

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МЭИ»

С.А. Янченко, С.В. Гужов

**РАБОТОСПОСОБНОСТЬ И КАЧЕСТВО
ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ
КОМПЛЕКСОВ И СИСТЕМ В РЕЖИМАХ
НЕСИНУСОИДАЛЬНОСТИ НАПРЯЖЕНИЯ**

Учебное пособие по курсам
«Качество электрической энергии», «Электроснабжение
предприятий и энергоэффективное электрооборудование»
для студентов, обучающихся по направлениям подготовки
«Теплоэнергетика и теплотехника»,
«Электроэнергетика и электротехника»

Москва
Издательство МЭИ
2016

УДК 621.313

ББК 31.2

Я662

Утверждено учебным управлением МЭИ
Подготовлено на кафедре ЭПП НИУ «МЭИ»

Рецензенты: С.С. Бодрухина, канд. техн. наук, доц. каф. ЭПП НИУ «МЭИ»;
М.Г. Баширов, докт. техн. наук, проф., зав. каф. ЭиАПП УГНТУ

Янченко, С.А.

Я662 Работоспособность и качество функционирования электротехнических комплексов и систем в режимах несинусоидальности напряжения: учебное пособие / С.А. Янченко, С.В. Гужов. — М.: Издательство МЭИ, 2016. — 44 с.

ISBN 978-5-7046-1760-0

Рассмотрены основные понятия, основы анализа нелинейных сетей, связанные с рациональным использованием электрической энергии, а также со снижением потерь от несинусоидальности токов и напряжений на этапах ее передачи и потребления различными типами нагрузок.

Изложены основы анализа влияния несинусоидальности напряжения электрической сети на электропотребление оборудования сети и различных типов нагрузок.

Приведены наиболее часто используемые способы снижения объемов потребляемой электроэнергии на счет снижения уровня эмиссии гармонических составляющих.

Для студентов технических университетов, обучающихся по программам подготовки бакалавров по направлению 13.03.01. «Теплоэнергетика и теплотехника». Также может быть использовано для подготовки бакалавров по направлению 13.03.02. «Электроэнергетика и электротехника».

УДК 621.313

ББК 31.2

ISBN 978-5-7046-1760-0

© Национальный исследовательский
университет «МЭИ», 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
1. Общие сведения о несинусоидальности напряжения.....	6
2. Типовые источники несинусоидальности напряжения и тока в электрических сетях.....	8
2.1. Трансформаторы.....	8
2.2. Электрические машины.....	9
2.3. Электротермические установки.....	9
2.4. Управляемые выпрямители.....	10
2.5. Неуправляемые выпрямители.....	14
2.6. Импульсные источники питания.....	15
2.7. Бытовые электропотребители.....	16
2.8. Светильники с разрядными источниками света.....	18
3. Влияние несинусоидальности напряжения на электрооборудование электрической сети.....	19
3.1. Частотный резонанс.....	19
3.2. Дополнительный нагрев трансформаторов.....	25
3.3. Потери в передающих сетях.....	28
3.4. Ускоренное старение элементов сети.....	29
3.5. Ложное срабатывание систем дистанционного управления.....	32
4. Влияние несинусоидальности напряжения на электрооборудование потребителей.....	33
4.1. Перегрев и ускоренный износ электродвигателей.....	33
4.2. Перегрузка по току нейтральных проводников.....	34
4.3. Системы связи, телефонизации, часофикации.....	37
4.4. Влияние несинусоидальности напряжения на приборы учета электроэнергии.....	38
5. Методы компенсации несинусоидальности напряжения.....	38
5.1. Превентивные методы компенсации несинусоидальности напряжения.....	38
5.2. Корректирующие методы компенсации несинусоидальности напряжения.....	39
Контрольные вопросы.....	41
Список литературы.....	42

ВВЕДЕНИЕ

Каждый электроприемник сконструирован для работы при определенных параметрах электрической энергии: номинальном напряжении, частоте, токе и др. Для работы потребителя электрической энергии в паспортных условиях должно быть оговорено электроснабжение с требуемым уровнем качества электрической энергии. В противном случае функционирование электроприемника сопровождается снижением эффективности, ускоренным износом, сбоями в работе. Определение необходимых уровней качества электроэнергии осуществляется на основе ГОСТ 32144–2013 «Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения» [1]. Стандарт устанавливает нормы и показатели качества электроэнергии (ПКЭ) для точек передачи электрической энергии в сетях низкого, среднего и высокого напряжения.

Показатели качества электрической энергии определяют степень отклонений сетевого напряжения и частоты в результате изменения параметров нагрузки, влияния кондуктивных помех. Помехи, распространяющиеся по элементам электрической сети, возникают при работе отдельных видов оборудования либо при неисправностях, вызываемых, главным образом, внешними событиями.

Продолжительные помехи, изменяющие характеристики ПКЭ обычно обусловлены особенностями технологического процесса производства, передачи, распределения и потребления электроэнергии. Различают следующие продолжительные изменения характеристик напряжения: отклонение частоты; медленные изменения напряжения; колебания напряжения и фликер; несинусоидальность напряжения (гармонические и интергармонические составляющие); несимметрия напряжений в трехфазных системах. Различают такие случайные события: прерывания напряжения; провалы напряжения и перенапряжения; импульсные напряжения [1].

В связи с высоким ростом доли нелинейных нагрузок в электрических сетях возрастает вероятность функционирования электротехнических комплексов и систем в режимах несинусоидальности напряжения. К нагрузкам, искажающим ПКЭ сети, относят как единичные мощные промышленные преобразователи, так и группы маломощных бытовых электроприемников, которые в совокупности характеризуются значи-

тельной потребляемой мощностью. Электроприемники, обладающие нелинейной вольт-амперной характеристикой (ВАХ), потребляют из сети ток несинусоидальной формы, который, протекая через сопротивление сети, вызывает искажение формы кривой напряжения питания сети. Большая суммарная мощность нелинейных потребителей является причиной существенной несинусоидальности напряжения. Превышение допустимых значений ПКЭ служит причиной пробоя конденсаторных установок, повышенного износа электрооборудования, сбоев в работе систем автоматического управления [2].

Искаженный гармонический состав тока и напряжения в сети ухудшает работу всех электроприборов и потребителей электрической энергии. Уровень дополнительных потерь от несинусоидальности напряжения в питающих сетях промышленных предприятий составляет 2–4 % номинальных потерь (при синусоидальном напряжении), во внутризаводских сетях, а также в сетях электрифицированного транспорта они достигают 10–15 % [3]. В целом по стране из-за повышенного гармонического состава при передаче и распределении электроэнергии дополнительно теряется 2,5–3 % всей генерируемой мощности.

В настоящее время значительная часть электроприборов содержит полупроводниковые преобразователи — источники эмиссии высших гармонических составляющих тока в электрическую сеть. Учитывая возможное внедрение нелинейного оборудования возобновляемых источников энергии и устройств зарядки электромобилей, реалистичными кажутся прогнозы постепенного преобладания доли нелинейной нагрузки над линейной в электрических сетях и соответствующего ухудшения уровней несинусоидальности напряжения сети. В связи с этим возникает необходимость в снижении потерь электроэнергии от несинусоидальности напряжения, а также в поиске причин и механизмов распространения высших гармонических составляющих тока по элементам электрической сети.

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О НЕСИНУСОИДАЛЬНОСТИ НАПРЯЖЕНИЯ

Кривые напряжений $u(t)$ и токов $i(t)$ в электрических сетях могут рассматриваться как совокупность элементарных колебаний в рамках так называемого спектрального подхода [4]. Если нелинейная нагрузка работает в продолжительном режиме, то выражение для тока $i(t)$ [аналогично для напряжения $u(t)$] можно представить рядом Фурье:

$$i(t) = I_0 + \sum_k I_k \sin(k\omega t + \varphi_k), \quad (1)$$

где I_0 — постоянная составляющая, практически всегда равная нулю в случае промышленных или бытовых сетей; I_k и φ_k — амплитуда и фазовый угол k -й гармонической составляющей, соответственно; ω — частота сетевого напряжения, рад/с.

Гармоника, частота которой соответствует частоте сети, называется первой или основной, остальные гармоники — высшими. Совокупность амплитуд I_k и фазовых углов φ_k образует амплитудный и фазовый спектры.

Амплитуды и фазовые углы высших гармонических составляющих могут быть найдены через ортогональные проекции I_{ka} и I_{kp} :

$$\left\{ \begin{array}{l} I_k = \sqrt{I_{ka}^2 + I_{kp}^2}; \\ I_{ka} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i(t) \cos(k\omega t) d\omega t; \\ I_{kp} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i(t) \sin(k\omega t) d\omega t; \\ \varphi_k = \arctg(I_{kp} / I_{ka}). \end{array} \right. \quad (2)$$

В качестве примера представления периодической кривой в виде гармонических составляющих рассмотрим кривую тока питания персонального компьютера (ПК) (рис. 1, а). Данный рисунок демонстрирует, как реальная кривая тока может быть аппроксимирована посредством суммирования 1-й, 3-й и 5-й гармонических составляющих (рис. 1, б). Учет всех высших гармонических составляющих позволяет полностью восстановить кривую тока питания электроприемника.

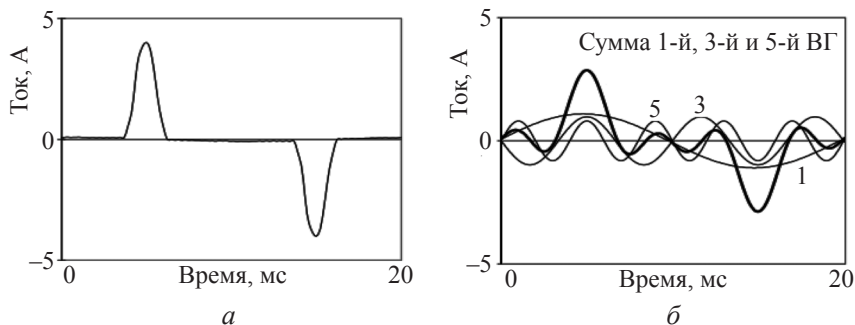


Рис. 1. Кривая тока питания ПК (а) и его 1-я, 3-я и 5-я гармонические составляющие (б)

В качестве параметра оценки несинусоидальности напряжения или тока наравне со спектром гармонических составляющих используется суммарный коэффициент гармонических составляющих. Этот коэффициент определяется как отношение корня суммы квадратов действующих значений высших гармоник (ВГ) к действующему значению основной гармоники. Например, суммарный коэффициент гармонических составляющих кривой напряжения

$$K_U = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^n U_{k,д}^2}}{U_{1,д}}, \quad (3)$$

где $U_{k,д}$ и $U_{1,д}$ — действующие значения k -й и основной гармоник соответственно; n — количество учитываемых гармоник. Аналогичное выражение может быть записано для суммарного коэффициента гармонических составляющих кривой тока K_I .

Для различных нагрузок K_I варьируется от нескольких процентов до 100 % и выше, в то время как суммарный коэффициент гармонических составляющих кривой напряжения K_U обычно не превышает 5 %. Уровень искажений напряжения, соответствующий K_U менее 8 %, считается допустимым для сетей напряжением 0,4 кВ, в то время как превышение этого значения может вызывать значительные негативные эффекты для чувствительного сетевого оборудования и нагрузок потребителей. Для сетей напряжением 35 кВ нормально допустимый уровень $K_U = 4$ %, для сетей напряжением 110–220 кВ — 2 % [1].

Помимо суммарного коэффициента несинусоидальности для оценки уровней отдельных гармонических составляющих напряжения или тока используются, так называемые, коэффициенты гармонических составляющих $K_{U(k)}$, которые представляют собой отношение действующих значений k -й гармоники к основной. Коэффициенты гармонических составляющих напряжения определяются по следующей формуле:

$$K_{U(k)} = U_{k,d} / U_{1,d}. \quad (4)$$

Аналогичное выражение может быть записано для коэффициентов гармонических составляющих тока.

Для коэффициентов $K_{U(k)}$ и $K_{I(k)}$ в работах [1] и [5] соответственно, устанавливаются нормы, которые для отдельных гармонических составляющих напряжения не превышают 6 %, а для гармоник тока могут составлять десятки процентов.

2. ТИПОВЫЕ ИСТОЧНИКИ НЕСИНУСОИДАЛЬНОСТИ НАПРЯЖЕНИЯ И ТОКА В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

2.1. Трансформаторы

Гармонические составляющие напряжения возникают в электрических сетях с подключенным электрооборудованием, потребляющим несинусоидальный ток. Примерами нелинейной нагрузки служат трансформаторы в режиме насыщения, характеризующиеся несинусоидальным током намагничивания; циклоконвертеры, осуществляющие непосредственное преобразование частоты; статические компенсаторы реактивной мощности; выпрямители на основе полупроводниковых элементов, применяемые в электроприводе и электрохимическом производстве; блоки частотного регулирования электропривода и др.

По экономическим соображениям силовые трансформаторы проектируются таким образом, чтобы рабочая точка на кривой гистерезиса магнитопровода располагалась в зоне перехода кривой в насыщение. Соответствующий данной рабочей точке ток намагничивания имеет пиковую форму и высокое содержание высших гармонических составляющих с преобладанием 3-й гармоники.

Например, экспериментально измеренная кривая тока намагничивания трансформатора 10/0,4 кВ мощностью 25 кВ·А (рис. 2) характеризуется высоким уровнем искажений ($K_I = 76,1 \%$), однако действующее значение тока составляет только 1,54 А, что крайне мало по сравнению с номинальным значением рабочего тока.

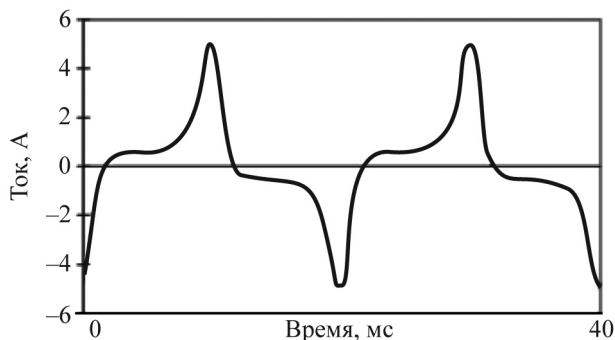


Рис. 2. Кривая тока намагничивания трансформатора 10/0,4 кВ мощностью 25 кВ·А, $K_I = 76,1 \%$

Таким образом, ток намагничивания составляет несколько процентов от номинального тока трансформатора. Потери электрической энергии от несинусоидальности тока также невелики.

2.2. Электрические машины

Как и в случае силовых трансформаторов, электрические машины характеризуются возможностью функционирования в зоне, граничащей с зоной насыщения. Ток 3-й гармонической трехфазного синхронного генератора при использовании схемы соединения обмоток статора «звезда», может содержать до 30 % от уровня тока основной гармоники. Большинство однофазных электродвигателей имеют K_I не более 10 % с преобладанием 3-й гармонической составляющей.

2.3. Электротермические установки

Работа электротермического электрооборудования характеризуется повторно-кратковременными режимами и аperiodическими кривыми

потребляемого тока. Кривая тока такого рода нагрузок не может быть описана с помощью разложения в ряд Фурье на высшие гармонические составляющие. Разработаны способы представления электрических печей в виде источников несинусоидальности тока с преобладающими 3-й и 5-й гармоническими составляющими тока.

2.4. Управляемые выпрямители

Данное электрооборудование наиболее широко применяется для питания мощных электроприемников. Электрическая схема шестипульсного управляемого выпрямителя показана на рисунке 3.

Индуктивность на стороне постоянного тока выпрямителя сглаживает кривую тока I_{dc} и при низких пульсациях тока выпрямитель может быть представлен в виде источника тока. Регулирование передаваемой мощности осуществляется тиристорами, коммутация которых происходит в зависимости от сигнала системы управления и знака приложенного напряжения. Данный тип регулирования носит название фазового и характеризуется низкими значениями коэффициента мощности при средних и низких нагрузках. После включения каждый тиристор остается в проводящем состоянии до момента естественного отключения при переходе напряжения через нуль. Тем самым, тиристоры выпрямителя не требуют сигнала на отключение, что значительно упрощает процесс регулирования.

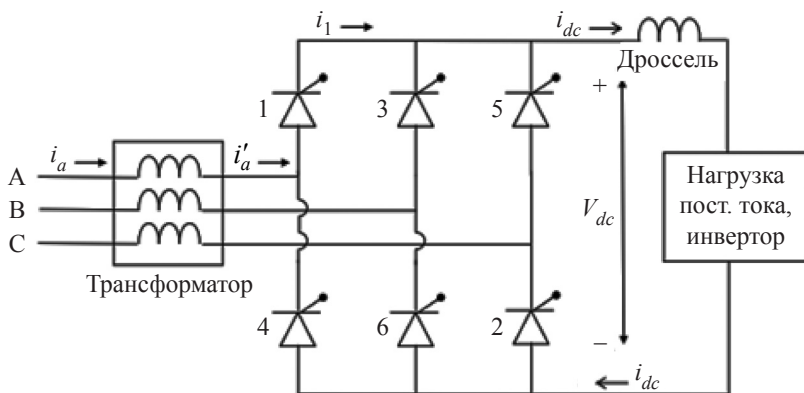


Рис. 3. Трехфазный шестипульсный управляемый выпрямитель:
1–6 — порядок переключения тириستоров (здесь и далее)

Идеализированная кривая переменного тока $i'_a(t)$ шестипульсного выпрямителя (рис. 3) в течение одного периода сетевого напряжения имеет прямоугольную форму и попеременно принимает значения, равные току на постоянной стороне преобразователя $\pm I_{dc}$ или нулю (рис. 4, а). Разложение кривой $i'_a(t)$ в ряд Фурье имеет следующий вид:

$$i'_a(t) = I_1 \left[\sin(\omega t - \theta_1) - \frac{1}{5} \sin(5\omega t - 5\theta_1) - \frac{1}{7} \sin(7\omega t - 7\theta_1) + \right. \\ \left. + \frac{1}{11} \sin(11\omega t - 11\theta_1) + \frac{1}{13} \sin(13\omega t - 13\theta_1) - \frac{1}{17} \sin(17\omega t - 17\theta_1) - \right. \\ \left. - \frac{1}{19} \sin(19\omega t - 19\theta_1) + \dots \right], \quad (5)$$

где I_1 — амплитудное значение тока основной частоты; θ_1 — угол сдвига фаз кривых напряжения и тока на основной частоте. Амплитуды высших гармонических составляющих переменного тока преобразователя изменяются обратно пропорционально номеру гармоники, т. е. амплитуда 5-й гармоники составляет $\frac{1}{5}$ амплитуды тока на основной частоте, амплитуда 7-й — $\frac{1}{7}$ амплитуды тока основной частоты и т.д. Четные гармонические составляющие тока отсутствуют благодаря симметрии кривой тока относительно оси абсцисс; гармоники с номерами, кратными трем, также не представлены, в случае, если выпрямитель питается через трансформатор со схемой соединения обмоток «треугольник»-«звезда» или «звезда»-«треугольник».

Если схема соединения обмоток трансформатора преобразователя не имеет фазовый сдвиг (т. е. либо «звезда-звезда», либо «треугольник-треугольник»), то формы кривых тока на первичной и вторичной стороне трансформатора одинаковы (рис. 4, а). Если схемой соединения обмоток является «треугольник-звезда» или «звезда-треугольник» (рис. 4, б), то на противоположные меняются знаки 5-й, 7-й, 17-й и т. д. гармоник:

$$i'_a(t) = I_1 \left[\sin(\omega t - \theta_1) + \frac{1}{5} \sin(5\omega t - 5\theta_1) + \frac{1}{7} \sin(7\omega t - 7\theta_1) + \right. \\ \left. + \frac{1}{11} \sin(11\omega t - 11\theta_1) + \frac{1}{13} \sin(13\omega t - 13\theta_1) + \frac{1}{17} \sin(17\omega t - 17\theta_1) + \right. \\ \left. + \frac{1}{19} \sin(19\omega t - 19\theta_1) + \dots \right]. \quad (6)$$

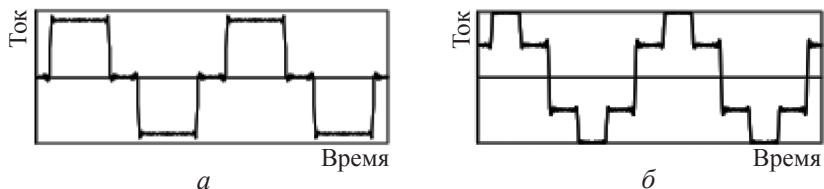


Рис. 4. Кривая тока $i'_a(t)$ при подключении к трансформатору со схемами соединения обмоток «треугольник–треугольник» или «звезда–звезда» (а) и «треугольник–звезда» или «звезда–треугольник» (б)

Два и более шестипульсных управляемых выпрямителя могут включаться в параллель посредством фазосдвигающих трансформаторов для того, чтобы снизить уровни гармонической эмиссии тока на сетевой стороне. Так, двенадцатипульсный выпрямитель содержит два шестипульсных преобразователя, включенных параллельно на стороне переменного тока и последовательно на стороне постоянного тока. Одна из вторичных обмоток трансформатора имеет схему соединения «треугольник», вторая — «звезда». В результате, половина высших гармонических составляющих тока преобразователя компенсируют друг друга (5-я и 7-я в особенности), тем самым, делая форму кривой переменного тока значительно более синусоидальной по сравнению с кривыми тока шестипульсных выпрямителей в отдельности. Также могут быть получены преобразователи с более высокими значениями пульсности (например, восемнадцатипульсный или двадцатичетырехпульсный). Номера высших гармоник, генерируемых p -пульсным преобразователем, определяются следующим выражением:

$$h = pN \pm 1, \quad (7)$$

где p — целое число, кратное 6; $N = 1, 2, 3 \dots$

Задача 1.

Требуется с помощью разложения в ряд Фурье получить аналитическое выражение амплитудного гармонического спектра тока на первичной стороне трансформатора, питающего шестипульсный управляемый выпрямитель. Схема соединения обмоток трансформатора — «треугольник-звезда».

Решение.

График тока на первичной стороне трансформатора аналитически представляется следующим образом (рис. 5):

$$I(t) = \begin{cases} I_m / 2, t \in (0, \pi / 3) \\ I_m, t \in (\pi / 3, 2\pi / 3) \\ I_m / 2, t \in (2\pi / 3, \pi) \\ -I_m / 2, t \in (\pi, 4\pi / 3) \\ -I_m, t \in (4\pi / 3, 5\pi / 3) \\ -I_m / 2, t \in (5\pi / 3, 2\pi). \end{cases}$$

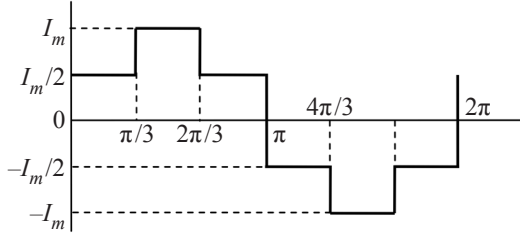


Рис. 5. Кривая тока питания шестипульсового управляемого выпрямителя с трансформатором, обмотки которого соединены по схеме «треугольник-звезда»

Определим ортогональные составляющие амплитуд гармонических составляющих I_{kp} с помощью выражения (2). Симметрия кривой тока относительно оси абсцисс позволяет проводить интегрирование на интервале полупериода и затем удвоить полученный результат. Кроме того, нечетная симметрия кривой тока относительно оси ординат позволяет принять равными нулю ортогональные составляющие амплитуд гармоник I_{ka} :

$$\begin{aligned} I_{kp} &= \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi/3} I_m / 2 \sin(k\omega t) d\omega t + \frac{1}{\pi} \int_{\pi/3}^{2\pi/3} I_m \sin(k\omega t) d\omega t + \\ &+ \frac{1}{\pi} \int_{2\pi/3}^{\pi} I_m / 2 \sin(k\omega t) d\omega t = -\frac{I_m}{2\pi k} \cos(k\omega t) \Big|_0^{\pi/3} - \frac{I_m}{\pi k \omega} \cos(k\omega t) \Big|_{\pi/3}^{2\pi/3} - \\ &- \frac{I_m}{2\pi k} \cos(k\omega t) \Big|_{2\pi/3}^{\pi} = -\frac{I_m}{2\pi k} [\cos(\pi k / 3) - 1 + 2 \cos(2\pi k / 3) - \\ &- 2 \cos(\pi k / 3) + (-1)^k - \cos(2\pi k / 3)] = -\frac{I_m}{2\pi k} [\cos(2\pi k / 3) - \cos(\pi k / 3) - \\ &- 1 + (-1)^k] = -\frac{I_m}{2\pi k} [-2 \sin(\pi k) \sin(\pi k / 3) - 1 + (-1)^k] = \frac{I_m (1 - (-1)^k)}{2\pi k}. \end{aligned}$$

Сравнение данного выражения с формулой тока (6) показывает соответствие вычисленного амплитудного спектра теоретическим данным.

2.5. Неуправляемые выпрямители

Для электрооборудования малой и средней мощности в рамках организации регулируемого электропривода часто применяются неуправляемые выпрямители с широтно-импульсным управлением (ШИМ). Поскольку регулирование передаваемой мощности и напряжения осуществляется непосредственно на стороне нагрузки, тиристоры (см. рис. 3) могут быть заменены обыкновенными диодами. Электрическая схема неуправляемого выпрямителя, называемого также «преобразователем напряжения», показана на рисунке 6. Мостовой диодный выпрямитель с конденсатором обеспечивает работоспособность источника постоянного напряжения V_{dc} для ШИМ-регулирования электропривода. Поскольку при функционировании неуправляемых выпрямителей не применяется фазовое регулирование, сдвиг между кривыми напряжения и тока преобразователя практически отсутствует, и его коэффициент мощности близок к 1.

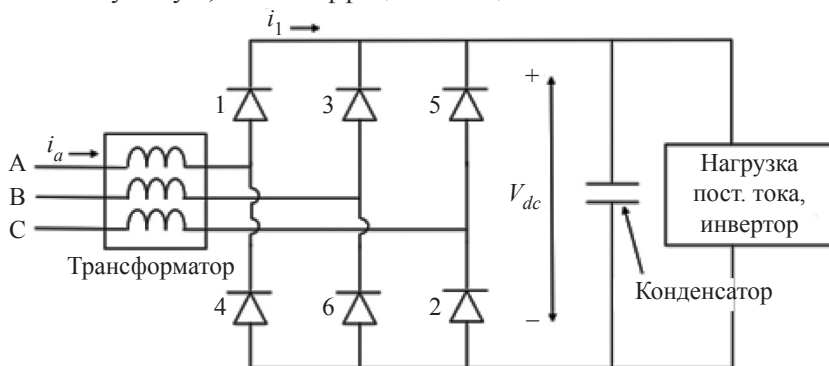
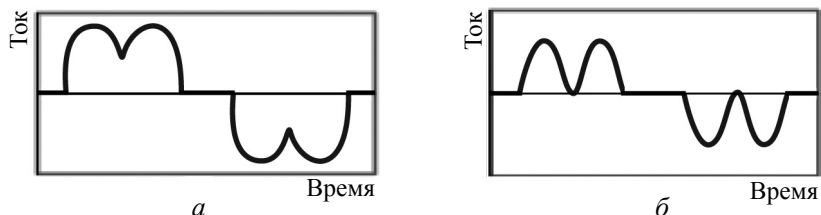


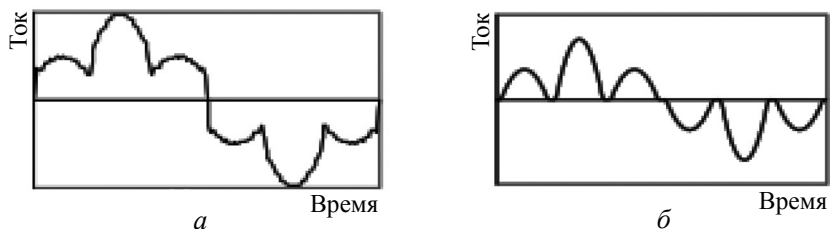
Рис. 6. Трехфазный шестипульсный неуправляемый выпрямитель

Тем не менее, уровень искажений кривой тока на сетевой стороне для неуправляемых диодных выпрямителей выше, чем для управляемых тиристорных. Кроме того, форма кривой тока меняется с изменением уровня нагрузки. Типовые кривые тока неуправляемого выпрямителя для разных уровней загрузки и схем соединения обмоток трансформатора показаны на рисунках 7 и 8. Несмотря на то, что низ-

кая нагрузка преобразователя характеризуется повышенными значениями токовых искажений, значения гармонических составляющих тока в абсолютном выражении меняются незначительно для разных уровней загрузки, поскольку ток основной гармонической составляющей пропорционален нагрузке. Высокая степень искажений кривой тока ограничивает применение неуправляемых выпрямителей для нагрузок мощностью не более 300 кВт [6].



**Рис. 7. Кривые тока i_a при высоком (а) и низком (б) уровнях загрузки преобразователя; K_I , соответственно, равен 55,3 и 77,4 %
(схема соединения обмоток трансформатора «треугольник-треугольник» или «звезда-звезда»)**



**Рис. 8. Кривые тока i_a при высоком (а) и низком (б) уровнях загрузки преобразователя; K_I , соответственно, равен 25,6 и 37,4 %
(схема соединения обмоток трансформатора «треугольник-звезда» или «звезда-треугольник»)**

2.6. Импульсные источники питания

Импульсные источники питания часто используются в составе однофазных нагрузок 220 В для преобразования сетевого напряжения в напряжение, параметры которого наиболее благоприятны для эффективной работы нагрузки. В качестве «входного каскада» импульсного источника питания чаще всего выступает мостовой выпрямитель

со сглаживающим конденсатором, который обеспечивает снижение пульсаций выпрямленного сетевого напряжения (рис. 9, а). В то же время чем ниже уровень пульсаций постоянного напряжения конденсатора, тем короче интервал его зарядки от сети переменного тока, а значит интервал протекания тока. Это в свою очередь вызывает «пиковость» формы кривой тока (рис. 9, б), и, соответственно, высокие уровни гармонических составляющих тока питания.

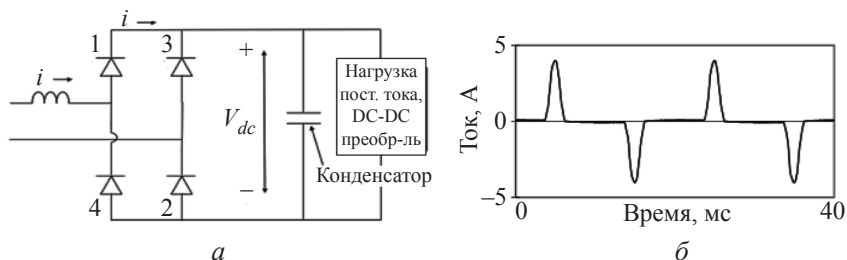


Рис. 9. Однофазный импульсный источник питания (а) и форма кривой тока питания (б)

2.7. Бытовые электропотребители

В составе электрооборудования малой мощности бытового и офисного назначения часто присутствуют маломощные электродвигатели и трансформаторы, характеризующиеся эффектами насыщения магнитной системы и соответствующими искажениями кривой тока. В качестве примера на рисунке 10 [7] представлены соответственно формы кривых тока некоторых распространенных бытовых электроприборов; в таблицах 1 и 2 приведены их амплитудные гармонические спектры.

Таблица 1

Амплитудный гармонический спектр тока питания холодильника

k	1	2	3	4	5	6	7	8	9	11	13	15
$I_{k\%}$	100	3,5	5,1	0,4	0,5	0,3	1	0,2	0,4	0,2	0,2	0,1

Таблица 2

Амплитудный гармонический спектр тока питания кондиционера

k	1	3	5	7	9	11	17
$I_{k\%}$	100	8	6,8	0,5	0,6	0,3	0,2

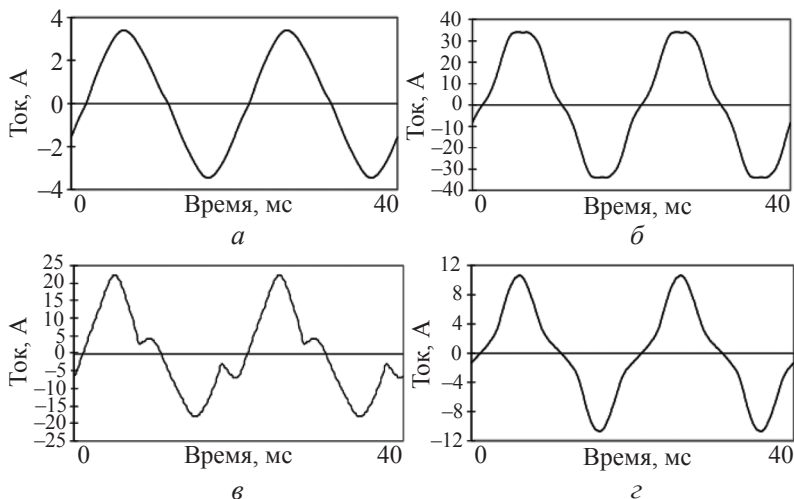


Рис. 10. Кривые тока питания холодильника, $K_I = 6,3 \%$ (а); кондиционера, $K_I = 10,5 \%$ (б); СВЧ-печи, $K_I = 31,9 \%$ (в) и пылесоса $K_I = 25,9 \%$ (г)

Задача 2.

На основе данных о гармонических спектрах токов питания холодильника и кондиционера (табл. 1, 2) рассчитайте суммарные коэффициенты гармонических составляющих кривых тока.

Решение.

Суммарные коэффициенты гармонических искажений кривой тока K_I для данных электроприемников определяются в соответствии с выражением (3).

Для холодильника:

$$K_I = \frac{\sqrt{\sum_{k=2,3,\dots} I_k^2}}{I_1} \cdot 100 \% =$$

$$= \sqrt{3,5^2 + 5,1^2 + 0,4^2 + 0,5^2 + 0,3^2 + 1^2 + 0,2^2 + 0,4^2 + 0,2^2 + 0,2^2 + 0,1^2} = 63 \%$$

Для кондиционера:

$$K_I = \frac{\sqrt{\sum_{k=2,3,\dots} I_k^2}}{I_1} \cdot 100 \% = \sqrt{8^2 + 6,8^2 + 0,5^2 + 0,6^2 + 0,3^2 + 0,2^2} = 10,5 \%$$

2.8. Светильники с разрядными источниками света

Разряд в лампах с электромагнитной пускорегулирующей аппаратурой (ЭмПРА) зажигается каждый полупериод основной гармоники напряжения. Зажигание происходит спустя некоторое время после пересечения нуля кривой напряжения. После зажигания, разрядная лампа характеризуется отрицательным сопротивлением. Кривые тока слегка сдвинуты и имеют пиковую форму с характерным вторым пиком. Преобладающей гармоникой являются 3-я с относительной амплитудой 15–20 % [8]. В качестве примера приведена форма кривой тока разрядной лампы с ЭмПРА (рис. 11, *а*) и амплитудный гармонический спектр тока (табл. 3).

В отличие от ЭмПРА лампы с электронной пускорегулирующей аппаратурой (ЭПРА) питают газовый разряд высокочастотным напряжением, обеспечивающим продолжительный срок службы и лучшие световые показатели лампы. При использовании дополнительных схем коррекции коэффициента мощности ток питания разрядной лампы с ЭПРА может иметь низкий уровень гармонических искажений (рис. 11, *б*).

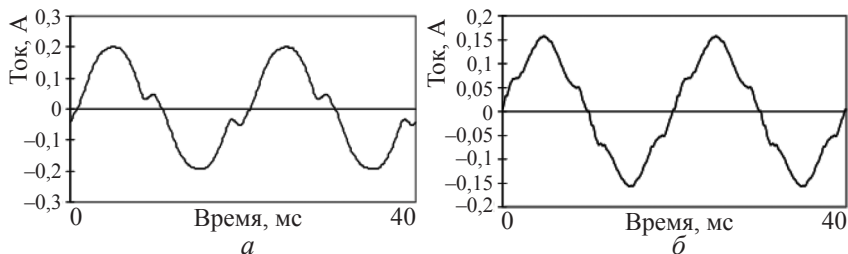


Рис. 11. Кривые тока питания разрядной лампы с ЭмПРА, $K_I = 18,5\%$ (*а*) и с ЭПРА, $K_I = 11,6\%$ (*б*)

Таблица 3

Спектр тока питания разрядной лампы с ЭмПРА 40 Вт

k	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$I_k, \%$	100	2	15,8	0,4	8,6	0,3	2,9	0,1	0,6

3. ВЛИЯНИЕ НЕСИНУСОИДАЛЬНОСТИ НАПРЯЖЕНИЯ НА ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

3.1. Частотный резонанс

Наибольший эффект на уровень несинусоидальности напряжения электрической сети оказывают нагрузки, питающиеся непосредственно от выводов вторичных обмоток сетевых трансформаторов. Такими нагрузками могут быть мощные электроприводы, электротермические установки, высоковольтные полупроводниковые преобразователи и др. В гармонических спектрах таких нагрузок значительные уровни имеют 5-я, 7-я, 11-я и 13-я гармонические составляющие тока, среди которых часто преобладает 5-я гармоника. Явные признаки повышенного уровня несинусоидальности следующие: снижение эффективности процессов генерации и передачи электроэнергии, ускоренный выход из строя предохранителей и батарей конденсаторов, перегрев силовых трансформаторов, дополнительные вибрации на валу электрических двигателей. Конденсаторные установки наиболее уязвимы по отношению к высшим гармоническим составляющим напряжения, в то время как силовые трансформаторы характеризуются повышенной чувствительностью к высшим гармоникам тока.

В случае равенства значений емкостных (X_C) и индуктивных (X_L) сопротивлений в сети и у потребителей на определенной частоте возникают резонансные явления. Если резонансная частота совпадает с частотой высшей гармонической составляющей тока питания нелинейной нагрузки, многократно увеличивается амплитуда соответствующей гармоники напряжения.

Частота резонанса $f_{\text{рез}}$ в электрической сети не зависит от значений активных сопротивлений сети или нагрузки и рассчитывается по формуле

$$f_{\text{рез}} = \frac{\omega_{\text{рез}}}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \quad (8)$$

где $\omega_{\text{рез}}$ — циклическая резонансная частота колебательного контура; L и C — соответственно, суммарные индуктивность и емкость электрической сети.

Частотный резонанс есть причина ложного срабатывания чувствительных микропроцессорных защит, протекания значительных токов

высших гармоник в конденсаторных батареях с последующим их выходом из строя, возникновения межвитковых КЗ в трансформаторах и электрических двигателях и др. В качестве примера последствий частотного резонанса рассмотрим процессы, зафиксированные при проведении измерений параметров несинусоидальности в сети напряжением 10 кВ шестипульсного неуправляемого выпрямителя мощностью 3,5 МВт. Форма кривых тока и напряжения (рис. 12) характеризуется значительными искажениями, обусловленными режимом последовательного резонанса. Преобладающими высшими гармониками напряжения были 13-я (8,3 %) и 11-я (7 %). Высокий уровень несинусоидальности напряжения ($K_U = 13\%$) способствовал ложному переключению автоматических выключателей, управляемых посредством релейной защиты, а гармонические искажения тока ($K_I = 30\%$) вызывали перегрев параллельных трансформаторов мощностью 3200 кВ·А 10/0,4 кВ, питающих электропривод.

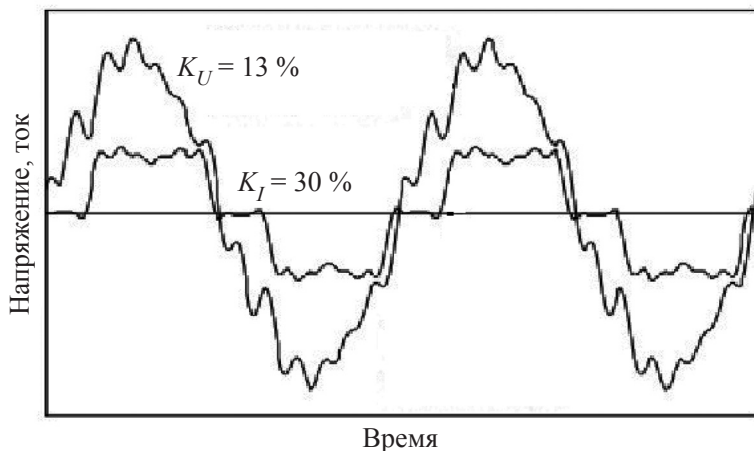


Рис. 12. Кривые напряжения и тока питания шестипульсного неуправляемого выпрямителя на основе спектра гармоник до 17-й включительно

Задача 3.

Определите возможность возникновения частотного резонанса в точке присоединения нагрузки к электрической сети при $L = 8,4$ мГн, $C = 48,3$ мкФ.

Решение.

Используя формулу (8) получаем частоту резонанса рассматриваемого контура:

$$f_{\text{рез}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{0,0084 \cdot 0,0000483}} = 249,99 \text{ Гц} \approx 250 \text{ Гц}.$$

Тогда номер гармоники, на частоте которой в контуре возникнет частотный резонанс:

$$k = 250/50 = 5.$$

Для действующих электрических сетей необходимо учитывать как изменение суммарной мощности электрической нагрузки, так и изменение ее активного и реактивного сопротивлений. При анализе возможности возникновения частотных резонансов оперируют частотной характеристикой входного сопротивления сети $Z_{\text{ВХ}}(f)$. Учитывая определение сопротивления через отношение напряжения к току, входное сопротивление на данной частоте фактически характеризует уровень несинусоидальности напряжения, создаваемый высшей гармоникой тока соответствующей частоты.

Частотный резонанс в электрической сети подразделяется на параллельный и последовательный. Параллельный резонанс на определенной частоте происходит в случае параллельного соединения индуктивного сопротивления сети и емкостного сопротивления конденсаторной батареи относительно точки присоединения нелинейной нагрузки, источника высших гармонических составляющих тока (рис. 13).

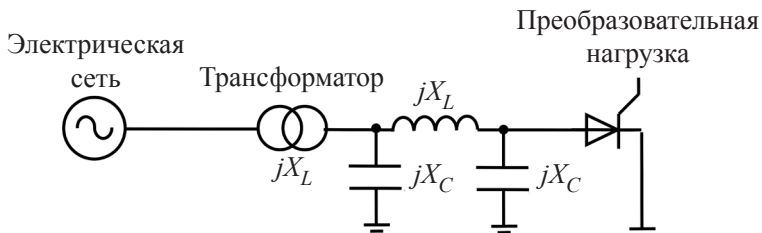


Рис. 13. Простейший пример схемы замещения электрической сети при параллельном резонансе

При параллельном резонансе наибольший уровень несинусоидальности напряжения наблюдается в точке присоединения нелинейной

нагрузки. Спектр частот гармонических составляющих тока определяется схемой преобразовательной нагрузки и передается по питающему кабелю ко всем другим электроприемникам. В результате, резонансные токи повышенного уровня, протекая по элементам сопротивления сети, вызывают значительное падение напряжения на соответствующей частоте, которое в свою очередь искажает напряжение питания.

Последовательный резонанс возникает, когда соединение индуктивного сопротивления сети и емкостного сопротивления конденсаторной батареи является последовательным, если рассматривать схему со стороны подключения преобразователя, источника несинусоидальности (рис. 14). При последовательном резонансе максимальные уровни искажения фиксируются в удаленных узлах сети или на сопряженном кабеле, отходящем от шин трансформатора преобразователя.

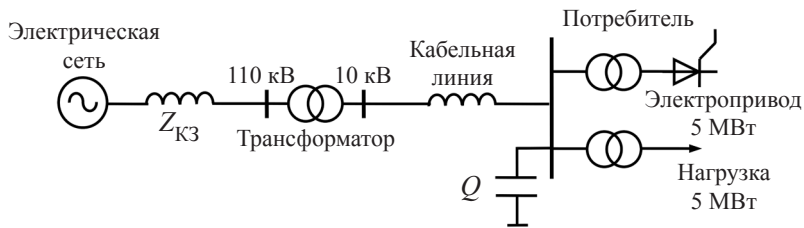


Рис. 14. Простейший пример схемы замещения электрической сети при последовательном резонансе

Современные электрические сети имеют сложную разветвленную структуру и могут иметь в составе множество различных по мощности и типу конденсаторных установок, что создает большое количество параллельных и последовательных путей для протекания резонансных токов. В таких условиях при расчете уровней несинусоидальности напряжения в узловых точках сети становится необходимым компьютерное моделирование режима сети, учитывающее не только проектные данные, но и перспективное развитие сетей.

Простейшим примером параллельного резонанса служит случай подключения конденсаторных установок в непосредственной близости к источнику несинусоидальности тока. Для его расчета удобно использовать формулу (8). Пусть $L_{\text{сист}}$ — общая индуктивность фазы, видимая со стороны точки подключения преобразователя, а $C_{\text{конд}}$ — фазная

емкость компенсирующего устройства. Тогда индуктивное сопротивление сети на частоте основной гармоники

$$X_{L \text{ сист}} = \omega L_{\text{сист}}$$

преобразовав эту формулу, получим:

$$L_{\text{сист}} = X_{L \text{ сист}} / \omega. \quad (9)$$

Емкостное сопротивление сети на частоте основной гармоники

$$X_{C \text{ конд}} = 1 / (\omega C_{\text{конд}}),$$

преобразовав эту формулу, получим:

$$C_{\text{конд}} = 1 / (\omega X_{C \text{ конд}}). \quad (10)$$

На основе уравнений (8)–(10) получим

$$f_{\text{рез}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\omega}{X_{L \text{ сист}}} \omega X_{C \text{ конд}}} = \frac{\omega}{2\pi} \sqrt{\frac{X_{C \text{ конд}}}{X_{L \text{ сист}}}}.$$

Поскольку мощность КЗ сети

$$S_{\text{КЗ}} = 1 / X_{L \text{ сист}}$$

и мощность конденсаторной установки

$$S_{\text{конд}} = 1 / X_{C \text{ конд}},$$

частоту параллельного резонанса определяют по формуле

$$f_{\text{рез}} = f_{50 \text{ Гц}} \sqrt{\frac{S_{\text{КЗ}}}{S_{\text{конд}}}}. \quad (11)$$

Недостатки, ограничивающие применение формулы (11), такие:

1) отсутствие информации о протяженности пика резонансной кривой. Так, если резонансная частота системы соответствует, например, 6-й гармонической составляющей, можно ошибочно предположить, что проблемы резонанса для данной системы не существует, поскольку в токе нелинейных нагрузок обычно присутствуют только нечетные гармоники. Однако за счет протяженности пика резонансной кривой воздействие на соседние 5-я и 7-я гармонические составляющие тока будет также велико;

2) учет небольшой части реального распределения потоков высших гармонических составляющих тока в системе. В целях снижения резонансной частоты обычно применяют подключение дополнительных конденсаторных установок, что неизбежно увеличивает количество возможных параллельных и последовательных путей протекания токов высших гармоник. В результате увеличивается количество резонансных частот, вызываемых различными комбинациями дополнительно включенных емкостей. Поэтому внедрение дополнительных мероприятий по компен-

сации реактивной мощности требует дополнительного расчета уровней несинусоидальности на всем протяжении кабеля, а также сопряженных линий, подключенных к общим шинам трансформаторной подстанции.

Например, кривые частотной характеристики сопротивления сети, содержащей резонансный пик (рис. 15), характеризуют частотную характеристику входного сопротивления эквивалентной схемы в точке подключения нагрузки при параллельном резонансе. Как видно из рисунка, при повышении коэффициента мощности посредством увеличения мощности конденсаторной батареи, резонансный пик характеристики входного сопротивления сдвигается в область более низких частот.

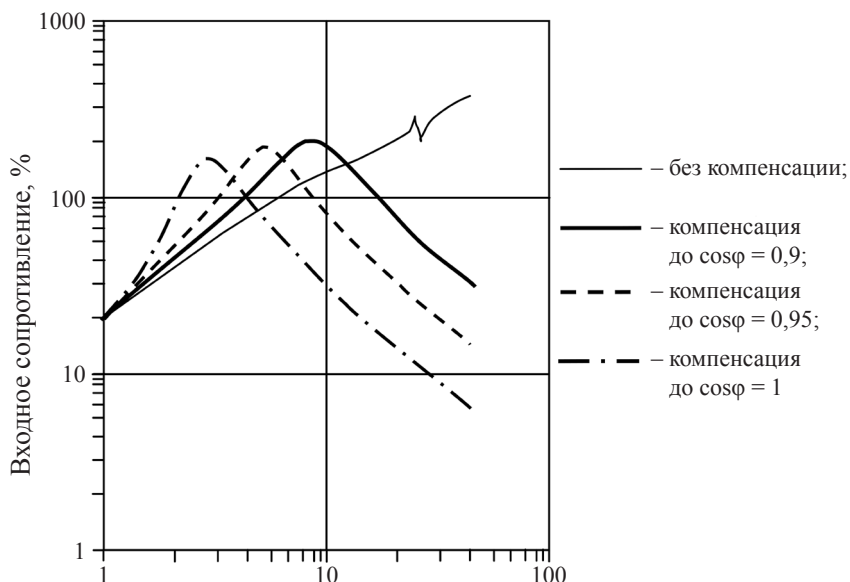


Рис. 15. Частотная характеристика сопротивления сети у шин потребителя для различных уровней компенсации коэффициента мощности

Также, исходя из представленной характеристики сопротивления сети, можно сделать следующие выводы.

1. Резонансный пик имеет достаточно длительную протяженность на большом интервале частот.

2. Подключение дополнительных конденсаторных установок при достижении коэффициентом мощности значений 0,95–0,98 приводит к возникновению резонансных условий на частотах 5-й и 7-й высших гармонических составляющих.

Результаты расчета (рис. 15) также могут быть полезны при определении значений высших гармоник напряжения, возникающих в точке подключения нагрузки.

Задача 4.

На основе известной характеристики входного сопротивления сети с подключенным устройством компенсации реактивной мощности (кривая «компенсация до 0,95» на рис. 15) определите амплитуду 5-й гармоники напряжения при подключении мощного шестипульсного преобразователя с номинальным током $I_1^* = 0,18$ о. е.

Решение.

В случае коррекции коэффициента мощности до уровня 0,95 на частоте 5-й гармонической составляющей величина входного сопротивления Z_5^* сети составляет 200 %, т. е. 2 о. е. от базисного сопротивления сети (рис. 15). При номинальной токовой нагрузке преобразователя $I_1^* = 0,18$ о. е. значение тока 5-й гармоники

$$I_5^* = I_1^* / 5 = 0,18 / 5 = 0,036 \text{ о. е.}$$

Тогда значение 5-й гармонической составляющей напряжения

$$U_5^* = I_5^* Z_5^* = 0,036 \cdot 2 = 0,072 \text{ о. е.}$$

Таким образом, следует ожидать величину 5-й гармонической составляющей напряжения на уровне 7,2 %, что соответствует минимальному уровню $K_U = 7,2$ %. Следует отметить, что дополнительный расчет 7-й, 11-й и т.д. гармонических составляющих будет способствовать дополнительному увеличению значения K_U .

3.2. Дополнительный нагрев трансформаторов

Признаком повышенного уровня несинусоидальности напряжения служит перегрев трансформаторов, наблюдающийся даже при небольшом уровне их загрузки. Подобные проблемы обычно относятся к ситуациям, когда трансформаторы используются для питания мощных нелинейных нагрузок. В таких случаях известны примеры 20%-го снижения передаваемой мощности трансформаторов.

Существует две причины перегрева.

1. Потери в проводнике возрастают при наличии несинусоидальности напряжения, поскольку потери пропорциональны квадрату действующего значения тока $I_{\text{д}}$, а ток увеличивается с ростом уровня искажений согласно выражению

$$I_{\text{д}} = \sqrt{1 + K_I^2}, \quad (12)$$

где K_I — суммарный коэффициент высших гармонических составляющих кривой тока.

2. В результате наличия поверхностного эффекта и эффекта близости, которые усугубляются близким расположением трансформаторных обмоток, и соответствующего увеличения активного сопротивления с ростом частоты 1 А токов высших гармоник вызывает больше потерь чем 1 А тока основной частоты [9].

Задача 5.

Определите увеличение токовой нагрузки трансформатора, питающего шестипульсный выпрямитель со схемой соединения обмоток «треугольник-звезда».

Решение.

Питание через трансформатор шестипульсного выпрямителя означает что, амплитуды высших гармонических составляющих тока преобразователя, протекающих через трансформатор, обратно пропорциональны номерам гармоник (5). Квадрат суммарного тока преобразователя, выраженный через ток основной частоты определяется следующим образом:

$$(I_{\text{пр}}^*)^2 = (I_1^*)^2 \cdot (1^2 + 1/5^2 + 1/7^2 + 1/11^2 + 1/13^2 + 1/17^2 + 1/19^2 + \dots). \quad (13)$$

Данный бесконечный ряд сходится к выражению:

$$(I_{\text{пр}}^*)^2 = (I_1^*)^2 \cdot \pi^2/9 = 1,0966 (I_1^*)^2.$$

Поскольку потери пропорциональны квадрату тока, потери в обмотках автоматически увеличиваются на 1,0966 по сравнению со случаем питания током основной частоты.

Таким образом, для поддержания потерь на уровне, обеспечивающем допустимый перегрев трансформатора, ток трансформатора должен быть снижен на $\sqrt{1/1,0966} = 0,955$ о. е. относительно номинального значения. Если пренебречь гармониками с номерами выше 25-й, эквивалентная мощность передаваемая трансформатором составит 0,96 о. е.

Второй причиной сокращения передаваемой мощности трансформатора является резистивный поверхностный эффект в обмотках. Данный эффект возникает при протекании токов высших гармоник

в основном по близкой к поверхности проводника зоне, тем самым увеличивая его сопротивление, вызывая перегрев данной зоны, ускоряя старение изоляции. При рассмотрении силовых трансформаторов этот эффект обычно моделируется посредством разделения сопротивления на постоянную составляющую и составляющую, зависящую от частоты. Частотная составляющая сопротивления принимается прямо пропорциональной квадрату частоты [6]:

$$R_k = R_{dc}(1 + k^2 P_{ec-r}), \quad (14)$$

где R_k — активное сопротивление обмотки на частоте k -й гармоники; R_{dc} — активное сопротивление обмотки на постоянном токе; P_{ec-r} — коэффициент, учитывающий потери в обмотках от вихревых токов.

P_{ec-r} варьируется от 0,01 для низковольтных трансформаторов собственных нужд с относительно небольшими проводниками до 0,1 для трансформаторов подстанций с проводниками крупного сечения.

Поскольку нагрев пропорционален квадрату тока, помноженному на активное сопротивление, описанная ранее зависимость сопротивления от частоты может быть включена в формулу тока трансформатора для учета поверхностного эффекта. Объединяя выражения (13) и (14), получаем эквивалентный ток трансформатора:

$$(I_{\text{экв}}^*)^2 = (I_1^*)^2 [1^2 + \Sigma(1/k)(1 + k^2 P_{ec-r}) / (1 + P_{ec-r})]. \quad (15)$$

Данный ряд не сходится при P_{ec-r} , отличном от нуля. Поэтому целесообразно рассматривать ограниченное число высших гармоник, например, до 25-го порядка. Результирующее сокращение передаваемой мощности трансформатора для наиболее вероятных значений P_{ec-r} представлено на рисунке 16.

Помимо описанных эффектов на работу трансформатора, гармонические составляющие напряжения вызывают увеличение потерь мощности на гистерезис, а также потерь, связанных с вихревыми токами в стали:

$$\Delta P_{\text{КЗ}} = \Delta P_X \sum_{k=2}^{\infty} U_k^2 + 0,607 \frac{\Delta P_{\text{КЗ}}}{U_K} \sum_{k=2}^{\infty} \frac{1 + 0,5k^2}{k\sqrt{k}} U_k^2, \quad (16)$$

где ΔP_X , $\Delta P_{\text{КЗ}}$, U_K — величины, указанные в паспортных данных трансформатора [10].

Следует также отметить негативное влияние токов нулевой последовательности, циркулирующих в обмотках мощных силовых трансформаторов со схемой соединения «треугольник», что часто приводит к перегрузке и последующему межвитковому КЗ.

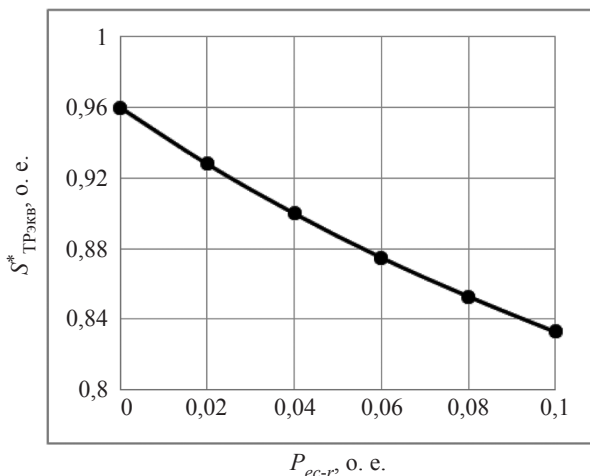


Рис. 16. Зависимость передаваемой мощности трансформатора, питающего шестипульсный выпрямитель, от коэффициента потерь в обмотках от вихревых токов

3.3. Потери в передающих сетях

В линии электропередачи гармонические составляющие тока приводят к дополнительным потерям мощности, в результате протекания токов высших гармоник по активному сопротивлению линии:

$$\Delta P_{ЛЭП} = 3 \sum_{k=2}^{\infty} I_k^2 r K_{rk}, \quad (17)$$

где K_{rk} — коэффициент, учитывающий влияние поверхностного эффекта ($K_{rk} \approx 0,47 \sqrt{k}$) [10].

В кабельных линиях гармонические составляющие напряжения увеличивают негативное воздействие на диэлектрический слой изоляции с ростом амплитуды напряжения, что ускоряет старение изоляции. В линиях сверхвысокого напряжения гармонические составляющие напряжения по той же причине (увеличение амплитуды) могут вызывать увеличение потерь на корону. Для сетей 6–10–35 кВ соотношение активного и реактивного сопротивлений при промышленной частоте пренебрежимо мало, так как

$$r / x = (0,1-0,3) / \sqrt{k}. \quad (18)$$

3.4. Ускоренное старение элементов сети

Одним из наиболее явных признаков существования проблемы несинусоидальности напряжения служат жалобы обслуживающего персонала распределительной сети о частой замене, перегорании предохранителей, источников света, бытового и офисного оборудования. Конденсаторы с протекающими через них повышенными токами высших гармоник часто гудят, их емкость снижается. Несмотря на то, что человеческий слух невосприимчив к звуку частотой 50 Гц, звуки частотой 5-й гармонической составляющей и выше входят в слуховой диапазон. Высшие гармонические составляющие напряжения вызывают протекание несинусоидальных токов повышенной амплитуды в конденсаторах благодаря обратной зависимости емкостного сопротивления от частоты (10). С увеличением номера гармоники, даже небольшие уровни несинусоидальности напряжения могут вызывать протекание значительных гармонических токов через конденсаторы. На рисунке 17 представлена кривая тока, протекающего через батарею конденсаторов мощностью 300 квар, измеренная в офисном здании [9]. В спектре тока преобладает 11-я гармоническая составляющая (23,3 %). При этом основной искажающей нагрузкой здания являлся полупроводниковый преобразователь мощного источника бесперебойного питания сервера здания.

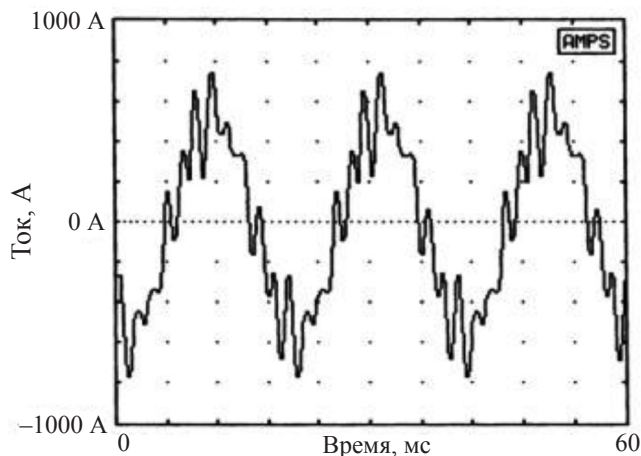


Рис. 17. Кривая тока питания офисного здания с преобладанием 11-й гармонической составляющей

Задача 6.

Определите увеличение тока через конденсатор компенсирующего устройства при его питании несинусоидальным напряжением с суммарным коэффициентом гармонических составляющих напряжения $K_U = 10\%$. В спектре напряжения присутствует только 5-я гармоническая составляющая.

Решение.

Значение результирующего тока 5-й гармонической составляющей через конденсатор составит

$$I_5^* = U_5^* / X_{\text{конд } 5}^* = 0,1/(1/5) = 0,5 \text{ о. е.}$$

Соответствующее действующее значение тока через конденсатор по сравнению с током основной частоты увеличивается согласно выражению

$$I_{\text{д}}^* = \sqrt{(I_1^*)^2 + (I_5^*)^2} = \sqrt{(1)^2 + (0,5)^2} = 1,12 \text{ о. е.}$$

Решение задачи при условии 10%-го уровня 11-й гармонической составляющей напряжения показывает еще большее значение среднеквадратичного тока, равного 1,49 о. е.

Задача 7.

Определите увеличение тока через конденсатор компенсирующего устройства при его питании несинусоидальным напряжением, содержащим гармоники шестипульсного выпрямителя вплоть до 25-й, амплитуды которых обратно пропорциональны частоте.

Решение.

Учитывая, что гармонические составляющие напряжения выражаются в о. е. относительно напряжения на основной частоте, квадрат суммарного коэффициента гармонических составляющих кривой напряжения будет иметь вид

$$K_U^2 = U_5^{*2} + U_7^{*2} + U_{11}^{*2} + U_{13}^{*2} + U_{17}^{*2} + U_{19}^{*2} + U_{23}^{*2} + U_{25}^{*2}.$$

Примем допущение об изменении амплитуд высших гармонических составляющих напряжения обратно пропорционально частоте. Тогда,

$$U_7^* = U_5^* \cdot 5/7, \quad U_{11}^* = U_5^* \cdot 5/11 \text{ и т. д.}$$

Таким образом,

$$K_U^2 = U_5^{*2} (1 + 5^2/7^2 + 5^2/11^2 + 5^2/13^2 + 5^2/17^2 + 5^2/19^2 + 5^2/23^2 + 5^2/25^2) = U_5^{*2} \cdot 2,108.$$

Откуда $U_5^{*2} = K_U^2 / 2,108$, $U_5^* = K_U / 1,452$.

Из условия обратной зависимости амплитуд гармонических составляющих напряжения от номеров гармоник также следует, что гармонические токи имеют равные амплитуды:

$$I_5^* = U_5^* / X_{\text{конд } 5}^* = U_1^* / 5 / (5X_{\text{конд } 1}^*) = U_1^* / X_{\text{конд } 1}^* ;$$

$$I_7^* = U_7^* / X_{\text{конд } 7}^* = U_1^* / 7 / (7X_{\text{конд } 1}^*) = U_1^* / X_{\text{конд } 1}^* .$$

Ток 5-й гармоники через конденсатор

$$I_5^* = U_5^* / X_{\text{конд } 5}^* = 5U_5^* = 5K_U / 1,452 \text{ о. е.}$$

Поскольку все токи высших гармоник имеют одинаковую амплитуду, квадрат суммарного тока через конденсатор

$$I_{\text{конд}}^2 = I_1^{*2} + \sum (I_k^*)^2 = 1^2 + 8(5K_U / 1,452)^2 = 1 + 94,9K_U^2.$$

Таблица 4

Ток через конденсатор (для гармоник до 25-го порядка) и соответствующие уровни несинусоидальности напряжения (при допущении, что амплитуды гармоник напряжения убывают с ростом частоты)

$K_U, \%$	0	5	10
$I_{\text{конд}}, \text{ о. е.}$	1	1,112	1,396

Вычисление квадратного корня приведенного выражения позволяет вычислить действующие значения тока для некоторого диапазона уровней несинусоидальности напряжения (табл. 4). Таким образом, следует ожидать почти 40%-го увеличения тока через конденсатор при увеличении K_U до 10 %. Выход из строя конденсаторных установок может быть также вызван износом диэлектрика в результате воздействия перенапряжений. 10%-й уровень гармоники напряжения с порядковым номером выше 3-й может увеличивать амплитуду кривой напряжения до 10 %, поскольку максимумы гармоник часто совпадают с пиком кривой напряжения основной частоты.

Дополнительные потери в конденсаторах от несинусоидальности напряжения могут быть определены в соответствии с выражением

$$\Delta P_{\Sigma \text{ диэл}} = \omega \sum_{k=2}^{\infty} U_k^2 nC \operatorname{tg} \delta_k, \quad (19)$$

где ω — номинальная угловая частота; U_k — напряжение k -й гармоники; C — емкость батареи; $\operatorname{tg} \delta_k$ — коэффициент диэлектрических потерь на k -й гармонике.

3.5. Ложное срабатывание систем дистанционного управления

Некоторые нагрузки, управляемые в автоматическом режиме, характеризуются повышенной чувствительностью к несинусоидальности напряжения. Несмотря на трудности в получении достоверной информации по вопросу негативного влияния несинусоидальности напряжения на работу микропроцессорных нагрузок, известен случай, когда при суммарном коэффициенте гармонических составляющих кривой напряжения $K_U = 5,5 \%$, регулярно отключались компьютеризированные станки термической обработки на заводе по производству труб. Таким образом, если при $K_U = 4 \%$, может и не быть существенных проблем для сетей напряжением 35 кВ, то при 6%-м уровне K_U может быть ложное срабатывание микропроцессорной защиты нагрузок.

Ложное срабатывание систем дистанционного управления может произойти при наличии гармонических составляющих, частоты которых соответствуют частоте системы управления. Возможны два вида воздействия: блокировка управляющего сигнала и ложная работа реле из-за возникших сетевых гармоник при отсутствии управляющего сигнала. Современные реле включают в себя активные цифровые фильтры, что в сочетании с высокой степенью кодирования сигнала позволяет выделять сигналы установленной частоты при наличии помех в виде высших гармонических составляющих.

Дистанционная защита, основанная на измерении сопротивлений на основной частоте, может давать существенные ошибки в случае наличия в токах КЗ высших гармонических составляющих (особенно 3-го порядка) [11]. В переходных режимах могут возникать гармоники произвольного порядка, однако наибольшие амплитуды имеют обычно 3-я и 7-я. Вместе с тем, фильтрация гармоник на основе сложных алгоритмов с использованием микропроцессорной техники позволяет гарантировать корректную работу современной дистанционной защиты в большинстве случаев.

4. ВЛИЯНИЕ НЕСИНУСОИДАЛЬНОСТИ НАПРЯЖЕНИЯ НА ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

4.1. Перегрев и ускоренный износ электродвигателей

Негативное влияние высших гармонических составляющих напряжения, которому подвержены потребители, включает как негативные эффекты для сетевого оборудования, описанные ранее, так и некоторые следующие аспекты.

На частотах выше сетевой трехфазные асинхронные двигатели могут быть приближенно представлены параллельными сопротивлениями прямой/обратной последовательностей:

$$Z_k = R_{\text{обм}} + jkX'', \quad (20)$$

где $R_{\text{обм}}$ — активное сопротивление обмотки двигателя; X'' — сверх-переходное реактивное сопротивление на основной частоте (обычно 0,2 о. е.). Учитывая, что у большинства электродвигателей обмотки соединены по схемам «треугольника» или изолированной «звезды», гармонические составляющие нулевой последовательности у них отсутствуют. Принимая $X'' = 0,2$ о. е., значение $R_{\text{обм}}$ малым по сравнению с kX'' , а также уровень 5-й гармонической составляющей напряжения, равным 10 %, уровень генерируемого тока 5-й гармоники составит:

$$I_5^* = U_5^* / (5X'') = |0,1 / (5 \cdot 0,20)| = 0,1 \text{ о. е.}$$

Таким образом, высшие гармонические составляющие напряжения могут создавать дополнительные токи в обмотке ротора и увеличивать на несколько процентов потери на проводимость трехфазных электродвигателей.

В фазах обмоток статора гармониками создается пульсирующая магнитодвижущая сила, приводящая к появлению в зазоре несинхронных магнитных полей, создающих дополнительные потери и нагрев элементов электродвигателя. Наличие гармоник также приводит к значительной вибрации вала и ускоренному износу подшипников.

Потери, обусловленные наличием высших гармоник тока в статорной обмотке во вращающихся машинах, определяются по формуле

$$\Delta P = \Delta P_{\text{НОМ}} \left(1 + \frac{1}{K_{r1}} \sum_{k=2}^{\infty} [K_{I(k)}^2 \cdot K_{r(k)}] \right), \quad (21)$$

где $\Delta P_{\text{НОМ}}$ — потери в меди обмотки при синусоидальном токе; $K_{I(k)}$ — коэффициент k -й гармоники тока; $K_{r(1)}$ и $K_{r(k)}$ — коэффициенты увели-

чения потерь (коэффициенты вытеснения) для 1-й и k -й гармоник тока, определяемые в зависимости от конструкции машины [12].

Современные маломощные однофазные асинхронные электродвигатели более чувствительны к несинусоидальности напряжения по сравнению с трехфазными. Для нормального функционирования данным электродвигателям необходимы вспомогательные параллельные обмотки с пусковыми конденсаторами, которые создают квази-синусоидальную кривую магнитного потока.

Индуктивность вспомогательной обмотки и пусковой конденсатор создают резонансные условия на частотах 4-й — 11-й гармоник. В качестве иллюстрации этого явления были измерены кривые тока электродвигателя мощностью 1,5 кВт для случаев питания напряжением с 1,3 % 5-й гармоники ($K_f = 11,6\%$) (рис. 18, *а*) и напряжением с содержанием 5,4 % 5-й гармоники ($K_f = 34\%$) (рис. 18, *б*). Существуют эксперименты, подтверждающие, что увеличение коэффициента несинусоидальности в пределах 6 % с преобладающими 3-й и 5-й гармониками способно снижать срок службы однофазных двигателей на 25–30 % [6].

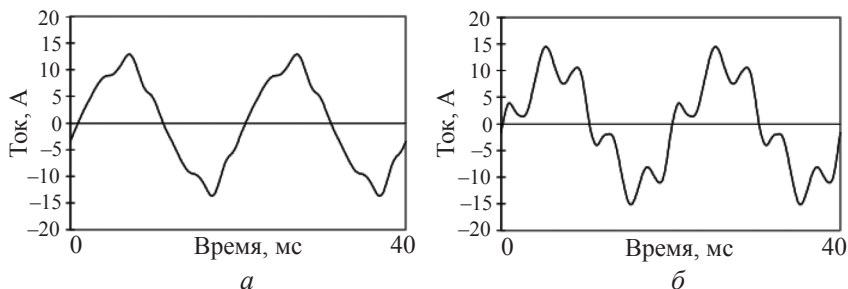


Рис. 18. Кривые тока питания однофазного асинхронного электродвигателя мощностью 1,5 кВт напряжением с 1,3%-м (*а*) и 5,4%-м (*б*) уровнями 5-й гармоники

4.2. Перегрузка по току нейтральных проводников

В трехфазной четырехпроводной системе сумма трехфазных токов протекает в нейтральном проводнике. Токи прямой и обратной последовательностей компенсируют друг друга в нейтральной точке, однако синфазные составляющие тока нулевой последовательности складываются арифметически.

Традиционно принято считать, что в трехфазных системах отсутствуют токи в нейтральном проводнике. Однако данное правило не соблюдается в случае наличия гармонических составляющих тока нулевой последовательности.

В офисных зданиях с большим количеством компьютерных нагрузок, действующее значение тока нейтрали может превышать действующие значения фазных токов. Рассматривая экспериментально полученные результаты измерений щита питания с подключенными 147 персональными компьютерами и некоторой дополнительной линейной нагрузкой (рис. 19). Видим, что действующие значения фазных токов для фаз А, В, С составляют 40,2 А, 52,7 А и 47,8 А соответственно. Ток в нейтрали содержит в основном 3-ю гармоническую составляющую и имеет действующее значение 60,9 А, что в 1,3 раза превышает среднее значение фазового тока.

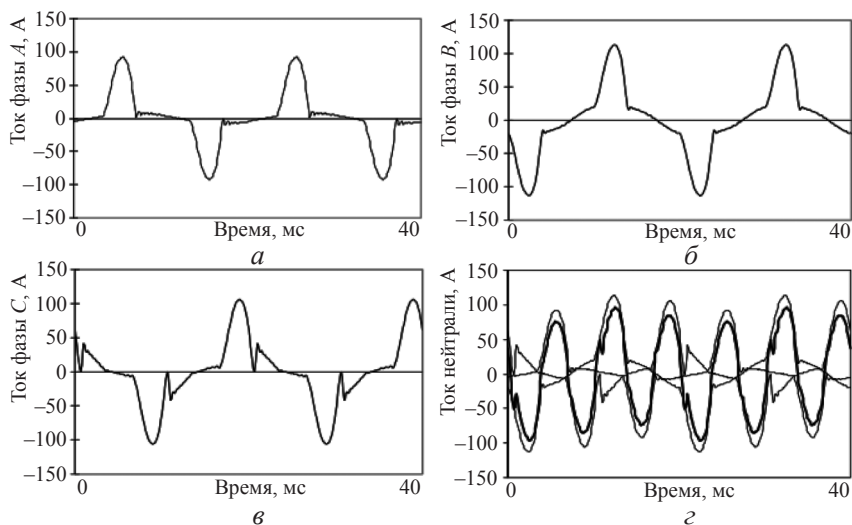


Рис. 19. Результаты измерений на щите питания офисного здания с подключенными 147 персональными компьютерами:

а–в — токов фаз; *г* — тока нейтрали

Большое количество компьютерных нагрузок вызывает «уплощение» верхушки кривой фазного напряжения (рис. 20, а). Эта расплывчатая плоская форма кривой напряжения характеризуется

$K_U = 5,1 \%$, и содержит: 3,9 % 5-й; 2,2 % 3-й; 1,4 % 7-й гармонических составляющих. Действующее значение тока нейтрали за счет 3-й гармонической составляющей может превышать аналогичное значение, представленное на рисунке 19, ε .

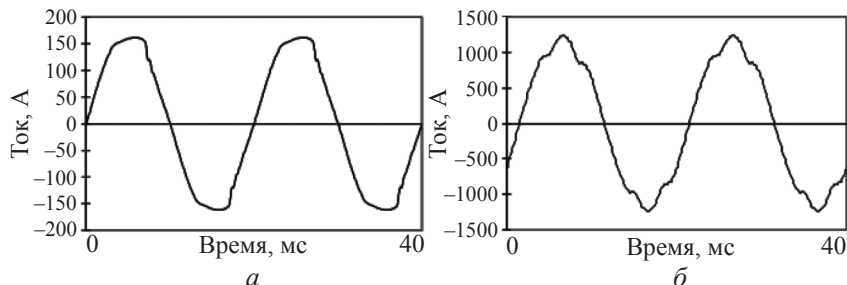


Рис. 20. Кривые фазного напряжения (а) и тока (б) на щите питания 147 персональных компьютеров

Большинство блоков питания персональных компьютеров имеют входной ток с уровнем содержания 3-й гармонической составляющей более 80 %. В этих случаях ток нейтрали составит $3 \cdot 80 \% = 240 \%$ относительно фазного тока основной частоты.

Поэтому при преобладании среди электроприемников здания компьютерной нагрузки стандартной инженерной практикой является использование индивидуального нейтрального проводника для каждой фазы или увеличение как минимум в 2 раза допустимой токовой нагрузки нейтрального проводника по сравнению с фазными.

Перегруженные нейтральные проводники обычно представляют локальную проблему внутри здания. С приближением к точке присоединения объекта к питающей сети возрастает суммарная мощность электрических нагрузок здания. Возрастающее входное сопротивление в некоторой степени подавляет искажения от мало-мощных электроприемников. Кривая тока питания нагрузок крупного административно-офисного здания показана на рисунке 20, б. Суммарный коэффициент гармонических составляющих кривой напряжения K_U в данном случае составляет 7 % и включает 4,5 % 5-й гармоники, 3,7% 7-й, 3,5% 3-й.

4.3. Системы связи, телефонизации, часофикации

Принцип работы цифровых часов основывается на подсчете количества пересечений через нуль или изменений наклона кривой напряжения основной частоты. В схемотехнике цифровых часов могут быть предусмотрены фильтрующие элементы, но в случае значительных уровней несинусоидальности возможно наличие множественных пересечений через нуль или изменений наклона кривой напряжения (рис. 21), что вызывает неточности в работе часов.

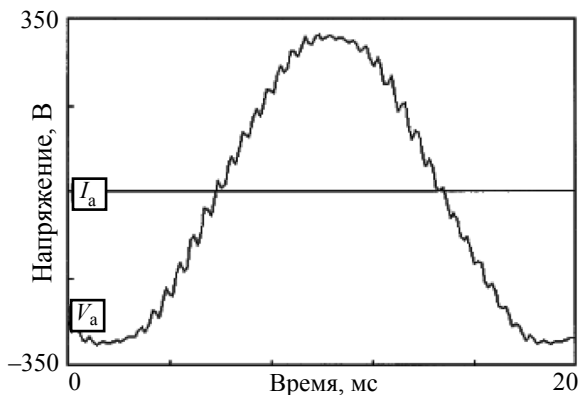


Рис. 21. Кривая сетевого напряжения с 2%-м уровнем 36-й гармонической составляющей [6]

Ранние версии цифровых часов наиболее сильно подвержены негативному влиянию несинусоидальности напряжения. Переход на цифровые способы связи полностью решил данную проблему.

Современные системы телефонизации, передачи телевизионного и интернет сигналов практически не подвержены воздействиям высших гармонических составляющих напряжения в силу использования цифрового принципа кодирования и декодирования информации. Проблемы с помехами в аналоговых телефонных линиях связи обычно решаются телефонными компаниями совместно с операторами электрических сетей. Методы решения определяются путем проб и ошибок и часто состоят в перемещении или отключении конденсаторных батарей с высокими значениями несинусоидальных токов, а также в подключении регулируемых реакторов в нулевой проводник конденсатор-

ных батарей, в случае их соединения по схеме «звезды». Регулируемые реакторы не оказывают влияния на гармонические составляющие прямой и обратной последовательностей, однако могут менять резонансную частоту кабеля питания, которая обуславливается нулевой последовательностью, а иногда и вовсе исключать резонансные режимы.

4.4. Влияние несинусоидальности напряжения на приборы учета электроэнергии

Измерительные приборы калибруются при чисто синусоидальном характере тока и напряжения, поэтому при их использовании в электрических сетях с искаженными токами и напряжениями они могут не обеспечивать заявленных параметров точности. Например, индукционные счетчики могут завышать значения потребляемой мощности (до 6 %) вследствие слабого демпфирования в интервалы отсутствия тока [11], [13].

Кроме того, несинусоидальный режим сети оказывает воздействие на точность измерений реактивной мощности и, соответственно, коэффициента мощности, порядок расчета которых определен только для случая синусоидальных токов и напряжений.

5. МЕТОДЫ КОМПЕНСАЦИИ НЕСИНУСОИДАЛЬНОСТИ НАПРЯЖЕНИЯ

5.1. Превентивные методы компенсации несинусоидальности напряжения

Способы подавления гармонической эмиссии делятся на две группы: превентивные и корректирующие.

Превентивные методы основываются на минимизации уровней гармонической эмиссии в электрической сети за счет:

- строгого следования требованиям стандартов по качеству электроэнергии;
- взаимной компенсации противофазных гармонических составляющих. Например, при использовании двенадцатипульсных преобразователей вместо шестипульсных возможна компенсация 5-й и 7-й гармонических составляющих тока, вызывающих боль-

шинство проблем несинусоидальности в электрических сетях (см. подразд. 2.4);

- внедрения электрических нагрузок с низким уровнем помехоэмиссии. Благодаря требованиям стандартов, содержащих нормы гармонической эмиссии для различного оборудования, все большее внимание уделяется суммарному коэффициенту высших гармонических составляющих тока K_h искажающих электроприемников. В настоящее время потребитель имеет возможность применять современные типы преобразователей, обеспечивающие низкий уровень гармонической эмиссии тока независимо от потребляемой мощности, будь то многопульсные преобразователи мощного электропривода или электронные ПРА с коррекцией коэффициента мощности маломощных разрядных ламп;
- предварительного проектирования и компьютерного моделирования уровня эмиссии гармонических составляющих. Перед покупкой и установкой мощной нелинейной нагрузки всегда следует предварительно рассчитать ее влияние на параметры качества электрической сети. Коррекция уровней несинусоидальности уже установленной и функционирующей нелинейной нагрузки достаточно сложна вследствие дополнительных финансовых затрат и необходимости обеспечения непрерывности производственного процесса.

К мероприятиям по снижению несинусоидальности напряжения электрической сети, применяемым на стадиях проектирования, относятся принципиальные решения по устройству и модернизации электросетей:

- выделение нелинейных нагрузок на отдельную систему шин;
- подключение нагрузки к системе с большей мощностью короткого замыкания $S_{кз}$.

5.2. Корректирующие методы компенсации несинусоидальности напряжения

Корректирующие методы в основном подразумевают применение фильтрующих устройств, подразделяющихся на пассивные и активные.

Пассивные фильтры широко используются для снижения уровней 5-й и 7-й гармонических составляющих тока. Большинство из них состоит из последовательно соединенных индуктивных и емкостных

компонентов, обеспечивающих возникновение заземляющего контура с низким сопротивлением на частоте резонанса. Учитывая наличие значительной емкостной составляющей, в низкочастотной области около 50 Гц пассивные фильтры обеспечивают как компенсацию реактивной мощности, так и контроль уровня несинусоидальности напряжения.

В ряде случаев подавление 5-й гармонической составляющей оказывается достаточным для решения большинства проблем, связанных с гармонической эмиссией в электрической сети. Однако в некоторых случаях дополнительная фильтрация 7-й, 11-й и 13-й гармонических составляющих является необходимой. При этом номера фильтруемых гармоник нельзя «пропускать». Например, если проблемна 7-я гармоника, следует устанавливать фильтры 5-й и 7-й гармоник, поскольку только фильтр 7-й гармоники может усиливать уровень 5-й гармоники напряжения. Следует избегать установки фильтров 3-й гармонической составляющей, поскольку подключенные к сети электродвигатели и трансформаторы — традиционные источники 3-й гармоники, значительно снижают подавляющие свойства данных фильтров.

Обычно, чем выше номер гармоники, тем меньше значение реактивной мощности фильтра, требующегося для ее подавления. Для установок, содержащих несколько фильтров, удобно дискретное изменение реактивной мощности фильтра: если фильтр 5-й гармонической составляющей имеет мощность Q квар, то для фильтрации 7-й гармоники понадобится $Q/2$ квар, а для 11-й и 13-й гармоник — соответственно, $Q/4$ и $Q/8$ квар. Для наиболее эффективной работы мощность фильтра должна быть не менее 300 квар [6].

Установка низковольтных фильтров в сетях промышленного потребителя без проведения компьютерного моделирования возможна только в том случае, когда все конденсаторные установки предприятия снабжены фильтрами. Тем не менее в условиях распределительной сети всегда целесообразно рассчитать эффект от установки фильтра, чтобы избежать недопустимого увеличения уровней несинусоидальности в отдаленных точках сети. В особенности это актуально для кабелей питания с подключенными конденсаторными установками.

К проблемам, связанным с пассивной фильтрацией, относят:

- снижение эффективности по мере того, как конденсаторы стареют и снижают емкость, тем самым увеличивая частоту резонанса фильтра;

- возможную перегрузку за счет привлечения токов высших гармонических составляющих от неучтенных источников несинусоидальности сети.

Активные фильтры являются силовыми преобразователями, генерирующими высшие гармонические составляющие тока, равные по амплитуде, но противоположные по фазе гармоникам, уже существующим в сети. Тем самым, достигается значительное снижение несинусоидальности напряжения.

К достоинствам активных фильтров относят:

- возможность подавления гармонической эмиссии, изменяющейся во времени;
- токоограничивающие возможности для недопущения перегрузки токами высших гармонических составляющих от новых и неучтенных источников эмиссии;
- одновременный контроль параметров синусоидальности напряжения в месте подключения и в удаленных участках сети.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

К главе 1.

1. Перечислите и дайте определения основных параметров количественной оценки уровня несинусоидальности кривой.

К главе 2.

2. Перечислите основные источники несинусоидальности напряжения в электрических сетях.
3. Поясните преимущества многопульсных неуправляемых выпрямителей по сравнению с шестипульсными. Какие гармоники присутствуют в спектрах шестипульсного и двенадцатипульсного неуправляемых выпрямителей?
4. В чем отличия управляемых выпрямителей от неуправляемых?

К главе 3.

5. Опишите причины и последствия возникновения частотных резонансов в электрических сетях.
6. Что такое частотная характеристика сопротивления сети? В чем недостатки формулы для определения резонансной частоты через мощность конденсаторной установки?

7. Опишите причины перегрева трансформаторов при протекании по ним несинусоидальных токов.
8. Поясните причины ускоренного старения конденсаторов при протекании по ним несинусоидальных токов.
К главе 4.
9. С какой целью необходимо увеличивать сечение нейтральных проводников в электрических сетях с большим количеством компьютерных нагрузок?
К главе 5.
10. Назовите основные группы методов снижения несинусоидальности напряжения, а также входящие в них мероприятия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **ГОСТ 32144–2013.** Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. — М.: Стандарт-информ, 2014.
2. **Гармоники** в электрических системах / Дж. Арриллага [и др.]. — М.: Энергоатомиздат, 1990.
3. **Жежеленко, И.В.** Избранные вопросы несинусоидальных режимов в электрических сетях предприятий / И.В. Жежеленко. — М.: Энергоатомиздат, 2007.
4. **Жежеленко, И.В.** Высшие гармоники в системах электроснабжения промышленных предприятий / И.В. Жежеленко. — М.: Энергоатомиздат, 1984.
5. **ГОСТ 30804.3.2–2006.** Совместимость технических средств электромагнитная. Эмиссия гармонических составляющих тока техническими средствами с потребляемым током не более 16 А (в одной фазе). Нормы и методы испытаний. — М.: Стандарт-информ, 2014.
6. **Grady, M.** Understanding power system harmonics. — Режим доступа: <http://www.ece.utexas.edu/~grady>.
7. **J. Arrillaga** Power systems harmonic analysis — John Wiley & Sons, 1997.
8. **Разработка** методики расчета установившихся режимов электрических сетей наружного освещения с учетом нелинейных харак-

- теристик светодиодных светильников : дисс. ... канд. техн. наук: 05.09.03: защищена 18.06.09 : утв. 09.10.09 / С.В. Гужов. — М., 2009 — 147 с.
9. **Key, T.** Costs and benefits of harmonic current reduction for switch-mode power supplies in a commercial office building / T. Key, J.-S. Lai // IEEE Transactions on industry applications, September, 1996.
 10. **Конюхова, Е.А.** Электроснабжение объектов: учебн. пособие по специальности 140409 «Электроснабжение (по отраслям)» / Е.А. Конюхова. — 9-е изд., испр. — М.: Академия, 2013. — 320 с.
 11. **Ополев, Г.Н.** Электротехнологические установки. Конспект лекций по дисциплине «Электротехнологические установки и освещение предприятий» для студентов специальности 190401.65 — Электроснабжение железных дорог, специализации 190401.65.03 — Электроснабжение предприятий железнодорожного транспорта / Г.Н. Ополев. — Иркутск: ИРГУПС, 2009. — 34 с.
 12. **Анчарова, Т.В.** Электроснабжение и электрооборудование зданий и сооружений: учебн. для вузов по курсу «Электрооборудование и электроснабжение промышленных предприятий» / Т.В. Анчарова, М.А. Рашевская, Е.Д. Стебунова. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Форум; ИНФРА-М, 2014. — 416 с. — (Высшее образование. Бакалавриат).
 13. **Кудрин, Б.И.** Электроснабжение промышленных предприятий: учебно-справочное пособие / Б.И. Кудрин. — М.: Теплотехник, 2009. — 698 с.

Учебное издание

Янченко Сергей Александрович
Гужов Сергей Вадимович

**РАБОТОСПОСОБНОСТЬ И КАЧЕСТВО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ И СИСТЕМ
В РЕЖИМАХ НЕСИНУСОИДАЛЬНОСТИ НАПРЯЖЕНИЯ**

Учебное пособие

Редактор издательства М.П. Малахов
Компьютерная верстка Ю.В. Сушок

Темплан издания МЭИ 2016, учебн.	Подписано в печать 11.08.16
Печать офсетная	Формат 60×84/16
Тираж 150 экз.	Физ. печ. л. 2,75
	Изд. № 16у-038
	Заказ

Оригинал-макет подготовлен в Издательстве МЭИ,
111250, Москва, ул. Красноказарменная, д. 14
Отпечатано в отделе оперативной полиграфии МЭИ,
111250, Москва, ул. Красноказарменная, д. 13