

ИЗМЕРЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В СЕТИ КОМПЬЮТЕРНОГО КЛАССА И РАЗРАБОТКА МЕРОПРИЯТИЙ ПО ФИЛЬТРАЦИИ ВЫСШИХ ГАРМОНИК

В работе произведено измерение показателей качества электрической энергии (ПКЭ) системы электроснабжения компьютерного класса одного из учебных заведений города Омска с применением анализаторов качества электрической энергии. В состав каждого персонального компьютера входит импульсный источник питания, являющийся источником высших гармоник. Они нарушают нормы ПКЭ, установленные ГОСТ 32144–2013. Для исключения влияния высших гармоник на элементы питающей сети и недопущения возникновения резонансных режимов авторами статьи был предложен расчет параметров и установка пассивных фильтров в исследуемую сеть. Выполненное математическое моделирование в программном комплексе MATLAB-Simulink подтвердило авторскую гипотезу об эффективности использования фильтров.

Ключевые слова: показатели качества электрической энергии, несинусоидальный режим, резонансный режим, фильтрация высших гармоник.

Введение. Наличие высших гармоник (ВГ) в системах электроснабжения (СЭС) является причиной ухудшения показателей качества электрической энергии (ПКЭ) и их выход за пределы значений, регламентированных ГОСТ 32144–2013 [1]. Отклонение ПКЭ от нормированных приводит к различным нежелательным последствиям для элементов СЭС и их составных частей [2, 3]:

- ускоренному старению и сокращению срока службы изоляции электрооборудования;
- возникновению дополнительных потерь мощности и энергии;
- уменьшению пропускной способности линий электропередачи (ЛЭП);
- сбоям и неправильной работе различного электронного оборудования вторичных цепей, устройств релейной защиты и автоматики (РЗА);
- невозможности компенсации реактивной мощности с помощью регулируемых конденсаторных установок;
- уменьшению срока службы и надежности конденсаторных установок;
- возникновению потенциальных резонансных режимов вблизи частот одной или нескольких ВГ сети [4–8].

Вышеперечисленные аспекты приведут к уменьшению срока службы элементов СЭС из-за протекания несинусоидальных токов, что в итоге ведет к увеличению эксплуатационных затрат на ремонт или приобретение нового оборудования при невозможности проведения капитального ремонта имеющегося.

Резонансные режимы. В [9] приведены нормируемые значения коэффициентов по активной и реактивной мощности в электрических сетях в зависимости от класса напряжения. Авторы [6] отмечают, что естественный коэффициент активной мощности ($\cos\varphi$) практически всех существующих промышленных предприятий находится в интервале 0,85–0,9, т.е. интервал не входит в регламентированные значения.

Для увеличения $\cos\varphi$ и компенсации реактивной мощности в электрических сетях распространенной мерой является установка конденсаторных батарей (КБ).

При наличии в сетях промышленных предприятий или офисных зданий ЭП с нелинейной вольт-амперной характеристикой (ВАХ) и конденсаторных батарей, предназначенных для компенсации реактивной мощности, могут возникать нежела-

тельные резонансные режимы. В параллельном контуре, образуемом активно-индуктивной (нелинейной нагрузкой) и емкостью КБ, возникнет режим резонанса токов, который приведет к выходу из строя КБ вследствие прохождения повышенных токов, приводящих к их перегрузке, а в отдельных случаях — к пожарам и взрыву [6].

Для предотвращения таких ситуаций научно-исследовательским коллективом был разработан алгоритм расчета, позволяющий идентифицировать потенциально возможные резонансные режимы. На основе алгоритма, подробно представленного в [6, 7], разработана программа расчета токов гармоник, протекающих через КБ в зависимости от реактивной мощности. Программа позволяет рассчитать резонансную частоту; сопротивление системы; токи, протекающие через КБ при заданных ВГ сети; параметры нагрузки; реактивную мощность КБ; построить спектры токов гармоник системы, а также рассчитать максимально возможную мощность нелинейных нагрузок, при которых токи через КБ не превысят допустимого значения.

Особую актуальность подобная тематика приобретает для сетей, в составе которых присутствуют нелинейные электроприемники (ЭП) с малой установленной мощностью (не превышающих 5 МВт). В [7] отмечается, что в настоящее время в отечественных и зарубежных научных изданиях практически отсутствуют публикации, посвященные данной тематике.

Актуальность расчета резонансных режимов СЭС при наличии ВГ также подтверждается и специалистами промышленного предприятия АО «Усть-Каменогорский конденсаторный завод». Специалистами этого предприятия было выявлено, что на срок службы, частоту ремонтов и надежность конденсаторных установок влияет «качество электрической энергии в точках их подключения» [8]. В последнее время все большую значимость приобретает проблема качества электрической энергии сетей офисной нагрузки, коммунально-бытовой сферы, торговых центров и сферы услуг из-за постоянного увеличивающегося количества таких объектов, а также из-за роста потребляемой ими мощности. В большинстве случаев это однофазные ЭП, в состав которых входят импульсные источники питания, являющиеся источниками ВГ [4, 10, 11].

Несинусоидальные и несимметричные режимы работы сетей напряжением 380 В. На сегодняшний день имеется достаточно большое количество работ, посвященных изучению несинусоидальных и несимметричных режимов, создаваемых нелинейными однофазными нагрузками и объектами производственного коммунально-бытового сектора [2, 5, 10–12]. Все выдвигаемые авторами теоретические положения получили экспериментальную проверку в виде данных физического измерения ПКЭ с применением различных анализаторов качества электрической энергии, например, «Chavin Arpoux SA 8335», «Энергомонитор 3.3» [5, 10–12], либо данными имитационного моделирования [2].

Распространение нелинейных ЭП с малой установленной мощностью (персональные компьютеры, оргтехника, энергосберегающие источники света) приводит не только к вышеперечисленным нежелательным последствиям для основных элементов СЭС, но и к возникновению несимметричных режимов работы четырехпроводных сетей. Для их выявления в [2, 10–12] были проведены исследования различных видов производственных объектов,

для каждого из которых определялись спектры гармоник тока. Результаты измерений ПКЭ в низковольтных электрических сетях напряжением 380 В, привели к следующим выводам:

— в спектральном составе тока нагрузки производственных объектов доминируют 3-я, 9-я и 15-я гармоники [10];

— в многоквартирных домах преобладают 3-я и 5-я гармоники [2];

— в нулевом рабочем проводнике происходит суммирование токов гармоник, кратных трем [11];

Данные всех исследований ПКЭ показали, что уровни ВГ в сетях 380 В значительно превышают установленные нормы. Все авторы связывают это с постоянным ростом нелинейных ЭП офисных зданий и производственной нагрузки коммунально-бытового сектора.

Результаты замеров ПКЭ и данных математического моделирования позволяют спрогнозировать спектральный состав тока при выполнении оценочных расчетов потерь мощности и энергии, а также произвести выбор устройств компенсации и фильтрации высших гармоник для существующих и проектируемых электрических сетей.

Снижение токов высших гармоник и их фильтрация. Для исключения выхода ПКЭ за пределы ГОСТ 32144-2013 и недопущения возникновения резонансных режимов, а также снижения уровней несинусоидальности и несимметрии необходимо проводить мероприятия по уменьшению ВГ в СЭС. Подобные мероприятия могут быть разделены на две категории:

— мероприятия, не требующие значительных капитальных вложений (к ним можно отнести мероприятия по естественному снижению токов ВГ);

— мероприятия, требующие ощутимых капитальных вложений (к таким мероприятиям относят установку фильтров ВГ в СЭС).

Естественное снижение токов ВГ. При естественной компенсации токов ВГ предлагается максимально использовать эффекты ослабления и неоднородности в сетях офисных зданий и нагрузки коммунально-бытового сектора.

Для достижения максимального эффекта авторы исследования [13] предлагается совместное подключение к одной питающей линии энергосберегающего освещения и компьютерной техники для снижения 3-й или 5-й гармоник тока. Для максимизации эффекта ослабления предлагается располагать однотипную нагрузку как можно ближе к вводному распределительному устройству или трансформаторной подстанции для исключения случаев питания таких нагрузок протяженными кабельными линиями.

Фильтрация ВГ. В тех случаях, когда использование эффектов ослабления и неоднородности для естественной компенсации токов гармоник по каким-либо причинам не приносит ожидаемого результата, прибегают к фильтрации ВГ. На сегодняшний день существует огромное количество устройств, предназначенных для компенсации реактивной мощности не только в сетях промышленных предприятий, содержащих высшие гармонические составляющие, но и в сетях, содержащих бытовую (офисную) нагрузку, а также различные типы фильтров. Обширный обзор таких устройств, сравнение их преимуществ и недостатков произведен в [14]. Авторы этой работы предлагают устанавливать гибридные фильтры, так как они имеют наилучшие технико-экономические показатели.

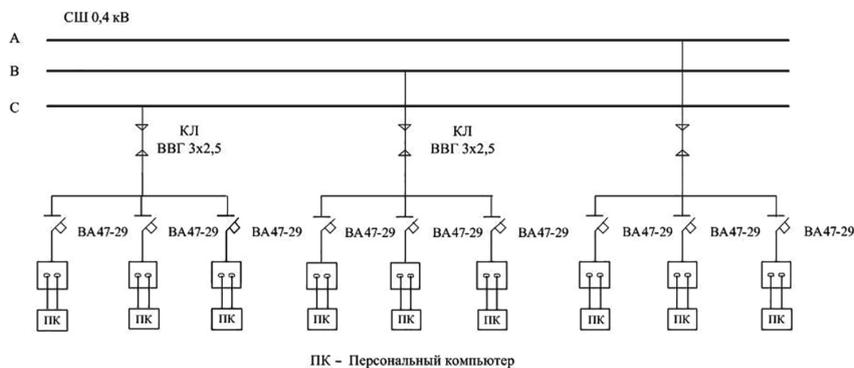


Рис. 1. Трехфазная сеть, питающая компьютерный класс

Гибридные фильтры могут быть использованы не только для промышленных объектов, но и для непромышленной офисной нагрузки и объектов коммунально-бытового сектора. Примером использования гибридного фильтра ВГ в сетях офисных зданий может служить работа [4]. Её авторы предлагают использовать гибридный фильтр собственной разработки, в состав которого входит трансформатор двойного питания для решения задачи фильтрации ВГ и одновременного повышения коэффициента активной мощности сети. В работе также производится расчет параметров элементов фильтра применительно к сети офисного здания.

Однако существуют и альтернативные точки зрения на решение задачи компенсации ВГ в сетях. В ряде работ [11, 15, 16] предлагается использование активных фильтров для компенсации гармоник в сетях промышленных предприятий и непромышленной нагрузки. Кроме того, в [3, 17] авторы предлагают устанавливать фильтрокомпенсирующие устройства (ФКУ).

В [15] отмечается, что традиционные методы, направленные на компенсацию реактивной мощности, повышение $\cos\phi$ в сети и компенсацию высших гармонических составляющих, имеют большое количество недостатков при реализации технологии «умных» сетей, поэтому авторами предлагается использовать параллельные активные фильтры (ПАФы). Выполненные исследования доказали снижение уровней высших гармонических составляющих при наличии ПАФов в сети.

В [16] предлагается применять активные фильтры, позволяющие производить компенсацию реактивной мощности вместе гармоническими составляющими в сетях по причине того, что использование традиционных средств компенсации реактивной мощности (например, синхронных компенсаторов) может привести к перегрузке компенсаторов из-за протекания через них токов ВГ.

В [11] предложена установка активного фильтра гармоник (АФГ) на шинах 0,4 кВ для компенсации ВГ и симметрирования сети объекта индивидуального жилищного строительства (ИЖС) с высоким содержанием нелинейной нагрузки. Проведенное имитационное моделирование с включенным АФГ подтвердило эффективность использования фильтра.

Авторами [3] были выполнены замеры ПКЭ в сети при наличии огромного количества нелинейных ЭП и установленных на шинах 0,4 кВ конденсаторных батарей, которые показали, что суммарный коэффициент гармоник значительно превышает значения, установленные ГОСТ 32144–2013. Кроме того, наблюдается превышение коэффициентов n -й гармонической составляющей для 5-й, 7-й

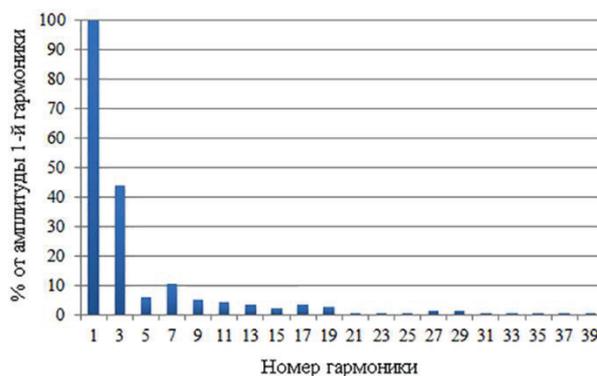


Рис. 2. Спектр гармоник сигнала тока, потребляемого компьютерным классом

и 11-й гармоник. Для улучшения ПКЭ и исключения случаев появления ВГ в сетях более высоких уровней напряжения предлагается фильтрация ВГ путем последовательного подключения реакторов к существующим КБ, либо параллельного соединения новых ФКУ относительно существующих КБ на шинах 0,4 кВ КТПН.

В [17] проводилось исследование по выявлению жестких и сенсорных узлов СЭС на примере фрагмента электрической Белгородской энергосистемы с применением метода сальдо-проводимостей. Авторами отмечено, что установка ФКУ в сенсорных узлах для фильтрации ВГ в сети наиболее эффективна с точки зрения технико-экономических показателей, так как в этом случае потребуются ФКУ с наименьшей установленной мощностью.

Результаты исследования. В настоящей работе авторами были проведены измерения ПКЭ в электрической сети, питающей компьютерный класс, находящийся в одной из учебных аудиторий Омского государственного технического университета, с использованием различных анализаторов качества электрической энергии. Схема сети, производящая питание группы персональных компьютеров (ПК), приведена на рис. 1.

При подключении однофазных ПК к сети питания учебных аудиторий было учтено их равномерное распределение между фазами трехфазной сети. Все ПК, установленные в компьютерном классе, полностью идентичны. Кроме того, при проведении замеров ПКЭ в исследуемом временном интервале все компьютеры были в работе. Учитывая эти обстоятельства, мы можем ввести допущение об отсутствии несимметрии, поэтому в настоящей работе не учитывался несимметричный режим трехфазной сети.

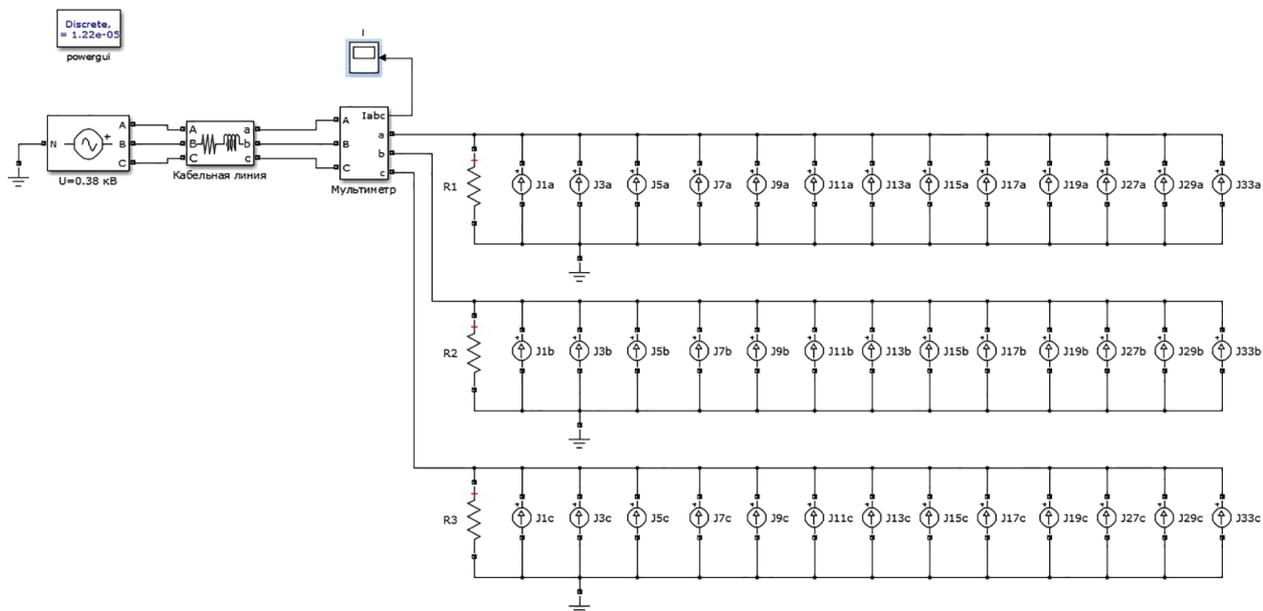


Рис. 3. Имитационная модель СЭС

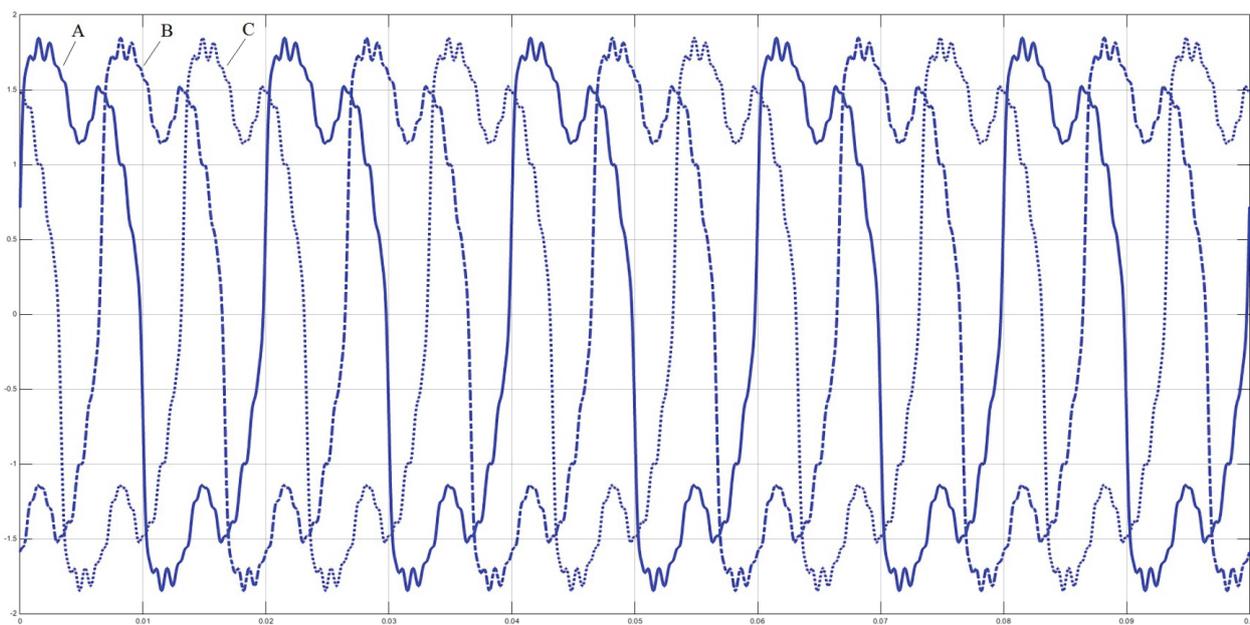


Рис. 4. Осциллограммы фазных токов: А — ток фазы А; В — ток фазы В; С — ток фазы С

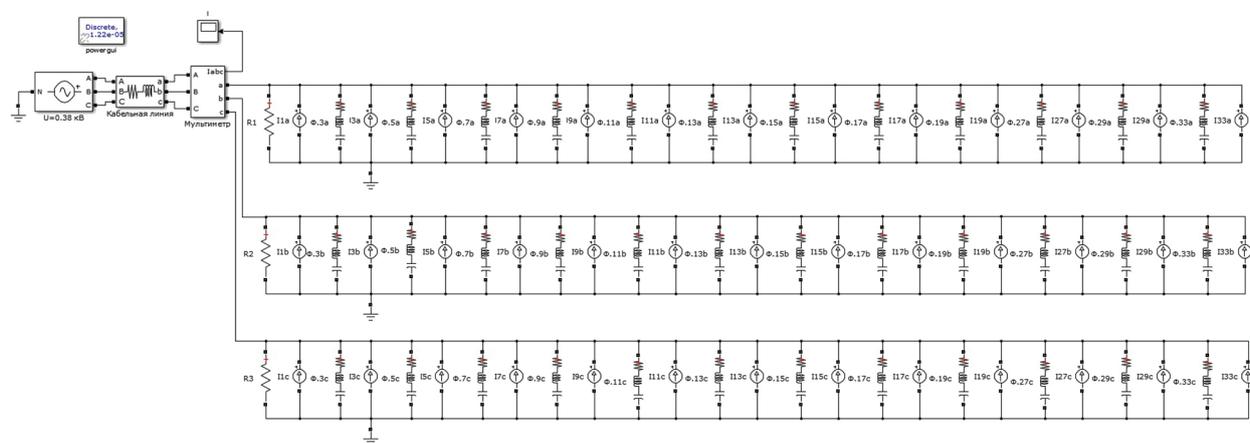


Рис. 5. Имитационная модель СЭС с установленными фильтрами ВГ

Параметры секций пассивного фильтра

| Номер гармоники (n) | Емкость фильтра на частоте n -й гармоники (C_n), мкФ | Индуктивность фильтра на частоте n -й гармоники (L_n), Гн |
|-------------------------|------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| 3 | 3,432 | 0,328 |
| 5 | 0,289 | 1,404 |
| 7 | 0,358 | 0,578 |
| 9 | 0,137 | 0,911 |
| 11 | 0,091 | 0,917 |
| 13 | 0,061 | 0,989 |
| 15 | 0,032 | 1,407 |
| 17 | 0,047 | 0,743 |
| 19 | 0,033 | 0,854 |
| 27 | 0,012 | 1,192 |
| 29 | 0,011 | 1,094 |
| 33 | 0,006 | 1,689 |

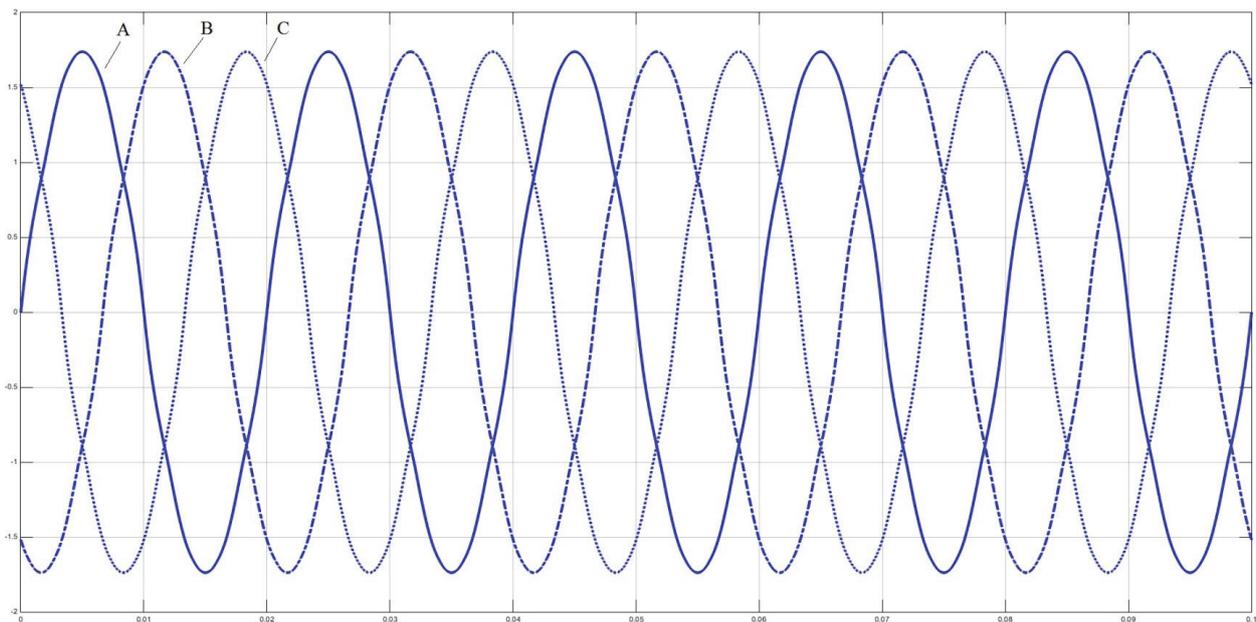


Рис. 6. Осциллограммы токов фаз (после проведения процедуры фильтрации ВГ):
 А — ток фазы А; В — ток фазы В; С — ток фазы С

Спектр гармоник, создаваемый импульсными источниками питания, входящими в состав каждого из компьютеров, приведен на рис. 2.

Используя данные физических замеров ПКЭ, создаем имитационную модель, которая наглядно демонстрирует кривую тока, потребляемого компьютерами. Модель, отражающая несинусоидальность режима работы компьютерного класса, разработана в программном комплексе MATLAB-Simulink и представлена на рис. 3, а осциллограммы фазных токов, потребляемых компьютерами, — на рис. 4. Анализ экспериментальных данных и рис. 2–4 при-

водит к выводу, что главным виновником нарушений ПКЭ являются импульсные источники питания ПК, которые генерируют широкий спектр ВГ.

Отметим, что коэффициенты n -ых гармонических составляющих напряжения в исследуемой сети превышают регламентированные ГОСТ 32144–2013 значения в отношении 3-й и 9-й гармоник. Поэтому для улучшения ПКЭ, а также для недопущения возникновения потенциальных резонансных режимов вблизи частот ВГ целесообразно предпринять меры для снижения либо полного подавления имеющихся гармоник в сети компьютерного класса.

Несмотря на большое количество существующих в настоящее время способов и средств снижения уровней ВГ в СЭС, примем к установке в исследуемой сети пассивные фильтры для подавления ВГ как наиболее простое, дешевое и достаточно эффективное средство компенсации токов гармонических составляющих.

Для определения параметров индуктивного и емкостного элементов силового фильтра воспользуемся алгоритмом [18, 19]. Однако для использования этого алгоритма необходимо найти связь между реактивной мощностью КБ и ее емкостью. Она может быть представлена выражением (1).

$$C_n = \frac{Q_{kn}}{U_\phi^2 \cdot 2\pi f n}, \quad (1)$$

где Q_{kn} — мощность, вырабатываемая БСК на частоте n -й гармоники, вар; C_n — емкость БСК на частоте n -й гармоники, Ф; U_ϕ — фазное напряжение сети, В; f — промышленная частота сети (50 Гц); n — номер гармоники.

Результаты расчетов элементов секций пассивного фильтра, предназначенного для компенсации ВГ тока в сети, представлены в табл. 1.

Намечаем к установке пассивные фильтры для компенсации n -ых гармонических составляющих тока. Имитационная модель, учитывающая фильтрацию токов ВГ, представлена на рис. 5, а осциллограммы фазных токов (после фильтрации ВГ) — на рис. 6.

Анализ графиков, приведенных на рис. 6, позволяет сделать вывод об эффективности применения пассивных фильтров для компенсации высших гармонических составляющих (графики токов по форме очень близки к чистым синусоидам).

Заключение. В настоящей работе произведены физические замеры ПКЭ и имитационное моделирование системы электроснабжения, производящее питание персональных компьютеров. В состав каждого ПК входит импульсный источник питания, генерирующий широкий спектр высших гармоник в питающую сеть.

Чтобы исключить негативное влияние ВГ на элементы СЭС и предотвращения возникновения потенциально возможных резонансных режимов вблизи частот гармоник, предложено использовать пассивные фильтры как наиболее дешевое, простое и достаточно эффективное средство для их подавления.

Данные имитационного моделирования показали, что при наличии фильтров гармоник кривые потребляемых токов становятся близкие к синусоидальным и ПКЭ уже соответствуют требованиям, установленным ГОСТ 32144–2013.

Библиографический список

1. ГОСТ 32144–2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 2014–07–01. М.: Стандартинформ, 2014. 19 с.
2. Гужов С. В., Янченко С. А. Анализ работоспособности функционирования электротехнических комплексов и систем в режимах несинусоидального тока // вестник Кузбасского государственного технического университета. 2016. № 6 (118). С. 145–152.
3. Зырянов В. М., Митрофанов Н. А., Соколовский Ю. Ю. Анализ гармонического состава тока и напряжения на шинах

0,4 кВ КТПН и применение устройств ограничения высших гармоник // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2016. № 2 (109). С. 61–67.

4. Буре И. Г., Хевсуриани И. М., Киселев М. Н., Козырьков А. Ю. Влияние современного оборудования жилых и офисных комплексов на качество электроэнергии // Энергетик. 2017. № 1. С. 42–46.

5. Вагин Г. Я., Севостьянов А. А., Солнцев Е. Б. и [др.] Исследование высших гармоник тока, генерируемых энергосберегающими источниками света // Промышленная энергетика. 2014. № 6. С. 51–54.

6. Михеев Г. М., Атаманов М. Н., Афанасьева О. В., Дрей Н. М. Расчет тока конденсаторных батарей с учетом источников высших гармоник // Вестник Чувашского университета. 2017. № 1. С. 145–155.

7. Михеев Г. М., Атаманов М. Н., Дрей Н. М. Алгоритм расчета тока высших гармоник в системе электроснабжения промышленных предприятий // Промышленная энергетика. 2018. № 3. С. 40–45.

8. Аксенов В. В., Быстров Д. В., Воротницкий В. Э., Трофимов Г. Г. Компенсация реактивной мощности с фильтрацией токов высших гармоник — реальный путь повышения энергоэффективности передачи и распределения электроэнергии // Электрические станции. 2012. № 3. С. 53–60.

9. О порядке расчета значений соотношения потребления активной и реактивной мощности для отдельных энергопринимающих устройств (групп энергопринимающих устройств) потребителей электрической энергии: приказ Министерства энергетики РФ от 23 июня 2015 г., № 380. Доступ из справочной системы «Консультант Плюс».

10. Тульский В. Н., Карташев И. И., Насыров Р. Р. [и др.]. Влияние высших гармоник тока на режимы работы кабелей распределительной сети 380 В // Промышленная энергетика. 2013. № 5. С. 39–44.

11. Авербух М. А., Жилин Е. В. Влияние нелинейной и несимметричной нагрузки на систему электроснабжения жилых микрорайонов // Промышленная энергетика. 2017. № 12. С. 40–45.

12. Косоухов Ф. Д., Васильев Н. В., Филиппов А. О. Снижение потерь от несимметрии токов и повышение качества электрической энергии в сетях 0,38 кВ с коммунально-бытовыми нагрузками // Электротехника. 2014. № 6. С. 8–12.

13. Янченко С. А., Цырук С. А. Компенсация высших гармоник тока при питании групп бытовых нелинейных электроприемников // Промышленная энергетика. 2014. № 1. С. 20–26.

14. Вагин Г. Я., Севостьянов А. А., Юртаев С. Н. К вопросу о выборе источников реактивной мощности на промышленных предприятиях // Промышленная энергетика. 2012. № 4. С. 26–30.

15. Абрамович Б. Н., Сычев Ю. А. Повышение качества электрической энергии с помощью параллельного активного фильтра в системах электроснабжения промышленных предприятий // Электричество. 2012. № 3. С. 7–11.

16. Воронин К. А., Рахманова Ю. В., Волкова Т. Ю. Эффективность компенсации реактивной мощности при больших нелинейных нагрузках // Промышленная энергетика. 2015. № 8. С. 54–58.

17. Баранов И. Л., Чемборисова Н. Ш. Определение чувствительности узлов электроэнергетических систем на основной частоте и высших гармониках // Электричество. 2013. № 8. С. 15–20.

18. Коваленко Д. В., Киселев Б. Ю., Плотников Д. И. и [др.] Методика расчета пассивных фильтров, предназначенных для компенсации высших гармоник тока в системах электроснабжения промышленных предприятий // Международный научно-исследовательский журнал. 2017. № 1 (55). С. 82–86.

19. Дед А. В., Сикорский С. П., Даниюков И. Б. Обработка данных экспериментальных измерений показателей качества электрической энергии на примере уровней отклонений

напряжений // Омский научный вестник. 2018. № 2 (158). С. 55 – 59. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-158-55-59.

КОВАЛЕНКО Дмитрий Валерьевич, ассистент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

SPIN-код: 7587-8782

AuthorID (РИНЦ): 901108

ORCID: 0000-0003-4822-4145

AuthorID (SCOPUS): 57193410109

ResearcherID: R-7414-2017

СМИРНОВ Павел Сергеевич, магистрант гр. ЭЭМ-172 факультета элитного образования и магистратуры.

SPIN-код: 9621-4162

AuthorID (РИНЦ): 949169

ДУБРОВСКИЙ Денис Викторович, магистрант гр. ЭЭМ-181 факультета элитного образования и магистратуры.

SPIN-код: 3481-8696

МАТВЕЕВА Марина Станиславовна, магистрант гр. ЭЭМ-182 факультета элитного образования и магистратуры.

SPIN-код: 7332-4520

AuthorID (РИНЦ): 998320

РУБАНОВ Николай Витальевич, магистрант гр. ЭЭМ-182 факультета элитного образования и магистратуры.

SPIN-код: 2073-6961

AuthorID (РИНЦ): 997668

Адрес для переписки: Dmitrii_Kovalenko92@mail.ru

Для цитирования

Коваленко Д. В., Смирнов П. С., Дубровский Д. В., Матвеева М. С., Рубанов Н. В. Измерение показателей качества электрической энергии в сети компьютерного класса и разработка мероприятий по фильтрации высших гармоник // Омский научный вестник. 2018. № 6 (162). С. 108 – 114. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-162-108-114.

Статья поступила в редакцию 27.10.2018 г.

© Д. В. Коваленко, П. С. Смирнов, Д. В. Дубровский,
М. С. Матвеева, Н. В. Рубанов