

3 РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ РАСЧЕТА ВЫСШИХ ГАРМОНИК И ИНТЕРГАРМОНИК ПО ВЕЙВЛЕТ КОЭФФИЦИЕНТАМ

3.1 Анализ проблемы нормирования, анализа и обеспечения качества электроэнергии

Для развития концепций «Smart Grid», «Энерджинет», «Цифровая подстанция» среди прочих задач, должна быть решена задачи развития системы управления качеством электрической энергии. Такая система управления предполагает: осуществление контроля ПКЭ на соответствие действующим нормативам; обеспечение доступа к режимным характеристикам объектов электроэнергетики и возможности регистрации характерных особенностей конкретной электрической сети; активного управления ПКЭ в режиме реального времени [111, с. 29]. Необходимость применения системного подхода для управления качеством электроэнергии [188] и совершенствование методов контроля и анализа показателей качества [201] определена задачами развития интеллектуальных электрических сетей.

При невыполнении энергоснабжающей организации требований к ПКЭ (в соответствии с ГОСТ 32144-2013, обязательным к применению в соответствии с частью 1 статьи 46 Федерального закона от 27.12.2002 № 184-ФЗ «О техническом регулировании») наступает административная ответственность по статье 14.43 «Кодекса Российской Федерации об административных правонарушениях» [194, с. 53].

Для обеспечения надёжного, устойчивого и экономичного электроснабжения необходимо свести к минимуму кондуктивные низкочастотные электромагнитные помехи в электрических сетях [56, с. 172]:

$$F \delta X_{l,n} \rightarrow \min. \quad (3.1)$$

Или другими словами – многомерная функция распределения F_n (3.1) должна определять вероятность того, что значение i -го показателя качества электроэнергии не превысит заданного значения [56, с. 172]:

$$\frac{\partial^n F_n}{\partial X_1, \partial X_2, \dots, \partial X_i, \dots, \partial X_n} = P_n(X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_n). \quad (3.2)$$

Сравнение подходов к нормированию несинусоидальности напряжения в России и за рубежом с точки зрения влияния на основные виды ущерба от высших гармоник производится Вагиным Г.Я (и др.) в работе [40]. Автор отмечает, что действующий в России стандарт [65] предъявляет более высокие требования к уровню суммарного коэффициента гармонического искажения K_u , по сравнению с аналогичными документами, действующими в странах Евросоюза [272] и США [294]. На данное обстоятельство указывает также автор [225], приводя при этом дополнительное сравнение с стандартами качества электроэнергии, действующими в Китае. Требования стандарта КНР сопоставимы с российскими нормативами, а в части требований к нечетным гармониками даже имеют более строгие ограничения [225, с. 17].

Большой вклад в развитие теории статистического анализа несинусоидальных режимов для сетей высокого напряжения внесли сотрудники Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭМ СО РАН) [115, 197].

Невзирая на большое количество разработанных методов [50] для определения виновника в ухудшение ПКЭ, эта задача по-прежнему является актуальной. В работе [50] представлен обзор существующих методик, но авторы для определения виновника искажения кривой напряжения в точке общего подключения (ТОП) рекомендуют использовать метод измерения величины знака искажающей мощности [50, с. 119]. В работе [73] производится оценка влияния источников бесперебойного питания (ИБП) на качество электроэнергии в ТОП административных и деловых центров и энергоснабжающей организации. Экспериментальные данные были аппроксимированы с целью определения

относительной (от номинальной) мощности ИБП при которой уровень искажения суммарного гармонического коэффициента в ТОП превысит уровень 8%, регламентированный в [65]. Как показали исследования, нормативный коэффициент был превышен уже при достижении ИБП мощности 63%. Общее описание групп методов определения виновника ухудшения показателей качества электроэнергии в ТОП приводится в статье [180].

Для компенсации высших гармоник в настоящее время находят широкое применение гибридные структуры фильтров, представляющие сочетание активных и пассивных фильтров [4]. Анализ эффективности применения различных схем, реализующих коррекцию гармонических искажений, приводится в работе [5], где авторы производят сравнение изменения коэффициентов n -ной гармонической составляющей напряжения и тока (не нормируется ГОСТ 32144-2013) для устройств пассивной и гибридной фильтрации. Для систем распределённой генерации при наличии источника электроснабжения ограниченной мощности авторы [5] предлагают электротехнический комплекс на основе пассивных фильтров и гибридной системы, способный работать в повторно-кратковременном режиме, как отдельными структурами, так и совместно. На основании разработанной имитационной модели в среде MATLAB Simulink была доказана эффективность применения гибридного электротехнического комплекса для подавления 5-й и 7-й гармоник тока (таблица 3.1 – привод. по [5]) и напряжения, как правило, имеющих наибольшие значения амплитуд в действующих системах электроснабжения.

В работе [31] авторы исследуют резкопеременный режим работы электропривода скипового подъема шахтной подъемной машины для режима работы от 12-пульсного и 6-пульсного (ремонтный режим) преобразователей. Временные диаграммы, представленные в [31, с. 110] демонстрируют резкое изменение токов в цепи от 900 А до 50 А на достаточно коротких отрезках времени, что отражается в виде растекания спектра при проведении БПФ.

Таблица 3.1 Режимы коррекции кривых напряжения и тока различными типами фильтров (привод. по [5])

Режим компенсации	Показатель, %					
	k_u	k_i	$k_{u(5)}$	$k_{i(5)}$	$k_{u(7)}$	$k_{i(7)}$
Без компенсации	17,3	19,6	11,5	16,8	8,81	9,21
Пассивная компенсация	7,74	5,78	2,78	3,95	2,62	2,69
Гибридная компенсация	3,77	3,69	0,23	0,2	0,23	0,43
Электротехнических комплекс на основе пассивных фильтров и гибридной системы	3,02	1,68	0,16	0,16	0,49	0,47

Увеличивается доля бытовой нагрузки (жилых и общественных зданий, офисных и торговых центров), имеющей нелинейные вольт-амперные характеристики. Современная бытовая техника, как правило, снабжается мостовыми выпрямителями с ёмкостными сглаживающими фильтрами. Такие блоки «вызывают значительные искажения формы кривой потребляемого тока, существенную долю которого составляют компоненты третьей гармоники» [6, с. 40].

С учетом несимметричного характера нагрузок для определения мощности активного фильтра гармоник в [6] предлагается следующая формула:

$$S_{АФГ}^2 = T_u^2 + N_{несимм}^2 + Q^2, \quad (3.3)$$

где $T_u = \sqrt{3}U_{л}I_{иск}$; $N_{несимм} = \sqrt{3}U_{л}I_N$; $I_{иск}$ – ток искажения, А; T_u – мощность искажения, В·А; $N_{несимм}$ – мощность несимметрии, В·А [6, с. 44].

Применение гибридного фильтра с использованием трансформатора двойного питания в активном канале для компенсации ВГ на объектах жилищно-бытового и офисного секторов предложено в работе [48]. Вопросам разработки, моделирования и внедрения фильтров гармоник различной конфигурации посвящены работы исследователей, представляющих различные научные школы [74, 82, 97, 101, 153]. В последнее время для разработки алгоритмов управления

активными фильтрами начинает применяться методы нейронных сетей и нечёткой логики [117]. Обзор зарубежного опыта применения технических средств для обеспечения качества электроэнергии (активные, пассивные, гибридные фильтры; динамические компенсаторы напряжения и др.) представлен в книге [301]

Изменение ПКЭ в течение суток (рабочей смены) зачастую носит случайный характер, поэтому некоторые авторы [7] при выборе технических устройств и мероприятий по фильтрации ВГ предлагают учитывать статистические показатели.

Практические измерения суммарных коэффициентов гармонического искажения (в англ. терминологии THD) на шинах 0,4 кВ для предприятий по производству труб [9] и завода железобетонных изделий [10] показали превышение допустимых уровней напряжения. Несмотря на то, что уровень гармоник тока сети не нормируется, результаты анализа [9, 10] показали широкий спектр гармоник тока, в том числе и кратных трем.

Анализ коэффициентов n -ной гармонической составляющей K_{un} ряда крупных городских потребителей – супермаркетов, офисных центров, учебных заведений, проведённый сотрудниками СФУ [19] также показал в ряде случаев превышение допустимых норм. Зафиксированы высокие уровни 3-й гармоники тока – более 15% от основной составляющей [19, с. 116]. О достаточно высокой доле третьей гармоники при измерениях ПКЭ в офисном центре отмечается в работе [69]. Оценке качества электроэнергии в системе электроснабжения городского электротранспорта посвящена статья [179]. На основе приведенных исследований на тяговых подстанциях г. Самары авторы [179] предлагают установить фильтрокомпенсирующие устройства.

Спектральный состав нелинейной нагрузки, представляющей светодиодное освещение, задавался в соответствии с данными фактических измерений, представленных в [35, 215] для различных типов светодиодных источников света. В работе [105] Г.Я. Вагин приводит статистику измерений высших гармоник тока 15 различных источников света (светодиодные, люминесцентные, металлогалогенные, натриевые). Ряд источников света (производства КНР) по

уровню тока 3-й гармоники имеет значение до 80% от тока основной частоты; 9-я гармоника достигает величины 50%. На основании проведенных исследований, авторы отмечают необходимость принимать во внимание сечение нулевых проводников при модернизации осветительных установок (замене ламп накаливания на газоразрядные и светодиодные источники света) [105, с. 54]. Данная проблема связана с суммированием гармоник кратных трем в нулевых жилах кабелей сетей 380 В. Также мощным источником гармоник, кратных трем является однофазная нагрузка, использующая импульсные блоки питания по схеме с накопительным конденсатором [17]. Данное обстоятельство, очевидно, приводит к увеличению тока в нулевом проводе в трехфазных четырехпроводных сетях с глухозаземленной нейтралью. Результирующий ток в нейтральном проводе может быть определен по [17, с. 17]:

$$I_N = 3 \sqrt{\sum_{n=1}^{39} I_{3n}^2}. \quad (3.4)$$

На основании проведенных исследований [106] при электроснабжении городских потребителей с высокой долей нелинейной несимметричной нагрузки авторы не рекомендуют использовать кабели марки АСБ с использованием свинцовой оболочки кабеля в качестве нулевой жилы.

Для обеспечения установленных в [65] уровней ПКЭ и выработки реактивной мощности могут быть применены фильтрокомпенсирующие и фильтросимметрирующие устройства [174, 191, 192] или статические компенсаторы (СТАТКОМ) [151].

Таким образом, проблема нормирования, анализа и обеспечения показателей качества электроэнергии остаётся актуальной. С увеличением доли электроприёмников, искажающих ПКЭ остаются востребованными системы мониторинга качества электроэнергии. В рамках национальной инициативы «Энерджинет» и технологии «Цифровая подстанция» необходимо развивать методы цифровой обработки данных о параметрах режима с оценкой ПКЭ.