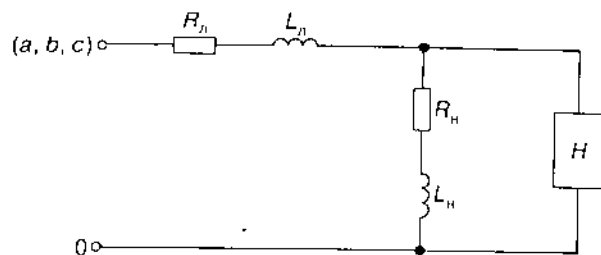


Рис. 4.11. Эквивалентная схема замещения нагрузочного узла подключения электроприемников групповой сети

$i_b, i_c$  — мгновенные значения фазных токов линейной составляющей нагрузки всего здания (для ГРЩ) или рассматриваемого стояка (для РЩ) соответственно;  $u_a, u_b, u_c$  — мгновенные значения фазных напряжений на ГРЩ или РЩ соответственно.

На рис. 4.11 приведена эквивалентная схема замещения, описав которую можно построить математические модели нагрузочных узлов подключения электроприемников (розеток) групповой сети. Здесь  $R_n, L_n$  — суммарные (фаза — нуль) активное сопротивление и индуктивность соответствующего участка линии групповой сети;  $R_n, L_n$  — активное сопротивление и индуктивность линейной составляющей нагрузки соответствующей группы электроприемников;  $H$  — нелинейная составляющая нагрузки соответствующей группы электроприемников.

Система дифференциальных уравнений, описывающих линейную часть данной схемы замещения, имеет следующий вид:

$$\begin{cases} u_{(a,b,c)} = R_n i_n + L_n \frac{di_n}{dt} + u_n; \\ u_n = R_n i_n + L_n \frac{di_n}{dt}, \end{cases} \quad (4.2)$$

где  $u_{(a,b,c)}$  — мгновенное значение фазного напряжения на РЩ (для ближней относительно РЩ розетки групповой сети) или в ближней относительно РЩ розетке (для более удаленной розетки) соответственно;  $i_n$  — мгновенное значение тока в головном участке линии групповой сети или в любом другом участке линии в соответствии с рассматриваемыми случаями;  $i_n$  — мгновенное значение тока линейной составляющей нагрузки соответствующей группы электроприемников;  $u_n$  — мгновенное значение фазного напряжения в соответствующих нагрузочных узлах групповой сети.

Отметим, что представленные схемы замещения и описывающие их уравнения очевидны; новизна же разработанных моделей определяется принципами их построения с учетом предложенных основных положений формирования искажения синусоидальности кривых напряжений в нагрузочных узлах, а также метода эквивалентирования нелинейных нагрузок и построения эквивалентных схем замещения сети НН. Нетрудно понять, что результаты расчета мгновенных значений фазных напряжений с помощью рассмотренных моделей нагрузочных узлов несколько неточны по сравнению с соответствующими результатами расчета с помощью математической модели низковольтной сети, учитывающей параметры упомянутых выше основных элементов электрической сети здания. Погрешность в расчетах возникает из-за эквивалентирования всей нагрузки здания, стояка или группы электроприемников в одном узле ГРЩ, РЩ или розетки соответственно. При таком эквивалентировании необходимо рассчитать суммарную мощность нагрузки рассматриваемого узла (с разделением линейной и нелинейной составляющей) и определить ее характерные параметры ( $R, L, C$ ) для учета в схеме замещения, пренебрегая при этом продольными сопротивлениями соответствующих элементов внутренней сети здания (в соответствии с основными положениями метода эквивалентирования нелинейных нагрузок).

Проведенный анализ показывает, что относительная погрешность при определении несинусоидальности фазных напряжений с помощью математических моделей нагрузочных узлов составляет 1–2 %. С одной стороны, такая погрешность не является большой с точки зрения разработки методик определения несинусоидальности напряжений в характерных узлах сети НН. С другой стороны, очевидным преимуществом математических моделей узлов является их простота, что позволяет легко перейти от анализа приведенных выражений к разработке упомянутых методик.

Проанализировав любое из трех последних уравнений системы (4.1) и второе уравнение системы (4.2), можно сделать вывод, что мгновенное значение фазного напряжения в любом нагрузочном узле низковольтной сети определяется сопротивлением и мгновенным значением тока линейной составляющей соответствующей нагрузки. Иными словами, значение несинусоидальности фазного напряжения в нагрузочных узлах сетей НН можно определить по значению несинусоидальности тока любого ли-



нейного электроприемника, включенного на фазное напряжение в рассматриваемом узле. Тогда с учетом зависимостей высших гармоник интересующих нас токов от конкретных параметров элементов сети и нагрузки, полученных в результате расчета с помощью точной математической модели, данное обстоятельство можно использовать для разработки методики определения несинусоидальности фазных напряжений в сетях НН.

Запишем выражение для несинусоидального тока линейной составляющей нагрузки произвольного узла в виде

$$i(t) = \sum_{n=1}^{\infty} [I'_{m(n)} \sin n\omega t + I''_{m(n)} \cos n\omega t],$$

где  $I'_{m(n)}$ ,  $I''_{m(n)}$  — амплитуды синусной и косинусной составляющей  $n$ -й гармоники тока. Тогда фазное напряжение соответствующего нагрузочного узла сети НН с учетом  $\frac{di(t)}{dt} = \sum_{n=1}^{\infty} [n\omega I'_{m(n)} \times \cos n\omega t - n\omega I''_{m(n)} \sin n\omega t]$  определяется выражением

$$\begin{aligned} u(t) &= R \sum_{n=1}^{\infty} [I'_{m(n)} \sin n\omega t + I''_{m(n)} \cos n\omega t] + \\ &+ n\omega L \sum_{n=1}^{\infty} [I'_{m(n)} \cos n\omega t - I''_{m(n)} \sin n\omega t] = \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} [RI'_{m(n)} - n\omega LI''_{m(n)}] \sin n\omega t + \sum_{n=1}^{\infty} [RI''_{m(n)} + n\omega LI'_{m(n)}] \cos n\omega t = \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} [U'_{m(n)} \sin n\omega t + U''_{m(n)} \cos n\omega t], \end{aligned}$$

где  $R$  и  $L$  — активное сопротивление и индуктивность линейной составляющей нагрузки рассматриваемого узла;  $U'_{m(n)}$  и  $U''_{m(n)}$  — амплитуды синусной и косинусной составляющей  $n$ -й гармоники фазного напряжения.

В результате амплитуду  $n$ -й гармоники фазного напряжения запишем так:

$$\begin{aligned} U_{m(n)} &= \sqrt{(U'_{m(n)})^2 + (U''_{m(n)})^2} = \\ &= \sqrt{[RI'_{m(n)} - n\omega LI''_{m(n)}]^2 + [RI''_{m(n)} + n\omega LI'_{m(n)}]^2} = \end{aligned}$$

$$= \sqrt{[R^2 + (n\omega L)^2] [(I'_{m(n)})^2 + (I''_{m(n)})^2]} = z_{(n)} I_{m(n)},$$

где  $z_{(n)}$ ,  $I_{m(n)}$  — модуль сопротивления и амплитуда тока  $n$ -й гармоники линейной составляющей нагрузки рассматриваемого узла.

Продолжим преобразования, для простоты оперируя действующими значениями токов и напряжений:

$$U_{(n)} = z_{(n)} I_{(n)} = z_{(1)} \sqrt{\cos^2 \varphi + n^2 \sin^2 \varphi} I_{(1)} = \frac{U_{(1)}}{I_{(1)}} \sqrt{\cos^2 \varphi + n^2 \sin^2 \varphi} I_{(1)}.$$

Здесь  $z_{(1)}$ ,  $I_{(1)}$ ,  $U_{(1)}$  — модуль сопротивления, действующие значения тока и напряжения первой гармоники линейной составляющей нагрузки;  $\cos \varphi$  — интегральный коэффициент мощности линейных электроприемников рассматриваемого узла.

Разделив левую и правую часть на  $U_{(1)}$  и обозначив  $\sqrt{\cos^2 \varphi + n^2 \sin^2 \varphi} = B_{(n)}$ , с учетом  $\frac{I_{(n)}}{I_{(1)}} = K_{I(n)}$  и  $\frac{U_{(n)}}{U_{(1)}} = K_{U(n)}$  по-

лучим

$$K_{U(n)} = B_{(n)} K_{I(n)}, \quad (4.3)$$

где  $K_{U(n)}$  и  $K_{I(n)}$  — коэффициенты  $n$ -й гармонической составляющей напряжения и тока линейной составляющей нагрузки рассматриваемого узла.

Таким образом, зная для конкретного нагрузочного режима значение  $\cos \varphi$  и  $K_{I(n)}$ , можно определить коэффициент искажения синусоидальности кривой фазного напряжения любого нагрузочного узла:

$$K_U = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} [K_{U(n)}]^2}.$$

Ранее было показано, что значение  $K_{I(n)}$  сети НН с конкретными параметрами зависит только от доли нелинейной нагрузки  $\alpha$ . Причем характер этих зависимостей весьма сложный, а закон изменения  $K_{I(n)}$  в зависимости от  $\alpha$  различается для разных гармоник. Используя результаты расчета  $K_{I(n)}$  с помощью точной математической модели, можно путем аппроксимации упростить указанные зависимости и выразить  $K_{I(n)}$  через  $\alpha$ .

Наиболее удобной представляется аппроксимация кривых отрезками прямых линий. При этом, с одной стороны, легче описать закон изменения линейных функций, а с другой — достигается достаточная для инженерных расчетов точность. Это позволило использовать выражение (4.3) для определения  $K_{U(n)}$  по известным проектным нагрузочным параметрам  $\cos\varphi$  и  $\alpha$ . При этом результаты расчета во всех вариантах не отличались от соответствующих результатов, полученных с помощью точной методики, более чем на 5 %.

С учетом изложенного выше в работе [45] предложена методика определения  $K_U$  характерных нагрузочных узлов электрической сети здания. При этом исходной является информация о наполнении помещений здания электроприемниками, очередности и типе их подключения (непосредственно к ГРЩ, РЩ или через розетки) и характеристика электроприемников (удельные параметры, единичная мощность,  $\cos\varphi$  и т.д.).

Для определения  $K_U$  ГРЩ необходимо предварительно определить следующие параметры.

1. Интегральный коэффициент мощности линейных электроприемников, подключенных к ГРЩ:

$$\cos \varphi_{\text{ГРЩ}} = \frac{P_{\text{ГРЩ}}}{S_{\text{ГРЩ}}},$$

где  $P_{\text{ГРЩ}}$  и  $S_{\text{ГРЩ}}$  — суммарная активная и полная мощность линейных электроприемников, подключенных к ГРЩ.

2. Коэффициент, определяющий соотношение между  $K_{U(n)}$  и  $K_{I(n)}$  линейной составляющей нагрузки ГРЩ:

$$B_{U(n)}^{\text{ГРЩ}} = \sqrt{\cos^2 \varphi_{\text{ГРЩ}} + n^2 \sin^2 \varphi_{\text{ГРЩ}}}.$$

3. Доля нелинейной нагрузки ГРЩ:

$$\alpha_1 = \frac{P_{\text{нл}}^{\text{ГРЩ}}}{P_{\Sigma}^{\text{ГРЩ}}},$$

где  $P_{\text{нл}}^{\text{ГРЩ}}$  и  $P_{\Sigma}^{\text{ГРЩ}}$  — активная мощность нелинейной составляющей нагрузки и суммарная активная мощность нагрузки ГРЩ.

4. Коэффициент третьей гармоники тока линейной составляющей нагрузки ГРЩ, %:

#### 4.5. Методика определения коэффициента искажения синусоидальности

$$K_{I(3)}^{\text{ГРЩ}} = \begin{cases} 32\alpha_1, & 0 < \alpha_1 \leq 0,2; \\ 4,6 + 9\alpha_1, & 0,2 < \alpha_1 < 0,4. \end{cases}$$

5. Коэффициент пятой гармоники тока линейной составляющей нагрузки ГРЩ, %:

$$K_{I(5)}^{\text{ГРЩ}} = \begin{cases} 4,15\alpha_1, & 0 < \alpha_1 \leq 0,1; \\ 0,315 + \alpha_1, & 0,1 \leq \alpha_1 < 0,2; \\ 0,555 - 0,2\alpha_1, & 0,2 \leq \alpha_1 < 0,4. \end{cases}$$

6. Коэффициент седьмой гармоники тока линейной составляющей нагрузки ГРЩ, %:

$$K_{I(7)}^{\text{ГРЩ}} = \begin{cases} 2,05\alpha_1, & 0 < \alpha_1 \leq 0,1; \\ 2,05, & 0,1 \leq \alpha_1 < 0,2; \\ 0,025 + 0,9\alpha_1, & 0,2 \leq \alpha_1 < 0,4. \end{cases}$$

7. Коэффициент девятой гармоники тока линейной составляющей нагрузки ГРЩ, %:

$$K_{I(9)}^{\text{ГРЩ}} = \begin{cases} 3,1\alpha_1, & 0 < \alpha_1 \leq 0,1; \\ 0,33 - 0,2\alpha_1, & 0,1 \leq \alpha_1 < 0,2; \\ 0,24 + 0,25\alpha_1, & 0,2 \leq \alpha_1 < 0,4. \end{cases}$$

8. Коэффициент  $n$ -й гармоники напряжения ГРЩ:

$$K_{U(n)}^{\text{ГРЩ}} = B_{U(n)}^{\text{ГРЩ}} K_{I(n)}^{\text{ГРЩ}}.$$

В результате проведенных расчетов можно определить

$$K_U^{\text{ГРЩ}} = (1,01 - 1,02) \sqrt{\sum_{n=3}^9 [K_{U(n)}^{\text{ГРЩ}}]^2}.$$

При этом коэффициент перед радикалом вводится для компенсации погрешности от неучета токов гармоник с  $n > 9$ .

Следует отметить, что  $K_U$  нагрузочных узлов РЩ и розеток групповой сети определяются аналогично. Различаться будут только выражения для определения  $K_{I(n)}$ .

1. Коэффициент третьей гармоники тока линейной составляющей нагрузки РЩ и розетки соответственно, %:

$$K_{I(3)}^{\text{РЩ}} = \begin{cases} 184,7\alpha_2, & 0 < \alpha_2 \leq 0,03; \\ 4,25 + 43\alpha_2, & 0,03 < \alpha_2 \leq 0,1; \\ 7,95 + 6,3\alpha_2, & 0,1 < \alpha_2 < 0,22, \end{cases}$$

$$K_{I(3)}^{\text{розет}} = \begin{cases} 710\alpha_3, & 0 < \alpha_3 \leq 0,01; \\ 5,1 + 200\alpha_3, & 0,01 < \alpha_3 \leq 0,03; \\ 10,4 + 25\alpha_3, & 0,03 < \alpha_3 < 0,18, \end{cases}$$

где  $\alpha_2 = \alpha_1 \alpha_{\text{РЩ}}$ ,  $\alpha_3 = \alpha_2 \alpha_{\text{розет}}$ ,  $\alpha_{\text{РЩ}} = \frac{P_{\text{НЛ}}^{\text{РЩ}}}{P_{\Sigma}^{\text{РЩ}}}$ ,  $\alpha_{\text{розет}} = \frac{P_{\text{НЛ}}^{\text{розет}}}{P_{\Sigma}^{\text{розет}}}$  ( $P_{\text{НЛ}}^{\text{РЩ}}$ ,  $P_{\Sigma}^{\text{РЩ}}$ ,

$P_{\text{НЛ}}^{\text{розет}}$  и  $P_{\Sigma}^{\text{розет}}$  — активная мощность нелинейной составляющей нагрузки и суммарная активная мощность нагрузки РЩ и розетки соответственно).

2. Коэффициент пятой гармоники тока линейной составляющей нагрузки РЩ и розетки соответственно, %:

$$K_{I(5)}^{\text{РЩ}} = \begin{cases} 22\alpha_2, & 0 < \alpha_2 \leq 0,03; \\ 0,62 + 1,4\alpha_2, & 0,03 < \alpha_2 \leq 0,1; \\ 0,92 - 1,6\alpha_2, & 0,1 < \alpha_2 < 0,22, \end{cases}$$

$$K_{I(5)}^{\text{розет}} = \begin{cases} 103\alpha_3, & 0 < \alpha_3 \leq 0,01; \\ 0,96 + 6,5\alpha_3, & 0,01 < \alpha_3 \leq 0,03; \\ 1,26 - 3,2\alpha_3, & 0,03 < \alpha_3 < 0,18. \end{cases}$$

3. Коэффициент седьмой гармоники тока линейной составляющей нагрузки РЩ и розетки соответственно, %:

$$K_{I(7)}^{\text{РЩ}} = \begin{cases} 9,7\alpha_2, & 0 < \alpha_2 \leq 0,03; \\ 0,29, & 0,03 < \alpha_2 \leq 0,1; \\ 0,22 + 0,75\alpha_2, & 0,1 < \alpha_2 < 0,22, \end{cases}$$

$$K_{I(7)}^{\text{розет}} = \begin{cases} 35\alpha_3, & 0 < \alpha_3 \leq 0,01; \\ 0,32 + 2,75\alpha_3, & 0,01 < \alpha_3 < 0,18. \end{cases}$$

#### 4.5. Методика определения коэффициента искажения синусоидальности

4. Коэффициент девятой гармоники тока линейной составляющей нагрузки РЩ и розетки соответственно, %:

$$K_{I(9)}^{\text{РЩ}} = \begin{cases} 15\alpha_2, & 0 < \alpha_2 \leq 0,03; \\ 0,48 - \alpha_2, & 0,03 < \alpha_2 \leq 0,1; \\ 0,38, & 0,1 < \alpha_2 < 0,22, \end{cases}$$

$$K_{I(9)}^{\text{розет}} = \begin{cases} 67\alpha_3, & 0 < \alpha_3 \leq 0,01; \\ 0,62 + 4,5\alpha_3, & 0,01 < \alpha_3 \leq 0,03; \\ 0,79 - 1,2\alpha_3, & 0,03 < \alpha_3 < 0,18. \end{cases}$$

Следует отметить, что данная методика применима для низковольтных сетей с трансформатором, обмотки которого соединены по схеме звезда—звезда с нулем, а также с соответствующими кабельными внешними и внутренними питающими линиями. При этом трансформатор должен быть загружен на 100 % своей мощности. В случае необходимости определения  $K_u$  в сети НН иного исполнения или в другом нагрузочном режиме необходимо вносить в данную методику изменения с учетом результатов, которые были получены в предыдущих параграфах. Предложенную методику можно использовать как на этапе проектирования, так и во время эксплуатации электрической сети жилого или общественного здания. В этом случае специалисты любого профиля и квалификации могут легко определить значение несинусоидальности фазных напряжений, не используя специальных средств измерения, а также точных физических и математических моделей проектируемых или эксплуатируемых сетей.

## СНИЖЕНИЕ УРОВНЯ ВЫСШИХ ГАРМОНИК В НИЗКОВОЛЬТНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

### 5.1. Средства снижения уровня высших гармоник в сетях низкого напряжения

В результате исследований, проведенных в настоящей работе, установлено, что в трехфазных четырехпроводных сетях при доле нелинейной нагрузки  $\alpha_1$  менее 12 % уже нарушаются требования ГОСТ 13109—97 к напряжениям высших гармоник. Для сравнения, анализ аналогичных результатов, полученных для трехпроводных сетей, показывает, что доля потребляемой преобразователями мощности не должна превышать 20—30 % мощности генератора (трансформатора) для обеспечения допустимых параметров КЭ [141, 208].

Для повышения суммарной установленной мощности нелинейной нагрузки сети НН при одновременном соблюдении требований к КЭ и обеспечении ЭМС электропотребителей необходимо выполнение ряда дополнительных мероприятий, которые более подробно рассмотрены ниже. При этом предлагается рассматриваемые мероприятия по уменьшению отрицательного влияния высших гармоник разделить на две группы.

1. Изменение условий распространения токов высших гармоник.

2. Минимизация уровня высших гармоник, генерируемых каждым электроприемником.

К первой группе, в первую очередь, относятся различные организационно-технические мероприятия. Например, в трехпроводных сетях применяется выделение нелинейной нагрузки на отдельные секции шин, электрическое удаление источника гармоник от шин системы путем увеличения сопротивления рассеивания выпрямительного трансформатора или включения дополнительных реакторов [24, 81] и т. д. В сетях НН одним из подобных методов решения проблемы роста уровня высших гармоник могут стать мероприятия (см. четвертую главу), направленные на снижение эквивалентного сопротивления нулевой последовательности сети. Однако в условиях эксплуатируемой элек-

трической сети объекта осуществлять такие мероприятия весьма затруднительно. Поэтому возникает необходимость в установке дополнительных технических средств снижения уровня высших гармоник в уже эксплуатируемую сеть.

При этом известно много способов, позволяющих понизить уровень гармоник тока [53, 94, 165]. Они могут быть разделены на пассивные и активные методы подавления гармоник с применением соответствующих корректирующих устройств. Это в основном различные пассивные и активные фильтры [53, 94].

Наибольшее распространение в низковольтных и высоковольтных сетях получили в настоящее время так называемые силовые резонансные фильтры [62, 145]. Эти фильтры обычно состоят из реакторов и конденсаторов, соединенных последовательно, параметры которых подбираются так, чтобы для выбранных частот выполнялся резонанс напряжений. Резонансный контур напряжения, как правило, выполняет двойную функцию [32, 57]. Во-первых, он генерирует на основной частоте реактивную мощность, что позволяет улучшить коэффициент мощности, во-вторых, — частично шунтирует высшие гармоники, на частоту которых он настроен. Следует отметить, что в настоящее время фильтры гармоник собираются также на базе батарей конденсаторов симметрирующих устройств. Такие фильтросимметрирующие устройства наряду со снижением несинусоидальности осуществляют симметрирование напряжений сети [52].

Главной особенностью применения фильтров высших гармоник в сетях НН является необходимость учета активных сопротивлений всего электрооборудования, подключенного к сети 0,38 кВ, соотношение эквивалентного реактивного и активного сопротивлений которой более, чем на порядок меньше соответствующего значения для сетей напряжением выше 1000 В. Как показали проведенные авторами статьи [55] расчеты, неучет активных сопротивлений сетей 0,38 кВ приводит к погрешностям в определении коэффициентов искажения синусоидальности кривой напряжения, достигающим в ряде случаев 50 %. В результате проведенных исследований было определено, что эффективность работы фильтра в сетях НН в значительной степени зависит от активного сопротивления его цепи. При этом значения соотношений активного сопротивления фильтра и питающей сети с нагрузкой накладывают ограничения на области целесообразного применения фильтров высших гармоник в сетях НН.

Пассивные фильтры обладают рядом серьезных недостатков, таких, как паразитное активное сопротивление; технологический

разброс значения емкости конденсатора и индуктивности реактора фильтра, а также изменение их значений в процессе эксплуатации и негативное влияние на переходные процессы в сети. Поэтому их использование часто не даст желаемого эффекта [183].

В связи с этим представляет несомненный интерес информация о совместной разработке Института электродинамики НАН Украины и каналской компании «MIRUS Int. Corporation». В работе [26] сообщается о создании «Universal Harmonic Mitigator (UHM)», представляющего собой пассивную трехфазную электрическую цепь, эффективно снижающую уровень гармоник, генерируемых в сеть выпрямителями, в частности, систем регулируемого электропривода. В ряде случаев, когда имеется большое количество однотипных нагрузок (например, персональных компьютеров), которые можно распределить равномерно между фазами питающего трансформатора, подавление высших гармоник можно осуществить, используя принцип сдвига по фазе гармоник в различных вторичных обмотках специального трансформатора в целях их взаимного уничтожения [199]. Обобщению теории и практики таких устройств подавления высших гармоник тока и принципов их построения посвящена работа [126].

Следует отметить, что главная особенность современных фильтров — это их многофункциональность, т.е. позитивное воздействие на несколько параметров КЭ систем электроснабжения [144, 167, 186]. Так, фильтрокомпенсирующие устройства на базе простых режекторных или сложных комбинированных фильтров обеспечивают фильтрацию высших гармоник и компенсацию реактивной мощности. Еще более широкими возможностями обладают активные и гибридные фильтры.

Применение силовых активных фильтров [59, 78, 110, 143, 144, 146] позволяет устранить недостатки, характерные для резонансных фильтров. Силовой активный фильтр представляет собой дополнительный источник токов высших гармоник, равных по амплитудному значению и противоположных по фазе токам высших гармоник нелинейной нагрузки. При этом активный фильтр подключается к узлам питающей сети параллельно нелинейной нагрузке и осуществляет компенсацию генерируемых ею токов высших гармоник. Одновременно происходит компенсация мощности искажения, определяемой высшими гармониками нелинейной нагрузки, поэтому подобные устройства часто называют компенсаторами или корректорами мощности искажения.

Основные типы активных корректоров искажений рассмотрены в обзоре [186]. Отметим, что к 1990 г. XX века, когда был сделан этот обзор, работы находились на стадии экспериментальных образцов и не вышли за пределы научных лабораторий. В настоящее время только в США эти устройства находятся в номенклатуре около 200 промышленных компаний. Необходимо указать, что в отличие от резонансных фильтров силовые активные фильтры позволяют:

- производить одновременную компенсацию нескольких высших гармоник, что приводит к существенному улучшению массогабаритных показателей аппаратуры;

- осуществлять эффективную компенсацию высших гармоник независимо от колебаний их амплитуд и частот, при этом не требуется дополнительная подстройка элементов фильтра;

- наращивать мощность компенсации до требуемого уровня за счет параллельного подключения идентичных активных фильтров.

Вместе с тем при использовании активных фильтров необходимо учитывать, что их применение наряду со значительным ослаблением амплитуд высших гармоник расширяет их частотный спектр за счет гармоник, генерируемых самим корректором. Как правило, для ослабления этих гармоник достаточно включить небольшую емкость параллельно его входу, однако в некоторых случаях требуется применение более сложных фильтров радиопомех.

Кроме того, поскольку резонансные явления в системе возникают на одной или нескольких частотах, то необходимость фильтрации во всем диапазоне, возможная при использовании активных фильтров-преобразователей с импульсной модуляцией, позволяющих реализовывать управляемые по требуемому закону источники тока или источники напряжения, отсутствует. Поэтому установка активного фильтра в этом случае экономически нецелесообразна. Таким образом, для устранения резонансных явлений в СЭС наиболее перспективным является использование так называемых гибридных фильтров. При этом гибридный фильтр представляет собой комбинацию пассивного и активного фильтра, тем самым, объединяя их преимущества — высокое качество фильтрации и невысокую стоимость [142, 207].

Очевидно, что все рассмотренные фильтрующие устройства представляют собой дополнительное оборудование по обеспечению КЭ (с дополнительными капитальными вложениями, потреблением электроэнергии, эксплуатационными затратами и т.д.). По-

этому в ряде случаев их применение с экономической точки зрения оказывается нецелесообразным, так как затраты на их установку и эксплуатацию могут превышать убытки от понижения КЭ. Следовательно, одним из наиболее перспективных путей решения проблемы высших гармоник является метод, не связанный с применением дополнительных устройств. При таком подходе положительный эффект достигается за счет совершенствования схемотехнических решений и конструкции нелинейных нагрузок электрических сетей. В первую очередь это относится к устройствам преобразовательной техники, которые, как известно, являются главным источником высших гармоник в современных СЭС. Поэтому совершенствование принципов их построения с точки зрения решения проблемы улучшения ЭМС потребителей с питающей сетью является актуальной научно-технической задачей. При этом осуществляется минимизация уровня высших гармоник, генерируемых каждым электроприемником, что относится ко второй группе мероприятий по уменьшению отрицательного влияния высших гармоник.

Нетрудно понять, что лучше устранять причины появления высших гармоник, чем бороться с их последствиями. Существует технология преобразования параметров электроэнергии, которая не вызывает искажений. Суть этой технологии заключается во введении индуктивности во входную цепь источника электропитания и принудительном формировании кривой потребляемого от сети тока, совпадающего по фазе и форме с питающим напряжением. В середине 80-х годов XX века работы по созданию подобных источников электропитания проводились практически во всех промышленно развитых странах [173, 196, 202, 213, 214, 218, 219]. Отметим, что в Украине подобные работы проводятся с 1984 г. в Институте электродинамики НАН Украины и были начаты по инициативе академика А.К. Шидловского [114, 132, 133, 138, 160]. В результате проведения этих работ были созданы выпрямители, у которых коэффициент искажения синусоидальности кривой потребляемого тока находится в пределах 2—3 %, чем достигается практически идеальная ЭМС преобразователя с питающей сетью [160].

Очевидно, что исключение «искажающих» энергопотребителей, генерирующих реактивную мощность и высшие гармоники, является наиболее перспективным направлением повышения КЭ в электрических сетях. Технически это возможно осуществить за счет широкого использования выпрямителей с принудительным формированием кривой входного тока (с улучшенной ЭМС). По эконо-

мическим показателям такие выпрямители не дороже любых других стабилизированных выпрямителей. Однако реальная ситуация, существующая в распределительных сетях НН, далека от совершенства. Несмотря на все ограничения и запреты, устанавливаемые действующими стандартами, найдется тысяча причин, по которым уже разработанные «искажающие» потребители нецелесообразно модернизировать и необходимо продолжать эксплуатировать.

Поэтому в электрических сетях пока осуществляются выборочные мероприятия по снижению уровня высших гармоник с применением дополнительных технических средств. При этом известно, что для электроснабжения наиболее чувствительного к снижению КЭ электронного оборудования (вычислительные комплексы, автоматизированные системы управления, телевизионные комплексы, цифровые датчики и т. п.) в ряде случаев применяют источники бесперебойного питания (ИБП). Очевидно, что подобные устройства комплексно решают задачи обеспечения ЭМС в сети, но их применение не всегда оправдано по экономическим соображениям (цена наиболее совершенных ИБП составляет примерно 500—700 дол. за 1 кВт установленной мощности). В связи с этим в низковольтных сетях с нелинейными электроприемниками целесообразно применение современных фильтрующих устройств, осуществляющих эффективную фильтрацию высших гармоник в широком спектре частот. Одним из преимуществ данных устройств, например, по сравнению с преобразователями с улучшенной ЭМС является то, что их установку можно как предусмотреть на этапе проектирования, так и осуществить при строительстве или во время эксплуатации электрической сети здания.

В заключение следует отметить, что рекомендации по использованию способов и средств обеспечения ЭМС должны базироваться на анализе процессов в электрической сети конкретного объекта. При этом практический интерес представляют анализ эффективности применения технических средств повышения КЭ и разработка научно обоснованных рекомендаций по организации самой распределительной сети НН.

## 5.2. Синтез схем корректирующих устройств для трехфазных четырехпроводных сетей

Технические средства снижения отрицательного влияния высших гармоник на питающую сеть при подключении однофазных выпрямителей рассмотрены, в частности, в работах [2, 116]. В ра-

боте [116] теоретически обоснована возможность существования и синтезирована схема реактивного четырехполюсника, обеспечивающего синусоидальный входной ток указанного выпрямителя. В работе [2] с практической точки зрения рассмотрены различные варианты включения фильтрующих и других вспомогательных устройств в однофазных схемах питания частотно-регулируемых электроприводов. При этом использование сопрягающего устройства в виде разделительного трансформатора позволяет существенно улучшить КЭ, что проявляется в снижении  $K_f$  и действующего значения потребляемого тока, а также увеличении коэффициента мощности.

Несмотря на эффективность данных устройств, отметим, что они являются индивидуальными средствами снижения уровня высших гармоник и в условиях насыщенности однофазными нелинейными электроприемниками не могут рассматриваться в качестве средства обеспечения ЭМС потребителей сетей НН. Поэтому представляется целесообразной и в настоящее время имеет преимущественное распространение фильтрация высших гармоник путем подключения корректирующих устройств к характерным нагрузочным узлам низковольтной электрической сети. При этом проведенные в предыдущих главах исследования показали, что для эффективного снижения несинусоидальности фазных напряжений указанные устройства должны, в первую очередь, минимизировать напряжение гармоник, кратных трем (нулевой последовательности).

В работе [119] рассмотрен общий подход к синтезу схем симметрирования системы напряжений в трехфазных четырехпроводных сетях. Известно, что несимметрия напряжений по нулевой последовательности однозначно определяется напряжением нулевой последовательности, и при равенстве нулю последнего указанная несимметрия напряжений равно нулю [167]. Включим в электрическую сеть, состоящую из источника электрической энергии и нагрузки (Н) корректирующее устройство (КУ) (рис. 5.1), содержащее реактивные элементы, т.е. элементы без потерь энергии.

При этом геометрическая структура корректирующего устройства характеризуется тем, что КУ подключают к трем фазам питающей сети и к нулевому проводу. Поэтому его можно рассматривать как четырехполюсник с заданными парными зажимами для присоединения источника электрической энергии и нагрузки, который описывается системой уравнений

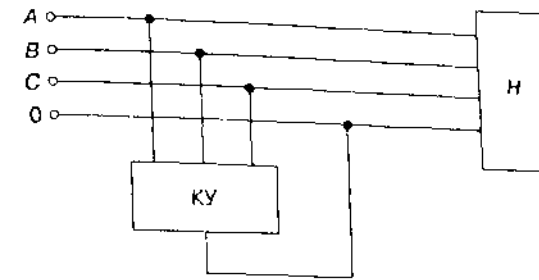


Рис. 5.1. Схема подключения корректирующего устройства

$$\begin{aligned} L_{11}\ddot{q}_1(t) + L_{12}\ddot{q}_2(t) + L_{13}\ddot{q}_3(t) + D_{11}q_1(t) + D_{12}q_2(t) + D_{13}q_3(t) &= u_A(t); \\ L_{12}\ddot{q}_1(t) + L_{22}\ddot{q}_2(t) + L_{23}\ddot{q}_3(t) + D_{12}q_1(t) + D_{22}q_2(t) + D_{23}q_3(t) &= u_B(t); \\ L_{13}\ddot{q}_1(t) + L_{23}\ddot{q}_2(t) + L_{33}\ddot{q}_3(t) + D_{13}q_1(t) + D_{23}q_2(t) + D_{33}q_3(t) &= u_C(t), \end{aligned} \quad (5.1)$$

где  $L_{ij}$  и  $D_{ij}$  ( $j = 1, 2, 3$ ) — суммарная индуктивность и обратная емкость всех элементов, входящих в  $j$ -й контур;  $L_{ij}$  и  $D_{ij}$  ( $i \neq j = 1, 2, 3$ ) — суммарные индуктивность и обратная емкость, входящие одновременно в  $i$ -й и  $j$ -й контуры (при этом индуктивность  $L_{ij}$  должна учитывать взаимоиндуктивную связь  $i$ -го и  $j$ -го контуров цепи);  $u_A(t)$ ,  $u_B(t)$  и  $u_C(t)$  — мгновенные значения фазных напряжений;  $q_k = \int i_k(t)dt$  — импульс тока  $i_k(t)$ ;  $\ddot{q}_k = di_k/dt$  ( $k = 1, 2, 3$ ).

Ставится задача симметрирования системы напряжений, т.е. требуется, чтобы напряжение нулевой последовательности

$$u_0(t) = \frac{1}{3}[u_A(t) + u_B(t) + u_C(t)] = 0. \quad (5.2)$$

Подставив выражения для фазных напряжений из (5.1) в равенство (5.2), имеем

$$\begin{aligned} (L_{11} + L_{12} + L_{13})\ddot{q}_1(t) + (L_{12} + L_{22} + L_{23})\ddot{q}_2(t) + \\ + (L_{13} + L_{23} + L_{33})\ddot{q}_3(t) + (D_{11} + D_{12} + D_{13})q_1(t) + \\ + (D_{12} + D_{22} + D_{23})q_2(t) + (D_{13} + D_{23} + D_{33})q_3(t) = 0. \end{aligned} \quad (5.3)$$

Равенство (5.3) является условием симметрии системы напряжений трехфазной системы по нулевой последовательности, которое определяется параметрами КУ и режимными параметрами  $q_1, q_2, q_3, \dot{q}_1, \dot{q}_2$  и  $\dot{q}_3$ .

Предполагаем в уравнении (5.1) функции  $u_A(t)$ ,  $u_B(t)$  и  $u_C(t)$  синусоидальными с частотой  $\omega$ . Учитывая, что  $L_{ij}$  и  $D_{ij}$  ( $i, j = 1, 2, 3$ ) являются постоянными, получаем функции  $q_k(t)$ , которые также будут синусоидальными с частотой  $\omega$ . Из этого следует, что

$$\ddot{q}_k(t) = -\omega^2 q_k(t). \quad (5.4)$$

С учетом (5.4) равенство (5.3) принимает вид

$$\begin{aligned} & [D_{11} + D_{12} + D_{13} - \omega^2(L_{11} + L_{12} + L_{13})]q_1(t) + \\ & + [D_{12} + D_{22} + D_{23} - \omega^2(L_{12} + L_{22} + L_{23})]q_2(t) + \\ & + [D_{13} + D_{23} + D_{33} - \omega^2(L_{13} + L_{23} + L_{33})]q_3(t) = 0. \end{aligned}$$

Поскольку требуется параметрическое симметрирование, т.е. обеспечение равенства нулю напряжения нулевой последовательности независимо от режимных параметров  $q_1(t)$ ,  $q_2(t)$  и  $q_3(t)$  для всего периода изменения времени  $t$ , то имеем

$$\begin{aligned} D_{11} + D_{12} + D_{13} - \omega^2(L_{11} + L_{12} + L_{13}) &= 0; \\ D_{12} + D_{22} + D_{23} - \omega^2(L_{12} + L_{22} + L_{23}) &= 0; \\ D_{13} + D_{23} + D_{33} - \omega^2(L_{13} + L_{23} + L_{33}) &= 0. \end{aligned} \quad (5.5)$$

Введем обозначение

$$Z_{ij} = D_{ij} - \omega^2 L_{ij}. \quad (5.6)$$

Тогда уравнения (5.5) запишем в виде

$$Z_{11} + Z_{12} + Z_{13} = 0; Z_{12} + Z_{22} + Z_{23} = 0; Z_{13} + Z_{23} + Z_{33} = 0. \quad (5.7)$$

Эти уравнения являются условиями обеспечения параметрического симметрирования по нулевой последовательности системы напряжений. Воспользуемся ими для синтеза схем КУ.

## 5.2. Синтез схем корректирующих устройств для трехфазных сетей

Рассмотрим наиболее простую схему КУ с электрическими связями (рис. 5.2). Для нее имеем

$$\begin{aligned} Z_{11} &= Z_A + Z_0; Z_{22} = Z_B + Z_0; Z_{33} = Z_C + Z_0; \\ Z_{12} &= Z_{13} = Z_{23} = Z_0. \end{aligned} \quad (5.8)$$

Уравнения (5.7) с учетом соотношений (5.8) принимают вид

$$\begin{aligned} Z_A + 3Z_0 &= 0; Z_B + 3Z_0 = \\ &= 0; Z_C + 3Z_0 = 0, \end{aligned} \quad (5.9)$$

или с учетом (5.6) получим

$$\begin{aligned} D_A - \omega^2 L_A + 3D_0 - 3\omega^2 L_0 &= 0; \\ D_B - \omega^2 L_B + 3D_0 - 3\omega^2 L_0 &= 0; \\ D_C - \omega^2 L_C + 3D_0 - 3\omega^2 L_0 &= 0. \end{aligned} \quad (5.10)$$

Для упрощения принимаем

$$D_A = D_B = D_C = D; L_A = L_B = L_C = L. \quad (5.11)$$

Тогда (5.10) сводится к одному уравнению:

$$D + 3D_0 = \omega^2(L + 3L_0). \quad (5.12)$$

Поскольку физическая реализуемость предполагает, что  $L$  и  $D$  должны быть больше нуля, то из уравнения (5.12) получаем равенства

$$D = \frac{1}{C} = 3\omega^2 L_0; \quad (5.13)$$

$$3D_0 = \frac{3}{C_0} = 3\omega^2 L. \quad (5.14)$$

В соответствии с соотношениями (5.11)–(5.14) простейшие схемы КУ состоят из трех емкостных и трех индуктивных эле-

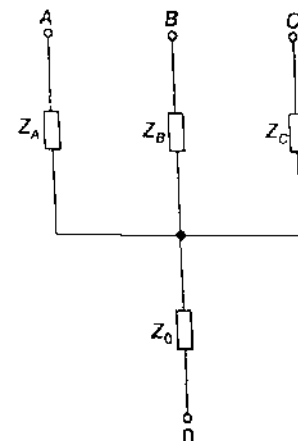


Рис. 5.2. Схема КУ с электрическими связями



ментов, соединенных в «звезду», к общей точке которых присоединен индуктивный или емкостной элемент соответственно с проводимостью в три раза большей, чем проводимость каждого из трех элементов. Целесообразность применения индуктивно-емкостных устройств симметрирования системы напряжений в значительной степени определяется условием компенсации реактивной мощности сети.

Система уравнений (5.1), которая описывает состояние КУ для случая схемы с электромагнитными связями между элементами, будет иметь вид

$$\begin{aligned} L_{11}\ddot{q}_1(t) + L_{12}\ddot{q}_2(t) + L_{13}\ddot{q}_3(t) &= u_A(t); \\ L_{12}\ddot{q}_1(t) + L_{22}\ddot{q}_2(t) + L_{23}\ddot{q}_3(t) &= u_B(t); \\ L_{13}\ddot{q}_1(t) + L_{23}\ddot{q}_2(t) + L_{33}\ddot{q}_3(t) &= u_C(t). \end{aligned} \quad (5.15)$$

Для обеспечения симметрирования системы напряжений, т.е. выполнения условия (5.2), из уравнений (5.15) имеем

$$\begin{aligned} (L_{11} + L_{12} + L_{13})\frac{di_1(t)}{dt} + (L_{12} + L_{22} + L_{23})\frac{di_2(t)}{dt} + \\ + (L_{13} + L_{23} + L_{33})\frac{di_3(t)}{dt} = 0. \end{aligned}$$

В этом случае на функции токов  $i_k(t)$  не накладываются особые ограничения, исключая отсутствие разрывов непрерывности и гладкости. Это обеспечит существование производных функций токов. Для того чтобы осуществлялось параметрическое симметрирование системы напряжений независимо от токов  $i_k(t)$  и их производных  $di_k(t)/dt$  при всех значениях времени  $t$ , необходимо выполнение условий

$$L_{11} = -L_{12} - L_{13}; \quad L_{22} = -L_{12} - L_{23}; \quad L_{33} = -L_{13} - L_{23}. \quad (5.16)$$

Рассмотрим наиболее простой случай, когда

$$L_{12} = L_{13} = L_{23} = -M. \quad (5.17)$$

Тогда из соотношений (5.16) имеем

$$L_{11} = L_{22} = L_{33} = 2M. \quad (5.18)$$

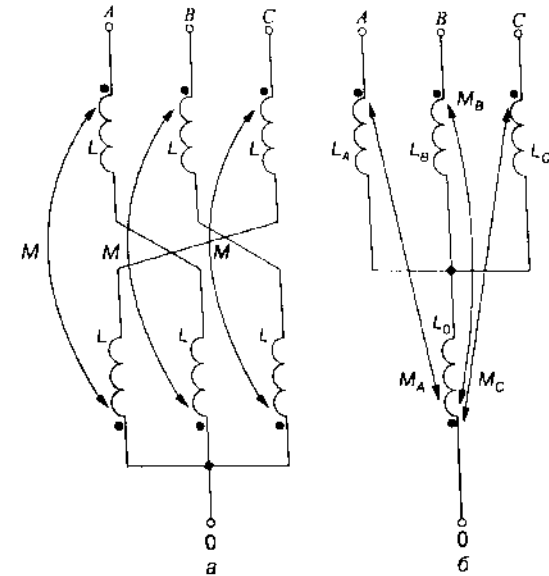


Рис. 5.3. Схемы КУ с электромагнитными связями: а — встречный зигзаг; б — звезда с нулевой обмоткой

С учетом (5.17) и (5.18) уравнение (5.15) для рассматриваемой схемы КУ принимает вид

$$\begin{bmatrix} u_A(t) \\ u_B(t) \\ u_C(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2M & -M & -M \\ -M & 2M & -M \\ -M & -M & 2M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} di_1/dt \\ di_2/dt \\ di_3/dt \end{bmatrix}.$$

Из этого уравнения следует, что схема КУ представляет собой схему с электромагнитными связями, в которой потоки самоиндукции и взаимной индукции направлены встречно (например, рис. 5.3,а). Устройство, реализующее эту схему, выполняется на трехстержневом магнитопроводе с полуобмотками, соединенными по схеме встречный зигзаг (коэффициент трансформации равен 1).

При определенных соотношениях между параметрами  $L_A$ ,  $L_B$ ,  $L_C$ ,  $L_0$ ,  $M_A$ ,  $M_B$ ,  $M_C$  параметрическое симметрирование системы трехфазных напряжений обеспечивает схема, показанная на рис. 5.3,б. Устройство, реализующее эту схему, представляет собой четырехстержневой трансформатор с пространственным магнито-



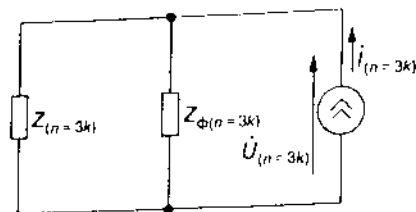


Рис. 5.5. Схема замещения сети с источником тока  $n$ -й гармоники ( $n = 3k$ ) при подключении фильтра

$$U_{(n=3k)} = 0. \quad (5.19)$$

На рис. 5.5 показана однолинейная схема замещения сети с источником тока  $n$ -й гармоники для гармоник, кратных трем. Здесь  $Z_{(n=3k)}$  и  $Z_{\Phi(n=3k)}$  — эквивалентное сопротивление сети и фильтра для гармоник, кратных трем. Из рисунка видно, что для выполнения условия (5.19) необходимо, чтобы  $Z_{\Phi(n=3k)} = 0$ . Иными словами, для эффективной фильтрации высших гармоник в сетях НН необходимо использовать устройства с малым сопротивлением для токов гармоник, кратных трем. Очевидно, что указанному требованию в полной мере соответствуют электромагнитные фильтры, синтез схем которых был проведен в предыдущем параграфе. В связи с этим возникает задача разработки схемы замещения упомянутых фильтров для использования ее в развернутой схеме замещения сети.

Как было показано в третьей главе, в схеме замещения элементы сети и нагрузки представляются соответствующими сопротивлениями, а процессы в моделируемой сети НН описываются очевидными системами дифференциальных уравнений. Решая тем или иным методом эти дифференциальные уравнения, можно найти все токи и напряжения данной сети, причем расчет проводится на основной частоте. В то же время, рассматриваемые фильтры, из-за своих конструктивных особенностей, должны иметь сопротивление на частотах гармоник, кратных трем, очень малое, а на частотах гармоник, не кратных трем, очень большое. Поэтому представление такого фильтра в схеме замещения в виде сочетания активных и реактивных элементов, а также его математическое описание — очень непростая задача.

Решить эту задачу позволяют возможности, которые предоставляет компьютерная программа схемотехнического моделирования PSpice. Предположим, что фильтр Ф1 осуществляет успешную фильтрацию токов гармоник, кратных трем, в нагрузочном узле ГРЩ. Тогда мгновенные значения фазных токов рассматриваемого фильтра представим в форме

$$i_1^{\Phi 1} = i_2^{\Phi 1} = i_3^{\Phi 1} = k \frac{i_1' + i_2' + i_3' + i_5 + i_6 + i_7}{3}, \quad (5.20)$$

где  $i_1', i_2', i_3', i_5, i_6, i_7$  — мгновенные значения фазных токов нагрузки Н1 и стояка соответственно;  $k$  — коэффициент, учитывающий неидеальность элементов фильтра. Аналогично мгновенные значения фазных токов фильтра Ф2 имеют вид

$$i_5^{\Phi 2} = i_6^{\Phi 2} = i_7^{\Phi 2} = k \frac{i_5' + i_6' + i_7' + i_9 + i_{10} + i_{11}}{3}, \quad (5.21)$$

где  $i_5', i_6', i_7', i_9, i_{10}, i_{11}$  — мгновенные значения фазных токов нагрузки Н2 и головных участков линий, отходящих от РЩ, соответственно.

Программа PSpice среди прочих содержит в библиотеке моделей электрических компонентов модель аналогового компонента «источник тока, управляемый током». Подключив на рабочем поле построения модели данные компоненты к интересующим нас нагрузочным узлам схемы замещения сети НН и описав их (компоненты) соответствующим образом, можно реализовать выражения (5.20) и (5.21). Таким образом, мы получаем имитационную модель фильтрации токов высших гармоник для трехфазных четырехпроводных сетей с помощью фильтров токов гармоник нулевой последовательности.

Следует отметить, что входное сопротивление нулевой последовательности рассматриваемого фильтра, составленного из идеальных элементов, равно нулю, что при моделировании соответствует  $k = 1$ . Однако, на практике элементы фильтра с электромагнитными связями обладают активными сопротивлениями обмоток и сопротивлением рассеяния, т.е.  $k < 1$ . Опыт разработки и эксплуатации корректирующих устройств для снижения несимметрии в сетях НН показывает, что практически сопротивление нулевой последовательности КУ, в основном, определяется омическим сопротивлением обмоток. Тогда, учитывая, что, как правило, для осуществления эффективной фильтрации указанное сопротивление должно составлять около 10 % сопротивления нулевой последовательности сети, примем при моделировании  $k = 0,9$ .

Для иллюстрации возможностей предложенной модели проведем расчет искажения синусоидальности кривых токов и напряжений для базового варианта схемы замещения сети НН (см.

параграф 3.3) при подключении фильтра в нагрузочном узле РЩ. Во-первых, необходимо сказать о влиянии неидеальности фильтра на эффективность фильтрации. Следует отметить, что, фильтруя токи гармоник, кратных трем, устройство влияет на форму кривых напряжений на зажимах нелинейных электроприемников. При этом изменяется режим работы выпрямителей, которые определяют нелинейность нагрузки, что приводит к изменению формы кривых токов и, соответственно, значению их высших гармоник. В результате в идеальном режиме,  $k = 1$ , при снижении токов внешней и внутренней питающей (стояков) сети гармоник, кратных трем, уровень соответствующих токов пятой, седьмой, одиннадцатой, тринадцатой гармоник увеличивается в 2 и более раз. По сравнению с идеальным режимом при  $k = 0,9$  происходит не только предсказуемое увеличение токов гармоник, кратных трем, но и одновременное уменьшение токов остальных гармоник. Поэтому не происходит ожидаемое ощутимое увеличение несинусоидальности фазных напряжений и соответствующее снижение эффективности фильтрации из-за неидеальности фильтра. Даже при уменьшении  $k$  до 0,8 эффективность фильтрации снижается незначительно, если оценивать ее интегрально по значению искажений синусоидальности кривых фазных напряжений в характерных нагрузочных узлах сети.

Во-вторых, при подключении фильтра токов гармоник, кратных трем, наблюдается значительное снижение коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения  $K_U$  в характерных узлах сети. Если в рассматриваемом варианте сети НН без подключения устройств обеспечения ЭМС значение  $K_U$  на ГРЩ  $K_{U1} = 7,38 \%$ , на РЩ групповой сети  $K_{U2} = 7,96 \%$ , в розетках ближней комнаты  $K_{U3} = 8,60 \%$ , в розетках дальней комнаты  $K_{U4} = 8,62 \%$ , то в результате фильтрации токов гармоник, кратных трем, эти значения составляют соответственно 2,74; 2,89; 3,48; 3,52 %. Очевидно, что данные значения в полной мере соответствуют требованиям ГОСТ 13109—97.

В-третьих, в результате подключения фильтра за счет изменения форм кривых токов и напряжений происходит перераспределение токов высших гармоник по элементам сети НН, что приводит в случае его подключения в узле РЩ к некоторому увеличению токов высших гармоник в линиях групповой сети. По этой причине в рассматриваемом варианте сети значение коэффициента искажения синусоидальности кривой тока головного участка линии питания розеток увеличилось от 29,54 до 39,08 %. В заключение, в результате расчетов можно получить зна-

чение фазного тока фильтра (в рассматриваемом случае его действующее значение равно 12,7 А) и оценить его с точки зрения нормальности режима функционирования и определения установленной мощности реального устройства.

Таким образом, с учетом показанных возможностей модели можно провести анализ эффективности фильтра в любом другом варианте схемы замещения. При этом предложенная имитационная модель фильтрации высших гармоник позволяет получить результаты, с помощью которых можно определить оптимальные места установки, оценить эффективность фильтров данного типа в различных вариантах исполнения, состава электроприемников и нагрузочных режимов, а также разработать рекомендации по их применению в сетях НН.

#### 5.4. Анализ эффективности фильтрации с использованием фильтров токов гармоник нулевой последовательности

Исследование ущерба, обусловленного высшими гармониками, показало, что он максимален при значительных напряжениях гармоник и уменьшается с их снижением в зависимости, близкой к квадратичной. Поэтому необходимость полного снижения уровней гармоник практически отсутствует. Достаточно снизить их до предела, определяемого техническими требованиями, например, в пределах допустимого значения согласно ГОСТ 13109—97 [52]. Следовательно, можно предположить, что фильтры токов гармоник, кратных трем (в общем случае, нулевой последовательности), являются достаточно эффективным средством снижения несинусоидальности фазных напряжений в низковольтных сетях.

Рассмотрим возможность использования указанных фильтров для фильтрации высших гармоник в разных вариантах исполнения сети НН. При этом, в первую очередь, следует определить оптимальные места их установки. На рис. 5.6 представлены зависимости, которые показывают, как изменяется эффективность фильтрации при изменении места подключения фильтра. Кривая 1 показывает изменение  $K_{U4}$  от  $\alpha_1$  в сети с трансформатором мощностью 1000 кВ·А без подключения фильтров, кривая 2 — при подключении фильтра на РЩ, кривая 3 — при подключении фильтра на ГРЩ и кривая 4 — при подключении двух фильтров на РЩ и ГРЩ. Из рисунка видно, что только при подключении

двух фильтров (на ГРЩ и РЩ) можно обеспечить значение  $K_{U4}$ , удовлетворяющее требованиям ГОСТ 13109–97. При этом  $K_{U4}$  уменьшается в 2,3–2,5 раза по сравнению с вариантом исполнения сети без подключения фильтров.

Следует отметить, что варианты исполнения электрической сети здания с трансформатором мощностью 1000 кВ·А предусматривают наличие нескольких осветительных стояков, к каждому из которых подключается существенная нелинейная нагрузка. В этом случае эквивалентный источник токов высших гармоник всей сети здания будет находиться в узле ГРЩ. Очевидно, что для обеспечения наибольшей эффективности фильтрации фильтр должен подключаться на зажимах источника токов высших гармоник. В результате за счет значительных токов высших гармоник суммарной нелинейной нагрузки здания ток, проходящий через фильтр, будет чрезмерно большим. Проведенный анализ показал, что в рассмотренных вариантах действующее значение тока в нулевом проводе фильтра будет составлять 300–350 А (при  $\alpha_1 = 0,113$ ) и 800–900 А (при  $\alpha_1 = 0,355$ ).

Кроме того, для осуществления эффективной фильтрации с учетом значения эквивалентного сопротивления нулевой последовательности сети с трансформатором мощностью 1000 кВ·А сопротивление нулевой последовательности фильтра должно составлять 0,005–0,01 Ом, что технологически осуществить затруднительно, а по экономическим соображениям — нецелесообразно. В связи с этим создать фильтрующее устройство для подключения на ГРЩ сети с трансформатором мощностью 1000 кВ·А практически не представляется возможным. Поэтому рекомендуется устанавливать фильтры на РЩ в каждом стояке. При этом каждый фильтр будет фильтровать токи высших гармоник только от нелинейных электропотребителей, подключенных к соответствующему стояку, а все вместе — обеспечивать нормальный уровень несинусоидальности фазных напряжений электрической сети здания.

Очевидно, что в случае сети с трансформатором мощностью 100 кВ·А и наличия одного осветительного стояка оптимальной является установка фильтра на РЩ первого этажа. На рис. 5.7 представлены зависимости, которые иллюстрируют эффективность фильтрации высших гармоник при подключении фильтра на РЩ в разных вариантах исполнения указанной низковольтной электрической сети. При этом кривые 1 отражают изменение  $K_{U4}$  от  $\alpha_1$  для трех вариантов исполнения сети без подключе-

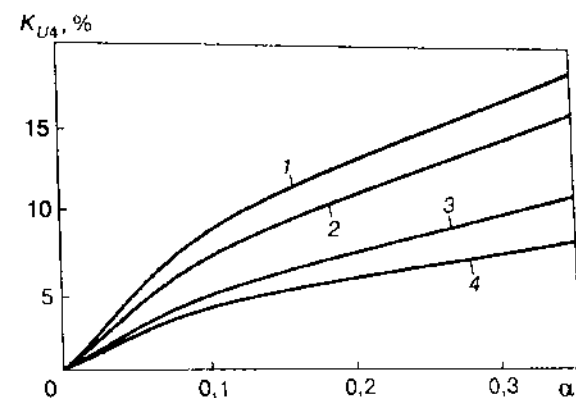


Рис. 5.6. Зависимости  $K_{U4}$  от  $\alpha_1$  для разных вариантов подключения фильтров

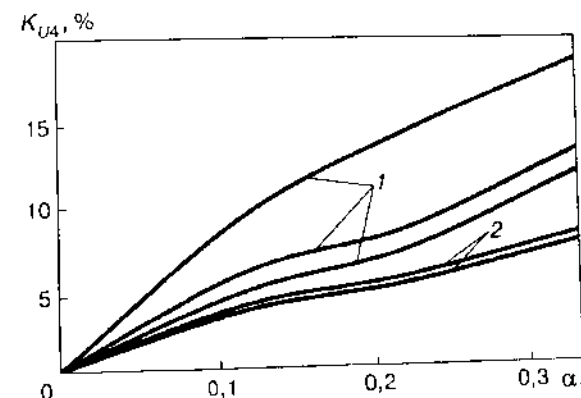


Рис. 5.7. Зависимости  $K_{U4}$  от  $\alpha_1$  для разных вариантов исполнения элементов сети без подключения (1) и при подключении (2) фильтра

ния фильтра: с трансформатором со схемой соединения обмоток звезда—звезда с нулем и кабелем стояка сечением  $3 \times 50 + 1 \times 16$  мм<sup>2</sup> (верхняя кривая 1), с трансформатором со схемой соединения обмоток треугольник—звезда с нулем и кабелем стояка того же сечения (средняя кривая 1), а также с трансформатором со схемой соединения обмоток треугольник—звезда с нулем и кабелем стояка сечением  $4 \times 50$  мм<sup>2</sup> (нижняя кривая 1). Кривые 2 показывают изменение  $K_{U4}$  от  $\alpha_1$  для двух вариантов исполнения сети при подключении фильтра: с трансформатором со схемой соединения обмоток звезда—звезда с нулем и кабелем стояка сечением  $3 \times 50 + 1 \times 16$  мм<sup>2</sup> (верхняя

кривая 2), а также с трансформатором со схемой соединения обмоток треугольник—звезда с нулем и кабелем стояка сечением  $4 \times 50 \text{ мм}^2$  (нижняя кривая 2).

Из рисунка видно, что использование фильтра (без проведения организационно-технических мероприятий по снижению эквивалентного сопротивления нулевой последовательности сети) обеспечивает существенное снижение  $K_{U4}$  (в 2,4–2,5 раза). При этом действующее значение тока в нулевом проводе устройства во всех рассмотренных вариантах не превышает 100 А, а его установленная мощность составляет 12,5 кВ·А при мощности защищаемой нагрузки 100 кВ·А. Стоимость фильтра с такими характеристиками составляет не более 1500 дол., что значительно меньше стоимости современного ИБП соответствующей мощности.

Продолжая анализ, рассмотрим, как влияют на эффективность фильтрации параметры нагрузочного режима и несимметрии электрических нагрузок. В результате проведенных исследований определено, что при использовании фильтра в сети с трансформатором мощностью 1000 кВ·А и нагрузкой мощностью 100 кВ·А  $K_{U4}$  снижается в 2,5–3 раза. Иными словами, при совместном применении двух средств снижения уровня высших гармоник (трансформатора завышенной мощности и фильтра) эффективность фильтрации несколько повышается.

При проведении анализа влияния несимметрии высших гармоник рассмотрим случаи ее возникновения в соответствии с нумерацией четвертой главы. Так, в случае 1 эффективность фильтрации практически не изменяется по сравнению с симметричным режимом. В случае 2 при скрытом увеличении  $\alpha_1$  и соответствующем увеличении токов нулевой последовательности в отдельных фазах эффективность фильтрации возрастает. При подключении фильтра  $K_{U4}$  снижается в 2,5–3,5 раза (большее снижение соответствует большему значению  $\alpha_1$ ) и, кроме того, происходит эффективное симметрирование напряжений по нулевой последовательности. Таким образом, рассматриваемые фильтры обеспечивают комплексное решение задачи снижения несимметрии и несинусоидальности напряжений в сетях НН.

В четвертой главе были рассмотрены случаи возникновения несимметрии высших гармоник, когда несинусоидальность напряжений возникает в фазах низковольтной сети, где отсутствуют нелинейные электроприемники. Проведенный анализ показывает, что только при использовании фильтров в этих случаях можно

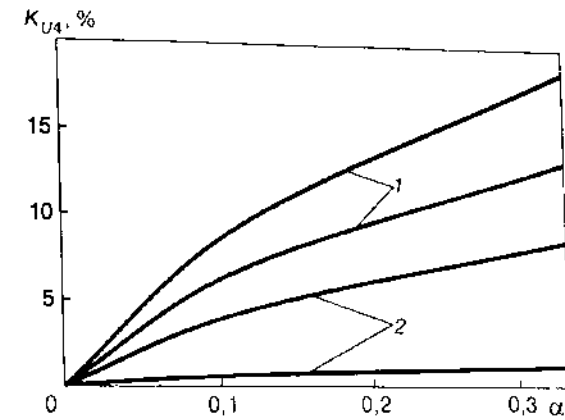


Рис. 5.8. Зависимости  $K_{U4}$  от  $\alpha_1$  в случае несимметрии нелинейных потребителей без подключения (1) и при подключении (2) фильтра

обеспечить по желанию заказчика минимальный уровень высших гармоник на определенных участках электрической сети здания. На рис. 5.8 показаны зависимости  $K_{U4}$  от  $\alpha_1$  для случая 3 несимметрии высших гармоник без подключения (кривые 1) и при подключении (кривые 2) фильтра. При этом верхние кривые в обоих вариантах отражают изменение  $K_{U4}$  в фазе А (В) с нелинейными потребителями, а нижние — в фазе С, где указанные потребители отсутствуют. Из рисунка видно, что подключение фильтра обеспечивает минимальный уровень напряжений высших гармоник в фазе С.

Аналогичные результаты получены при подключении фильтра в случае 4 несимметрии высших гармоник, когда вся нелинейная нагрузка сосредоточена в одной фазе сети. Только в этом случае обеспечивается низкий уровень несинусоидальности напряжений в двух фазах, а в третьей (с нелинейной нагрузкой) — удовлетворяющий требованиям ГОСТ 13109—97. Таким образом, с помощью рассматриваемых фильтров, предварительно проведя целенаправленное перераспределение нелинейных электроприемников по фазам, можно добиться практически синусоидальной формы кривых фазных напряжений на отдельных участках низковольтной сети здания.

С учетом проведенного анализа эффективности фильтрации с использованием фильтров токов гармоник нулевой последовательности можно сформулировать рекомендации по их исполь-

зованию для обеспечения ЭМС потребителей низковольтных электрических сетей.

1. Наиболее эффективным является использование фильтров токов гармоник нулевой последовательности в электрических сетях зданий и сооружений с большим содержанием средств компьютерной техники, которые являются мощным источником токов указанных гармоник.

2. Для повышения эффективности фильтрации следует подключать фильтры как можно ближе к источнику токов высших гармоник (на зажимах нелинейных электроприемников), препятствуя их распространению по сети здания. При определении количества и параметров фильтров должны учитываться суммарная мощность нелинейных электроприемников и значение эквивалентного сопротивления нулевой последовательности сети.

3. Для существенного снижения несинусоидальности фазных напряжений на отдельных участках сети здания можно перед подключением фильтров создавать несимметрию высших гармоник путем перераспределения нелинейных электроприемников по фазам. При этом фильтры обеспечивают на отдельных участках  $K_U < 1\%$  (даже при  $\alpha_1 > 0,3$ ), снижая  $K_U$  на других участках сети до уровня нормально допустимых значений согласно ГОСТ 13109—97.

4. Наиболее эффективным является применение фильтров токов гармоник нулевой последовательности в электрических сетях 2—4-этажных общественных зданий с 1 или 2 осветительными стояками и трансформатором мощностью 100 кВ·А. При этом, учитывая места подключения нелинейных электроприемников наибольшей суммарной мощностью, рекомендуется подключать фильтр (фильтры) на РЩ, ближайших к источнику токов высших гармоник. Причем в случае равномерного распределения нелинейных потребителей по этажам здания достаточным для обеспечения ЭМС является подключение одного фильтра на РЩ первого этажа.

5. С учетом прогноза роста нелинейных нагрузок установку фильтров можно заранее предусмотреть на этапе проектирования электрической сети здания наряду с проведением организационно-технических мероприятий по снижению эквивалентного сопротивления нулевой последовательности сети. Во всех случаях при решении вопроса выбора средств обеспечения ЭМС ре-

шающим фактором являются финансовые и технические возможности пользователей.

Очевидно, что рекомендации по применению фильтров в электрической сети конкретного объекта должны базироваться на результатах ее предварительных исследований, которые включают в себя анализ состава, характера и мест подключения нелинейных электроприемников, определение варианта исполнения основных элементов сети, а также проведение расчетов или измерений уровней высших гармоник в характерных нагрузочных узлах. При этом желательно также прогнозировать рост нелинейных нагрузок и учитывать перспективы развития электрической сети здания.

## ПРИМЕНЕНИЕ СРЕДСТВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ В СЕТЯХ НИЗКОГО НАПРЯЖЕНИЯ РАЗЛИЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

В предыдущих главах были рассмотрены вопросы моделирования и анализа режимов, которые являются элементами теории ЭМС в сетях НН с нелинейными потребителями. В данной главе представлены полученные в работе результаты практического применения способов и средств обеспечения ЭМС в указанных сетях. При этом рассмотрим примеры экспериментальной проверки эффективности специальных фильтрующих устройств по снижению несинусоидальности фазных напряжений, принципы построения и практическое использование предложенных подходов к анализу современных систем электропитания с улучшенной ЭМС, а также предложения по организации систем гарантированного электропитания электронных устройств на электростанциях и подстанциях.

### 6.1. Снижение несинусоидальности напряжений в низковольтных электрических сетях общего и специального назначения

В 80—90 гг. XX века в отделах стабилизации параметров электромагнитной энергии и оптимизации систем электроснабжения Института электродинамики НАН Украины были разработаны и прошли экспериментальную проверку в сетях НН общего и специального назначения электромагнитные фильтрующие устройства разных модификаций [63, 87, 91, 95, 136, 137, 152, 165, 167]. К ним относятся различные фильтросимметрирующие или фильтрующие корректирующие устройства, фильтры токов нулевой последовательности или токов гармоник, кратных трем, и, наконец, устройства подавления высших гармоник тока [126].

Работа таких фильтрующих устройств основана на взаимной компенсации несбалансированных магнитных потоков нулевой по-

### 6.1. Снижение несинусоидальности напряжений в низковольтных

следовательности. Это достигается вследствие включения обмоток электромагнитного аппарата по схеме встречный зигзаг (см. параграф 5.2), которая является базовой для рассматриваемых фильтров, а также особенностей конструкции катушек и магнитопровода. Все шесть полуобмоток должны быть абсолютно симметричными, т.е. содержать равное количество витков. Кроме того, необходимо максимально уменьшить магнитные потоки рассеяния, вызванные токами нулевой последовательности. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования позволили получить такую конструкцию магнитопровода и обмоток, которая позволяет до минимума снизить сопротивление рассеяния двух магнитосвязанных обмоток, расположенных на одном стержне магнитопровода.

Известно, что наименьшим сопротивлением рассеяния обладают магнитосвязанные обмотки, выполненные в виде однослойной двухходовой спирали. Однако в результате проведения расчетов и экспериментальных исследований разных вариантов устройств установлено, что наиболее целесообразным с технико-экономической точки зрения является исполнение обмотки в виде шестислойной двухходовой спирали. Это позволяет уменьшить высоту окна магнитопровода, т.е. улучшить массогабаритные показатели всего устройства, сохранив при этом его фильтрующие свойства.

В результате фильтр, выполненный по базовой схеме, имеет следующие основные технические характеристики.

Номинальное напряжение	380 В
Частота переменного тока	50 Гц
Ток в фазе фильтра	50 А
Ток в нулевом проводе	150 А
Снижение коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения	до 5 %
Уменьшение коэффициента несимметрии напряжений по нулевой последовательности	до 1 %
Сопротивление нулевой последовательности	0,02 Ом
Перекас фазных напряжений при обрыве фазы	не больше 12 %
Габаритные размеры	650×500×250 мм <sup>3</sup>
Масса	150 кг

Из приведенных характеристик видно, что кроме фильтрации высших гармоник рассмотренные устройства осуществляют эффективное симметрирование напряжений в низковольтных электрических сетях. Кроме того, опыт эксплуатации показал, что они также обеспечивают демпфирование несимметричных перенапряжений и провалов фазных напряжений вплоть до обрыва



одной из фаз. Таким образом, указанные корректирующие устройства являются многофункциональными с точки зрения воздействия на несколько параметров КЭ и обеспечения ЭМС в сетях НН.

Рассмотрим результаты экспериментальной проверки работы фильтров в реальных СЭС. В частности, исследования были проведены в сети, питающей стенды регулировки и поверки счетчиков на одном из киевских предприятий энергонадзора. Для стабилизации напряжения на этих стендах применяются стабилизаторы напряжений, которые являются источниками высших гармоник. В результате коэффициент искажения синусоидальности кривой фазного напряжения доходит до 8 %. Применение фильтра позволяет уменьшить его до 2—3 %.

Кроме того, были проведены исследования возможностей разработанных фильтров на ряде производственных объединений (ПО) Украины в цехах, где проходят испытания, например, цифровые измерительные приборы с ИВЭП с бестрансформаторным входом. В ПО «Микропроцессор» (г. Киев) в одном из цехов отдела испытаний подключение фильтра обеспечивало снижение  $K_U$  от 12,1 до 3,7 %, т.е. более, чем в 3 раза. Главное, что практически прекратились сбои цифрового оборудования, которые до этого были систематическими.

Следует отметить, что приведенные результаты являются наиболее успешными, так как во многих других случаях эффективность фильтрации была ниже. Причем одним из факторов, снижающих указанную эффективность, была несимметрия высших гармоник при довольно ощутимых значениях токов гармоник, некратных трем. Например, в одной из организаций при подключении фильтра на РЩ электропитания вычислительного комплекса от автономной системы двигатель—генератор мощностью 50 кВт коэффициент искажения синусоидальности кривых фазных напряжений уменьшился примерно в 2 раза (до подключения фильтра  $K_U = 7$ —8 %). В табл. 6.1 приведены действующие значения напряжений гармоник для двух вариантов схемы: без фильтра (левая графа) и при его подключении (правая графа). Из таблицы видно, что его применение позволяет снизить уровень некоторых высших гармоник.

Однако, анализируя представленные в таблице результаты, можно выявить особенности распределения симметричных составляющих гармонического спектра, о которых говорилось в предыдущих главах. Если бы системы фазных напряжений высших гармоник были симметричными, то фильтровались бы только тре-

ТАБЛИЦА 6.1

Результаты измерений действующих значений напряжений различных гармоник на РЩ электропитания вычислительного комплекса

Номер гармоник	Фаза					
	А		В		С	
1	213	211	210	210	205	209
3	14,2	2,4	13,5	5,4	13	2,6
5	2,4	1,9	3,5	4,2	0,6	0
7	2,3	0,5	3,8	0	3,5	3,5
9	1,2	0	0,7	0	0,3	0
11	0,2	0,3	—	—	—	—
13	0,2	0,3	0,3	0,7	0,7	0,4

тья и девятая гармоники. По данным же, которые приведены в таблице, видно, что существует несимметрия высших гармоник. Например, третья гармоника фильтруется не полностью и в разной степени по фазам. Уровень пятой гармоники в фазе А уменьшается, а в фазе В — увеличивается; пятая гармоника в фазе С и седьмая в фазе В уменьшаются до нуля и т. д.

Вторым аналогичным примером, характеризующим влияние состава гармонического спектра и несимметрии высших гармоник на эффективность фильтрации, служат результаты исследований, которые проводились в 90-е годы XX века на ПО «Горизонт» (г. Минск) в цеху, где проходили термоиспытания телевизоров. На стеллажах термоиспытаний в трехфазную сеть с нулевым проводом включается большое количество телевизоров одновременно. Причем телевизоры содержат блоки питания как с трансформаторным, так и бестрансформаторным входом. При этом телевизионная нагрузка является не только источником возникновения высших гармоник, но и несимметрии напряжений. В табл. 6.2 приведены значения коэффициентов искажения синусоидальности кривых и действующие значения третьей и пятой гармоник фазных напряжений на одном из участков этого цеха для двух случаев: без фильтра и при его подключении. Низкая эффективность фильтрации объясняется наличием существенных токов гармоник, некратных трем, источником которых, в основном, являются телевизоры с трансформаторным блоком питания. Из анализа значений напряжений гармоник видно наличие небольшой несимметрии высших гармоник, так как фильтр неравномерно фильтрует третью гармонику, для которой преобладающей является нулевая последовательность. Пятая гармони-

ТАБЛИЦА 6.2

Результаты измерений  $K_U$  и действующих значений третьей и пятой гармоник фазных напряжений (ПО «Горизонт»)

Режим	Показатель								
	$K_{U3} \%$	$K_{U5} \%$	$K_{U3} \%$	$U_{A3} \text{ В}$	$U_{B3} \text{ В}$	$U_{C3} \text{ В}$	$U_{A5} \text{ В}$	$U_{B5} \text{ В}$	$U_{C5} \text{ В}$
Без фильтра	7,7	8,1	7,8	13	15	13	6	5	6
При подключении фильтра	4,4	4,7	4,6	2	5	2	4	4	5

ка фильтруется слабо, так как для нее основной будет обратная последовательность.

На другом участке этого цеха для стабилизации напряжения сети питания используются стабилизаторы СТС, которые вносят дополнительные искажения в форму кривой напряжения. Кроме того, здесь сильнее проявляется несимметрия напряжений. В табл. 6.3 приведены значения коэффициента искажения синусоидальности кривой фазных напряжений  $K_U$  для двух вариантов схемы питания этого участка.

Из таблицы видно, что  $K_U$  снижается несущественно (меньше, чем в 2 раза) и неравномерно по фазам из-за эффекта несимметрии высших гармоник и недостаточно большого относительного значения токов гармоник, кратных трем. Кроме того, в фазе А уменьшенное значение  $K_U$  не удовлетворяет требованиям ГОСТ 13109—97, а в фазе С коэффициент искажения синусоидальности кривой фазного напряжения изменяется незначительно. Очевидно, что говорить об успешной фильтрации высших гармоник в таких условиях весьма проблематично.

Таким образом, теоретически рассмотренные фильтры токов гармоник нулевой последовательности являются эффективным средством снижения уровня высших гармоник и обеспечения ЭМС

ТАБЛИЦА 6.3

Результаты измерений  $K_U$  (ПО «Горизонт», участок со стабилизаторами)

Режим	Коэффициент искажения $K_U$		
	Фаза А	Фаза В	Фаза С
Без подключения фильтра	17	12,1	5,6
При подключении фильтра	8,6	6,9	4,5

## 6.1. Снижение несинусоидальности напряжений в низковольтных

в сетях НН. Однако для достижения указанной эффективности на практике необходимо выполнять разработанные в пятой главе рекомендации по использованию указанных фильтрующих устройств для обеспечения ЭМС потребителей низковольтных электрических сетей. В результате рассмотренные фильтры могут стать обязательным элементом сети НН при ее организации с точки зрения соответствия требованиям ЭМС. Так, в свое время на объектах Минобороны СССР предлагалось в составе вновь разрабатываемых комплексов средств связи и автоматизации, автоматизированных систем управления и электронно-вычислительной техники использовать фильтросимметрирующие устройства для обеспечения ЭМС радиоэлектронной аппаратуры с питающей сетью, автономными источниками электроснабжения и другими электропотребителями. При этом кроме защиты от ЭМП указанные устройства должны были обеспечивать снижение потерь электроэнергии и требуемой мощности автономного источника питания.

В настоящее время в условиях насыщенности электрических сетей зданий, рассмотренных в предыдущих главах, нелинейными электроприемниками стала существенной тенденция к организации пользователями собственной системы энергообеспечения. Причем это характерно не только для структур, занимающих отдельные строения и сооружения, но и для фирм, размещающихся в жилых зданиях. В результате становится актуальным вопрос построения указанной СЭС, которую можно назвать локальной системой питания [99]. Под локальной системой питания понимается система питания потребителей электроэнергии переменного тока, которая ограничена по территории (здание, сооружение), мощности электроприемников, которые объединены общностью выполняемых функций в пределах предприятия (организации), требованиями к электропитанию, а также общими подводом электроэнергии и системами распределения, контроля и защиты.

Очевидно, что этому определению в полной мере соответствует электрическая сеть здания, исполнение основных элементов которой (в том числе, с использованием дополнительных технических средств) обеспечивает ЭМС ее потребителей. При организации такой низковольтной сети следует рассматривать два этапа. На этапе проектирования можно с учетом прогнозирования роста доли нелинейной нагрузки проводить организационно-технические мероприятия, направленные, в частности, на снижение эквивалентного сопротивления нулевой последовательно-

сти сети (см. четвертую главу). На этапе эксплуатации сети, когда ее конструктивные элементы существуют много лет и реконструкцию очень часто проводить нет возможности, в условиях роста уровня ЭМП необходимо применение дополнительных технических средств (кстати, их установку можно предусмотреть еще на этапе проектирования сети).

Следует отметить, что для обеспечения требований к качеству и надежности электропитания локальные системы питания, как правило, комплектуются ИБП. Однако по экономическим соображениям их использование не всегда является целесообразным. Поэтому с учетом многофункциональности рассмотренных фильтрующих устройств предлагается использовать их (в соответствии с рекомендациями настоящей работы) в качестве дополнительных технических средств обеспечения ЭМС потребителей сетей НН.

## 6.2. Построение систем электропитания с улучшенной электромагнитной совместимостью

Широкое распространение в современных технических системах сложного радиоэлектронного оборудования, прежде всего имеющего в своем составе средства вычислительной техники, предопределяет необходимость совершенствования традиционных и поиск новых подходов к построению источников и систем электропитания радиоэлектронной аппаратуры. В качестве входного звена традиционных систем вторичного электропитания (СВЭП) радиоэлектронной аппаратуры используются неуправляемые мостовые (однофазные или трехфазные) выпрямители с емкостным фильтром. Основными их преимуществами, определившими масштабы применения указанных выпрямителей, являются высокое, близкое к абсолютному, значение КПД и хорошие массогабаритные показатели. Наряду с этими преимуществами, таким устройствам присущи те же недостатки, которые характерны для всех устройств преобразовательной техники. Как известно, значительные уровни гармонических составляющих, генерируемых их силовой частью, затрудняют согласование данных преобразователей с питающей сетью и потребителями (см. первую главу).

Следует напомнить некоторые количественные характеристики несинусоидальности, вызываемой такими выпрямительными нагрузками, которые (характеристики) были определены в данной работе, а также в ряде публикаций. В частности, в чет-

вертой главе было показано, что в сетях НН однофазные выпрямители с емкостным фильтром (источники электропитания средств компьютерной техники) вызывают значительные искажения синусоидальности кривых напряжений. При их массовом использовании в электрических сетях зданий коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения  $K_v$  на зажимах наиболее удаленных электроприемников может превышать 15 % (в основном за счет напряжения гармоник, кратных трем). В работе [37] приведены результаты анализа энергопотребления импульсного источника электропитания электронной техники, т.е. определены составляющие полной мощности на входе однофазного выпрямителя с емкостным фильтром. При этом установлено, что значение коэффициента мощности рассматриваемой выпрямительной нагрузки при питании от сети бесконечной мощности составляет около 0,5 (в основном за счет наличия мощности искажения). При подключении выпрямителя к сети ограниченной мощности изменится значение высших гармоник и, соответственно, значения составляющих полной мощности, что приведет к некоторому увеличению коэффициента мощности до 0,6—0,7. В работе [25] приведены экспериментальные и расчетные характеристики фазных токов трехфазных мостовых выпрямителей с емкостным фильтром. Показано, что нагрузки такого типа, если не применять никаких фильтрующих устройств, генерируют в сеть значительные токи высших гармоник (в основном пятой и седьмой — каждая до 80—90 % основной). При этом расчетные значения коэффициента искажения синусоидальности кривой тока  $K_i$  составляют 140—180 %, а экспериментальные значения коэффициента мощности на входе — 0,43—0,66 (в зависимости от мощности нагрузки).

В работе [51] рассмотрены принципы построения и проведен сравнительный анализ современных систем электропитания сложных радиоэлектронных комплексов (РЭК). При этом, исследование в области электропитания ответственных потребителей показывают, что существующие традиционные СВЭП не могут удовлетворять возрастающим требованиям по массе, объему, потерям энергии, металлоемкости, ресурсу надежности. В то же время, анализ тенденций развития современных автономных СЭС, в том числе, комплексов связи, вычислительных, радиотехнических и навигационных устройств и систем, свидетельствует о том, что достижение их высокой эффективности при существенном уменьшении массы и объема невозможно без обязательного решения вопросов ЭМС с источником электрической энергии или

сетью, с одной стороны, и нагрузкой — с другой. Иными словами, необходим подход, учитывающий параметры и взаимодействие всех элементов, входящих в СЭС: от источников до нагрузок. Необходимость такого подхода определяется тем, что повышение эффективности отдельных элементов, например, использование СВЭП с бестрансформаторным входом, имеющих массу и объем в несколько раз меньше электромашиных или трансформаторно-выпрямительных, может не привести к повышению эффективности СЭС в целом. Это объясняется необходимостью проведения дополнительных (как было отмечено выше) мероприятий по обеспечению ЭМС, в частности, увеличения мощности источника электропитания. Поэтому существенное уменьшение массы или объема СЭС с учетом соизмеримости масс и объемов ее составляющих может быть достигнуто только при снижении массогабаритных показателей всех или большинства устройств, необходимых для ее построения.

Таким образом, решение комплексной проблемы повышения эффективности СЭС напрямую связано с задачей обеспечения ЭМС входящих в СВЭП преобразователей с питающей сетью. Существующее в практике противоречие между требованием уменьшения массы и объема всего электроэнергетического комплекса и необходимостью увеличения мощности питающих генераторов (трансформаторов) может быть разрешено использованием в качестве входных звеньев СВЭП преобразователей с улучшенной ЭМС. Высокая ЭМС указанных преобразователей обеспечивается за счет потребления из сети практически синусоидальных и симметричных токов при коэффициенте мощности, близком к единице.

В работах [120, 122] предложена математическая модель цепи идеального преобразователя (четырёхполюсника) с активным входным сопротивлением при выходном постоянном напряжении, т.е. осуществлен синтез преобразователя переменного напряжения в постоянное при отсутствии токов высших гармоник и реактивной мощности на входе. Полученные аналитические выражения для изменяющихся коэффициентов передачи четырёхполюсников описывают теоретическую возможность выполнения данного преобразования переменного синусоидального напряжения в постоянное без применения реактивных накопительных элементов, которая, однако, на практике не была реализована. В работах [135, 161] рассмотрен подход к построению указанных преобразователей, заключающийся в применении схем с малыми индуктивностями во входных цепях и использовании импульсно-

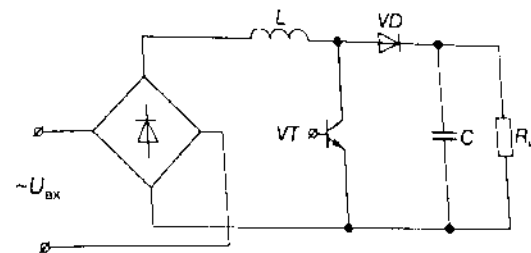


Рис. 6.1. Схема однофазного выпрямителя с принудительным формированием кривой потребляемого тока

го регулирования на повышенной частоте, обеспечивающего принудительное формирование входного тока, как правило, повторяющего форму входного напряжения.

Принцип реализации такого преобразования может быть проиллюстрирован с использованием схемы (рис. 6.1), которая вызывает наибольший интерес у разработчиков подобной техники. В ее основу положено использование неуправляемого мостового выпрямителя (о котором говорилось выше) и подключенного к его зажимам на стороне постоянного тока одноключевого импульсного регулятора с последовательным дросселем  $L$  и параллельным транзисторным ключом  $VT$ . Принцип действия рассматриваемой схемы основан на высокочастотной коммутации транзисторного ключа  $VT$ , обеспечивающего накопление энергии в магнитном поле дросселя  $L$  и последующую ее отдачу через разделительный диод  $VD$  в выходной емкостной фильтр и нагрузку. Алгоритм управления транзисторным ключом выбирается таким, чтобы обеспечить на основании информации о мгновенных значениях эталонного сигнала (в качестве которого используется сигнал, пропорциональный мгновенному напряжению питающей сети) и входного тока принудительное формирование кривой потребляемого тока, повторяющего форму эталонного сигнала. Регулирование потребляемой от сети мощности и, следовательно, входных токов и уровня выходного напряжения осуществляется по сигналам отрицательной обратной связи с выходных зажимов преобразователя.

В результате форма кривой входного тока преобразователя становится близкой к синусоидальной. Значение  $K$ , ограничено единицами процентов, поэтому влияние на форму кривой питающего напряжения и другие потребители электроэнергии будет незначительным. Значение коэффициента мощности, которое

определяется в основном гармоническим составом кривой входного тока, для такого преобразователя изменяется (в зависимости от мощности нагрузки) в пределах от 0,99 до 1,0. Наконец, при симметричном включении выпрямителей с принудительным формированием кривой потребляемого тока на фазные напряжения трехфазной четырехпроводной сети ток в нулевом проводе отсутствует. Таким образом, данные выпрямители со стороны входных зажимов эквивалентны линейной активной нагрузке.

Известно, что чрезвычайно актуальным является вопрос ЭМС для автономных, в частности, судовых электроэнергетических систем и судового электрооборудования. При этом актуальность определяется не только постоянным увеличением на судах удельного веса преобразовательных устройств, когда суммарная мощность силовой полупроводниковой техники приближается к мощности источников электроэнергии, но и качественным изменением роли силовых полупроводниковых преобразователей, когда на ряде типов судов они становятся одними из основных элементов, определяющих структуру СЭС. В ее состав входят разнообразные как по назначению, так и по принципам построения преобразовательные устройства, которые генерируют высшие гармоники тока и напряжения, воздействуя на устройства, комплексы и системы судовой СЭС. При этом особую группу судовых электроприемников составляют радиоэлектронные устройства и системы, обеспечивающие гидроакустику, навигацию и радиосвязь судна. Известно, что эти системы, а также ЭВМ, как правило, наиболее чувствительны к качеству потребляемой электроэнергии, поэтому даже сравнительно низкий уровень высших гармоник в питающих напряжениях может приводить к функциональным нарушениям и сбоям в работе такого оборудования. Кроме того, чрезвычайно важным для судовых СЭС является решение проблемы вынужденного превышения установленной мощности и массогабаритных показателей энергооборудования в результате его загрузки неактивными составляющими полной мощности, в первую очередь, мощностью искажения, вызываемой высшими гармониками тока и напряжения.

Для иллюстрации преимуществ систем электропитания с улучшенной ЭМС проведем сравнительный анализ энергетических показателей СВЭП одного из судовых РЭК. В состав данного РЭК входят 5 основных систем: управления антенным постом, информационно-вычислительная, отображения информации, приемных и передающих устройств. Электропитание оборудования РЭК осуществляется от судовой трехфазной сети перемен-

ного тока с междупазным напряжением 220 В (частота 50 Гц). Для питания систем, входящих в РЭК, требуется широкий спектр напряжений постоянного тока, которые вырабатываются преимущественно импульсными источниками вторичного электропитания с бестрансформаторным входом.

Для проведения указанного анализа предлагается подход, при котором энергетические показатели СВЭП определяются по результатам расчета энергопотребления выпрямителя с известными параметрами. В результате проведенного анализа и расчетов эквивалентного трехфазного выпрямителя с емкостным фильтром (входной цепи рассматриваемой СВЭП) было установлено, что при средней мощности нагрузки 2 кВт полная мощность достигает 3,5 кВт·А. При этом амплитуда мгновенной мощности достигает 3,4 кВт, действующее значение фазного тока на входе выпрямителя составляет 9 А при амплитудном значении 22 А, что обусловлено его импульсным характером. Приведенные результаты, а также полученные ранее параметры несинусоидальности, вызываемой указанным выпрямителем, достаточно наглядно иллюстрируют характер и степень влияния рассматриваемой СВЭП на бортовую сеть судна. Это влияние приводит (без учета нарушений в работе чувствительного оборудования) к дополнительным потерям в элементах СЭС судна и перерасходу топлива дизеля судовой электростанции.

Структурная схема предлагаемой современной СВЭП с улучшенной ЭМС приведена на рис. 6.2. Здесь: 1 — преобразователь переменного напряжения в промежуточное постоянное с принудительным формированием синусоидального входного тока; 2 — источники вторичного электропитания, преобразующие промежуточное постоянное напряжение в постоянные напряжения для питания судовых радиоэлектронных систем; 3; 4 — промежуточный инвертор для питания стандартных потребителей переменного тока (компьютеры, измерительные приборы); 5; 6 — осветительная и вентиляторная нагрузка.

Рассмотрим энергетические характеристики данной СВЭП с учетом того, что форма входного тока синусоидальная, а по фазе он совпадает с входным напряжением. Тогда максимальная мощность в фазе входной цепи преобразователя будет составлять 1,34 кВт. Амплитудное значение фазного тока при номинальном фазном напряжении 127 В равно 7,6 А, а его действующее значение — 5,4 А. Среднее значение полной мощности равно активной, т.е. составляет 2 кВт. Сравнивая полученные результаты для двух вариантов рассматриваемой СВЭП, нетрудно видеть, что

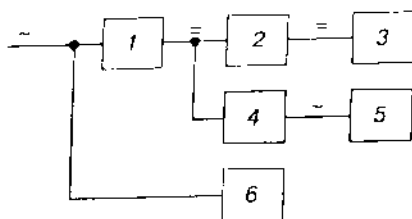


Рис. 6.2. Структурная схема СВЭП с улучшенной электромагнитной совместимостью

применение СВЭП с улучшенной ЭМС дает положительный эффект, который заключается в следующем:

- почти в 2 раза уменьшается полная мощность;
- в 3 раза уменьшаются амплитуды мощности и входного тока;
- практически исчезают высшие гармоники входного тока.

Следует отметить, что общее потребление электроприемников рассматриваемого судна составляет около 30 кВ·А, из которых около 20 % приходится на радиоэлектронное оборудование, которое можно рассматривать как нелинейную (выпрямительную) нагрузку. Известно, что при такой доле выпрямительной нагрузки  $K_v$  питающих напряжений составляет 10—15 %, что негативно сказывается на работе электропривода и генератора переменного тока. Кроме того, амплитудные значения фазных токов СЭС судна будут существенно превышать их действующие значения. Традиционно указанные проблемы в существующих СЭС решают увеличением установленной мощности генератора переменного тока. В связи с этим использование предлагаемых СВЭП позволяет кроме обеспечения ЭМС судовых электроприемников снизить установленную мощность генератора, что существенно улучшает массогабаритные показатели СЭС. Однако такой положительный эффект может быть достигнут лишь при комплексном использовании СВЭП с улучшенной ЭМС для всех РЭК (навигации, локации, связи и пр.) судна.

Таким образом, приведенные результаты сравнительного анализа энергетических показателей разных СВЭП наглядно показывают преимущества систем электропитания с улучшенной ЭМС. Подобный анализ можно провести с учетом состава электроприемников, особенностей построения и конкретных параметров СЭС любого объекта. Полученные результаты позволяют оценить энергопотребление как в процессе эксплуатации, так и при разработке новых перспективных систем электропитания радиоэлектронной аппаратуры.

### 6.3. Организация искусственного нулевого провода при подключении системы электропитания к трехфазной трехпроводной сети

При рассмотрении вопросов построения универсальных систем электропитания РЭК следует учитывать возможность их подключения как к трех-, так и четырехпроводным сетям переменного тока, а также к автономным источникам электроэнергии. Применительно к судовым и корабельным СВЭП, питание которых осуществляется от трехпроводных сетей напряжением соответственно 220 и 380 В, возможны различные варианты построения СВЭП в зависимости от схемной реализации входных и выходных звеньев. Так, для рассмотренных в предыдущем параграфе судовых СВЭП с учетом уровня напряжения промежуточной сети постоянного тока (400 В) (см. рис. 6.2) и существующей элементной базы, возможно применение трехфазных преобразователей сетевого напряжения, которые не требуют создания искусственной нулевой точки. Для корабельных СВЭП, у которых уровень указанного постоянного напряжения составляет 700 В, требуется создание искусственной нулевой точки и применение других схем сетевых преобразователей, которые могут быть практически реализованы на существующей элементной базе.

В случае четырехпроводной сети в качестве входного звена СВЭП используется набор идентичных однофазных модулей на основе преобразователей переменного напряжения в постоянное с принудительным формированием кривой потребляемого тока (рис. 6.1). Очевидно, что данная СВЭП рассчитана на работу от трехфазных сетей переменного тока с нулевым проводом, а в корабельной (судовой) СЭС нулевой провод отсутствует. Поэтому для питания указанной СВЭП от трехфазной трехпроводной электросети необходимо предусмотреть возможность организации искусственного нулевого провода. Данная задача может быть решена с использованием фильтров токов нулевой последовательности (ФТНП).

Для исследования вопроса о возможности использования ФТНП в качестве средства для создания искусственной нулевой точки напомним его некоторые конструктивные особенности. Устройство представляет собой трехстержневые электромагнитный аппарат, на стержнях которого расположены магнитосвязанные полуобмотки, включенные по схеме встречный зигзаг. Поскольку начала первых полуобмоток включаются непосредственно на

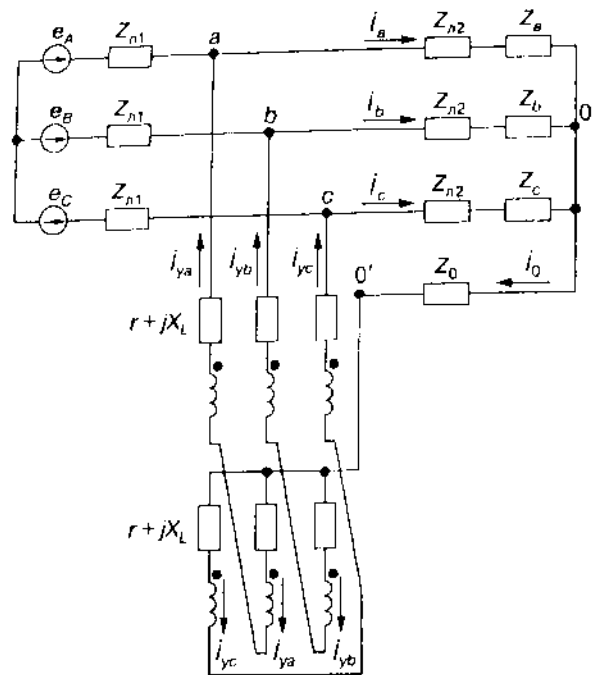


Рис. 6.3. Схема подключения ФТНП к трехпроводной сети для организации искусственного нулевого провода

фазные напряжения, устройство должно иметь достаточно высокое сопротивление прямой последовательности, чтобы свести до минимума потери холостого хода при его включении параллельно нагрузке. Начала вторых полуобмоток соединяются между собой и подключаются к общей точке трехфазной нагрузки (нулю СВЭП), что фактически означает создание искусственного нулевого провода.

Конструктивно (соотношение размеров магнитопровода, схема соединения и исполнение обмоток) ФТНП выполнен таким образом, чтобы снизить до минимума сопротивление нулевой последовательности при максимально возможном сопротивлении прямой последовательности. В этом случае обеспечивается эффективная стабилизация нулевой точки даже при существенной несимметрии фазных нагрузок. Очевидно, что наряду с выполнением указанной функции — формированием стабильной искусственной нулевой точки, данное устройство остается эффективным фильтром токов нулевой последовательности (гармоник токов, кратных трем) и способно демпфировать несимметричные

### 6.3. Организация искусственного нулевого провода при подключении системы

по фазам колебания напряжения и симметризовать фазные напряжения при неравномерной нагрузке фаз.

Рассмотрим схему подключения ФТНП к трехпроводной сети для организации с его помощью искусственной нулевой точки. На рис. 6.3 представлен фрагмент трехфазной трехпроводной СЭС, питающей однофазные нагрузки  $Z_a$ ,  $Z_b$ ,  $Z_c$ .

Сопротивления линии  $Z_{n1}$  и  $Z_{n2}$  в данном случае существенного влияния на работу ФТНП не оказывают. Ток нулевой последовательности  $\dot{I}^0$  составляет одну треть тока небаланса в точке 0 рассматриваемой системы, т. е.  $1/3$  суммы фазных нагрузочных токов  $\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c$ . Результирующий ток на участке нулевого провода 00' равен утроенному току нулевой последовательности. Каждая из полуобмоток ФТНП имеет сопротивление  $r + jX_L$ . Вследствие симметричной структуры устройства эти сопротивления равны. Кроме того, конструктивные особенности обеспечивают минимальное сопротивление рассеяния обмоток, поэтому, пренебрегая последним, можно считать, что  $X_L$  представляет собой полное реактивное сопротивление полуобмотки.

Рассмотрим фазные напряжения  $U_a$ ,  $U_b$ ,  $U_c$  на входе нагрузки между точками  $a$ ,  $b$ ,  $c$  соответственно и  $0'$ , которые одновременно являются напряжениями на зажимах устройства. Магнитные связи между полуобмотками, находящимися на одном стержне магнитопровода, можно считать в нашем случае жесткими (коэффициент трансформации равен 1). Составляем систему уравнений с учетом падения напряжения на отдельных полуобмотках и индуцированного напряжения за счет магнитной связи полуобмоток:

$$\begin{cases} \dot{U}_a = 2\dot{I}_{ya}(r + jX_L) - \dot{I}_{yb}jX_L - \dot{I}_{yc}jX_L; \\ \dot{U}_b = 2\dot{I}_{yb}(r + jX_L) - \dot{I}_{ya}jX_L - \dot{I}_{yc}jX_L; \\ \dot{U}_c = 2\dot{I}_{yc}(r + jX_L) - \dot{I}_{ya}jX_L - \dot{I}_{yb}jX_L; \\ 3\dot{I}^0 = \dot{I}_{ya} + \dot{I}_{yb} + \dot{I}_{yc}. \end{cases}$$

При этом ток в нулевом проводе  $\dot{I}_0$  равен сумме токов  $(\dot{I}_{ya}, \dot{I}_{yb}, \dot{I}_{yc})$ , протекающих по обмоткам устройства. Определяем для данной системы напряжений напряжение нулевой последовательности

$$\dot{U}^0 = (\dot{U}_a + \dot{U}_b + \dot{U}_c)/3 = (\dot{I}_{ya} + \dot{I}_{yb} + \dot{I}_{yc})2r/3.$$



Тогда с учетом  $I_{ya} = I_{yb} = I_{yc} = I_y = I^0$  имеем

$$U^0 = I^0 R,$$

где  $R = 2r$  — активное сопротивление обмотки устройства.

Таким образом, составляющие нулевой последовательности тока и напряжения связаны между собой в соответствии с законом Ома, т. е. напряжение  $U^0$  в нашем случае зависит от тока  $I^0$  и активного сопротивления  $R$ .

Создание абсолютно стабильной нулевой точки предполагает выполнение условия  $U^0 = 0$ . Реально нам необходимо определить допустимое смещение данной точки или допустимое значение напряжения нулевой последовательности  $U^0$ , при котором возможна нормальная работа СВЭП. Токи холостого хода ФТНП практически равны по значению, поэтому они не оказывают существенного влияния на смещение нулевой точки.

Нормальная эксплуатация однофазных потребителей с точки зрения допустимой несимметрии напряжений возможна в том случае, если  $U^0 \leq 4\%$ . Поскольку несимметрия линейных напряжений судовой (корабельной) трехпроводной сети допустима в пределах  $\pm 2\%$ , выберем в качестве исходного для разработки устройства более жесткое условие  $U^0 \leq 3\%$  или  $U^0 \leq 7\text{ В}$  при фазном напряжении сети 220 В. Для расчета допустимого активного сопротивления устройства рассмотрим параметры аварийного режима, когда в нулевом проводе протекает ток, равный фазному току  $I_\phi$  (это возможно при выходе из строя одного или двух входных однофазных модулей). В результате анализа указанного режима можно определить соотношение между мощностью СВЭП и установленной мощностью устройства для организации искусственного нулевого провода.

Рассмотрим конкретный пример выбора установленной мощности ФТНП при мощности нагрузки 4 кВт. Тогда в учитываемом аварийном режиме при фазном токе нагрузки  $I_\phi = 6\text{ А}$  ток нулевой последовательности  $I^0 = 2\text{ А}$ . Отсюда допустимое сопротивление обмотки, при котором не превышает регламентированное значение  $U^0 = 7\text{ В}$ ,  $R = U^0/I^0 = 3,5\text{ Ом}$ . Более жестким критерием для выбора установленной мощности устройства является допустимая нагрузка по току. При этом с учетом условий нормальной теплоотдачи электромагнитного устройства сухого типа допускается для медных обмоток максимальная плотность тока  $2\text{ А/мм}^2$ . Таким образом, в рассматриваемом случае намотку мож-

ТАБЛИЦА 6.4

Конструктивные параметры устройств для организации искусственного нулевого провода

Параметр	Типоразмер		
	1	2	3
Сечение провода, мм <sup>2</sup>	1	2	3
Количество витков обмотки	696	492	402
Количество слоев	6	6	6
Базовый размер магнитопровода, мм	44	52	58
Высота окна, мм	140	150	160
Сечение стали сердечника, см <sup>2</sup>	19,36	27,04	33,64
Сечение ярма, см <sup>2</sup>	21,3	29,74	37
Ширина окна, мм	30	40	50
Радиальный размер катушки, мм	10	20	30
Вес обмотки, кг	4,27	7,1	9,66
Вес магнитопровода, кг	14	22	30
Ориентировочный вес устройства, кг	20	30	40
Размеры устройства, мм	240×190×70	260×210×80	280×23×90

но производить медным проводом сечением 1 мм<sup>2</sup>. Результаты расчета конструктивных и электрических параметров трех типоразмеров устройств для организации искусственного нулевого провода при мощности нагрузки 4, 8 и 12 кВт соответственно представлены в табл. 6.4 и 6.5.

Установленная мощность ФТНП, как устройства с электромагнитными связями, определяется по формуле [109]

$$S_{\text{уст}} = \frac{1}{2} \sum S_{\phi z} = \frac{1}{2} 6I_\phi U_{\phi z},$$

где  $S_{\phi z}$  — полная мощность полуобмотки;  $U_{\phi z}$  — фазное напряжение на полуобмотке (при фазном напряжении сети 220 В  $U_{\phi z} = 127\text{ В}$ ). Например, в случае, когда мощность СВЭП равна 4 кВт, установленная мощность устройства  $S_{\text{уст}} = 0,762\text{ кВт}$ . В результате проведенных расчетов получаем, что максимальное относительное смещение нулевой точки во всех трех случаях не превышает 3 %.

Таким образом, разработанные устройства, параметры которых приведены в табл. 6.4 и 6.5, можно использовать для организации искусственного нулевого провода в СВЭП с улучшенной ЭМС. Для дальнейшей оптимизации размеров указанных уст-



ТАБЛИЦА 6.5

Электрические параметры устройств для организации искусственного нулевого провода

Параметры	Типоразмеры		
	1	2	3
Мощность нагрузки, кВт	4	8	12
Ток в фазе устройства, А	2	4	6
Установленная мощность устройства, кВт	0,762	1,524	2,286
Активное сопротивление обмотки, Ом	2,8	1,16	0,7
Напряжение нулевой последовательности, В	5,6	4,64	4,2
Максимальное относительное смещение нулевой точки, %	2,55	2,11	1,91
Потери холостого хода, Вт	13,6	21,3	29
Потери в меди при максимальной нагрузке, Вт	41	68	92

роЙств необходимо дополнительно исследовать, в частности, возможное влияние несимметрии линейных питающих напряжений, а также характера нагрузки и степени загруженности фаз.

#### 6.4. Технические средства защиты от электромагнитных помех в сетях собственных нужд и оперативного тока энергетических объектов

Современное развитие электроэнергетики характеризуется широким внедрением и распространением на энергетических объектах компьютерной и другой цифровой техники. На электростанциях и подстанциях повсеместно используется вычислительная техника (ВТ), а средства релейной защиты и автоматики (РЗ и А), связи и телемеханики (С и ТМ) все чаще строятся на базе микропроцессорной и электронной техники. В то же время в связи с распространением электронного оборудования обостряется проблема его ЭМС с системой электропитания. С одной стороны, электронная техника отличается повышенной чувствительностью к воздействию электромагнитных помех (ЭМП), а с другой стороны, электростанции и подстанции являются объектами, которые в условиях эксплуатации подвергаются их интенсивному воздействию.

Следует отметить, что еще в 1997 г. в Днепропетровском региональном диспетчерском центре Украины (г. Запорожье) про-

#### 6.4. Технические средства защиты от электромагнитных помех

волилась научно-практическая конференция по эксплуатации и совершенствованию устройств РЗ и А, на которой анализировались результаты работы за 1995—1996 гг. На конференции, в частности, было обращено внимание на два вопроса:

— необходимость скорейшего перехода устройств РЗ и А на микропроцессорную базу;

— увеличение количества нарушений в работе устройств РЗ и А, которые расследовались, но причины их появления не были установлены, и составили в среднем 12 % числа ложных срабатываний.

По мнению авторов [12] эти нарушения произошли под влиянием помех, возникших в результате коммутационных переключений, причем на подстанциях, которые еще не были оснащены микропроцессорной техникой. Аналогичная ситуация наблюдалась и на высоковольтных подстанциях Мосэнерго. При этом анализ случаев неправильной работы устройств РЗ и А за несколько лет показал, что более 15 % таких случаев можно с уверенностью отнести к проблемам ЭМС.

В работах [153, 157] изучались и систематизировались источники ЭМП, а также пути их распространения. На основе обширных материалов по измерениям различного рода источников ЭМП Международной электротехнической комиссией составлены руководящие документы. Обзор электромагнитных явлений, от которых возможно возникновение ЭМП приводится в [189] и [190], а дополнительная информация о типовых источниках и причинах возникновения помех дана в Приложении А [191]. Предварительный анализ типичных проблем ЭМС на электроэнергетических объектах показал, что при их решении необходимо рассматривать весь спектр ЭМП, перечисленных в названных документах.

Основными источниками ЭМП на электроэнергетических объектах являются коммутационные операции выключателями и разъединителями, короткие замыкания и удары молнии на территории объекта или примыкающей к ней линии. В то же время не следует исключать такие источники ЭМП, как магнитные поля промышленной частоты, разряды статического электричества, электромагнитные поля радиочастотного диапазона и т.д. Кроме того, надо отметить различные мощные нелинейные нагрузки, в первую очередь, полупроводниковые устройства, которые вызывают систематические искажения формы кривых токов и напряжений. При всем многообразии источников помех на энергообъектах при изучении опыта и результатов измерений, которые

проводили исследователи разных стран, было установлено, что чаще всего помехи проникают в электронные устройства через цепи питания. При этом, в результате действия ЭМП происходит нарушение качества питающего напряжения.

Напомним (см. первую главу), что изменения эффективного значения напряжения являются основными помехами, так как электрооборудование в той или иной мере зависит от параметров питающего напряжения. При этом рассматриваются отклонения напряжения, которые происходят при любом изменении установленного напряжения выше или ниже входного диапазона, который является допустимым для конкретного оборудования. Очень распространенной помехой является прекращение подачи электроэнергии (максимально возможное отклонение напряжения), которое определяется, как полное отключение входного напряжения в течение не менее 5 мс [195, 204, 211]. Отдельно следует отметить помехи большой амплитуды и малой длительности, которые в виде колебательных перенапряжений накладываются на нормальную синусоиду питающего напряжения. Если рассмотреть первые два или три полупериода этих колебаний, то можно выделить так называемые пики импульсов напряжения, обычно возникающие в частотном диапазоне от десятков кГц до единиц МГц. Результаты измерений на энергообъектах разных стран показывают, что амплитуды указанных импульсных помех находятся в диапазоне от десятков вольт до нескольких киловольт. Причем возникновение этих помех наблюдалось в сетях питания как переменного, так и постоянного тока [192, 194]. Отметим, что кроме рассмотренных внешних случайных помех в системах электропитания существуют периодические искажения синусоидальности кривой напряжения питания, вызванные внутренними причинами.

В настоящее время, когда на подстанциях стали применяться системы РЗ и А с использованием микропроцессорной техники, проблема обеспечения ЭМС цепей разных классов напряжений стала наиболее острой. В соответствии с требованием к помехоустойчивости устройств РЗ и А на электроэнергетических объектах должна быть обеспечена такая электромагнитная обстановка (ЭМО), чтобы возникающие ЭМП при любых режимах не превышали допустимых уровней для этих устройств.

Современное состояние энергетики Украины таково, что приоритетным является не строительство новых объектов, а реконструкция существующих. При проведении реконструкции чрезвычайно важно перед проектированием определить реальную

ЭМО на объекте. Для этого, в частности, надо проводить исследования и измерения ЭМП в цепях собственных нужд (СН) и оперативного тока (ОТ) конкретных энергообъектов. В работе [43] приведены результаты указанных исследований на двух характерных энергообъектах: Киевской ТЭЦ-5 и подстанции «Северная-330 кВ». Проведенные измерения уровня ЭМП показали, что возникающие на данных энергообъектах помехи, существенно различаются по амплитуде и характеру распространения. Это объясняется, прежде всего, различными энергетическими характеристиками сетей СН и ОТ электростанции и подстанции.

Например, сеть постоянного ОТ Киевской ТЭЦ-5 за счет наличия мощной аккумуляторной батареи и сравнительно маломощных потребителей постоянного тока имеет большой запас мощности. Поэтому при включении выключателей 6 и 330 кВ не возникают опасные для ответственных электропотребителей провалы постоянного напряжения. В то же время на подстанции «Северная-330 кВ» потребляемый соленоидом выключателя 110 кВ ток существенно превышает разрядный ток штатной аккумуляторной батареи. В результате при включении выключателя 110 кВ в цепях постоянного тока наблюдались значительные провалы напряжения с понижением до 210 В в цепи питания соленоидов (уровень 270 В) и до 186 В в цепи питания других электропотребителей подстанции (уровень 220 В). Такие значительные провалы напряжения могут вызвать нарушения в работе соответствующих средств РЗ и А, работающих на постоянном токе, а также сбои в работе компьютеров и современных средств А, работающих на переменном токе, но получающих питание через инвертор от сети постоянного тока подстанции. Кроме того, следует отметить, что в процессе измерений на зажимах соленоидов были зарегистрированы высокочастотные импульсы напряжения длительностью приблизительно 150 мкс и амплитудой до 100 В. При широком использовании микропроцессорной техники для средств РЗ и А это может стать причиной сбоев и нарушений в работе ответственных электропотребителей.

Таким образом, проведенные теоретические и экспериментальные исследования систем электропитания подтвердили, что в ТМ и ВТ на электростанциях и подстанциях интенсивному воздействию ЭМП. Анализ существующих технических средств защиты от ЭМП показывает, что, если требуется высокая степень стабилизации напряжения и полная защита от всех видов ЭМП, используются системы гарантированного электропитания (СГЭ).

СГЭ является наиболее эффективным средством защиты, обеспечивающим резервом мощности при прекращении подачи электроэнергии и коротких отключениях. По крайней мере СГЭ дает возможность правильно отключить ВТ без риска повредить аппаратуру и потерять информацию. Если емкость аккумуляторной батареи достаточно большая или имеется резервный генератор, то при прекращении подачи электроэнергии СГЭ обеспечивает достаточно длительное функционирование ВТ.

Наряду с преимуществами СГЭ имеют некоторые недостатки:

- в составе СГЭ используется полупроводниковая техника, которая сама часто требует дополнительных средств защиты от помех типа разрядников или подавителей импульсов напряжения;

- СГЭ занимает много места в основном из-за габаритов и условий эксплуатации аккумуляторной батареи, требующей отдельного помещения [175].

Следует отметить, что на электростанциях и подстанциях с постоянным ОТ используются аккумуляторные батареи, которые можно рассматривать как резервный источник питания. Предлагается дополнить существующую систему электропитания специальными фильтрующими устройствами и построить на ее основе СГЭ микропроцессорной техники на энергообъекте. Как известно, в Институте электродинамики НАН Украины разработаны соответствующие фильтры, а накопленный опыт их эксплуатации в сетях низкого напряжения (см. параграф 6.1) и результаты проведенного анализа ЭМП на энергообъектах позволяет предложить эти устройства для использования в указанных системах электропитания. При этом предлагаются два вида фильтрующих устройств: фильтр низких частот (ФНЧ), который осуществляет фильтрацию токов высших гармоник на низких частотах, и специальный высокочастотный фильтр (СФВЧ) для подавления высокочастотных и импульсных помех.

Проведенные исследования показали, что кроме фильтрации высших гармоник ФНЧ обеспечивает демпфирование несимметричных перенапряжений (не менее 30 % амплитуды) и провалов фазных напряжений (продолжительностью не более 5с) вплоть до обрыва одной из фаз питания. В то же время возможности ФНЧ по подавлению высокочастотных и импульсных помех оказались ограниченными, что обусловило необходимость привлечения СФВЧ, который имеет следующие технические ха-

Номинальное напряжение	380 В, 220 В
Рабочий ток	30 А
Уменьшение импульсов напряжения длительностью до сотен нс	до 30 раз
Уровень подавления высокочастотных помех в диапазоне частот 10 кГц—1 ГГц	не менее 30 дБ
Габаритные размеры	200×350×500 мм <sup>3</sup>
Масса	20 кг

В результате лабораторных исследований комплекта ФНЧ-СФВЧ было установлено, что после проверки в промышленных условиях предложенные фильтры могут быть рекомендованы в качестве элементов СГЭ средств РЗ и А, ВТ, С и ТМ на электростанциях и подстанциях.

На основании изложенного выше, а также с учетом известных требований к обеспечению надежности сетей СН и ОТ предлагаются принципы построения указанных СГЭ на энергообъектах, которые (СГЭ) должны строиться на основе существующих элементов системы питания и дополнительных технических средств защиты от ЭМП. При этом существующими элементами являются сеть СН, обеспеченная надежным резервированием [31, 84] и РЗ от коротких замыканий со своим резервированием [113, 147], и система постоянного ОТ со штатными аккумуляторной батареей и средствами автоматического регулирования напряжения [71, 101, 106]. Обязательным элементом сети СН должны быть ограничители перенапряжений (разрядники) [8, 11, 23]. Кроме того, система заземлений энергообъекта, зданий, помещений и устройств должна быть выполнена в соответствии с существующими нормами и современными требованиями [205].

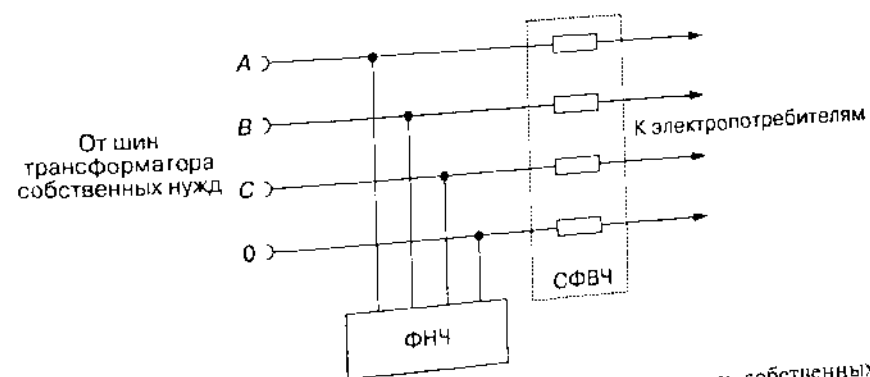


Рис. 6.4. Схема подключения фильтрующих устройств к сети собственных нужд энергообъекта

В результате, электропитание электронных устройств можно осуществлять или от сети переменного тока с резервированием от сети постоянного тока, или от сети постоянного тока с аккумуляторной батареей, которая работает в буфере с подзарядным агрегатом.

В качестве дополнительных обязательных элементов СГЭ предлагаются фильтрующие устройства ФНЧ и СФВЧ, схема подключения которых приведена на рис. 6.4. ФНЧ может подключаться в любой точке сети СН переменного тока (от шин трансформатора до нагрузки) параллельно сети, а СФВЧ — в расщелку проводов сетей как переменного, так и постоянного тока. Точки подключения, мощность и количество фильтров определяются мощностью и спецификой защищаемых устройств. Ряд номинальных мощностей фильтров позволяет использовать их в различных вариантах построения СГЭ.

Следует отметить, что дополнительными элементами СГЭ на подстанциях также могут стать технические средства защиты от провалов напряжения постоянного тока, которые возникают при включениях мощных потребителей ОТ. Для обеспечения бесперебойности электропитания средств С и ТМ в качестве резервных источников питания традиционно используются индивидуальные аккумуляторные батареи. Аналогично, персональные компьютеры могут быть укомплектованы индивидуальными агрегатами бесперебойного питания. В результате, при подключении средств РЗ и А, ВТ, С и ТМ к общестанционной сети СН, которая должна быть укомплектована предложенными фильтрами для защиты от ЭМП, можно обеспечить гарантированное электропитание упомянутых средств.

## Заключение

В настоящее время в низковольтных сетях жилых и общественных зданий получили широкое распространение сравнительно маломощные нелинейные электроприемники, в первую очередь, преобразователи с бестрансформаторным входом, в качестве входного звена которых используется сетевой выпрямитель с емкостным фильтром. Несмотря на малую мощность каждого из этих потребителей электроэнергии, их массовое применение наряду с большими значениями сопротивлений нулевой последовательности элементов трехфазных четырехпроводных сетей является основной причиной значительных искажений синусоидальности кривых напряжений в сетях НН. Отрицательное влияние несинусоидальности напряжений и токов на различные виды электрооборудования приводит в современных СЭС к серьезному технико-экономическому ущербу. Очевидно, что проблема ЭМС является проблемой совместного функционирования разных электропотребителей в конкретной СЭС. При этом в условиях насыщенности нелинейными электропотребителями доминирующим фактором ухудшения КЭ и нарушения ЭМС в электрических сетях зданий и сооружений становится несинусоидальность токов и напряжений.

В связи с этим существует потребность в улучшении КЭ и обеспечении ЭМС потребителей низковольтных сетей. Поэтому нуждаются в дальнейшем развитии научные исследования по созданию новых методов непосредственного анализа режимов и, соответственно, разработке моделей сетей НН с нелинейными нагрузками. Полученные результаты теоретических и экспериментальных исследований позволяют сформулировать требования к элементам низковольтной сети при ее проектировании и разработать рекомендации по использованию технических средств для обеспечения ЭМС потребителей сетей НН.

Существующие математические модели позволяют проводить исследования электромагнитных процессов в сетях НН с нели-

нейными нагрузками в целях определения их влияния на сеть с учетом конкретных параметров сети и нагрузки. Однако, эти модели позволяют проводить расчет токов и напряжений сетей НН с сосредоточенной в одном узле нелинейной нагрузкой. Это могут быть либо неразветвленные автономные сети с нагрузкой, имеющей в своем составе радиоэлектронную аппаратуру с ИВЭП с бестрансформаторным входом, либо распределительные (городские или сельские) сети НН, питающие нагрузку крупных объектов (зданий, предприятий), которая имеет в своем составе нелинейные электроприемники. Таким образом, существующие модели не позволяют определить значение высших гармоник токов и напряжений внутренней сети электроснабжения здания, а также параметры несинусоидальности напряжений на зажимах подключенных к ней электроприемников.

Предложенная авторами модель электрической сети здания за счет учета параметров ее основных элементов позволяет определять значения искажений синусоидальности кривых токов и напряжений на зажимах электроприемников, подключенных в любой точке моделируемой сети НН. Усовершенствованная схема замещения сети НН усложняется за счет дополнительного учета основных элементов внутренней электрической сети здания и соответствующих групп электроприемников, которые подключаются к ее характерным нагрузочным узлам. В целях получения оптимального количества нагрузочных узлов, к которым подключаются отдельные группы электроприемников с конкретными параметрами, предложен метод эквивалентирования нелинейных нагрузок и построения эквивалентных схем замещения сети. Показано, что оптимальной для проведения моделирования и анализа режимов электрической сети здания с несимметричными нелинейными электроприемниками является схема замещения, которая учитывает четыре характерных нагрузочных узла (ГРЩ, РЩ и два узла (розетки) групповой сети).

При этом, в частности, применяется метод анализа сетей НН с нелинейными нагрузками с использованием традиционных моделей, который позволяет, не конкретизируя нелинейную нагрузку, рассматривать конкретную низковольтную сеть с определенными параметрами. В результате анализа развернутых схем замещения с источниками токов высших гармоник сформулированы основные положения, описаны механизм и составляющие формирования несинусоидальности напряжений в любом нагрузочном узле сети НН. Показано, что искажение синусоидальности кривой напряжения на зажимах любого электроприемника

состоит из собственного и приобретенного искажений. Получены выражения для определения падений напряжения от токов высших гармоник через значение потерь напряжения в различных элементах сети НН.

Для получения соответствующих количественных характеристик в целях проведения анализа несинусоидальности токов и напряжений предложена методология определения параметров схемы замещения конкретной сети НН и подключенных к ней электроприемников на основании общепринятых норм и подходов к проектированию подобных электрических сетей. При этом в качестве характерных нелинейных электроприемников рассмотрены персональные компьютеры и принтеры. С учетом полученных параметров схемы замещения проведено моделирование установившихся режимов и расчет токов и напряжений конкретной электрической сети общественного здания.

Доля нелинейной нагрузки оказывает наиболее существенное влияние на форму кривых токов и напряжений в сетях НН. При этом всегда можно определить пределы изменения  $\alpha_1$  для выбранного состава нелинейных электроприемников, характеристики здания и принятого варианта исполнения его электрической сети. В результате проведенных расчетов установлено, что при  $\alpha_1 > 0,22$  ток в нейтрали трансформатора и в нулевом проводе внешней питающей линии составляет 25—30 % фазного тока внешней питающей сети, а ток в нулевой жиле кабеля стояка — 70—90 % соответствующего фазного. Таким образом, в рассмотренных нагрузочных режимах нарушается известное техническое требование о том, что для трансформаторов со схемой соединения обмоток звезда—звезда с нулем допускается ток в нейтрали трансформатора не более 25 % номинального, а действующее значение тока в нулевой жиле кабеля стояка достигает допустимой длительной токовой нагрузки для кабеля принятого сечения нулевой жилы.

Для определения степени влияния нелинейных электроприемников на сеть при изменении доли нелинейной нагрузки найдены значения  $K_U$  в характерных узлах низковольтной сети. Расчеты показывают, что основной вклад (80—90 %) в несинусоидальность напряжения на зажимах электроприемников, подключенных через розетки к электрической сети здания, вносит составляющая несинусоидальности напряжения на вводе в здание (на ГРЩ). Например, при  $\alpha_1 = 0,333$  коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения на ГРЩ превышает 14 %, а в розетках дальней комнаты здания — 17 %.

зультате, при  $\alpha_1 > 0,22$   $K_U$  в разных точках электрической сети здания превышает предельно допустимое согласно ГОСТ 13109—97 значение 12 %. При этом коэффициент третьей гармоники напряжения на зажимах рассматриваемых электроприемников существенно превышает предельно допустимое согласно ГОСТ 13109—97 значение 7,5 %.

С помощью разработанного метода оценки влияния потерь напряжения в линиях на несинусоидальность напряжения в узлах получены количественные характеристики указанного влияния при разных значениях  $\alpha_1$ . Например, при  $\alpha_1 > 0,22$  увеличение  $\Delta U$  в сети на 3 % вызывает увеличение  $K_U$  на зажимах электроприемников рассматриваемой линии групповой сети на 3—4 %. При этом часть указанного увеличения  $K_U$ , которая определяется увеличением на 1 %  $\Delta U$  в стояке, составляет 70—75 %. Кроме того, определены соотношения между значением потерь напряжения в линиях и их длиной, которые позволяют оценить влияние изменения длины рассматриваемых линейных элементов сети на несинусоидальность напряжения.

Установлено, что при изменении мощности трансформатора на значение высших гармоник в первую очередь влияют его конструктивные особенности, которые определяют величину сопротивления нулевой последовательности трансформатора. За счет относительного уменьшения сопротивления нулевой последовательности при использовании трансформатора мощностью 250 кВ·А значения  $K_{U0}$  уменьшаются на 30—40 % соответствующих значений  $K_{U0}$  при использовании трансформатора мощностью 100 кВ·А. Использование трансформатора со схемой соединения обмоток треугольник—звезда с нулем приводит, с одной стороны, к нежелательному увеличению токов нулевого провода, а с другой — к ощутимому снижению  $K_U$  в сетях НН. Например, при  $\alpha_1 = 0,333$  ток в нейтрали трансформатора составляет около 55 % его фазного тока, а ток в нулевой жиле кабеля стояка — около 115 % фазного тока кабеля стояка. При этом  $K_{U0}$  уменьшился на 30—40 % его значения при использовании трансформатора со схемой соединения обмоток звезда—звезда с нулем и практически не превышает предельно допустимое согласно ГОСТ 13109—97 значение 12 %. Следует отметить, что повышение мощности питающего трансформатора не приводит к существенному снижению несинусоидальности напряжений на зажимах электроприемников. Даже при 10-кратном завышении мощности питающего трансформатора  $K_U$  на зажимах электроприемников групповой сети снижается меньше, чем в 2 раза.

В низковольтной электрической сети конкретного объекта значение  $K_U$  в течение рабочего дня изменяется в широких пределах (в два раза) в зависимости от доли нелинейной нагрузки всей сети здания  $\alpha_1$ , которая определяется ее нагрузочным режимом в соответствии с сезонным суточным графиком нагрузок. При этом, в частности, учитывается возможность возникновения так называемого скрытого увеличения доли нелинейной нагрузки за счет неравномерного подключения в течение суток отдельных групп электроприемников при неизменной суммарной установленной мощности нелинейных электроприемников здания. В результате, летом  $K_U$  на 5—20 % больше соответствующих (по времени суток)  $K_U$  для зимнего рабочего дня (большие значения приращения соответствуют меньшим значениям  $\alpha_1$ ), в основном, за счет летнего скрытого увеличения доли нелинейной нагрузки всей сети здания.

В электрических сетях зданий очень часто существует несимметрия высших гармоник, которая возникает при несимметричном подключении нелинейных электроприемников в результате совместного воздействия и взаимного влияния изменения формы кривых фазных токов и напряжений по сравнению с симметричным режимом. При этом возможны случаи возникновения несимметрии высших гармоник, когда за счет скрытого увеличения  $\alpha_1$  в отдельных фазах может произойти существенное увеличение  $K_U$  (на 20—25 % по сравнению с симметричным режимом) в разных узлах электрической сети здания.

Полученные в работе выводы и соотношения позволили предложить принципы построения математических моделей нагрузочных узлов с нелинейными электроприемниками для низковольтных сетей. В результате анализа разработанных математических моделей нагрузочных узлов получены аналитические выражения для определения несинусоидальности фазного напряжения через несинусоидальность тока любого линейного электроприемника, включенного на фазное напряжение в рассматриваемом узле. С использованием указанных выражений и полученных в работе зависимостей токов высших гармоник от конкретных параметров элементов сети и нагрузки разработана оригинальная методика определения несинусоидальности фазных напряжений по известным значениям проектных нагрузочных параметров  $\cos \varphi$  и  $\alpha$ .

В результате проведенного анализа причин и закономерностей роста уровня высших гармоник установлено, что несинусоидальность токов и напряжений в сетях НН, в основном, оп-

ределяют конструктивные особенности построения трехфазных четырехпроводных сетей, соотношение сопротивлений отдельных их элементов и величина доли нелинейной нагрузки. Полученные результаты позволяют сформулировать требования к элементам сети НН при ее организации с точки зрения обеспечения ЭМС электроприемников. При неизменной доле нелинейной нагрузки одним из основных путей решения проблемы на этапе проектирования сети может стать снижение эквивалентного сопротивления нулевой последовательности низковольтной сети. Для этого, в частности, предлагается использовать трансформаторы со схемой соединения обмоток треугольник—звезда с нулем (и звезда—зигзаг с нулем), а также повышать их мощность и увеличивать сечение нулевого провода сети. Очевидно, что наиболее перспективным направлением решения проблемы обеспечения ЭМС в низковольтных электрических сетях с нелинейными потребителями является исключение «искажающих» энергопотребителей путем широкого использования преобразователей с улучшенной ЭМС. Однако, по ряду причин, в настоящее время в сетях НН целесообразно проведение мероприятий по снижению эквивалентного сопротивления нулевой последовательности сети, а также применение специальных фильтрующих корректирующих устройств. При этом рекомендации по использованию разных способов и средств обеспечения ЭМС должны базироваться на анализе процессов в электрической сети конкретного объекта.

Разработанная имитационная модель фильтрации токов высших гармоник для трехфазных четырехпроводных сетей с помощью фильтров токов гармоник нулевой последовательности позволяет провести проверку предполагаемых возможностей и анализ эффективности рассматриваемых фильтров в сетях НН разного назначения. В результате проведенных расчетов определено, что использование указанных фильтров в электрических сетях зданий позволяет уменьшить  $K_v$  в характерных нагрузочных узлах в 2—3 раза. При этом наиболее эффективной, с точки зрения снижения  $K_v$  на зажимах электроприемников групповой сети, является работа рассматриваемых фильтров в сети с трансформатором мощностью 100 кВ·А, при подключении в узле РЩ, в случае несимметрии нелинейных потребителей и при малых значениях коэффициентов загрузки электрооборудования. С учетом полученных результатов разработаны рекомендации по использованию фильтров данного типа для обеспечения ЭМС электроприемников низковольтных электрических сетей.

В монографии представлены результаты экспериментальной проверки работы фильтров токов гармоник нулевой последовательности в низковольтных электрических сетях разного назначения. С учетом результатов предварительного анализа несинусоидальности токов и напряжений предлагается использовать фильтрующие корректирующие устройства в качестве обязательных элементов низковольтной электрической сети здания при ее организации с точки зрения обеспечения ЭМС электроприемников. В результате проведенных исследований разработаны принципы построения систем гарантированного электропитания для энергообъектов на основе существующих элементов системы электропитания и дополнительных технических средств защиты от ЭМП. В качестве дополнительных обязательных элементов СГЭ, которые прошли опытную проверку на действующих энергообъектах, предлагаются два вида фильтрующих устройств — для фильтрации токов высших гармоник на низких частотах и для подавления высокочастотных и импульсных помех. Кроме того, в работе рассмотрены принципы построения и проведен сравнительный анализ энергопотребления с использованием предложенной методики определения энергетических показателей СВЭП по результатам расчета энергопотребления выпрямителя с известными параметрами (входной цепи рассматриваемой СВЭП) современных систем электропитания сложных радиоэлектронных комплексов.

Таким образом, в монографии разработаны эффективные методы анализа низковольтных электрических сетей с нелинейными потребителями, получены новые количественные характеристики несинусоидальности токов и напряжений в электрических сетях зданий, а также разработаны практические рекомендации по использованию предложенных способов и технических средств обеспечения ЭМС в сетях НН разного назначения. Следует отметить, что разработанные авторами методы достаточно универсальны и позволяют проводить анализ несинусоидальности токов и напряжений низковольтных сетей с учетом прогноза изменения количественного и качественного состава нелинейных нагрузок, а также перспектив развития электрических сетей зданий, что, в конечном итоге, повышает эффективность решения проблем электромагнитной совместимости в низковольтных электрических сетях с нелинейными потребителями.



1. *Абакумов П.Н., Баранов С.А.* Фильтр-стабилизатор переменного напряжения для питания переносного компьютера // *Электротехника*. — 1993. — № 1. — С. 57—61.
2. *Акинин К.П., Исаков Г.В.* Однофазные источники питания для автономных инверторов напряжения // *Техн. электродинамика: Тем. вып. «Проблемы современной электротехники»*. — 2002. — Ч. 2. — С. 80—81.
3. *Ари К., Шнейлер А.* Сучасне планування промислових мереж // *Енергетика та ринок*. — 1997. — № 1 (2). — С. 25—27.
4. *Асан Х.* Высшая гармоника и ее вред в электроснабжительной системе // *Дзюки дзасси*. — 1982. — 69, № 10. — С. 17—20.
5. *Афанасьева Е.И., Тульчин И.К.* Снижение расхода электроэнергии в электроустановках зданий. — М.: Энергоатомиздат, 1987. — 224 с.
6. *Барский В.А.* Улучшение электромагнитной совместимости тиристорных преобразователей соизмеримой мощности // *Электротехника*. — 1989. — № 8. — С. 22—26.
7. *Бас А.А., Миловзоров В.П., Мусолин А.К.* Источники вторичного электропитания с бестрансформаторным входом. — М.: Радио и связь, 1987. — 160 с.
8. *Беляков Н.Н., Кузьмичева К.И.* Ограничение перенапряжений при дуговых замыканиях на землю в сети 6 кВ собственных нужд электростанций с помощью ОПН // *Эл. станции*. — 1991. — № 4. — С. 78—84.
9. *Бибер Л.А., Никифорова В.Н., Рашкес В.С.* Проблемы нормирования и метрологического обеспечения ЭМС электрооборудования потребителей с сетью энергосистемы // *Электротехника*. — 1989. — № 8. — С. 27—32.
10. *Блюмович Г.И.* Определение коэффициента несинусоидальности напряжения систем электроснабжения ЭВМ // *Техн. электродинамика*. — 1992. — № 4. — С. 91—96.
11. *Богатенков И.М., Карабанов А.В., Созинов А.В., Халилов В.Х.* Разработка и опытная эксплуатация ограничителей перенапряжений для защиты сетей 6 кВ собственных нужд электростанций // *Эл. станции*. — 1988. — № 10. — С. 82—86.
12. *Бордиенко Г.И., Василенко А.Я., Грипас В.А.* Научно-практическая конференция по эксплуатации и совершенствованию устройств релейной защиты и автоматики // *Енергетика и електрифікація*. — 1997. — № 6. — С. 53—54.
13. *Борисов Р.К., Колиушко Г.М., Колиушко Д.Г.* Проблемы обеспечения электромагнитной совместимости на электроэнергетических объектах в современных условиях // *Техн. электродинамика: Тем. вып. «Проблемы современной электротехники»*. — 2002. — Ч. 4. — С. 99—103.

14. *Бржезицкий В.А., Найдовский А.В., Бутков С.В.* О влиянии высших гармонических составляющих напряжения на характеристики измерительных трансформаторов // *Вестник КПИ. Электроэнергетика*. — 1983. — Вып. 20. — С. 36—40.
15. *Будницкий В.Е.* Влияние гармонического состава сигнала на показания выпрямительных приборов // *Измерит. техника*. — 1984. — № 4. — С. 34—36.
16. *Букреев С.С., Головацкий В.А., Гулякович Г.Н.* Источники вторичного питания. — М.: Радио и связь, 1983. — 280 с.
17. *Буткевич О.Ф., Кириленко О.В., Кузнецов В.Г., Тугай Ю.И.* Один из аспектов энергетической безопасности Украины // *Техн. электродинамика: Тем. вып. «Силовая электроника та енергоефективність»*. — 2003. — Ч. 2. — С. 100—103.
18. *Васин Г.Я., Борисов Б.Н.* Электромагнитная совместимость электро-технологических установок и питающих сетей // *Техн. электродинамика*. — 1986. — № 2. — С. 35—39.
19. *Василенко В.А.* Дискретные математические модели нелинейных элементов для задачи расчета потокораспределения // *Теория и математические модели электрических цепей и интегральных схем: Сб. науч. тр.* — Киев: Ин-т электродинамики АН УССР, 1988. — С. 170—182.
20. *Василенко О.В., Переверзев А.В., Шмалей С.Л.* Макромодель GTO // *Техн. электродинамика*. — 2001. — № 3. — С. 42—48.
21. *Васильев В.В., Грездов Г.И., Симак Л.А., Васильев А.В.* Моделирование динамических систем: аспекты мониторинга и обработки сигналов. — Киев: НАН Украины, 2002. — 344 с.
22. *Васильковский Ю.И.* Математическое моделирование на ЭВМ электрических схем с полупроводниковыми выпрямителями // *Техн. электродинамика*. — 1988. — № 1. — С. 56—58.
23. *Васюра Ю.Ф., Вильнер А.В., Виткин А.Л., Евдокимин Г.А. и др.* Защита сети собственных нужд электростанций нелинейными ограничителями перенапряжений // *Эл. станции*. — 1989. — № 4. — С. 32—35.
24. *Волков А.И., Макарова Т.И., Полевая В.П., Рыжов Ю.П., Феденко В.Г.* О влиянии долевого участия выпрямительной нагрузки на гармонический состав напряжения автономной системы // *Тр. Челябинского политехн. ин-та*. — 1974. — № 157. — С. 235—239.
25. *Волков И.В., Акинин К.П., Исаков Г.В.* Сравнительный анализ способов фильтрации токов, потребляемых выпрямительными установками // *Техн. электродинамика*. — 1999. — № 4. — С. 23—27.
26. *Волков И.В.* Новая концепция построения силовых цепей частотно-регулируемых электроприводов // *Техн. электродинамика*. — 1999. — № 4. — С. 21—26.
27. *ГОСТ 13109-97.* Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. — Введ. в Украине 01.01.2000. — (Межгосударственный стандарт).
28. *Григорьев О., Петухов В., Соколов В., Краснов И.* Высшие гармоники в сетях электроснабжения 0,4 кВ // *Новости электротехники*. — 2002. — № 6(18); 2003. — № 1(19). — С. 54—56.
29. *Гурвич И.С.* Защита ЭВМ от внешних помех. — М.: Энергоатомиздат, 1984. — 224 с.



30. Двали Д.И., Мерабишвили П.Ф., Брегадзе И.Т. Электромагнитная совместимость энергосберегающих компактных люминесцентных ламп с электрической сетью // Техн. электродинамика: Тем. вып. «Проблемы современной электротехники». — 2002. — Ч.1. — С. 77—78.
31. Держко М.В. Особенности схем главных электрических соединений и собственных нужд современных мощных зарубежных гидроэлектростанций // Эл. хозяйство за рубежом. — 1989. — № 4. — С. 24—31.
32. Домнин И.Ф., Жемеров Г.Г., Копачовец О.И. Характеристики полупроводникового фильтрокомпенсирующего устройства в установившемся режиме // Техн. электродинамика: Тем. вып. «Силовая электроника та енергоефективність». — 2003. — Ч.4. — С. 15—20.
33. Дробович Ю.И., Комаров Н.С., Марченко Н.Б. Транзисторные источники электропитания с бестрансформаторным входом. — Киев: Наук. думка, 1984. — 160 с.
34. ДСТУ 3465-96. Якість електричної енергії. Терміни і визначення. — Чин. 01.01.1998. — Київ: Держстандарт України, 1996. — 35 с.
35. Жаркин А.Ф. Анализ величины искажений синусоидальности кривых токов и напряжений в электрических сетях жилых или общественных зданий // Техн. электродинамика. — 2003. — № 2. — С. 62—66.
36. Жаркин А.Ф. Анализ несинусоидальности токов и напряжений в низковольтных сетях с помощью схем замещения с источниками токов высших гармоник // Там же. — 2003. — № 3. — С. 47—50.
37. Жаркин А.Ф. Анализ электропотребления импульсного источника электропитания электронной техники // Там же. — 2002. — № 1. — С. 19—21.
38. Жаркин А.Ф., Возный В.А., Бойко П.С. Математическая модель низковольтной сети с нелинейными нагрузками // Техн. электродинамика: Тем. вып. «Силовая электроника та енергоефективність». — 2002. — Ч. 1. — С. 117—119.
39. Жаркин А.Ф. Искажение синусоидальности кривых токов и напряжений в низковольтных сетях при различных значениях загрузки питающего трансформатора // Техн. электродинамика. — 2001. — № 6. — С. 43 — 45.
40. Жаркин А.Ф., Капличный Н.Н. Анализ высших гармоник в низковольтных сетях с помощью традиционных моделей // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України. Електродинаміка: 36. наук. пр. — Київ: ІЕД НАН України, 2001. — С. 91—95.
41. Жаркин А.Ф., Капличный Н.Н. Влияние схемы соединения обмоток трансформатора 10/0,4 кВ на величину высших гармоник в низковольтной сети // Техн. электродинамика. — 1994. — № 1. — С. 76—79.
42. Жаркин А.Ф., Капличный Н.Н. Моделирование фильтрации высших гармоник в низковольтных электрических сетях // Техн. электродинамика: Тем. вып. «Силовая электроника та енергоефективність». — 2003. — Ч. 2. — С. 117—119.
43. Жаркин А.Ф., Лозинский В.А. Технічні засоби захисту від електромагнітних завад в мережах власних потреб і оперативного струму електростанцій та підстанцій // Новини енергетики: Спец. випуск, серпень. — 2003. — С. 61—63.
44. Жаркин А.Ф. Математическое моделирование режимов низковольтной сети с нелинейными нагрузками // Техн. электродинамика. — 1990. — № 3. — С. 95—101.

45. Жаркин А.Ф. Методика определения коэффициента искажения синусоидальности кривых фазных напряжений в низковольтных электрических сетях // Техн. электродинамика. — 2003. — № 4. — С. 68—72.
46. Жаркин А.Ф. Методика определения параметров схемы замещения низковольтной сети с нелинейными нагрузками // Там же. — 2002. — № 6. — С. 62—65.
47. Жаркин А.Ф. Моделирование и анализ нагрузочных режимов сетей низкого напряжения с нелинейными электроприемниками // Там же. — 2003. — № 6. — С. 50—53.
48. Жаркин А.Ф. Моделирование и расчет токов и напряжений сети низкого напряжения с нелинейной нагрузкой // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України. Енергоефективність: 36. наук. пр. — Київ: ІЕД НАН України, 2001. — С. 116—121.
49. Жаркин А.Ф. Несимметрия высших гармоник тока и напряжения в низковольтных распределительных сетях // Преобразование и стабилизация параметров электроэнергии: Сб. науч. тр. — Киев: Наук. думка, 1990. — С. 93—99.
50. Жаркин А.Ф. Определение несинусоидальности токов и напряжений в электрических сетях жилых или общественных зданий // Техн. электродинамика. — 2003. — № 1. — С. 52—56.
51. Жаркин А.Ф. Сравнительный анализ современных систем электропитания сложных радиоэлектронных комплексов // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: 36. наук. пр. — Київ: Ін-т електродинаміки НАН України, 2003. — № 3(6). — С. 97—101.
52. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. — М.: Энергоатомиздат, 1984. — 160 с.
53. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. — М.: Энергоатомиздат, 1994. — 266 с.
54. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в сетях промпредприятий. — М.: Энергоатомиздат, 2000. — 331 с.
55. Жежеленко И.В., Липский А.М., Кривоносов В.Е. Особенности выбора параметров фильтров высших гармоник для электрических сетей напряжением до 1000 В // Пробл. электромагнитной совместимости силовых полупроводниковых преобразователей: Тез. докл. Третьего Всесоюз. науч.-техн. совещания. Таллинн, 1986. — Таллинн: Ин-т термодинамики и электрофизики АН ЭССР, 1986. — Ч.3. — С. 125—126.
56. Жежеленко И.В. Нормирование уровней гармоник с учетом экономического ущерба // Электричество. — 1976. — № 5. — С. 64—68.
57. Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л. Проблемы качества электроэнергии // Промислова електроенергетика та електротехніка. — 2002. — № 4. — С. 13—26.
58. Жемеров Г.Г., Крылов Д.С. Сетевые токи шестипульсного мостового и эквивалентного двенадцатипульсного управляемых выпрямителей // Техн. электродинамика. — 2001. — № 1. — С. 39—43.
59. Жук А.К. Управление силовыми активными фильтрами с применением датчиков тока // Техн. электродинамика: Тем. вып. «Силовая электроника та енергоефективність». — 2003. — Ч.4. — С. 79—84.
60. Звездный А.М. Гармонический синтез в радиотехнике и электросвязи. — Л.: Энергия, 1971. — 528 с.

61. *Затяган А.В., Кожушко К.М.* Світло в Україні // Техн. електродинаміка. — 1996. — № 2. — С. 75–79.
62. *Иванов В.С., Соколов В.И.* Режимы потребления и качество электроэнергии систем электроснабжения промышленных предприятий. — М.: Энергоатомиздат, 1987. — 336 с.
63. *Капличный Н.Н., Данилюк В.Б., Самков А.В.* Анализ схем корректирующих устройств для трехфазных систем с нулевым проводом // Преобразование и стабилизация параметров электроэнергии. — Киев: Наук. думка, 1990. — С. 81–85.
64. *Капличный Н.Н., Жаркин А.Ф., Бреус И.В.* Влияние полупроводниковых преобразователей на режим работы низковольтной электрической сети общего назначения // Пробл. электромагнитной совместимости силовых полупроводниковых преобразователей: Тез. докл. Третьего Всесоюз. науч.-техн. совещания. Таллинн, 1986. — Таллинн: Ин-т термофизики и электрофизики АН ЭССР, 1986. — Ч.3. — С. 34–35.
65. *Карнов И.В.* Симметрия гармонического спектра трехфазных цепей // Пробл. техн. электродинамики. — 1975. — Вып. 55. — С. 51–55.
66. *Карташов И.И.* Электромагнитная совместимость в системах электроснабжения // Электротехника. — 2001. — № 4. — С. 57–61.
67. *Кинеев Ю.П., Морозов А.А., Быбак А.Л., Митяшина Т.И.* Состояние и перспективы развития источников вторичного электропитания // Обзоры по электронной технике. Сер. 5, Радиодетали и радиокомпоненты. — М.: Изд-во ЦНИИ «Электроника». — Вып.5 (1115). — 1985. — 50 с.
68. *Кириленко О.В., Денисюк С.П.* Моделювання енергетичних процесів у системах енергопостачання при вирішенні завдань енергозбереження // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України. Електродинаміка: 36. наук. пр. — Київ: ІЕД НАН України, 2001. — С. 87–91.
69. *Кисель О.Б., Чернопятаев Н.И.* Экспериментальное определение параметров нулевой последовательности трехфазных трансформаторов // Электротехника. — 1967. — № 12. — С. 38–39.
70. *Кисель О.Б., Шпилько Ю.Е., Колобов Б.А.* К вопросу о параметрах нулевой последовательности трехфазных сухих трансформаторов // Тр. Целиноградского сельскохозяйств. ин-та. — 1979. — № 22. — С. 34–37.
71. *Ковальчук Е.С., Кальницкая М.С.* Реле напряжения для системы оперативного постоянного тока // Эл. станции. — 1984. — № 9. — С. 56–57.
72. *Коган Ф.Л.* Аномальные режимы мощных турбогенераторов. — М.: Энергоатомиздат, 1988. — 86 с.
73. *Когда Я.* Влияние высших гармоник в электрораспределительных системах и меры по их устранению // Дэнки гэмба. — 1981. — 20, № 235. — С. 50–54.
74. *Козлов В.А., Билик Н.И., Файбисович Д.Л.* Справочник по проектированию электроснабжения городов. — Л.: Энергия, 1974. — 280 с.
75. *Козлов В.А., Билик Н.И., Файбисович Д.Л.* Там же. — 1986. — 256 с.
76. *Козюков В.А., Пястолов А.А.* Опытное определение параметров нулевой последовательности насыщенных трансформаторов // Эл. станции. — 1967. — № 1. — С. 77–78.
77. *Комаров Н.С., Федоров С.Д.* Качество электроэнергии в системах гарантированного электроснабжения информационно-вычислительных комплексов // Энергетика и электрификация. — 2001. — № 12(221). — С. 33–39.

78. *Комацу К.* Новая технология устранения погрешностей, обусловленных высшими гармониками // Дэнки Кэйсан. — 1985. — 53, № 11. — С. 48–52.
79. *Константинов Б.А., Жежеленко И.В., Липский А.М., Слепов Ю.В., Козырь В.Н., Божко В.М., Рабинович М.Л.* Качество электроэнергии и электромагнитная совместимость электрооборудования предприятий // Электричество. — 1977. — № 3. — С. 1–8.
80. *Косицин Ю.В.* О сопротивлениях силовых трансформаторов 6(10)/0,4 кВ токам прямой, обратной и нулевой последовательностей // Пром. энергетика. — 1990. — № 8. — С. 31–32.
81. *Костенко М.П., Нейман Л.Р., Бладзевич Г.Н.* Электромагнитные процессы в системах с мощными выпрямительными установками. — М.: Л.: Изд-во АН СССР, 1946. — 108 с.
82. *Котельников О.И., Крахмалин И.Г.* Влияние помех питающего напряжения на работу ЭВМ // Пром. энергетика. — 1982. — № 7. — С. 44–46.
83. *Криволапов О.Н., Островский Е.П.* Питання вибору та перспектив ефективного використання енергоекономних джерел світла // Енергетика та ринок. — 1997. — № 3(4). — С. 29–32.
84. *Крикунич А.Б.* Собственные нужды крупных блоков // Эн. хозяйство за рубежом. — 1983. — № 2. — С. 37–38.
85. *Крогерис А.Ф.* Расчет токов и напряжений в цепях трехфазных мостовых выпрямительных схем // Изв. АН Латв. ССР. — 1954. — № 7. — С. 91–111.
86. *Кузнецов В.Г., Григорьев А.С., Данилюк В.Б.* Снижение несимметрии и несинусоидальности напряжений в электрических сетях. — Киев: Наук. думка, 1992. — 240 с.
87. *Кузнецов В.Г., Капличный Н.Н., Данилюк В.Б., Жаркин А.Ф.* Уравновешивание и снижение несинусоидальности напряжения в трехфазных сетях с нулевым проводом // Техн. электродинамика. — 1986. — № 5. — С. 70–76.
88. *Кузнецов В.Г., Колесниченко А.Б., Олянишин В.О.* Анализ и поликри-териальное управление режимами электрических сетей с искажающими потребителями // Present day problems of power system automation and control. Proc. of 5-th International conference. (Гливице, Польша, 26–28 сентября 1989 г.). — Gliwice, 1989. — С. 104–110.
89. *Кузнецов В.Г., Николаенко В.Г.* Оценка экономического ущерба от несимметрии и несинусоидальности напряжений в промышленных системах электроснабжения // Техн. электродинамика. — 1980. — № 1. — С. 33–37.
90. *Кузнецов В.Г., Олянишин В.О.* Нормирование несимметрии и несинусоидальности напряжений в электрических сетях: Обзор отечественных и зарубежных источников. — Киев, 1993. — 33 с. — (Препр./АН Украины. Ин-т электродинамики; 732).
91. *Кузнецов В.Г.* Проблемы повышения качества энергии в электрических сетях и системах // Техн. электродинамика. — 1991. — № 2. — С. 84–92.
92. *Кузнецов В.Г., Тугай Ю.И.* Тенденції розвитку систем електропостачання // Електротехніка та електроенергетика. — 2000. — № 2. — С. 73–76.
93. *Кузнецов В.Г., Тугай Ю.И., Шполянский О.Г.* Адаптивная оптимизация режимов систем электроснабжения с источниками искажений // Техн. елек-

- тройдинаміка: Тем. вип. «Моделювання електронних, електричних та технологічних систем». — 1999. — Ч.1. — С. 7—10.
94. Кузнецов В.Г. Универсальный метод анализа частотных свойств многофазных цепей // Там же. — 2000. — Ч.2. — С. 7—10.
95. Кузнецов В.Г. Устройства повышения качества электрической энергии в низковольтных сетях с нулевым проводом // Электричество. — 1978. — № 10. — С. 6—10.
96. Куренный Э.Г. Проблемы ЭМС потребителей в электрических сетях общего и специального назначения // Техн. электродинамика. — 1989. — № 3. — С. 22—25.
97. Липковский К.А., Кирик В.В., Жаркин А.Ф., Самков А.В. Особенности электропитания «энергоэффективных потребителей» // Техн. электродинамика: Тем. вип. «Моделювання електронних, енергетичних та технологічних систем». — 1999. — Ч.1. — С. 94—96.
98. Липковский К.А., Федоров С.Д. Определение требований к блоку гарантированного питания управляющих микроЭВМ, работающих в условиях сетевых помех. — Киев: 1990. — 44 с. — (Препр. / АН УССР. Ин-т электродинамики; 669).
99. Липківський К.О., Федоров С.Д. Особливості нормалізації живлення споживачів в системах електропостачання обмеженої потужності // Техн. електродинаміка: Тем. вип. «Силова електроніка та енергоефективність». — 2001. — Ч.3. — С. 7—13.
100. Липківський К.О., Халіков В.А., Можаровський А.Г. Интегральные характеристики джерела живлення з безтрансформаторним входом // Техн. електродинаміка. — 2002. — № 5. — С. 32—36.
101. Лысенко Е.Н. Защита сети оперативного постоянного тока от перенапряжений // Эл. станции. — 1987. — № 2. — С. 65—67.
102. Лютый О.П. Комплексный анализ несимметрии и несинусоидальности в системах электропостачання з різкозмінними навантаженнями // Техн. електродинаміка: Тем. вип. «Проблеми сучасної електротехніки». — 2002. — Ч.2. — С. 104—107.
103. Майер В.Я., Кладько С.Р., Зеня. Методика и алгоритм расчета гармонических составляющих несимметричных параметров электроэнергетики при определении показателей ее качества // Техн. электродинамика. — 1990. — № 5. — С. 88—92.
104. Манькин Э.А. Потери на вихревые токи в обмотках трансформаторов при несинусоидальном токе // Электричество. — 1955. — № 2. — С. 48—52.
105. Маркушевич Н.С., Солдаткина Л.А. Качество напряжения в городских электрических сетях. — М.: Энергия, 1975. — 256 с.
106. Масленников В.С., Стасевич С.Г. Регулирование напряжения в системе оперативного постоянного тока ГРЭС // Эл. станции. — 1982. — № 4. — С. 41—45.
107. Мельников Н.А. Электрические сети и системы. — М.: Энергия, 1975. — 464 с.
108. Мерабишвили П.Ф., Ярошенко Е.М. Нестационарные электромагнитные процессы в системах с вентилями. — Кишинев: Штиинца, 1980. — 208 с.
109. Милах А.Н., Шидловский А.К., Кузнецов В.Г. Симметрирующие устройства с электромагнитными связями. — Киев: 1970. — 46 с. — (Препр. / АН УССР. Ин-т электродинамики; 3).

110. Миндзуно Х. Силовая электроника, используемая для регулирования гармоник высших порядков // Дэнки Кэйсан. — 1984. — 52, № 12. — С. 36—39.
111. Мирский Г.Л. Электронные измерения. — М.: Радио и связь, 1986. — 440 с.
112. Мкртчян Ж.А. Электропитание электронно-вычислительных машин. — М.: Энергия, 1980. — 208 с.
113. Морозов Н.Р. Резервирование защит сетей 0,4 кВ собственных нужд электростанций // Эл. станции. — 1987. — № 4. — С. 57—60.
114. Москаленко Г.А., Комаров Н.С., Козлов А.В., Бойко П.С. Принципы построения источников вторичного электропитания с улучшенной электромагнитной совместимостью // Пробл. электромагнитной совместимости силовых полупроводниковых преобразователей: Тез. докл. Третьего Всесоюз. науч.-техн. совещания. Таллинн, 1986. — Таллинн: Ин-т термофизики и электрофизики АН ЭССР, 1986. — Ч.1. — С. 62—63.
115. Москаленко Г.А., Пономарев В.А., Жаркин А.Ф., Козлов А.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения. Обзор отечественных и зарубежных литературных источников. — Киев: 1988. — 41 с. — (Препр. / АН УССР. Ин-т электродинамики; 604).
116. Мостовяк И.В., Жаркин А.Ф., Зоценко А.В. Вхідний струм реактивного чотириполюсника з випрямним навантаженням // Техн. електродинаміка. — 2001. — № 3. — С. 48—50.
117. Мостовяк И.В., Жаркин А.Ф., Зоценко А.В. Моделювання вихідної напруги випрямляча при активно-емнісному навантаженні // Вісник Нац. ун-ту «Львівська політехніка». Електроенергетичні та електромеханічні системи. — 2001. — № 421. — С. 127—129.
118. Мостовяк И.В., Жаркин А.Ф., Самков А.В. Математическая модель трехфазного мостового выпрямителя с параллельным конденсатором // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: 36. наук. пр. — Київ: ІЕД НАН України, 2002. — № 3(3). — С. 68—69.
119. Мостовяк И.В., Жаркин А.Ф., Самков А.В. Синтез параметрических цепей урівновешивания системы трехфазных напряжений // Техн. електродинаміка. — 1999. — № 3. — С. 39—42.
120. Мостовяк И.В., Жаркин А.Ф. Синтез идеальных четырехполюсников для преобразования синусоидального напряжения в постоянное // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: 36. наук. пр. — Київ: Ін-т електродинаміки НАН України, 2003. — № 2(5). — С. 7—10.
121. Мостовяк И.В., Жаркин А.Ф. Упрощенная математическая модель низковольтной сети с выпрямительными нагрузками // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: 36. наук. пр. — Київ: ІЕД НАН України, 2003. — № 1(4). — С. 25—27.
122. Мостовяк И.В., Мостовяк Д.І., Фартушок І.М., Пасічник Х.А. Вихідна напруга однофазного перетворювача змінного струму у постійний при активному вхідному опорі // Техн. електродинаміка. — 2000. — № 6. — С. 48—50.
123. Мостовяк И.В., Новский В.А. Определение входных и выходных токов однофазных мостовых преобразователей // Техн. електродинаміка. — 1989. — № 5. — С. 29—32.
124. Музыченко А.Д. О критериях оценки качества трехфазных напряжений в электрических сетях // Методы и средства повышения качества электрической энергии. — Киев: Наук. думка, 1976. — С. 163—168.

125. *Паливно-енергетичний комплекс України на порозі третього тисячоліття* // Під ред. А.К. Шидловського, М.П. Ковалка. — Київ: Українські енциклопедичні знання, 2001. — 400 с.

126. *Пентегов И.В., Волков И.В., Левин М.* Устройства подавления высших гармоник тока // Техн. електродинаміка: Тем. вип. «Проблеми сучасної електротехніки». — 2002. — Ч.1. — С. 13—22.

127. *Пентегов И.В., Сидорец В.Н., Рымар С.В., Волков И.В.* Особенности расчета  $K$  и  $K_d$ -факторов распределительных трансформаторов и трансформаторов устройств преобразовательной техники // Техн. електродинаміка: Тем. вип. «Силовая электроника та енергоефективність». — 2003. — Ч.4. — С. 33—39.

128. *Перхач В.С.* Теоретична електротехніка. — Київ: Вища школа, 1992. — 439 с.

129. *Полуянов М.И., Раскин А.С., Чужба П.П.* Сопротивление нулевой последовательности трансформаторов со схемой звезда—звезда с нулем // Механизация и электрификация соц. сельского хоз-ва. — 1972. — № 8. — С. 47.

130. *Поляков Н.Г., Кийко В.В.* Об одном методе оценки эффективности электропотребления при несимметричных нелинейных нагрузках // Техн. електродинаміка: Тем. вип. «Проблеми сучасної електротехніки». — 2002. — Ч.7. — С. 86—89.

131. *Помешкин П.В.* Влияние электромагнитных помех на работу электронной аппаратуры в условиях строительной площадки // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: 36. наук. пр. — Київ: Ін-т електродинаміки НАН України, 2003. — № 1 (4). — С. 118—122.

132. *А.с. 1279031 СССР, МКИ H02M 7/04.* Преобразователь переменного напряжения в постоянное / А.К. Шидловский, Ю.И. Драбович, Н.С. Комаров и др. (СССР). — Оpubл. 23.12.86, Бюл. № 47.

133. *А.с. 1339516 СССР, МКИ H 02M 7/04.* Преобразователь переменного напряжения в постоянное / А.К. Шидловский, Ю.И. Драбович, Н.С. Комаров и др. (СССР). — Оpubл. 23.09.87, Бюл. № 35.

134. *Пястолов А.А., Попов Е.П.* Сопротивление нулевой последовательности трансформаторов с алюминиевыми обмотками // Эл. станции. — 1963. — № 4. — С. 82—84.

135. *Развить теорию и исследовать принципы построения полупроводниковых преобразователей с интеллектуальным микропроцессорным управлением и улучшенной электромагнитной совместимостью в электрических системах с нелинейными быстроизменяющимися нагрузками: Отчет о НИР «Параметр» / Ин-т електродинаміки НАН України. — № ГР 0198U008130; Инв. № 0201U005958. — Киев, 2001. — 136 с.*

136. *Развить теорию и разработать методы уравнивания многофазных систем с источниками искажений: Отчет о НИР «Баланс» / Ин-т електродинаміки НАН України. — № ГР 01.89.0068013; Инв. № 02929000757. — Киев, 1992. — 172 с.*

137. *Развить теорию построения новых многофункциональных устройств для повышения качества электроэнергии и эффективности функционирования оборудования в низковольтных сетях с нелинейными и несимметричными нагрузками: Отчет о НИР «Фаза-2» / Ин-т електродинаміки НАН України. — № ГР 0196U003760; Инв. № 0200U004978. — Киев, 2000. — 109 с.*

138. *Разработать теорию и создать новые полупроводниковые преобразовательные устройства с микропроцессорным управлением и стабилизацией режимных и входных параметров: Отчет о НИР «Стабилизация-1» / Ин-т електродинаміки НАН України. — № ГР 01.91.007412; Инв. № 02949000542. — Киев, 1993. — 258 с.*

139. *Разработать теорию электромагнитных процессов в трехфазных четырехпроводных системах с нелинейными нагрузками и разработать рекомендации по повышению качества электроэнергии и эффективности режимов низковольтных электрических сетей: Отчет о НИР «Фаза-П» / Ин-т електродинаміки НАН України. — № ГР UA 01008519P; Инв. № 0295U003199. — Киев, 1994. — 104 с.*

140. *Развиг В.Д.* Система проектирования *OrCAD 9.2*. — М.: Солон-Р, 2001. — 519 с.

141. *Розанов Ю.К.* Полупроводниковые преобразователи со звеном повышенной частоты. — М.: Энергоатомиздат, 1987. — 184 с.

142. *Розанов Ю.К., Рябчицкий М.В., Гринберг Р.П., Смирнов М.И.* Гибридный фильтр высших гармоник // Техн. електродинаміка: Тем. вип. «Силовая электроника та енергоефективність». — 2003. — Ч.3. — С. 31—32.

143. *Розанов Ю.К., Рябчицкий М.В., Кваснюк А.А.* Современные методы регулирования качества электроэнергии средствами силовой электроники // Электротехника. — 1999. — № 4. — С. 28—32.

144. *Розанов Ю.К., Рябчицкий М.В.* Современные методы улучшения качества электроэнергии (аналитический обзор) // Электротехника. — 1998. — № 3. — С. 10—17.

145. *Соколов М.М., Долбиллин Е.В.* Методы снижения несинусоидальности напряжения сети при работе статических источников питания электротермических установок // Пром. энергетика. — 1987. — № 1. — С. 35—37.

146. *Супротович Г.* Улучшение коэффициента мощности преобразовательных установок. — М.: Энергоатомиздат, 1985. — 136 с.

147. *Татаринцев А.Г.* О выборе установок защиты от однофазных коротких замыканий в сетях 0,4 кВ // Эл. станции. — 1984. — № 9. — С. 58—59.

148. *Тиховод С.М.* Методика компьютерного моделирования электрических цепей, содержащих полупроводниковые вентили // Электротехника и электроэнергетика. — 2000. — № 2. — С. 50—52.

149. *Тонкаль В.Е., Новосельцев А.В., Заболотный А.П.* Макромоделирование энергетических процессов вентильных преобразователей. — Киев: 1989. — 53 с. — (Препр. / АН УССР. Ин-т електродинаміки; 593).

150. *Тульчин И.К., Нудлер Г.И.* Электрические сети и электрооборудование жилых и общественных зданий. — М.: Энергоатомиздат, 1990. — 480 с.

151. *Ульянов С.А.* Электромагнитные переходные процессы. — М.: Энергия, 1970. — 520 с.

152. *А.с. 1206881 СССР, МКИ H 02 3/26.* Фальтросимметрирующее устройство для трехфазных электрических сетей с нулевым проводом / А.К. Шидловский, В.Г. Кузнецов, Н.Н. Капльинный, В.Б. Данилюк, А.В. Самков, О.С. Якимов (СССР). — Оpubл. 23.01.86, Бюл. № 3.

153. *Хабигер Э.* Электромагнитная совместимость. — М.: Энергоатомиздат, 1995. — 296 с.

154. *Чиженко И.М., Курило И.А., Тарасенко А.И.* Математическое моделирование системы тиристорный регулятор—вентильный двигатель // Проб-

- лемы нелинейной электротехники. — Киев: Наук. думка, 1984. — Ч. 2. — С. 17—19.
155. Чужба П.П. Сопротивление нулевой последовательности сельскохозяйственных трансформаторов // Механизация и электрификация сельского хозяйства: Респ. межвед. темат. науч.-техн. сб. — Минск: Урожай, 1969. — Вып. V. — С. 72—75.
156. Шаповалов И.Ф. Справочник по расчету электрических сетей. — Киев: Будівельник, 1974. — 236 с.
157. Шваб А.И. Электромагнитная совместимость. — М.: Энергоатомиздат, 1998. — 480 с.
158. Шевченко В.В., Буре И.Г. Проблемы электромагнитной совместимости в системах электроснабжения промышленных предприятий // Электротехника. — 1989. — № 8. — С. 32—40.
159. Шидловська Н.А. Аналіз нелінійних електричних кіл методом малого параметру. — Київ: Євроіндекс, 1999. — 192 с.
160. Шидловский А.К., Драбович Ю.И., Комаров Н.С., Москаленко Г.А., Козлов А.В. Анализ гармонического состава потребляемого тока преобразователя переменного напряжения в постоянное с улучшенной электромагнитной совместимостью // Техн. электродинамика. — 1987. — № 3. — С. 32—40.
161. Шидловский А.К., Козлов А.В., Комаров Н.С., Москаленко Г.А. Транзисторные преобразователи с улучшенной электромагнитной совместимостью. — Киев: Наук. думка, 1993. — 272 с.
162. Шидловский А.К., Кузнецов В.Г., Мостовяк И.В. Энергетические характеристики электромагнитной совместимости цепей // Техн. электродинамика. — 1985. — № 4. — С. 3—9.
163. Шидловский А.К., Кузнецов В.Г. Повышение качества энергии в электрических сетях. — Киев: Наук. думка, 1985. — 268 с.
164. Шидловский А.К., Куренный Э.Г. Введение в статистическую динамику систем электроснабжения. — Киев: Наук. думка, 1984. — 273 с.
165. Шидловский А.К., Мостовяк И.В., Москаленко Г.А. Уравновешивание режимов многофазных цепей. — Киев: Наук. думка, 1990. — 272 с.
166. Шидловский А.К., Мостовяк И.В., Новский В.А. Симметрирование режимов трехфазных систем с нелинейными однофазными нагрузками // Электричество. — 1991. — № 2. — С. 1—6.
167. Шидловский А.К., Новский В.А., Капличный Н.Н. Стабилизация параметров электрической энергии в распределительных сетях. — Киев: Наук. думка, 1989. — 312 с.
168. Шпилюк Ю.Е. Модернизация трансформаторов со схемой соединения обмоток «звезда-звезда с нулем» с целью повышения качества электрической энергии // Труды ЦСХП. — 1981. — Т. 35. — С. 53—58.
169. Ющенко Б.А., Заруба Н.И., Олейник С.Г. Математические модели вентильных преобразователей как системы дифференциальных уравнений с малыми параметрами // Техн. электродинамика. — 1985. — № 5. — С. 42—47.
170. Яндульський О.С., Шербина Ю.В., Білінцов В.С., Бржезицький В.О., Сенько В.І. Чинний в Україні стандарт якості енергії // Промислова електроенергетика та електротехніка. — 2002. — № 4. — С. 9—12.

171. Baith T.L. Network harmonics limitations in Australia through its Standard AS 2279—1979 // Proceedings of the International Wroclaw symposium on electromagn. compatibility. — Wroclaw, 1982. — P. 497—506.
172. Barton T.H. Rectifiers, Cycloconverters and AC Controllers. — Oxford: Clarendon Press, 1994. — 670 p.
173. Busse A., Holtz J. Multiloop control unit power factor fast switching AC to DC converter // Proc'82 Rec. IEEE Power electron spec. 13-th annual conf., Cambridge Mass, June 1982, New York. — 1982. — P. 171—179.
174. Cortina R., De Pasquali F., Giraldo A. La protezione dalle interferenze elettromagnetiche dei sistemi di automazione delle centrali termiche e nucleari // L'energia elettrica. — 1989. — N 6. — S. 157—281.
175. Dagenhart J.B., Dalton J.G., Ivey G.W., Keels K.B. New techniques developed to ensure quality power // Transmission and distribution. — 1987. — 39, N 5. — P. 48, 50, 52, 55—56.
176. Derek A. Price: Power electronic converter harmonics // IEEE Press, New York. — 1996.
177. Dugan R.C., McGranaghan M.F., Beaty H.W. Electrical power systems quality. — New York: McGraw-Hill, 1996. — 260 p.
178. Duran R.C., McGranaghan M.F., Waynebeaty H. Electrical power systems quality / McGraw-Hill. — New York, 1996. — P. 265.
179. Emanuel A.E. Estimating the effects of harmonic voltage fluctuations on the temperature rise of squirrel-cage motors // IEEE Trans. on Energy Conv. — 1991. — 6, N 1. — P. 162—169.
180. Emanuel A.E., Wang X. Estimation of loss of life of power transformers supplying nonlinear loads // IEEE Trans. on Power App. and Syst. — 1985. — PAS-114. — N 3. — P. 628—636.
181. Feser K. Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) — Begriffe und Wirkungsmechanismen // Elektrische Bahnen. — 1990. — N 10. — S. 355—360.
182. Freund A. Nonlinear loads mean trouble // Electr. Constr. and Maint. — 1988. — Vol. 87, N 3. — P. 83—90.
183. Fujita H., Yamasaki T., Akagi H. A hybrid active filter for damping of harmonic resonance in industrial power systems // IEEE Trans. on power electronics. — 2000. — 5, N 2. — P. 215—222.
184. Giacoletto L.J., Park J.L. Harmonic filtering in power applications // Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference: Pap. Annu. Meet., Chicago. — New York: IEEE, 1989. — P. 123—128.
185. Grabe T.E. Solving harmonic problems in industrial plants and harmonic mitigation techniques for adjustable speed drives / Proc. of Electrotech 92, Montreal, 1992.
186. Grady W.M., Samotyi M.J., Noyola A.H. Survey of active power line conditioning methodologies // IEEE Trans. — 1990. — 5, N 3. — P. 1536—1542.
187. Handke A. Pływ jednofazowych przekształtników tyrystorowych na pracę przewodu zerowego w trójfazowych sieciach zasilających prądu przemiennego // Politechnika Poznańska, Zeszyty naukowe, Elektryka, Poznań, WPP. — 1988. — N 23. — S. 107—118.
188. Howroyd L.C. Case studies in distortion on the public supply system // Proceedings of the International conference sources and eff. power system disturb. — London (UK), 1982. — P. 215—220.
189. IEC 61000-2. (all section and parts), Electromagnetic compatibility (EMC). — Part 2: Environment.

190. IEC 61000-4-1. Electromagnetic compatibility (EMC) — Part 4-1: Testing and measurement techniques. — Overview of 61000-4 series.
191. IEC 61000-6-5 Electromagnetic compatibility (EMC) — Part 6-5: Generic standards. — Immunity for power station and substation environments.
192. Immesberger B. Nenzstörungen und schutzmasnahmen // Elektronik. — 1982. — N 5. — S. 91—94.
193. Jacquet B. Disturbances problems in substations // International conference on electrical distributions. Paper 1. — 1983. — N 7. — P.C.11.1—C.11.6.
194. Kabrhel I. Impulsi ruseni v energetickych sitich // EGV Bulletin. — 1986. — 97. — S. 57—61.
195. Key T.S. Providing clean, stable power for sensitive electronic equipment // Plant engineering — 1980. — N 7. — P. 99—104.
196. Kocher M.J., Steigerwald R.L. An AC to DC converter with high quality wave form // Pesc'82 Rec. IEEE Power electron spec. 13-th annual conf., Cambridge Mass, June 1982. — New York, 1982. — P. 62—75.
197. Lamedica R., Prudenzi A., Tironi E., Zaninelli D. Analysis of harmonic distortion limits in IEC and IEEE standards // 5-th International Conference «Electrical power quality and utilization». Sept. 15—17, 1999, Cracow, Poland. — P. 93—100.
198. Le Grope de Travail 36-05 du Comite d'Etudes 36. Harmoniques parametres caracteristiques methodes d'etude, estimation de valeurs existantes en reseau // Electra. — 1981. — 77. — P. 35—54.
199. Pat. 5.543.771. USA Phase shifting transformer or autotransformer / M. Levin. — Publ. 08.06.1996.
200. Linders J.R. Effects of power supply variations on AC motor characteristics // IEEE Trans. on Ind. Appl. — 1972. — Vol.IA-8. — P. 383—400.
201. Linders J.R. Electric wave distortions: their hidden costs and containment // IEEE Trans. on Ind. Appl. — 1979. — Vol.IA-15, N 5. — P. 458—471.
202. Melesani L., Tenti P. Three-phase AC to DC PWM converter with sinusoidal AC currents and minimum filter requirements // IEE — IAS, 20-th annual Meeting, Toronto, Oct.6—11, 1985. — New York, 1985. — P. 1227—1232.
203. Michalik G., Mielczarski W., Ratnayaka P. Side effects of energy saving laps // 4-th Intern. Conf. «Electrical Power quality and utilisation». — Cracow, Poland. — 1997. — P. 433—439.
204. Nash H.O., Wells F.M. Power systems disturbances and considerations for power conditioning // Proceedings of the IEEE annual textile industry technical conference. — New York, 1985. — N 7. — P. 1—10.
205. Paul H.-U., Requa R. Behandlung von EMV-Problemen aus sicht des Betreibers // Elektrizitätswirtschaft. — 1988. — 87. — N 9. — S. 475—481.
206. Quality of Power and Standardization // Proceedings of the International Conference, Tallinn, Estonia. — 1996. — 244 p.
207. Rastogi M., Naik R., Mohan N. A comparative evaluation of harmonic reduction techniques in three-phase utility interface of power electronic loads // IEEE Transactions on industry applications. — 1994. — 30, N 5. — P. 1149—1155.
208. Ruhlmann R. Einflüsse von Oberschwingungen aus dem Übergelagerten Netz // Elektrotechnik. — 1983. — 65, N 22. — S. 16—18.
209. Russel B.D., Harvey S.M., Nilsson S.I. Substation electromagnetic interference. Part 1 // IEEE Trans. on power apparatus and systems. — 1984. — PAS-103. — N 7. — P. 1863—1870.

210. Sakui M., Fujita H., Shioya M. A method for calculating harmonic currents of three-phase bridge uncontrolled rectifier with DC filter // IEEE transaction on industrial electronics. — 1989. — 36, N 3. — P. 434—440.
211. Selieseth H. Forurensing ow nettspenningen // Electro. — 1984. — 97, N 9. — S. 18—21.
212. Shidlovsky A.K., Kuznetsov V.G. Increasing the functional efficiency of electric power systems with distorting loads // Proceedings of 3-th International Conference on Harmonics in Power Systems. — Capri, Italy, May 24—27, 1989.
213. Suzuki Y., Seo K., Saito R. A three-phase rectifier with low distortion input current // Orig. Techn. J. — 1984. — N 47. — P. 39—44.
214. Takahashi I., Ikeshita W. Improvement of input current waveform of a single-phase rectifier circuit // IEEE Trans., Japan. — Feb. 1985. — 105, N 2. — P. 174.
215. Tihanyi L. Electromagnetic Compatibility in power electronics // IEEE Press, New York, 1995. — P. 402.
216. Wajs K. Harmoniczne pradow i napiesci pradu przemiennego zasilajacej układy prostownikowe // Wiedomosci elektrotechniczne. — 1983. — 51, N 3-4. — S. 66—76.
217. Wolff R. Distribution harmonics cause problems // Electrical world. — April 1982. — 196, N 4. — P. 35—37.
218. Wurdel U. Selbstgeloschte Gleichrichter als netzruckwirkungsarme Stromrichter // Elektr. — 1982. — 36, N 9. — S. 482—483.
219. Ziogas P., Kang Young-Goo, Stefanovic V. PWM control techniques for rectifier filter minimization // Pesc'84 Rec. 15-th annual IEEE power electron spec. conf., Gathersburg, 18—21 June 1984, New York. — 1984. — P. 353—362.

ПРЕДИСЛОВИЕ .....	3
ОСНОВНЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ .....	5
ВВЕДЕНИЕ .....	7

## Глава первая

<b>СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОСОБЕННОСТИ ПРОБЛЕМЫ ВЫСШИХ ГАРМОНИК В НИЗКОВОЛЬТНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ</b> .....	11
1.1. Причины образования высших гармоник в сетях низкого напряжения .....	11
1.2. Влияние высших гармоник на различные виды электрооборудования .....	18
1.3. Электромагнитная совместимость и ее оценка в системах электроснабжения с нелинейными нагрузками .....	26

## Глава вторая

<b>МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ РЕЖИМОВ СЕТЕЙ НИЗКОГО НАПЯЖЕНИЯ С НЕЛИНЕЙНЫМИ НАГРУЗКАМИ</b> .....	35
2.1. Моделирование нелинейных нагрузок .....	35
2.2. Моделирование и расчет токов и напряжений сетей НН с нелинейными нагрузками .....	41
2.3. Модели низковольтных сетей, в которых нелинейные нагрузки задаются источниками токов .....	48
2.4. Анализ зависимостей высших гармоник тока и напряжения с помощью традиционных моделей .....	56

## Глава третья

<b>УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ И РАСЧЕТ НЕСИНУСОИДАЛЬНОСТИ ТОКОВ И НАПЯЖЕНИЙ НИЗКОВОЛЬТНЫХ СЕТЕЙ</b> .....	65
3.1. Математическая модель электрической сети здания с учетом параметров ее основных элементов и характерных электроприемников ..	65
3.2. Методология определения параметров схемы замещения сети .....	71

3.3. Расчет несинусоидальности токов и напряжений в электрических сетях общественных зданий .....	78
3.4. Анализ несинусоидальности напряжений с помощью схем замещения с источниками токов высших гармоник .....	...
3.5. Метод оценки влияния потерь напряжения в линиях на значение несинусоидальности напряжения в узлах .....	93

## Глава четвертая

<b>АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ НАГРУЗКИ И СЕТИ НА ЗНАЧЕНИЯ ВЫСШИХ ГАРМОНИК В СЕТЯХ НИЗКОГО НАПЯЖЕНИЯ</b> .....	100
4.1. Анализ влияния доли нелинейной нагрузки .....	100
4.2. Влияние мощности и схемы соединения обмоток трансформатора .....	106
4.3. Моделирование и анализ влияния параметров нагрузочных режимов .....	113
4.4. Анализ несимметрии нелинейных электроприемников .....	119
4.5. Методика определения коэффициента искажения синусоидальности кривых фазных напряжений .....	128

## Глава пятая

<b>СНИЖЕНИЕ УРОВНЯ ВЫСШИХ ГАРМОНИК В НИЗКОВОЛЬТНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ</b> .....	138
5.1. Средства снижения уровня высших гармоник в сетях низкого напряжения .....	138
5.2. Синтез схем корректирующих устройств для трехфазных четырехпроводных сетей .....	143
5.3. Моделирование фильтрации высших гармоник .....	150
5.4. Анализ эффективности фильтрации с использованием фильтров токов гармоник нулевой последовательности .....	155

## Глава шестая

<b>ПРИМЕНЕНИЕ СРЕДСТВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ В СЕТЯХ НИЗКОГО НАПЯЖЕНИЯ РАЗЛИЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ</b> .....	162
6.1. Снижение несинусоидальности напряжений в низковольтных электрических сетях общего и специального назначения .....	162
6.2. Построение систем электропитания с улучшенной электромагнитной совместимостью .....	168

6.3. Организация искусственного нулевого провода при подключении системы электропитания к трехфазной трехпроводной сети .....	175
6.4. Технические средства защиты от электромагнитных помех в сетях собственных нужд и оперативного тока энергетических объектов .....	180
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	187
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	194

Наукове видання

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ІНСТИТУТ ЕЛЕКТРОДИНАМІКИ

**ШИДЛОВСЬКИЙ** Анатолій Корнійович  
**ЖАРКІН** Андрій Федорович

## **ВИЩІ ГАРМОНІКИ В НИЗЬКОВОЛЬТНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ**

(Російською мовою)

Київ, видавництво «Наукова думка»

Художній редактор Є.І. Муштенко  
Технічний редактор С.Г. Максимова  
Коректор О.Є. Челок  
Оператор Л.В. Багненко  
Комп'ютерна верстка Т.О. Ценцус

Підп. до друку 27.10.2005. Формат 60×90/16. Офс. друк.  
Гарн. Таймс. Папір офс. № 1. Ум. друк. арк. 13,25.  
Ум. фарбо-відб. 13,75. Обл.-вид. арк. 12,07.  
Тираж 300 прим. Зам. № 5—1846

Видавництво «Наукова думка».  
Р.с. № 05417561 від 16.03.95  
01601 Київ 1, вул. Терещенківська, 3

ЗАТ фірма «Віпол»  
03151 Київ 151, вул. Волинська, 60