Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Ульяновский государственный технический университет»

На правах рукописи

ЧИКИН ВЛАДИСЛАВ ВЛАДИМИРОВИЧ

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ НЕСИНУСОИДАЛЬНОСТИ НАПРЯЖЕНИЯ В ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Специальность 2.4.2 – Электротехнические комплексы и системы

Диссертация на соискание
учёной степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, доцент
Курганов Сергей Александрович

Ульяновск – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 4
ГЛАВА 1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С НЕЛИНЕЙНЫМИ НАГРУЗКАМИ 12
§ 1.1 Структура электротехнического комплекса систем электроснабжения .. 12
§ 1.2 Роль системы мониторинга в управлении качеством электроэнергии .. 20
§ 1.3 Критерии обнаружения источников генерации токов гармонических составляющих 30
§ 1.4 Анализ схем замещения электротехнического комплекса систем электроснабжения 43
ГЛАВА 2 МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ИСТОЧНИКОВ ГЕНЕРАЦИИ ТОКОВ ГАРМОНИЧЕСКИХ СОСТАВЛЯЮЩИХ 50
§ 2.1 Схема замещения в виде трехлучевой звезды 50
§ 2.2 Достоверность предлагаемой схемы замещения при исследовании несинусоидального режима 61
§ 2.3 Выражения математической модели и ее ограничения 69
§ 2.4 Возможности математической модели 74
§ 2.5 Влияние установки фильтров на категорию потребителей – генераторов гармоник 79
ГЛАВА 3 АНАЛИТИЧЕСКИЕ КРИТЕРИИ ОБНАРУЖЕНИЯ ИСТОЧНИКОВ ГЕНЕРАЦИИ ТОКОВ ГАРМОНИЧЕСКИХ СОСТАВЛЯЮЩИХ 82
§ 3.1 Анализ аналитических критериев 82
§ 3.2 Оценка влияния факторов на граничное значение 89
§ 3.3 Оценка обнаружения источников генерации при подключении нового потребителя 97
ГЛАВА 4 АЛГОРИТМ ПООЧЕРЕДНОГО ОБНАРУЖЕНИЯ И ПОДАВЛЕНИЯ ИСТОЧНИКОВ ТОКОВ ГАРМОНИЧЕСКИХ СОСТАВЛЯЮЩИХ 105

§ 4.1 Объем искаженной электроэнергии как новый количественный параметр оценки качества электроэнергии 105
§ 4.2 Определения объема искаженной электроэнергии за период времени нормирования качества электроэнергии..... 109
§ 4.3 Коэффициент искажения электроэнергии 116
§ 4.4 Определение объема искаженной электроэнергии за расчетный период..... 119
§ 4.5 Порядок действий при поочередном поиске и подавлении источников генерации 123
§ 4.6 Технико-экономическая оценка инвестиционного проекта установки и эксплуатации фильтров гармоник 130
ГЛАВА 5 РЕКОМЕНДАЦИИ ПО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ЗАКОНОДАТЕЛЬСТВА ДЛЯ СНИЖЕНИЯ НЕСИНУСОИДАЛЬНОСТИ НАПРЯЖЕНИЯ 136
§ 5.1 Новый подход к построению системы управления качеством электроэнергии 136
§ 5.2 Оценка стоимости вредных последствий генерации и потребления токов гармонических составляющих 143
§ 5.3 Механизм применения надбавок и скидок в системе управления..... 149
§ 5.4 Методика расчета надбавок и скидок для потребителей сетевой организации 152
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 163
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ..... 165
ПРИЛОЖЕНИЯ..... 188

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования.

Исследование посвящено совершенствованию системы мониторинга качества электроэнергии (КЭ) для снижения несинусоидальности напряжения в как равновесной составной части структуры электротехнического комплекса систем электроснабжения сетевой организации и промышленных предприятий с нелинейными нагрузками, что дает необходимую информацию для принятия соответствующих мер, направленных на снижение или устранение генерации токов гармонических составляющих. Тема, согласно Указу Президента РФ от 18 июня 2024 г. № 529 [127], соответствует приоритетному направлению научно-технологического развития «1. Высокоэффективная и ресурсосберегающая энергетика».

На текущий момент времени более 90 % электрических нагрузок промышленных предприятий являются нелинейными, к которым относятся дуговые сталеплавильные печи, тиристорные преобразователи частоты, электросварочные и электролизные установки, системы электроприводов с регулируемой скоростью вращения, энергосберегающее освещение, преобразователи тока. [7, 17, 84, 131]. Наблюдается бурный рост предприятий оборонно-промышленного и машиностроительного комплексов, тяжелой металлургии, химической промышленности и высокотехнологичного производства [44], при котором уровень токов гармонических составляющих в электрической сети многократно возрастает. Растут и вредные последствия, такие как снижение срока службы изоляции [85, 86], преждевременный выход из строя электроустановок, перерывы электроснабжения в результате ложного срабатывания устройств релейной защиты [130, 149], повышенное потребление электроэнергии, увеличение погрешности средств измерений и помех в системах связи, брак и недоотпуск продукции [16, 20, 38, 41]. С учетом кумулятивного эффекта негативного воздействия гармонических составляющих, вредные

последствия могут появляться спустя некоторое время. Например, эксперименты показали, что при уровне гармонических составляющих напряжения в 6-8,5 % токи утечки кабелей за 2,5 года увеличиваются в среднем на 36 % [39].

Для подавления токов гармонических составляющих используются различные виды фильтров гармоник – фильтрокомпенсирующие устройства (ФКУ) и активные фильтры (АФ) [17]. Без их установки и эксплуатации невозможно добиться снижения несинусоидальности напряжения в системах электроснабжения до нормируемых значений. Из практики электролабораторий по контролю КЭ известен случай, когда на насосной станции при оснащении асинхронных двигателей инверторами для плавного пуска и регулирования скорости вращения, не были установлены ФКУ. При этом, согласно технической документации на инверторы, ФКУ подлежали установке. В результате, это привело к нарушению и сбою в работе системы учета электроэнергии, используемой на насосной станции.

Решение об установке ФКУ или АФ основывается на информации, полученной системой мониторинга КЭ. В задачу системы мониторинга, помимо обследования КЭ и его анализа, также входит принятия мер, направленных на снижение или устранение генерации токов гармонических составляющих.

Анализ результатов контроля КЭ в системах электроснабжения России [33, 46, 78] показывает, что нарушения по показателям K_U и $K_{U(n)}$ имеют массовый и систематический характер. Частота их появления выше, чем у нарушений, связанных с несимметрией или отклонениями напряжения. Поэтому существенная доля оцененного в 25 млрд. долларов в год ущерба от низкого КЭ [34] приходится на несинусоидальность напряжения. Фильтры гармоник имеют ограниченный спрос и используются только на объектах, где критически важно поддерживать высокий уровень КЭ, например, на предприятиях, связанных с экспортом нефти и газа. На большинстве же промышленных предприятий, в том числе проектируемых, фильтры отсутствуют. Все это позволяет сделать вывод о том, что известных показателей и параметров КЭ недостаточно для принятия

решений по подавлению токов гармонических составляющих [54]. ФКУ и АФ не устанавливаются и не эксплуатируются, несинусоидальность напряжения растет.

Таким образом, научно-техническая задача, направленная на совершенствование системы мониторинга КЭ для снижения несинусоидальности, является актуальной.

Степень разработанности темы.

Значительный вклад в разработку научных, технических и организационных основ мониторинга КЭ в системах электроснабжения внесли российские ученые Бородин М.В., Виноградов А.В., Вагин Г.Я., Гамазин С.И., Жежеленко И.В., Железко Ю.С., Зыкин Ф.А., Карташев И.И., Коверникова Л.И., Кузнецов А.В., Севостьянов А.А., Скамьин А.Н., Суднова В.В., Тульский В.Н., Шамонов Р.Г., Шаров Ю.В., Шклярский Я.Э., Янченко С.А., а также зарубежные исследователи Anu G., Francis M. Fernandez, Fulin Zhou, Hui Zhou, Jianling Wu, Leszek S. Czarnecki, Ling-ling Xu, Ying-ying Liu и др.

На сегодняшний день система мониторинга регистрирует следующие показатели и параметры КЭ, характеризующие несинусоидальный режим и используемые при поиске и подавлении источников гармонических составляющих: среднеквадратические значения гармонической составляющей фазного (междуфазного) напряжения ($U_{(n)}$) и фазного тока ($I_{(n)}$) порядка n; коэффициенты гармонической составляющей напряжения ($K_{U(n)}$) и тока ($K_{I(n)}$); суммарные коэффициенты гармонических составляющих напряжения (K_U) и тока (K_I) [72]; угол фазового сдвига между напряжением и током гармонической составляющей ($\varphi_{UI(n)}$); активная ($P_{(n)}$), реактивная ($Q_{(n)}$) и полная ($S_{(n)}$) мощности гармонической составляющей [27].

При этом задача поиска источников генерации токов гармонических составляющих решена частично. Алгоритмы, использующие известные показатели и параметры КЭ, не позволяют обнаружить все источники генерации.

Объект исследования – электротехнический комплекс систем электроснабжения сетевой организации и промышленных предприятий с

нелинейными нагрузками (далее потребителей – генераторов гармоник) от 0,4 до 35 кВ включительно.

Предмет исследования – система мониторинга показателей и параметров КЭ в точках передачи электроэнергии (ТПЭ) как равновесная составная часть структуры электротехнического комплекса систем электроснабжения, учитывающая аналитические критерии и новые параметры КЭ, которые позволяют выявить необнаруженных потребителей – генераторов гармоник и стимулируют потребителей к установке фильтров гармоник.

Цель работы: совершенствование системы мониторинга КЭ для снижения несинусосидальности напряжения за счет за счет поочередного обнаружения и подавления источников генерации токов гармонических составляющих.

Задачи диссертационного исследования:

1. Разработка математической модели электротехнического комплекса систем электроснабжения с источниками гармонических составляющих, отличающейся от известных моделей схемой замещения.

2. Вывод и анализ аналитических критериев обнаружения источников генерации токов гармонических составляющих.

3. Разработка алгоритма поочередного обнаружения и подавления источников генерации токов гармонических составляющих.

Научная новизна работы:

1.Разработана математическая модель электротехнического комплекса систем электроснабжения с источниками гармонических составляющих, которая отличается от известных моделей схемой замещения в виде трехлучевой звезды с выделением в первый луч исследуемого потребителя – генератора гармоник, во второй луч – остальных потребителей – генераторов гармоник и в третий луч – потребителей с линейными нагрузками (далее – линейные потребители).

2. Впервые выведены аналитические критерии обнаружения источников генерации токов гармонических составляющих, предполагающие сравнение

фактических значений токов источников и их граничных значений, при которых происходит обнаружение источников генерации.

3. Разработан алгоритм обнаружения и подавления источников генерации токов гармонических составляющих, который, в отличие от известных, предполагает поочередный поиск источников генерации при условии их подавления.

Теоретическая значимость работы.

Результаты диссертационного исследования направлены на дальнейшее развитие теории электромагнитной совместимости в системах электроснабжения с разработанной трехлучевой схемой замещения и выведенными на ее основе аналитическими критериями обнаружения источников генерации токов гармонических составляющих.

Практическая значимость работы:

1. Разработаны программы расчетов для системы компьютерной алгебры Maple 17, позволяющие: провести расчет параметров трехлучевой схемы замещения; построить зависимости активных токов и модулей напряжения гармонических составляющих от соотношения токов источников; оценить влияние сопротивления ветви обобщенного линейного потребителя и линейной нагрузки исследуемого потребителя – генератора гармоник на граничное значение; оценить влияние подключения нового источника генерации на обнаружение потребителей – генераторов гармоник.

2. Разработана компьютерная программа расчета объема искаженной электроэнергии и коэффициента искажения электроэнергии в сетях до 1 кВ.

3. Подготовлены Правила применения надбавок и скидок за генерацию и потребление токов гармонических составляющих.

Методология и методы исследования.

При решении поставленных задач использованы основные положения теоретической электротехники, теории электромагнитной совместимости в

системах электроснабжения, методы математического и компьютерного моделирования электротехнических комплексов и систем.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Математическая модель электротехнического комплекса систем электроснабжения с источниками гармонических составляющих в виде трехлучевой звезды, позволяющая вывести аналитические критерии обнаружения источников генерации токов гармонических составляющих.

2. Аналитические критерии обнаружения источников генерации, уменьшающий вычислительные затраты при изменении состава и схемы электротехнического комплекса и позволяющие сделать прогноз при введении в электротехнический комплекс систем электроснабжения нового потребителя – генератора гармоник.

3. Алгоритм поочередного обнаружения и подавления источников генерации токов гармонических составляющих, включающий в себя основной аналитический критерий и новые параметры КЭ – объем искаженной электроэнергии и коэффициент искажения электроэнергии, обеспечивающий снижение несинусоидальности напряжения до нормируемых значений.

Обоснование соответствия диссертации паспорту научной специальности 2.4.2 – Электротехнические комплексы и системы.

Диссертационная работа соответствует формуле специальности:

- по **п. 1** в работе рассмотрен электротехнический комплекс систем электроснабжения. Проводятся математическое и компьютерное моделирование электротехнического комплекса в целом как системы взаимосвязанных электротехнических устройств в системах электроснабжения сетевой организации и промышленных предприятий с нелинейными нагрузками;

- в соответствии с **п. 3** диссертация включает в себя разработку алгоритмов эффективного управления, используемых при обнаружении источников генерации токов гармонических составляющих и необходимых для снижения несинусоидальности напряжения;

- по **п. 4** предложены аналитические критерии и параметры КЭ для повышения работоспособности и качества функционирования электротехнического комплекса в ненормальном режиме работы при генерации нелинейными нагрузками потребителей токов гармонических составляющих.

Степень достоверности результатов.

Степень полученных результатов обеспечивается за счет корректного применения основных положений теоретической электротехники и теории электромагнитной совместимости, соответствие результатов моделирования в программном комплексе MATLAB Simulink и непротиворечивостью результатов с ранее полученными данными исследований и результатами контроля КЭ в электрической сети до 35 кВ.

Апробация результатов работы.

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на научных конференциях: международной конференции «CAMSTech-2020», Красноярск, 2020; The International Ural Conference on «Electrical Power Engineering», Магнитогорск, 2021; международной научно-практической конференции «Энергоресурсосбережение. Диагностика - 2022», Ульяновск, 2022; научно-технической конференции «Вузовская наука в современных условиях», Ульяновск, 2023, 2024; международной конференции «Системные исследования в энергетике», Иркутск, 2023, 2024; Всероссийской научно-технической конференции «Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике», Чебоксары, 2024; Всероссийской научно-технической конференции «Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем», Чебоксары, 2025.

Публикации.

По теме диссертации опубликовано 15 научных работ, в том числе 6 статей в журналах из перечня ВАК, получены 1 патент на изобретение и 1 свидетельство на регистрацию программы для ЭВМ.

Личный вклад автора.

В работах, выполненных в соавторстве, соискателю принадлежит разработка схемы замещения в виде трехлучевой звезды и основных положений алгоритма поочередного обнаружения и подавления источников генерации токов гармонических составляющих.

Структура и объем работы.

Диссертационная работа состоит из: введения, пяти глав, заключения, списка литературы и четырех приложений. Общий объем работы – 221 страница, включая 68 рисунков и 14 таблиц. Библиографический список содержит 175 наименований.

ГЛАВА 1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С НЕЛИНЕЙНЫМИ НАГРУЗКАМИ

§ 1.1 Структура электротехнического комплекса систем электроснабжения

В «Правилах устройства электроустановок» [98] под системой электроснабжения понимается совокупность электроустановок, предназначенных для обеспечения потребителей электроэнергией. В большинстве случаев электротехнический комплекс систем электроснабжения сетевой организации и промышленных предприятий как совокупность электроустановок – электротехнических устройств – рассматривается в рамках обеспечения электроэнергией одного потребителя (рисунок 1.1).

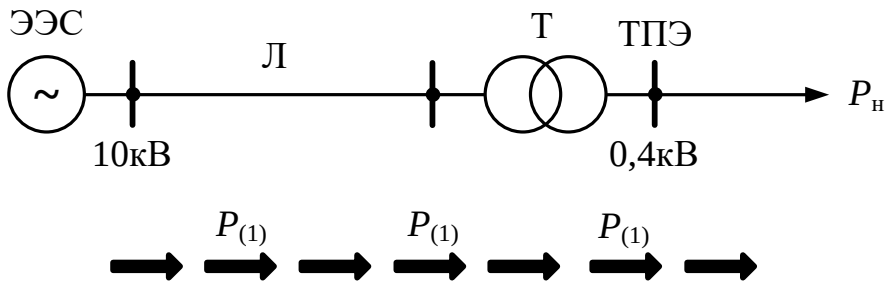


Рисунок 1.1 – Схема системы электроснабжения потребителя

Данная схема уместна при решении задач, связанных с обеспечением потребителей энергией основной частоты ($f_{осн}$ = 50 Гц). Это соответствует случаю, когда генераторы электрических станций вырабатывают «полезную» энергию, необходимую потребителям для обеспечения их технологических процессов, удовлетворения производственных или бытовых нужд и т.п. Направление передачи мощности основной частоты $P_{(1)}$ однозначное: от источника (генераторов электроэнергетической системы) к потребителю, что соответствует

прямому направлению активной энергии (угол фазового сдвига между напряжением и током лежит в диапазоне от 0 до 90° и от 270 до 360°).

Однако для решения задач, связанных с обеспечением КЭ в электротехнических комплексах систем электроснабжения в части несинусоидальности напряжения, использование схемы, приведенной на рисунке 1.1, не является корректным.

Физический процесс искажения синусоидальной формы кривой питающего напряжения описан следующим образом [128]: при подаче напряжения на электрическую нагрузку, имеющую нелинейные электрические характеристики (нелинейная нагрузка), кривая тока искажается. В ней появляются токи гармонических составляющих с частотами, отличными от основной частоты напряжения ($f_{(n)} \neq f_{осн}$) (рисунок 1.2). Далее, протекая по элементам сети, они создают падения напряжения на частотах гармонических составляющих, что и приводит к несинусоидальности питающего напряжения.

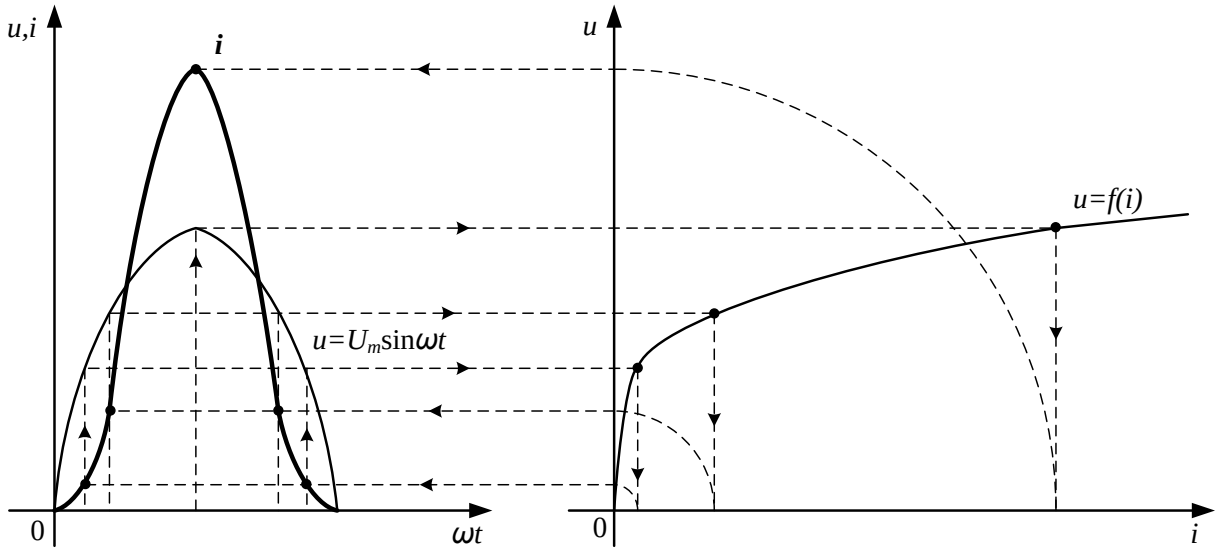


Рисунок 1.2 – Искажение синусоидальной кривой тока

Таким образом, технологический процесс передачи электроэнергии в сеть потребителя с нелинейными нагрузками характеризуется генерацией нелинейными нагрузками токов гармонических составляющих с дальнейшим распространением генерируемых токов по электрической сети (рисунок 1.3).

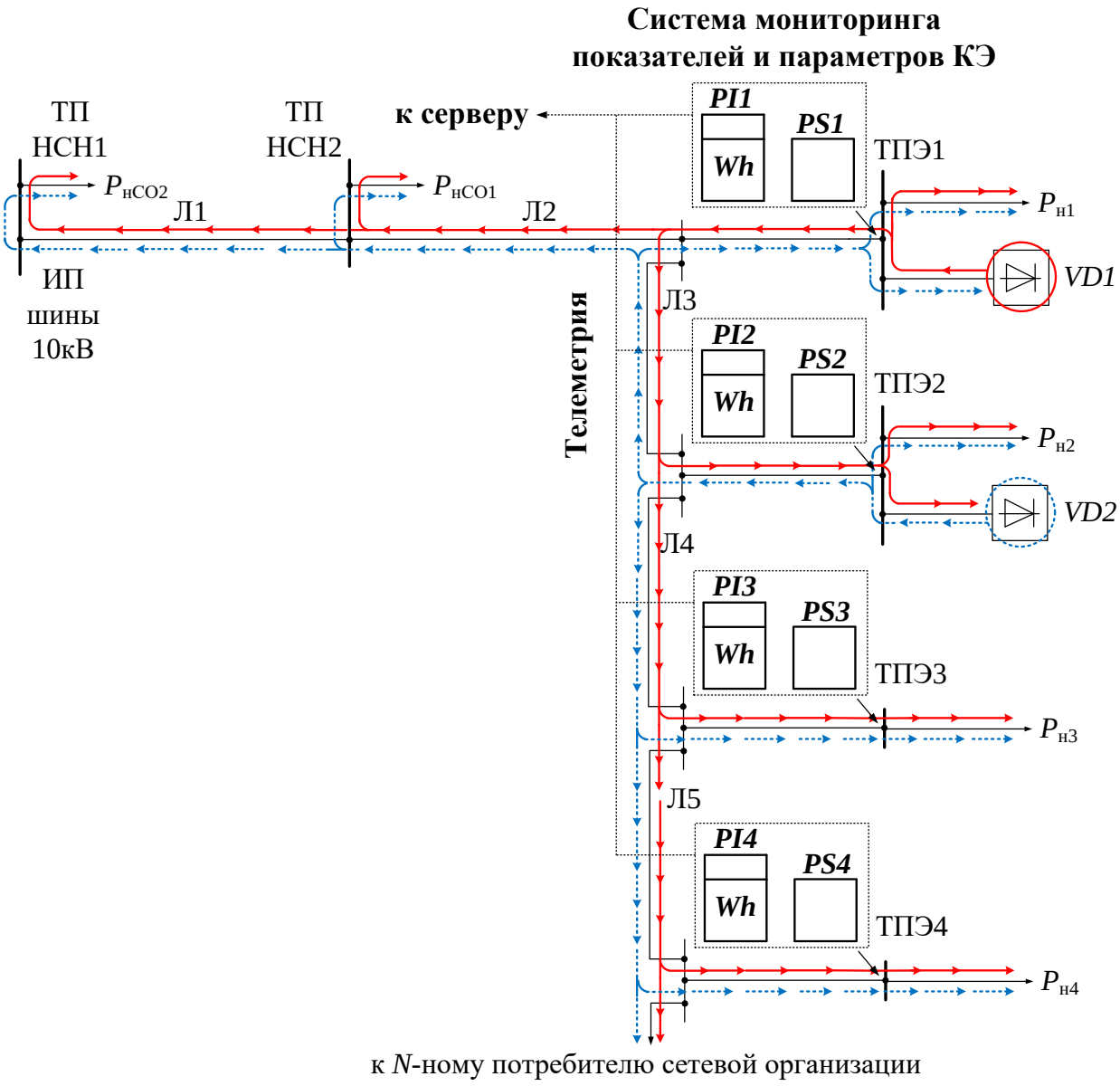


Рисунок 1.3 – Направления распространения токов гармонических составляющих в электротехническом комплексе систем электроснабжения

На рисунке 1.3: *VD*1 и *VD*2 – преобразователи частоты, представляющие собой нелинейную нагрузку потребителя 1 и потребителя 2 соответственно; красные сплошные и синие прерывистые стрелки – направления передачи и распределения токов гармонических составляющих, генерируемых устройствами *VD*1 и *VD*2; *PS*1, *PS*2, *PS*3 и *PS*4 – средства измерения КЭ; ТП НСН – точка подключения нагрузки собственных нужд сетевой организации.

Следует отметить, что рассмотренная схема не учитывает генерацию токов гармонических составляющих от нелинейных нагрузок, расположенных в

электрической сети сетевой организации. Вместе с тем известно, что установленная мощность нелинейных нагрузок, расположенных в электрической сети сетевой организации, несоизмеримо мала по сравнению с установленной мощностью нелинейных нагрузок, расположенных в электрических сетях потребителей ($P_{нел,потр} >> P_{нел,СО}$). Влиянием $P_{нел,СО}$ можно пренебречь.

Особенностью распространения токов гармонических составляющих в электрической сети является направление их движения как по направлению движения энергоносителя (как в случае с токами основной частотой), так и против него. Это связано исключительно с технологическими особенностями процесса производства, передачи, распределения и потребления электроэнергии. Для других энергоносителей это не характерно [62].

Токи гармонических составляющих связаны с вредными последствиями [19, 40, 71, 141] для всех элементов электротехнического комплекса систем электроснабжения, электрически и магнитно связанных с нелинейными нагрузками. Это элементы, участвующие в передаче, распределении и потреблении электроэнергии. Сюда относятся электротехнические устройства промышленных предприятий (потребителей) и сетевой организации.

Также помимо них обязательной частью электротехнического комплекса являются устройства, с помощью которых возможно получить, хранить и анализировать информацию о составе и значениях гармонических составляющих напряжения и тока. Такие устройства объединяются в систему мониторинга показателей и параметров КЭ [45, 51, 64, 65, 75, 124, 140]. В целях исполнения требований ГОСТ 32144-2013 [26], в котором установлены нормы КЭ в ТПЭ, регистрация показателей и параметров КЭ обязательно должна вестись на границах ведомственных принадлежностей сетей (ТПЭ1-ТПЭ4 на рисунке 1.3).

В систему мониторинга входят измерительные преобразователи (трансформаторы напряжения и тока), многофункциональные приборы учета электроэнергии с функцией анализа и контроля КЭ и средства измерения КЭ, устройства телеметрии и связи, а также центр обработки и хранения информации,

ведения статистики и принятия решений (сервер сетевой организации). Согласно нормативному документу [27] мониторинг проводится с целью оценки существующего уровня КЭ, анализа, прогноза и *принятия, при необходимости, соответствующих мер по результатам мониторинга*.

Таким образом, система мониторинга может рассматриваться как:

- программно-аппаратный комплекс, представляющий собой набор электротехнических и других технических устройств, а также заложенных в них программных обеспечений, необходимых для достижения цели мониторинга.

- измерительная информационная система, представляющая собой совокупность функционально объединенных измерительных, вычислительных и других технических устройств для получения информации о несинусоидальном режиме в ТПЭ и принятия при необходимости мер для его устранения.

Сводить генерацию токов гармонических составляющих к нулевым значениям ни технически, ни экономически не целесообразно. Достаточно достигнуть только нормированных уровней показателей КЭ (ПКЭ) в ТПЭ, при которых наносимый ущерб практически отсутствует, и поддерживать их в процессе эксплуатации. Для этого существует комплекс технических, методических и организационных мер, направленных на снижение или, в отдельных обоснованных случаях, устранение генерации [146]. Все они направлены на снижение генерируемых в электрическую сеть токов гармонических составляющих и могут быть отнесены к одной из следующих групп:

1. Изменение схемы электротехнического комплекса систем электроснабжения [18, 76, 116, 117, 118, 120, 147, 148].

2. Установка и эксплуатация специальных технических устройств подавления токов гармонических составляющих [13, 36, 37, 63, 88, 105, 106, 113, 132, 144].

3. Применение электротехнических устройств с пониженным уровнем генерируемых токов гармонических составляющих [13, 55, 143].

Первая группа подразумевает использование схемных решений в процессе эксплуатации или выбор оптимальной схемы на стадии проектирования для распределения токов гармонических составляющих. Сюда относятся: использование отдельной системы сборных шин для питания нелинейных нагрузок; выбор схем соединения обмоток силовых трансформаторов в пользу треугольника (фильтр токов гармоник, кратных трем); выбор мощности конденсаторных батарей с учетом условия исключения резонансных явлений, что позволяет исключить их перегрузки [116, 120]; распределение нагрузок по узлам системы электроснабжения; использование токоограничивающих реакторов для снижения токов гармонических составляющих в отдельных ветвях схемы [117, 118, 147]; использование электромашинного преобразователя, создающего гальваническую развязку для питания нелинейных нагрузок [76]. Стоит отметить, что названные выше способы первой группы не являются универсальными для снижения уровня гармонических составляющих, поскольку амплитудно-частотный спектр тока и напряжения в системах электроснабжения определяется в основном режимом работы нелинейных нагрузок, который имеет динамический характер [76].

Вторая группа связана с применением в процессе эксплуатации технических устройств подавления токов гармонических составляющих. В основе некоторых из них лежит использование *LC*-цепочки с настроенными параметрами конденсатора и катушки индуктивности. Такие устройства называются пассивными фильтрами гармоник или ФКУ. Схема фильтра собирается и настраивается на компенсацию токов гармонических составляющих только одного порядка (узкополосный) (рисунок 1.4) или сразу нескольких (широкополосный) [88, 105, 106, 144].

При низкой стоимости одного квар установленной мощности ФКУ обладают статическими характеристиками, что дает неуправляемость их параметров в процессе эксплуатации и ограничивает применение случаем со спокойным характером нелинейных нагрузок [17].

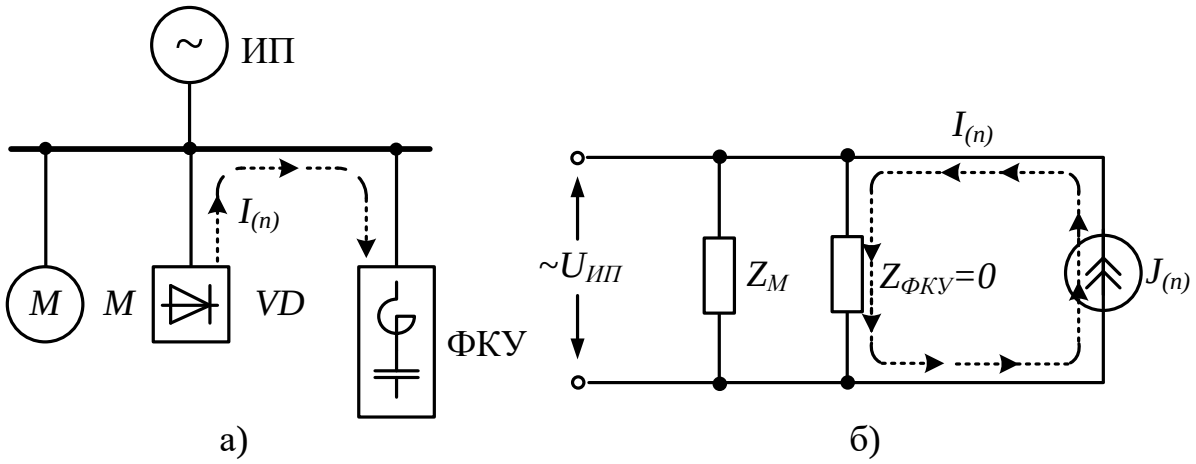


Рисунок 1.4 – Принципиальная схема включения ФКУ (а) и схема замещения в однофазном исполнении, поясняющая работу фильтра (б)

Данные недостатки могут быть устранены использованием элементов, способных реагировать на изменение гармонического состава напряжения и тока в реальном времени. Это реализовано в АФ (рисунок 1.5) и гибридных фильтрах [36, 37, 63], в которых применяются силовые полупроводники с емкостным или индуктивным накопителем на стороне постоянного тока [13, 113].

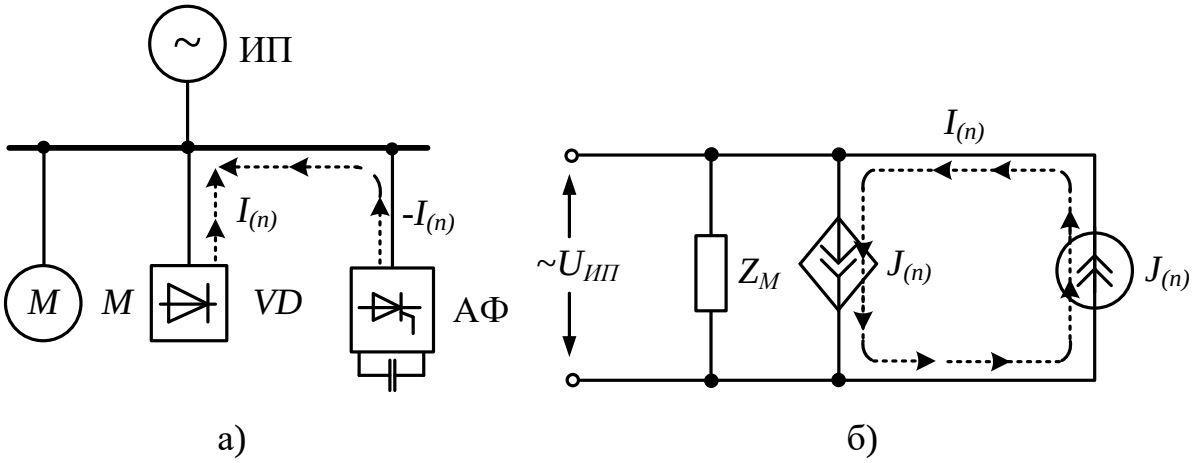


Рисунок 1.5 – Принципиальная схема поперечного включения АФ (а) и схема замещения в однофазном исполнении, поясняющая работу фильтра (б)

Третья группа предполагает использование электрооборудования, у которого наблюдается пониженный уровень эмиссии токов гармонических составляющих. К таким относятся силовые многофазные преобразователи частоты, работающие на двенадцатипульсной схеме выпрямления [55, 143].

Наибольшую эффективность и возможность реализации на практике из рассмотренных способов имеет вторая группа методов, заключающаяся в установке и эксплуатации ФКУ или АФ. Поэтому нередко в руководствах и инструкциях по эксплуатации электротехнических устройств с нелинейными характеристиками можно встретить положение об обязательном использовании данных устройств совместно с фильтрами гармоник.

Процесс протекания токов гармонических составляющих объединяет электротехнические устройства потребителей и сетевой организации, а также систему мониторинга в один самостоятельный электротехнический комплекс систем электроснабжения в составе электроэнергетической системы. С учетом ведомственной принадлежности электрических сетей при решении проблем КЭ электротехнический комплекс необходимо рассматривать в рамках отдельно взятой сетевой организации со всеми подключенными к ее сети потребителями.

Структура рассматриваемого электротехнического комплекса систем электроснабжения представлена в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Структура электротехнического комплекса

Элемент электротехнического комплекса	**Принадлежность на праве собственности или ином установленном законом основании**
Электротехнические устройства, потребляющие токи гармонических составляющих	Сетевая организация
Система мониторинга показателей и параметров качества электроэнергии, включающая в себя трансформаторы напряжения и тока, многофункциональные приборы учета электроэнергии и средства измерения, анализа и контроля КЭ, устройства телеметрии и сервер	

Продолжение таблицы 1.1

Электротехнические устройства, генерирующие и потребляющие токи гармонических составляющих	Промышленное предприятие с нелинейными нагрузками (обнаруженный потребитель – генератор гармоник)
	Промышленное предприятие с нелинейными нагрузками (необнаруженный потребитель – генератор гармоник)
	Промышленное предприятие с линейными нагрузками (линейный потребитель)

§ 1.2 Роль системы мониторинга в управлении качеством электроэнергии

В электротехнике понятие «электроэнергия» рассматривается в рамках физических процессов и явлений. В деятельности человека электроэнергия приобретает еще одну трактовку и рассматривается как товар, поставляемый потребителю компаниями топливно-энергетического комплекса – поставщиками электроэнергии (генерирующими и сетевыми компаниями, организациями, осуществляющими энергосбытовую деятельность, и другими) [93]. Источники генерации токов гармонических составляющих находятся у потребителей и распространение токов гармонических составляющих ведется не только по движению энергоносителя, но и против него (рисунок 1.3). Поэтому механизмы рыночного регулирования в случае с улучшением качества поставляемой электроэнергии как товара не работают. Для обычного товара регулирование происходит следующим образом. Если производитель изготавливает и продает некачественный товар, то спрос на него падает. Это побуждает производителя к

соблюдению требований ГОСТ при изготовлении, использованию более качественных комплектующих и т.д. Все это способствует улучшению качества товара, что приведет к повышению на него спроса у потребителей.

КЭ в части несинусоидальности определяется, в большей степени, потребителями электроэнергии. Поэтому сетевые организации, на которые возложена основная ответственность по поддержанию КЭ на уровне требований ГОСТ 32144-2013 [26], как поставщики только в крайних и редких случаях идут выполнение мероприятий для снижения уровня токов гармонических составляющих. Для потребителя – генератора гармоник установка и эксплуатация технических устройств подавления токов гармонических составляющих означает дополнительные капиталовложения. В условиях рыночной экономики решающим фактором против принятия решения об участии в инвестиционном проекте установки и эксплуатации ФКУ или АФ является тот факт, что деятельность по снижению или устранению генерации токов гармонических составляющих не приносит прибыли. Установка фильтров не отразится на тарифах на оплату электроэнергии и не позволит в серьезной степени повлиять на объемы потребляемой электроэнергии. Кумулятивный эффект воздействия токов гармонических составляющих, заключающийся в медленном накапливании вредного воздействия и его превращении со временем во вредные последствия, не позволяет наглядно потребителю увидеть эффект улучшения ситуации с гармоническими составляющими. Например, из опыта эксплуатации известны случаи, когда трансформатор преждевременно выходил из строя в результате многолетней перегрузки токами гармонических составляющих. По мнению потребителей, установка фильтров позволяет только выполнить требования технических правил, нормативных документов и законодательных актов.

В связи с этим, для снижения уровня токов гармонических составляющих важно обеспечить управляющее воздействие, направленное на потребителей – генераторов гармоник и побуждающее их к установке и эксплуатации ФКУ или АФ. Учитывая все это, задача по воздействию на потребителя – генератора

гармоник ложится на систему управления КЭ. Действующая система управления приведена на рисунке 1.6, в которой управляющее воздействие может быть выражено как в форме обязательных к исполнению требований (административные факторы управления - синие стрелки), так и в форме стимулирования (экономические факторы управления – красные стрелки).

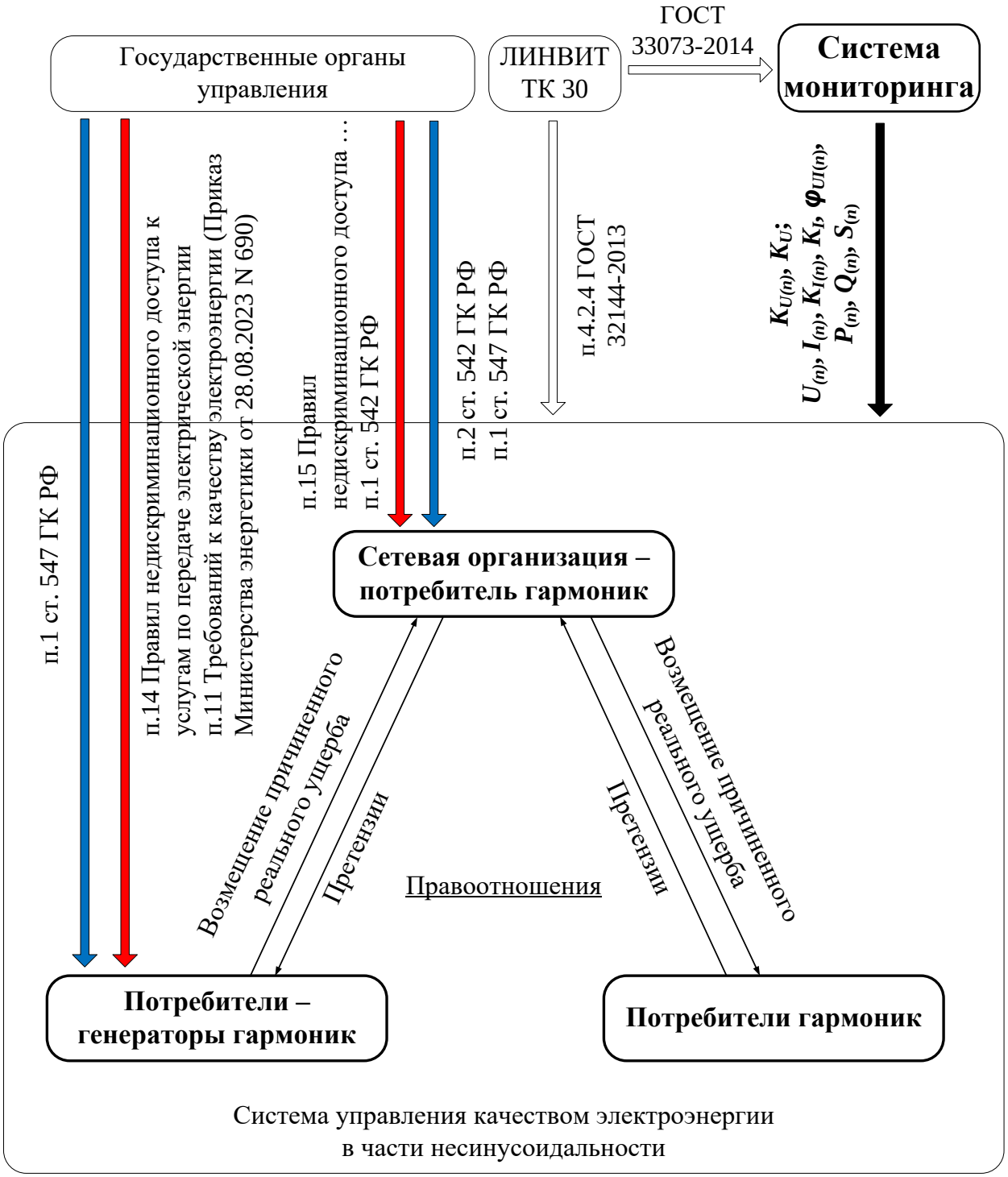


Рисунок 1.6 – Действующая система управления качеством электроэнергии

Управляющее воздействие в системе управления КЭ формируется с учетом показателей и параметров КЭ, регистрируемых системой мониторинга и характеризующих генерацию токов гармонических составляющих в ТПЭ. Роль мониторинга в управлении КЭ велика и сводится к получению и передаче в систему управления информации о токах, напряжениях и других параметрах несинусоидального режима, необходимой для формирования и применения управляющего воздействия, направленного на снижение или устранение генерации токов гармонических составляющих.

Одни регистрируемые показатели и параметры КЭ требуются для определения источника генерации токов гармонических составляющих. Другие могут применяться при установлении обязательств и формировании стимулирующего воздействия.

Обязательства по снижению генерации токов гармонических составляющих отражены в нормативных правовых актах и применяются как к потребителям, так и сетевой организации. Так, в Приказе Министерства энергетики от 28.08.2023 N 690 [99] ответственность за поддержание в ТПЭ значений ПКЭ, характеризующих несинусоидальность напряжения, на уровне требований ГОСТ 32144-2013 возложена на потребителей электроэнергии: «Потребители электрической энергии, владеющие на праве собственности или ином законном основании электроустановками с нелинейными нагрузками, должны обеспечить выполнение мероприятий, исключающих нарушение норм качества электрической энергии в части несинусоидальности …».

В другом документе, Гражданском кодексе Российской Федерации (ГК РФ) [29] обязательства установлены по отношению к поставщикам электроэнергии. Так, согласно п. 1 ст. 542 ГК РФ «качество подаваемой энергии должно соответствовать требованиям, установленными в соответствии с законодательством Российской Федерации, в том числе с обязательными правилами, или предусмотренным договором энергоснабжения».

Также обязательства по снижению генерации могут быть прописаны в договоре энергоснабжения, заключаемом между потребителем и поставщиком электроэнергии. Ответственность по договору энергоснабжения в части поддержания синусоидальной формы кривой напряжения формируется на основе Правил недискриминационного доступа к услугам по передаче электрической энергии и оказания этих услуг [94]. Правила недискриминационного доступа устанавливают двусторонние обязательства для потребителя (п. 14) и сетевой организации (п. 15). В таком случае, в договоре перечисляются показатели и нормы КЭ, допустимый и фактический вклад сторон в искажение, время превышения нормированных значений и другая информация, касающаяся регулирования несинусоидального режима.

Одних установленных обязательств для снижения или устранения генерации токов гармонических составляющих недостаточно. В случае невыполнения обязательств должна быть предусмотрена административная, юридическая или иная другая ответственность, побуждающая участников электротехнического комплекса выполнять обязательства.

В ст. 542 ГК РФ, помимо обязательств, предусмотрена также и ответственность поставщика в случае нарушения требований к КЭ (поставке некачественной энергии), которая наделяет потребителя правом «отказаться от оплаты такой энергии. При этом энергоснабжающая организация (поставщик) вправе требовать того, что абонент (потребитель) неосновательно сберег вследствие использования этой энергии». Проблема использования суммы неосновательного обогащения заключается в том, что она, согласно п. 2 ст. 1105 ГК РФ, связана с результатом использования электроэнергии, например, выпускаемой продукцией, и не связана с несинусоидальном режимом, а значит не может использоваться для решения задачи по снижению или устранению генерации токов гармонических составляющих.

Ответственность за невыполнение договора энергоснабжения, согласно п. 1 ст. 547 ГК РФ [29], заключается в возмещении убытков стороной, нарушившей

условия договора. В частности, статьей предусмотрено только взыскание причиненного реального ущерба. Под причиненным реальным ущербом понимаются электротехнические устройства потребителей или сетевой организации, которые вышли из строя по причине протекания токов гармонических составляющих, например, выход из строя силового трансформатора, измерительных приборов, батарей конденсаторов и т.д. При этом причиненный реальный ущерб не способен отразить растянутый во времени кумулятивный эффект воздействия гармонических составляющих. Упущенная выгода при несинусоидальном режиме [30], выраженная в неполученных доходах вследствие остановки производства, брака продукции, снижении продуктивности технологической линии и т.д., в ГК РФ не рассматривается.

Возмещение стоимости причиненного реального ущерба – это единственная мера в действующей на настоящий момент времени системе управления, которая может побудить потребителя – генератора гармоник к установке и эксплуатации фильтров. Ее расчет должен быть связан с показателями и параметрами КЭ, регистрируемыми системой мониторинга:

$$У = f\left(K_{U(2)}, K_{U(3)}, ..., K_{U(n)}\right). \quad (1.1)$$

Однако, по ряду причин, сумму причиненного реального ущерба в условиях эксплуатации электротехнического комплекса рассчитать крайне затруднительно. Дискуссии в данном направлении велись в 80-ых годах [81, 82]. В результате, был создан достаточно мощный механизм стимулирования потребителей к участию в снижении или устранении генерации токов гармонических составляющих, действовавший в период с 1991 до 2001 г.г. [43, 95-97].

Основу данного механизма стимулирования составляли Правила применения скидок и надбавок к тарифам за качество электроэнергии (первая редакция утверждена 10 апреля 1990 Главгосэнергонадзором Минэнерго СССР [95], вторая – 14 мая 1991 г. [96]), Правила присоединения потребителей к сети общего назначения по условиям влияния на качество электроэнергии, утвержденные 14 мая 1991 г. [97], и Инструкция о порядке расчетов за

электрическую и тепловую энергию [43]. Управляющее воздействие представлено в виде расчетной зависимости изменения стоимости ущерба от значений длительности отклонения ПКЭ от нормы в табличной форме. При этом абсолютное значение ущерба трансформировано в относительное, которое представляет собой стоимость ущерба по отношению к стоимости потребленной электроэнергии за расчетный период. Значение скидки или надбавки определяется по формуле:

$$H = 0,2 \cdot \left(T_1 - 5\right) + T_2 . \qquad (1.2)$$

где T_1 и T_2 – суммарные продолжительности выхода $K_{U(n)}$ за нормально и предельно допустимые нормируемые значения соответственно.

Для исключения чрезмерного экономического воздействия скидки и надбавки было ограничены 10 %.

В 2000 г. Минюст РФ направил в адрес Федеральной энергетической комиссии и Минтопэнерго России письмо [80], в котором сообщалось, что Инструкция вошла в противоречие с нормативно-правовыми документами более высокого уровня и ее необходимо привести в соответствие с действующими документами или отменить. Было решено пойти по второму пути: Приказом Минэнерго России от 28.12.2000 № 167 [100] с 1 января 2001 г. Инструкция утратила силу на территории РФ. Что касается раздела Инструкции, связанного с КЭ, то он «полностью прекратил действие в связи с противоречием ст. 542 и 547 Гражданского кодекса Российской Федерации».

Таким образом, функции Инструкции по формированию стимулирующего воздействия на потребителей – генераторов гармоник для их участия в инвестиционном проекте, направленном на снижение или устранение генерации токов гармонических составляющих, были переданы приведенным выше статьям ГК РФ, которые, как показывает время, не справляются с возложенными на них обязательствами. Уровень токов гармонических составляющих в электрических сетях крайне высок [33, 46]. Стимулирующее воздействие, побуждающее

участников электротехнического комплекса выполнять обязательства, не обеспечивается.

В отечественной и зарубежной литературе встречаются предложения по использованию других форм и видов стимулирующего воздействия.

Например, в работах [9, 11, 125] автор предлагает ввести поправочные коэффициенты к стоимости потребляемой электроэнергии в зависимости от ее качества. Предлагаемые поправочные коэффициенты учитывают двустороннюю ответственность потребителя и поставщика электроэнергии и вводятся при генерации токов гармонических составляющих одной из сторон. Значения коэффициентов определены с помощью метода экспертных оценок [10] и связаны с диапазонами отклонения ПКЭ от нормы. При этом они не связаны с причиненным ущербом, обусловленным протеканием токов гармонических составляющих, или затратами на мероприятия, обеспечивающие снижение или устранение генерации токов гармонических составляющих.

В других работах [89, 104, 123] предлагается воздействовать на потребителей – генераторов гармоник с целью снижения ими генерации токов гармонических составляющих при помощи оплаты энергии гармонических составляющих. В таком случае, для формирования стимулирующего воздействия используется интеграл активной мощности гармонических составляющих обратного направления за определенный интервал времени, например, за время усреднения ПКЭ.

В общем случае, регистрируемая системой мониторинга активная мощность в ТПЭ является алгебраической суммой мощностей гармонических составляющих прямого и обратного направления:

$$P_{(n),\text{ТПЭ},\Sigma} = P^{+}_{(n),1} + P^{+}_{(n),2} - P^{-}_{(n),3} - P^{-}_{(n),4} \pm \ldots = \sum_{j=1}^{M} \pm P_{(n),j}\,, \qquad (1.3)$$

где $+P^{+}_{(n),1},\ldots$ – активная мощность гармонических составляющих прямого направления первого потребителя;

$-P^{-}_{(n),3}$,... – активная мощность гармонических составляющих обратного направления третьего потребителя;

j и M – индекс и число потребителей – генераторов гармоник.

В случае с одним источником генерации, ее значение действительно может отразить вклад потребителя в искажение синусоиды напряжения. Однако, в случае с несколькими источниками, на такой параметр КЭ нельзя опираться при формировании управляющего воздействия, поскольку значение активной мощности характеризует генерацию потребителя в отдельно взятой ветви электротехнического комплекса (на границе передачи электроэнергии со стороны потребителя). Поэтому оплата такого параметра не учитывает наносимый ущерб рассматриваемым потребителем – генератором гармоник в электрических сетях других потребителей и сетевой организации.

Все рассмотренные формы и виды стимулирующего воздействия предусматривают оплату тех или иных показателей и параметров КЭ, связанных с генерацией токов гармонических составляющих и характеризующих ее в ТПЭ. Большинство из них – длительность и размер превышения значений ПКЭ от нормы, энергия гармонических составляющих и т.д. – это понятия узкие и конкретные, доступные для восприятия только узкому кругу специалистов. С технической точки зрения использование этих понятий вполне объяснимо. Измеряемая величина имеет стоимость, эквивалентную стоимости причиняемого ущерба и используется для его возмещения. Однако такие решения принимаются на уровне арбитражных судов. Методики расчета ущерба включают в себя эту величину и должны проходить согласование с Минюстом РФ. С учетом этого требуются экономическая и юридическая оценки этой величины. Оплата этих величин для широкого круга общественности, законодателей и т.д. рассматривается и оценивается с точки зрения классической системы товарооборота и тарифообразования. Эти величины не связаны с объем товара или услуги, не имеют спроса, не востребуются, не продаются и не покупаются, не имеют цены.

Длительность и размер превышения значений ПКЭ от нормы, энергия гармонических составляющих и другие встречающиеся в литературе параметры КЭ не воспринимаются товаром или услугой и не могут оплачиваться. Оплачиваются товар или услуга. Возникают трудности включения этих величин в нормативные акты. Эффективность управления КЭ в части несинусоидальности в данном случае сомнительна. С этой точки зрения желательно использовать для оценки ущерба регистрируемые системой мониторинга величины, которые воспринимаются общественностью и законодателем и включаются в нормативные правовые акты в сфере бухгалтерского учета [58, 61].

В мировой практике стимулирование широко используется для снижения генерации токов гармонических составляющих и повышения КЭ. Качество электроснабжения за рубежом исследуется и совершенствуется в трех основных аспекта: доступность электроэнергии (непрерывность поставки – continuity of supply – аналогично надежности электроснабжения в России), его технических характеристик (качество напряжения – voltage quality – аналогично КЭ в России), а также скорости и точности обработки запросов клиентов (коммерческое качество – commercial quality) [150].

В ряде стран в случае чрезмерного искажения КЭ вводятся штрафные санкции, причем они применяются как для поставщиков электроэнергии, так и потребителей. Регулирование КЭ, в том числе несинусоидальных режимов, основанное на применении штрафов, впервые нашло применение в 1996 году в Аргентине [166], затем в 2000-ых годах в Колумбии [151] и Иране [161].

Применение только штрафных санкций является наиболее простым видом стимулирования. В 2010 году в Италии был предложен механизм, основанный на применении как штрафов, так и поощрений. В нем также был реализован новый подход к регулированию КЭ, аналогичный тому, который принят в некоторых странах для регулирования непрерывности поставок электроэнергии [172]. Подход предусматривал два уровня регулирования: первый уровень (системный уровень) утверждается для обеспечения приемлемого среднего уровня КЭ для

всех потребителей, в то время как второй уровень (местное регулирование) учитывает взаимодействие между коммунальными службами и потребителями в ТПЭ. Отметим, что регулирование непрерывности поставок с помощью скидок и надбавок начало активно внедряться в странах Европы еще в 2000-ых годах [169].

Третьей формой стимулирования, имеющего место в практике регулирования напряжения, являются договора на КЭ. Например, во Франции, Италии [169] и Китае потребители имеют возможность заключить договор на дополнительные требования к качеству. В настоящее время в Китае активно разрабатывается и внедряется услуга КЭ [152, 153, 175]. В основу услуги заложен метод управления рисками и страхование. Цена такой услуги складывается из цены услуги по очистке сети от токов гармонических составляющих и цены услуги по улучшению фактического уровня КЭ в части несинусоидальности. Заключается договор, согласно которому потребитель оплачивает регулирование КЭ в своих сетях. В случае нарушения договора ему полагается компенсация.

Таким образом, система мониторинга показателей и параметров КЭ нуждается в совершенствовании поскольку:

1) она не дает информации, необходимой для принятия решений по подавлению токов гармонических составляющих путем установки ФКУ или АФ;

2) известные показатели и параметры КЭ измеряются, но не востребуются системой управления и не используются для расчета стоимости причиненного реального ущерба.

§ 1.3 Критерии обнаружения источников генерации токов гармонических составляющих

При установлении обязательств и формировании стимулирующего воздействия для снижения уровня токов гармонических составляющих одним из главных вопросов является определение источника их генерации. Без этого

невозможно применить меры по результатам мониторинга. Это является главной доказательной базой при применении управляющего воздействия в системе управления КЭ.

Для обнаружения источника генерации используются показатели и параметры КЭ, регистрируемые системой мониторинга в ТПЭ. В настоящее время для нахождения потребителей – генераторов гармоник используется численный подход – проведение исследований по численным значениям параметров, характеризующих несинусоидальный режим в ТПЭ.

Известные работы направлены на разработку и совершенствование математических моделей и способов, позволяющих рассчитать токи и напряжения гармонических составляющих в цепи, определить показатели и параметры КЭ, найти фактический вклад потребителя в искажение напряжения [14, 15]. При этом расчет фактического вклада может быть выражен как в абсолютных [22, 69, 126] или относительных [9, 10, 35] единицах, так и процентом соотношении [90]. Известные модели позволяют получить только численный критерий, на основании которого судят об источнике генерации на одной из частот гармонических составляющих.

Критерии обнаружения источника генерации токов гармонических составляющих опираются на физический процесс возникновения гармонических составляющих. Потребляемая нелинейной нагрузкой мощность основной частоты не полностью расходуется на совершение полезной работы и обеспечение технологического процесса, а частично преобразуется в виде гармонических составляющих и генерируется обратно в электрическую сеть [42]. Таким образом, если потребитель содержит нелинейную нагрузку, то мощность гармонических составляющих в ТПЭ будет иметь обратное направление [89], что соответствует значениям угла фазового сдвига между напряжением и током гармонических составляющих в определенном диапазоне:

$$\varphi_{UI(n)} \in \left(90°, 270°\right). \tag{1.4}$$

Выражение (1.4) является первым **критерием** для обнаружения источника генерации [53]. Если измеряемый в ТПЭ угол фазового сдвига находится в данном диапазоне, то к потребителю необходимо применить управляющее воздействие, направленное на снижение или устранение генерации токов гармонических составляющих.

Другой **критерий** подразумевает сравнение фактического вклада потребителя – генератора гармоник в искажение напряжения в ТПЭ с его допустимым вкладом:

$$U_{(n),\text{потр}} > U_{(n),\text{доп}}, \tag{1.5}$$

где $U_{(n),\text{потр}}$ – фактический вклад потребителя в напряжение гармонической составляющей порядка n;

$U_{(n),\text{доп}}$ – допустимый вклад в напряжение гармонической составляющей порядка n.

Если неравенство выполняется, то рассматриваемый потребитель является источником генерации токов гармонических составляющих и по отношению к нему необходимо применить управляющее воздействие.

Допустимый вклад представляет собой максимальную долю искажения напряжения в ТПЭ, которую разрешается вносить потребителю. Это часть ПКЭ, распределяемая между потребителями с нелинейными нагрузками. Если ее не превышать, то необходимость применения управляющего воздействия отсутствует. Во время действия Инструкции о порядке расчетов [43] (конец 90-ых годов) допустимый вклад определялся на основании методики [97]. В соответствии с ней, допустимый вклад по напряжению для каждого потребителя вычисляется по формуле:

$$U_{(n),\text{доп}} = K_{U(n),\text{распр}} \cdot U_{(1)} \cdot d^{\frac{1}{a}}, \tag{1.6}$$

где $K_{U(n),\text{распр}}$ – часть нормируемого значения коэффициента гармонических составляющих, распределяемая между потребителями одного узла электрической сети;

$U_{(1)}$ – напряжение основной частоты;

d – доля нагрузки рассматриваемого потребителя в общей нагрузке подстанции, от которой получает питание потребитель, при полном использовании ее пропускной способности;

a – коэффициент, учитывающий механизм суммирования искажений от различных источников генерации.

Значение коэффициента $K_{U(n),\text{распр}}$ может быть определено при помощи нормативного метода, согласно которому принимается допущение одинаковых вкладов потребителей подстанции, от которой питается рассматриваемый потребитель, и внешних по отношению к ней потребителей в формировании общего уровня ПКЭ на питающих шинах:

$$K_{U(n),\text{распр}} = \frac{K_{U(n),\text{ст}}}{2^{\frac{1}{a}}}, \tag{1.7}$$

где $K_{U(n),\text{ст}}$ – нормируемое ГОСТ 32144-2013 значение ПКЭ $K_{U(n)}$.

Значение коэффициента a является справочными данными (таблица 1.2).

Таблица 1.2 – Значение коэффициента суммирования искажений

Показатель качества электроэнергии	Значение a
Коэффициент гармонической составляющей, создаваемой преобразователями при: n = 3, 5, 7 n = 11, 13 n > 13 (нечетное) n – четное	 1 1,4 2 2
Коэффициент гармонической составляющей, создаваемой другими электроприемниками (не преобразователями) при любом n	2

Если потребитель использует совместно преобразователи и другие электроприемники с нелинейными характеристиками, то значение коэффициента рассчитывается следующим образом:

$$a = a_{\text{сп}} \cdot d_{\text{пр}} + 2 \cdot d_{\text{д}}, \tag{1.8}$$

где $a_{\text{сп}}$ – значение а, взятое из табл. 1.2;

$d_{\text{пр}}$ – доля нагрузки преобразователей;

$d_{\text{д}}$ – доля нагрузки других электроприемников ($d_{\text{пр}} + d_{\text{д}} = 1$).

При использовании критерия основная сложность заключается в определении фактического вклада потребителя в искажение напряжения. Напряжение гармонических составляющих в ТПЭ является результатом генерации токов гармонических составляющих не отдельно взятого потребителя, а всех потребителей – генераторов гармоник:

$$\underline{U}_{(n),\text{ТПЭ}} = \underline{U}_{(n),\text{потр}} + \underline{U}_{(n),\text{ЭТК}}, \tag{1.9}$$

где $\underline{U}_{(n),\text{ЭТК}}$ – напряжение гармонической составляющей, определяемое генерацией остальных (за исключением рассматриваемого) потребителей – генераторов гармоник электротехнического комплекса.

Для использования критерия (1.5) необходимо из измеряемого в ТПЭ напряжения гармонической составляющей выделить только ту часть, которая определяется генерацией рассматриваемого потребителя – генератора гармоник $\underline{U}_{(n)\text{потр}}$.

В работах [10, 22, 68, 112, 121, 126] для определения фактического вклада рассматривается двухблочная схема замещения (рисунок 1.7, на которой индекс гармонической составляющей n опущен), отражающая двухстороннюю ответственность потребителя и сетевой организацией за КЭ в ТПЭ.

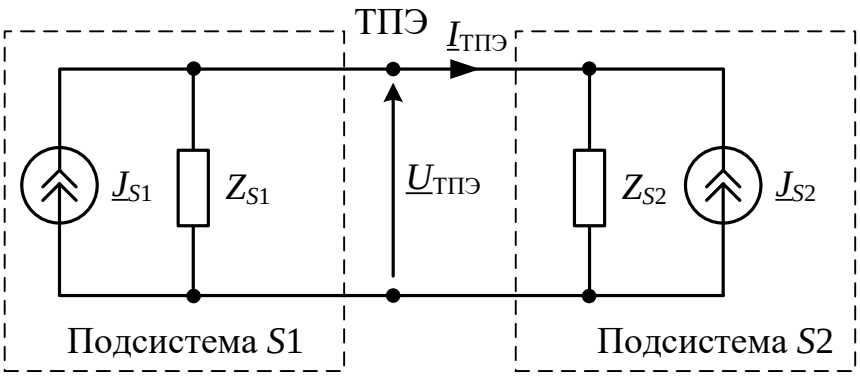


Рисунок 1.7 – Двухблочная схема замещения (схема Нортона)

Схема замещения формируется относительно ТПЭ на частоте гармонической составляющей. Рассматриваемый потребитель – генератор гармоник выделяется в подсистему $S1$, которая представлена источником тока $\underline{J}_{S1}$ и сопротивлением Z_{S1}. Сетевая организация вместе со всеми остальными потребителями включается в подсистему $S2$.

Поскольку значения токов источников $\underline{J}_{S1}$ и $\underline{J}_{S2}$ неизвестны, то фактический вклад по напряжению каждой из подсистем определяется по результатам мониторинга КЭ. Необходимо разложить в ряд Фурье снятые в ТПЭ функции напряжения и тока и рассчитать вклады по выражениям:

$$\underline{U}_{S1} = \left(\underline{U}_{\text{ТПЭ}} + Z_{S1} \cdot \underline{I}_{\text{ТПЭ}}\right) \cdot \frac{Z_{S2}}{Z_{S1} + Z_{S2}}, \tag{1.10}$$

$$\underline{U}_{S2} = \left(\underline{U}_{\text{ТПЭ}} - Z_{S2} \cdot \underline{I}_{\text{ТПЭ}}\right) \cdot \frac{Z_{S1}}{Z_{S1} + Z_{S2}}. \tag{1.11}$$

Значения сопротивлений подсистем Z_{S1} и Z_{S2} являются эквивалентными и могут быть определены по следующим друг за другом измерениям:

$$Z_{\text{р},i} = \frac{\Delta \underline{U}_{\text{ТПЭ}}}{\Delta \underline{I}_{\text{ТПЭ}}}. \tag{1.12}$$

При одном расчете (двух следующих друг за другом измерениях с шагом Δt) может быть определено только одно из необходимых сопротивлений. Если $\mathrm{Re}(Z_{\text{р},i}) < 0$, то расчетное сопротивление определяет значение сопротивления Z_{S2} ($Z_{\text{р},i} = Z_{S2}$). Иначе, если $\mathrm{Re}(Z_{\text{р},i}) > 0$, то расчетное сопротивление определяет значение сопротивления подсистемы $S1$ ($Z_{\text{р},i} = Z_{S1}$).

Фактическое напряжение $\underline{U}_{S1}$, создаваемое потребителем с нелинейными нагрузками, зависит не только от значений токов источников, но и от сопротивлений элементов электротехнического комплекса, включая нагрузку других потребителей. В зависимости от расчетных эквивалентных сопротивлений Z_{S1} и Z_{S2} при постоянстве токов источников $\underline{J}_{S1}$ и $\underline{J}_{S2}$ рассматриваемый потребитель может как превышать свой допустимый вклад в искажение напряжения, так и не превышать.

Недостатком критериев является их ограниченная эффективность в случае с несколькими источниками генерации. Критерии позволяют найти только часть потребителей – генераторов гармоник на частоте гармонической составляющей [107], которых можно разделить на две категории: обнаруженные и необнаруженные. Для пояснения приведены рисунок 1.8 и таблица 1.3, на которых представлены результаты спектрального анализа напряжения и тока.

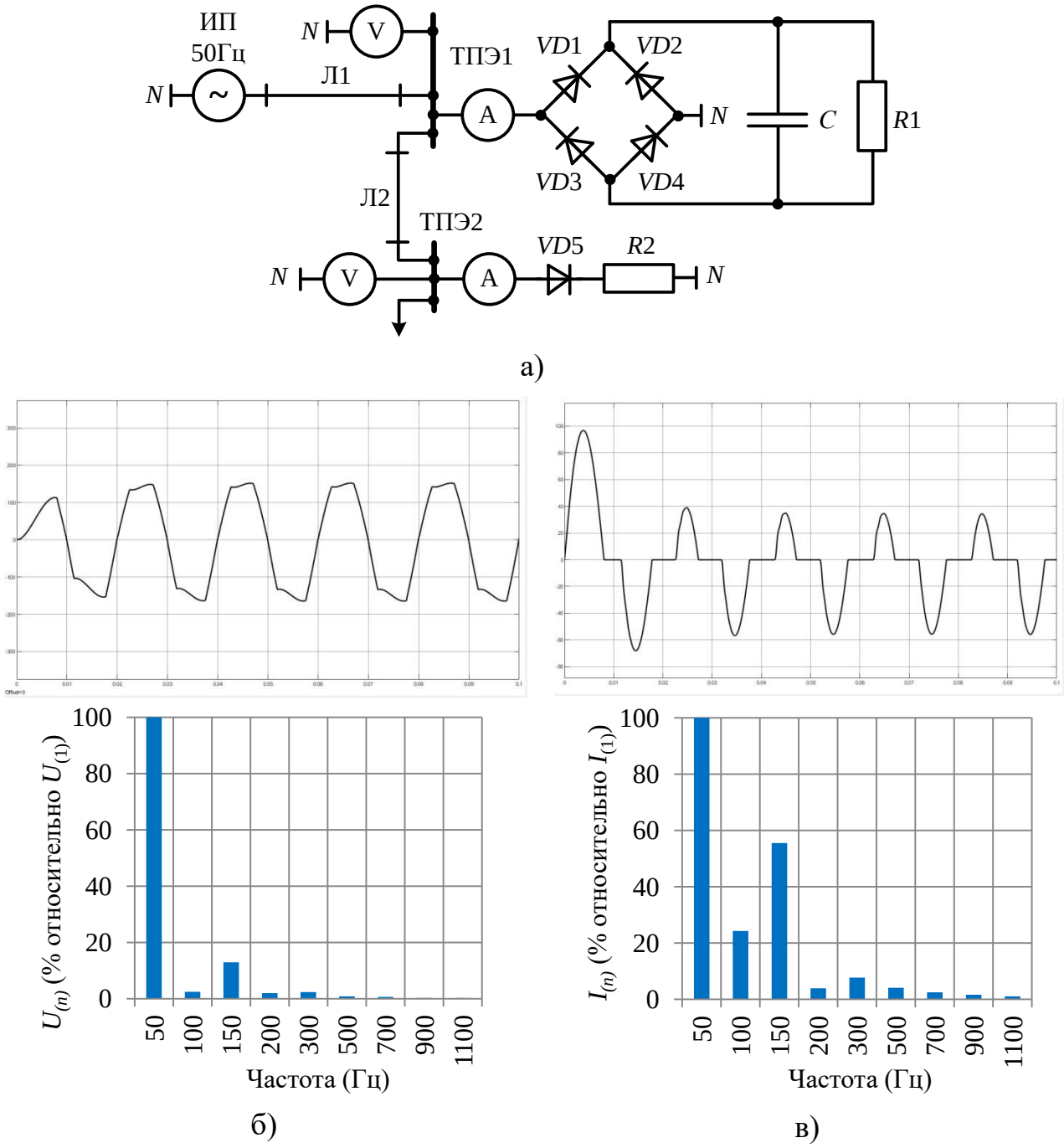


Рисунок 1.8 – Схема характерной части комплекса (два генератора) (а), осциллограмма и гармонический состав для напряжения (б) и тока (в) в ТПЭ1

Таблица 1.3 – Углы фазового сдвига при разложении в ряд Фурье

Частота, Гц	Угол сдвига между напряжением и током, градусы	
	ТПЭ1	ТПЭ2
100 (h2)	217,6	**76,2**
150 (h3)	186,5	**7,6**
500 (h10)	204,1	**34,1**
900 (h18)	216,6	**55,7**
1100 (h22)	203,9	**83,7**
	Обнаруженный генератор гармоник	**Необнаруженный генератор гармоник**
200 (h4)	122,8	214,7
300 (h6)	189,0	214,0
700 (h14)	197,5	260,8
	Обнаруженный генератор гармоник	Обнаруженный генератор гармоник

Как видно из табл. 1.3, первый потребитель – генератор гармоник (диодный мост *VD*1-*VD*4) на всех представленных частотах гармонических составляющих является обнаруженным генератором гармоник. В отличие от него второй потребитель – генератор гармоник (диод *VD*5) является обнаруженным только на 4, 6 и 14 гармонике. На всех остальных частотах данный потребитель является необнаруженным генератором гармоник, хотя содержит нелинейную нагрузку. Данное обстоятельство ограничивает принятие по отношению к нему мер, направленных на снижение или устранение генерации токов гармонических составляющих.

В зависимости от используемых критериев обнаружения источников генерации токов гармонических составляющих все потребители сетевой организации электротехнического комплекса систем электроснабжения могут быть классифицированы следующим образом (рисунок 1.9).

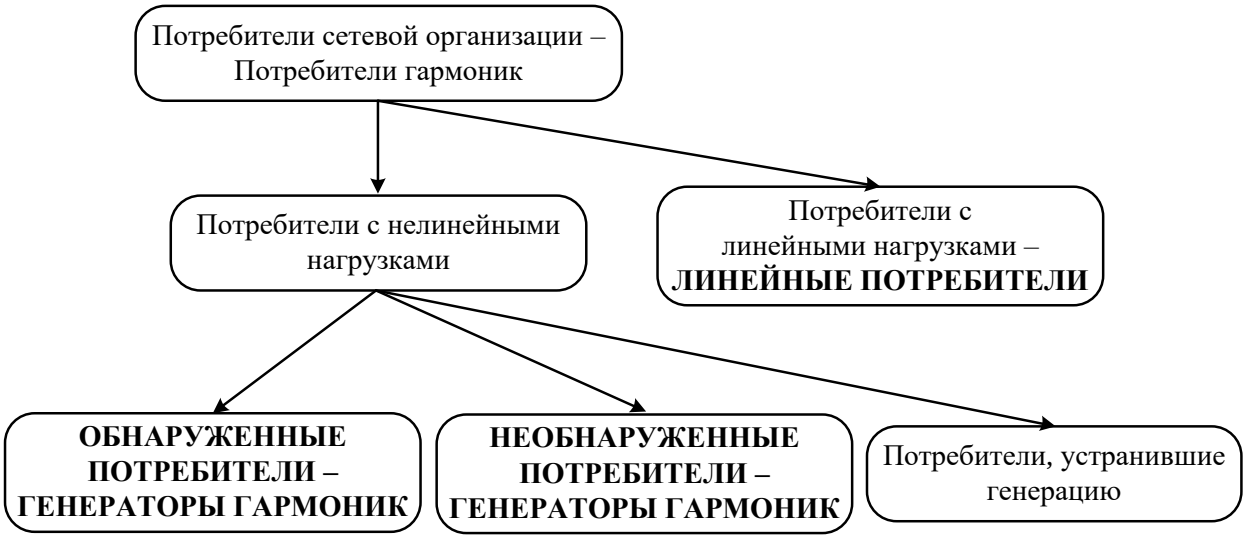


Рисунок 1.9 – Классификация потребителей

Наибольшее развитие и практическое применение получил первый критерий. Технической возможностью измерения угла фазового сдвига для гармонических составляющих обладают все современные отечественные и зарубежные средства измерения КЭ, оснащенные токовыми клещами [1, 2, 32, 73, 115]. Процедура измерения проводится в соответствии с требованиями ГОСТ 30804.4.30-2013 [25]. Необходимость регистрации данного параметра КЭ при мониторинге отмечена в п. 7.4.2 ГОСТ 33073-2014 [27].

Использование угла фазового сдвига $\varphi_{UI(n)}$ в качестве численного критерия обнаружения источников генерации токов гармонических составляющих отражено в нормативных документах. Так, в утвержденной методике ПАО «Россети» по определению источника искажений КЭ [70] используются понятия: направление тока «к шинам» («+») и «от шин» («-»). Численный критерий, принадлежащий одному из квадрантов векторной диаграммы, показывает направление вектора тока $\underline{I}_{(n),\text{ТПЭ}}$ относительно вектора напряжения $\underline{U}_{(n),\text{ТПЭ}}$, ориентированного вдоль положительной оси +1. Квадранты I и IV соответствуют прямому направлению активной и реактивной мощности, квадрант II – обратному направлению активной мощности и прямому направлению реактивной мощности индуктивного характера, квадрант III – обратному направлению активной и реактивной мощности емкостного характера (рисунок 1.10).

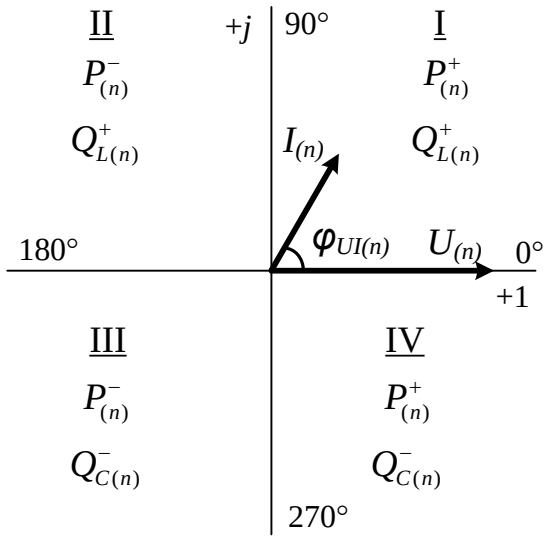


Рисунок 1.10 – Векторная диаграмма напряжения и тока в ТПЭ

Зарубежные исследования в данной области посвящены поиску доминирующего источника и классифицированы по трем группам [167, 168]. Каждой группе методов соответствуют свои критерии обнаружения.

Первую группу составляют исследования, в которых описываются методы, основанные на направлении потока активной мощности [154, 159, 171, 173, 174]. В качестве параметра обнаружения используется значение активной мощности:

$$P_{\text{ТПЭ}} = \text{Re}\left\{\underline{U}_{\text{ТПЭ}}\ \underline{I}^{*}_{\text{ТПЭ}}\right\}. \tag{1.13}$$

Получившийся знак в выражении (1.13) показывает направление потока активной мощности гармонических составляющих. Если при расчете мощность получилась отрицательной, то источником генерации является потребитель. Данные исследования аналогичны отечественным разработкам, поэтому для них применим рассмотренный ранее **критерий** – угол фазового сдвига в определенном диапазоне (1.4). Исходными данными для расчета критерия является информация об измеренных в ТПЭ напряжении и токе гармонических составляющих.

Методы на основе потока реактивной мощности составляют вторую группу исследований [164, 174]. В [174] отмечено, что направление потока реактивной мощности имеет лучшую корреляцию с величинами вкладов источников сторон, чем направление потока активной мощности. Для обнаружения источника

генерации предложен параметр – критический импеданс *CI*, рассчитываемый по формуле:

$$CI = 2 \cdot \frac{Q_{\text{пр}}}{I_{\text{ТПЭ}}^2}, \tag{1.14}$$

где $Q_{\text{пр}}$ – преобразованная реактивная мощность.

Для расчета $Q_{\text{пр}}$ требуется информация об эквивалентных сопротивлениях потребителя и электротехнического комплекса (Z_{S1} и Z_{S2}). Предварительно необходимо рассчитать суммарное эквивалентное сопротивление Z_{Σ}, угол β и фактический вклад по напряжению $\underline{U}_{(n)\text{ЭТК}}$:

$$Z_{\Sigma} = Z_{S1} + Z_{S2}, \tag{1.15}$$

$$\beta = \arctan\left(\frac{\operatorname{Re}\{Z_{\Sigma}\}}{\operatorname{Im}\{Z_{\Sigma}\}}\right), \tag{1.16}$$

$$\underline{U}_{\text{ЭТК}} = \underline{U}_{\text{ТПЭ}} - Z_{S2} \cdot \underline{I}_{\text{ТПЭ}}. \tag{1.17}$$

Тогда преобразованная реактивная мощность рассчитывается по формуле:

$$Q_{\text{пр}} = \begin{cases} +\left[\sin\beta \;\; \cos\beta\right] \begin{bmatrix} \operatorname{Re}\left\{\underline{U}_{\text{ЭТК}} \;\; \underline{I}_{\text{ТПЭ}}^{*}\right\} \\ \operatorname{Im}\left\{\underline{U}_{\text{ЭТК}} \;\; \underline{I}_{\text{ТПЭ}}^{*}\right\} \end{bmatrix} & \operatorname{Im}\{Z_{\Sigma}\} \geq 0, \\ -\left[\sin\beta \;\; \cos\beta\right] \begin{bmatrix} \operatorname{Re}\left\{\underline{U}_{\text{ЭТК}} \;\; \underline{I}_{\text{ТПЭ}}^{*}\right\} \\ \operatorname{Im}\left\{\underline{U}_{\text{ЭТК}} \;\; \underline{I}_{\text{ТПЭ}}^{*}\right\} \end{bmatrix} & \operatorname{Im}\{Z_{\Sigma}\} < 0. \end{cases} \tag{1.18}$$

Знак показателя *CI* всегда совпадает со знаком $Q_{\text{пр}}$. Положительное значение *CI* однозначно указывает на то, что потребитель не является источником генерации. Поскольку отрицательное значение *CI* может быть обусловлено реактивной мощностью емкостного характера, то для обнаружения источника генерации требуется дополнительно сравнить абсолютное значение критерия с величиной суммарного эквивалентного сопротивления.

Таким образом, **критерий** обнаружения потребителя как источника генерации на частоте гармонических составляющих может быть записан в следующем виде:

$$\begin{cases} CI < 0, \\ |CI| > |Z_{\Sigma}|. \end{cases} \tag{1.19}$$

Методы третьей группы [165] основаны на определении отношения гармонического напряжения к току в ТПЭ для оценки гармонического взаимодействия между потребителем и электротехническим комплексом. Метод отношения напряжение-ток может применяться для обнаружения доминирующего источника генерации и определения отношения фактических вкладов потребителя и электротехнического комплекса в искажение напряжения в ТПЭ.

Как и в методе с использованием критического импеданса, для определения источника генерации должны быть известны значения эквивалентных сопротивлений Z_{S1} и Z_{S2}, которые представляют собой две фокусные точки для сравнения положения отношения напряжение-ток (рисунок 1.11).

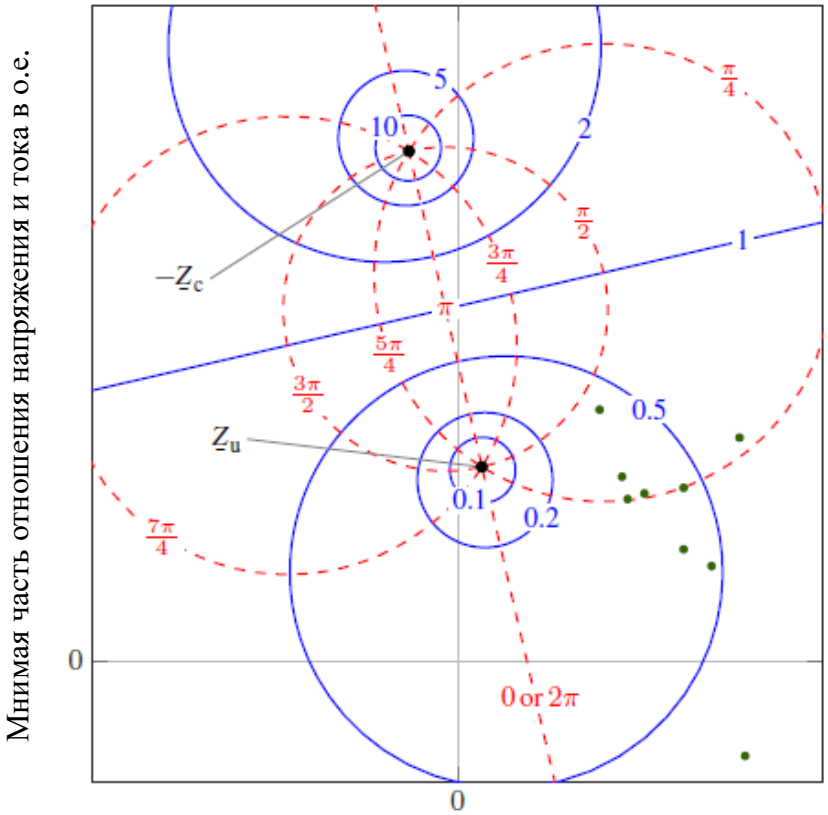


Рисунок 1.11 – Графическое представление метода отношения напряжение-ток

Параметром для обнаружения источника генерации служит отношение напряжения и тока $\underline{R}_v$:

$$\underline{R}_{\text{v}} = \frac{\underline{U}_{\text{ТПЭ}}}{\underline{I}_{\text{ТПЭ}}}. \qquad (1.20)$$

Тогда **критерий** обнаружения потребителя как источника генерации записывается следующим образом:

$$\left|\underline{R}_{\text{v}} + Z_{S1}\right| < \left|\underline{R}_{\text{v}} - Z_{S2}\right|. \qquad (1.21)$$

Недостатком методов второй и третьей группы зарубежных исследований является отсутствие методик, дающих достоверную информацию о значениях эквивалентных сопротивлений Z_{S1} и Z_{S2}.

Для решения задачи по снижению или устранению генерации токов гармонических составляющих известных исследований, направленных на получение численных критериев, обладающих ограниченной эффективностью (обнаружение только доминирующих источников), недостаточно. Сравнение фактического и допустимого вклада в искажение напряжения (1.5) и угол фазового сдвига, соответствующий определенному диапазону (1.4), а также зарубежные критерии (1.19) и (1.21) не позволяют ответить на ряд важных вопросов. Они не позволяют оценить области обнаружения и не обнаружения потребителей – генераторов гармоник и сделать прогноз по обнаружению источников генерации, например, при подключении нового потребителя.

Также численные критерии требуют постоянных пересчетов при изменении состава и схемы электротехнического комплекса систем электроснабжения.

В связи с данными обстоятельствами при решении задачи по обнаружению источника генерации требуется более общий, аналитический подход, который по сравнению с численными расчетами позволяет ответить на поставленные вопросы и получить общие выводы по нахождению источников генерации для определенных групп потребителей.

§ 1.4 Анализ схем замещения электротехнического комплекса систем электроснабжения

Анализ несинусоидального режима выполняется по линейной схеме замещения на каждой частоте гармонической составляющей в отдельности. При разложении в ряд Фурье несинусоидальная функция, которая имеет место в сети, раскладывается на составляющие – синусоидальную функцию основной частоты (50 Гц) и синусоидальные функции частот гармонических составляющих (100, 150 Гц и т.д.). Далее для частот гармонических составляющих на основе теоремы о компенсации [8] формируется схема путем замены нелинейной нагрузки источником тока (напряжения) с соответствующей периодической несинусоидальной функцией, снятой системой мониторинга показателей и параметров КЭ.

В диссертационной работе на нелинейную электрическую сеть подается синусоидальное напряжение. На нагрузках будет несинусоидальное напряжение и ток, гармонический состав которых определяется путем разложения в ряд Фурье соответствующих численных функций, снятых средствами измерения.

При подаче на нелинейную электрическую сеть синусоидального напряжения мультипликаций – умножений гармонических составляющих в сети не возникает, следовательно, нет комбинационных частот. Комбинационные частоты возникают в нелинейных цепях только при двух и более источниках с разными частотами. Доказательство основано на разложении функции нелинейного элемента в степенной ряд [4].

Даже если подать несинусоидальное напряжение, которое имеет место в сети, на нелинейный элемент, других гармоник, кроме как кратных основной частоте, на нелинейном элементе не появится.

В некоторых случаях гармонический режим обусловлен не только нелинейной нагрузкой. Гармонические напряжения и токи также появляются при замыканиях на землю в сетях с изолированной нейтралью [23] и провалах

напряжения, возникающих в результате работы мощных электроприемников с переменной нагрузкой, например, при работе блюмингов. Методы снижения гармонических составляющих в таком случае несколько отличаются и, в случае с провалами напряжения, сводятся к установке устройств компенсации реактивной мощности, способных реагировать на изменение режима потребления.

Для исследования различий в спектральном составе напряжения в случае нелинейной нагрузки и нагрузки с переменным режимом работы была рассмотрена следующая схема (рисунок 1.12), составленная в программном комплексе MATLAB Simulink.

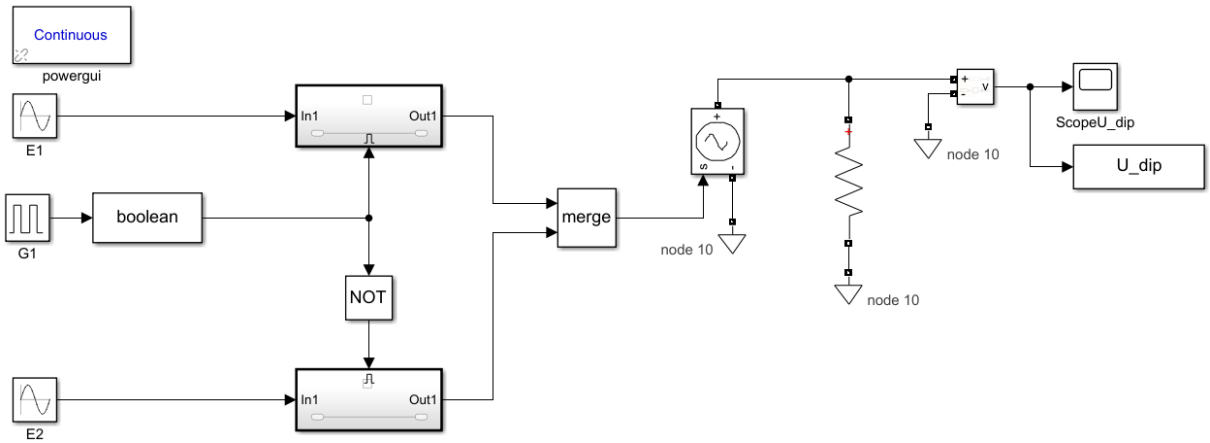


Рисунок 1.12 – Схема для исследования провала напряжения

Моделирование провала напряжения ведется при помощи двух источников синусоидального напряжения E1 и E2 различной амплитуды, импульсного генератора напряжения G1 и логических элементов boolean и NOT.

Осциллограмма моделируемого напряжения представлена на рисунке 1.13.

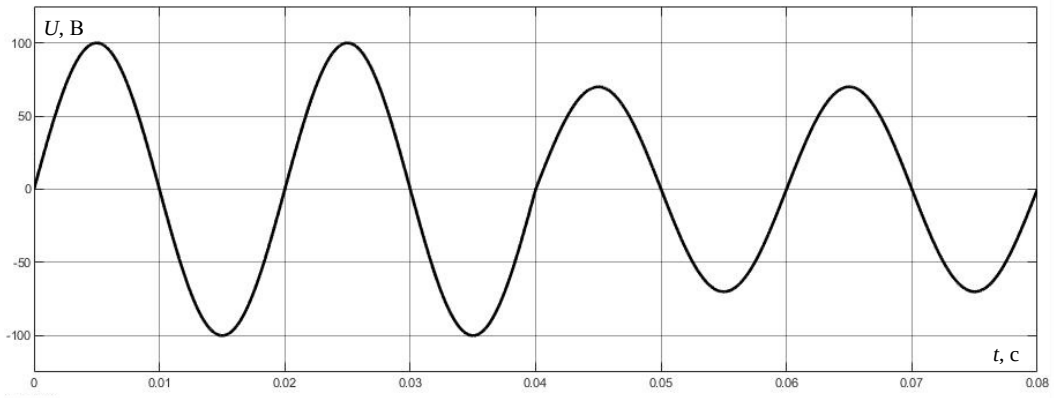


Рисунок 1.13 – Осциллограмма провала напряжения

Разложение в ряд Фурье с фундаментальной частотой 12,5 Гц для рассматриваемой функции дает следующий спектр частот (рисунок 1.14), из которого следует, что гармонические составляющие наибольшей амплитуды при провале сосредоточены в диапазоне от 10 до 90 Гц, что отличает их от кратных частот гармонических составляющих, возникающих в случае нелинейной нагрузки. При этом их уровень не превышает 10 % от напряжения основной частоты.

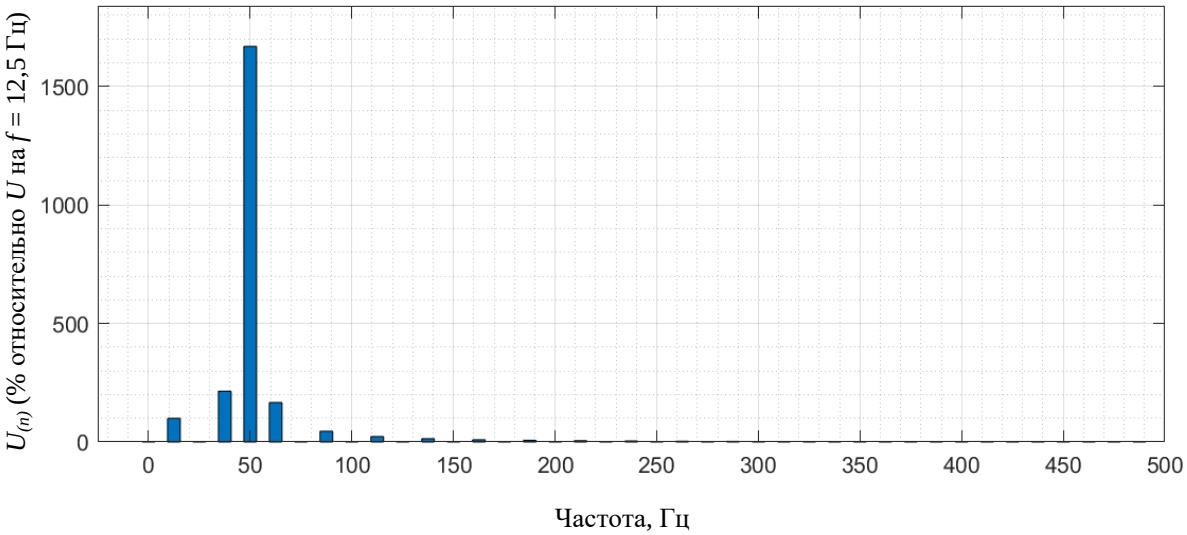


Рисунок 1.14 – Гармонический состав провала напряжения

Одной из известных схем замещения электротехнического комплекса является **полная** [5, 39, 108, 109], которая отражает свойства всех устройств сетевой организации, участвующих в передаче и распределении электроэнергии, нагрузок промышленных предприятий и собственных нужд сетевой организации. Потребители с нелинейными и линейными нагрузками представляются в виде источников тока гармонической составляющей $\underline{J}$ и нагрузки $Z_{н}$, параметры которой могут быть оценены по известным мощностям основной частоты [39]:

$$R_{(n),н} = \sqrt{n} \cdot \frac{U_{ном}^2}{P_{ном}}, \tag{1.22}$$

$$X_{(n),н} = n \cdot \frac{U_{ном}^2}{P_{ном} \cdot \tan\varphi}, \tag{1.23}$$

где $U_{ном}$, $P_{ном}$ и $\tan\varphi$ – параметры нагрузки потребителя.

Множитель $\sqrt{n}$ в (1.22) обусловлен поверхностным эффектом [39, 128].

Полная схема замещения представлена на рисунке 1.15, где ТП НСН – точка подключения нагрузки собственных нужд сетевой организации.

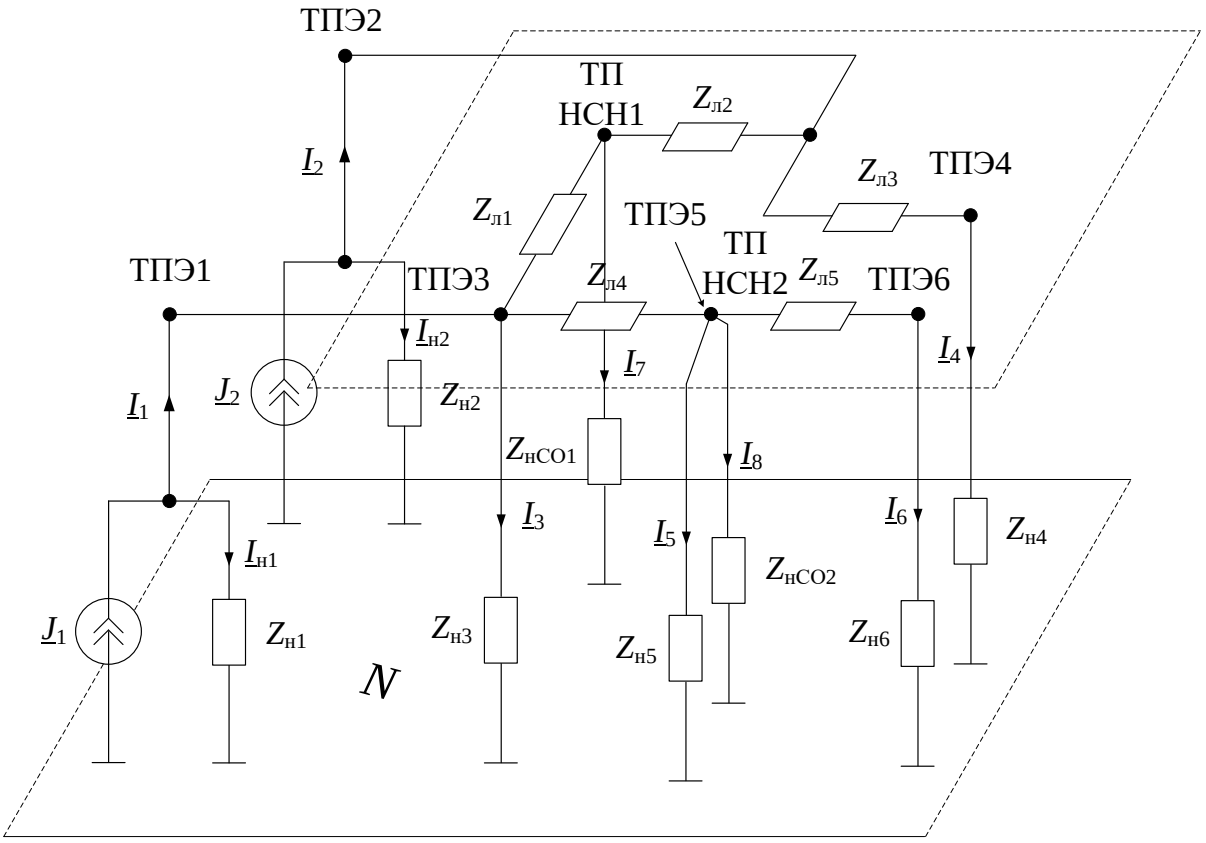


Рисунок 1.15 – Полная схема замещения электротехнического комплекса

Полная схема замещения является наиболее точным и простым вариантом схемы замещения электротехнического комплекса, при составлении которой не требуются эквивалентные преобразования и дополнительные расчеты. В тоже время, для ее составления требуется исчерпывающая информация о структуре и электротехнического комплекса систем электроснабжения, включая нагрузки собственных нужд сетевой организации.

Очевидно, что использование полной схемы замещения при аналитическом подходе дает достаточно большие и сложные символьные выражения, для анализа которых требуется множество допущений. Более того, в большинстве случаев, такие выражения вовсе не поддаются анализу.

Для исследования несинусоидального режима в ТПЭ, как правило, используется **двухблочная** схема замещения, в которой источник генерации представляется либо в виде эквивалентного источника тока (схема Нортона на рисунок. 1.7), либо в виде эквивалентного источника ЭДС (схема Тевенина на рисунке 1.16). Такие схемы используются как в отечественных исследованиях [10, 22, 68, 121, 122, 126], так и зарубежных [160, 162, 163, 170, 171].

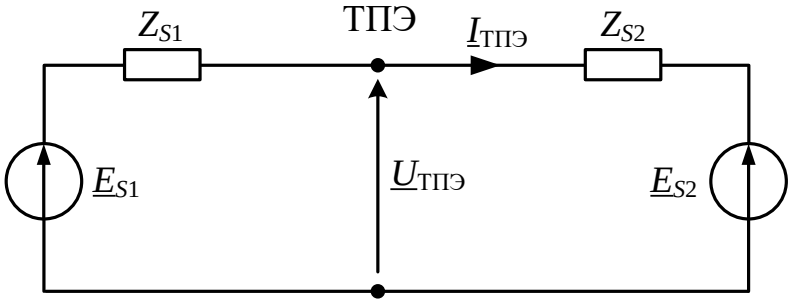


Рисунок 1.16 – Двухблочная схема замещения (схема Тевенина)

В некоторых случаях двухблочная схема, в соответствии с принципом наложения, разбивается на две подсхемы [10, 126, 167], отражающие вклад потребителя и остальной части электротехнического комплекса в искажение синусоидальной формы кривой напряжения (рисунок 1.17).

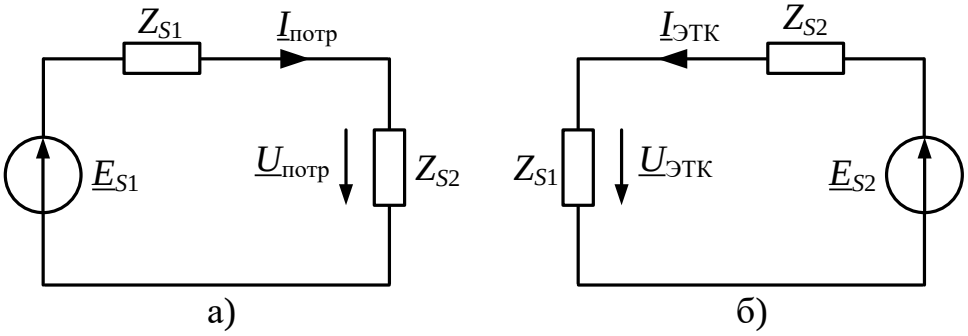


Рисунок 1.17 – Подсхемы, отражающие вклад потребителя (а) и электротехнического комплекса (б) в искажение напряжения в ТПЭ

Проблема использования данной схемы замещения, как было указано выше, заключается в отсутствии достоверной информации о значениях эквивалентных сопротивлений Z_{S1} и Z_{S2}. Их значения, в настоящее время, с некоторыми допущениями рассчитывают по результатам измерений согласно выражению

(1.12) [10, 126, 128]. Кроме того, двухблочная схема замещения не отображает связей с линейными потребителями.

Таким образом, для аналитического подхода известных схем замещения электротехнического комплекса электроснабжения, позволяющих исследовать несинусоидальный режим в ТПЭ, недостаточно. Необходимо разработать схему замещения для проведения аналитических исследований.

Выводы по первой главе

1. Процесс протекания токов гармонических составляющих связывает электротехнические устройства с нелинейными и линейными электрическими характеристиками, которые принадлежат сетевой организации и подключенным к ее сети промышленным предприятиям, а также систему мониторинга КЭ в единый электротехнический комплекс систем электроснабжения.

2. В условиях санкций и импортозамещения наблюдается бурный рост промышленных предприятий, при котором уровень токов гармонических составляющих многократно возрастает. Вместе с этим растут вредные последствия и снижается эффективность и экономичность электротехнического комплекса. Наиболее действенным способом повышения эффективности его функционирования в ненормальном режиме работы при генерации нелинейными нагрузками потребителей токов гармонических составляющих является установка и эксплуатация потребителями – генераторами гармоник ФКУ или АФ.

3. Задача по стимулированию потребителей – генераторов гармоник к установке фильтров лежит на системе управления КЭ, в которой управляющее воздействие формируется с учетом показателей и параметров КЭ, регистрируемых системой мониторинга.

4. Система мониторинга нуждается в совершенствовании, поскольку она не дает необходимой информации для принятия мер, направленных на снижение или

устранение генерации. Известные показатели и параметры КЭ измеряются, но не востребуются системой управления и не используются для расчета стоимости причиненного ущерба.

5. В настоящее время для поиска потребителей – генераторов гармоник используется численный подход, в соответствии с которым проводятся исследования по численным значениям углов сдвига между напряжением и током. Для решения задачи по устранению несинусоидального режима численных критериев недостаточно. Требуется разработка более общего, аналитического подхода, для которого полная схема замещения не подходит из-за громоздких символьных выражений, а широко используемая двухблочная схема замещения непригодна из-за отсутствия связей с другими потребителями. Поэтому первой задачей работы является разработка схемы замещения и математической модели, позволяющих проводить аналитические исследования.

6. Угол сдвига между напряжением и током при нескольких источниках позволяет найти только часть потребителей с доминирующим вкладом в генерацию на частоте гармонической составляющей. Численный критерий не позволяет оценить области обнаружения и не обнаружения потребителя – генератора гармоник и сделать прогноз по обнаружению источников генерации. Поэтому второй задачей работы является вывод и анализ аналитических критериев обнаружения источников генерации.

7. Рост числа установленных в электротехническом комплексе фильтров гармоник возможен только при одновременном выполнении мероприятий, обеспечивающих поиск источников генерации токов гармонических составляющих и их подавление. В связи с этим, ставится четвертая задача – разработка алгоритма поочередного обнаружения и подавления источников генерации токов гармонических составляющих, включающего предлагаемые аналитические критерии обнаружения и новые параметры оценки КЭ.

ГЛАВА 2 МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ИСТОЧНИКОВ ГЕНЕРАЦИИ ТОКОВ ГАРМОНИЧЕСКИХ СОСТАВЛЯЮЩИХ

Известные математические модели, базирующиеся на полных или двухблочных схемах замещения, и показатели и параметры КЭ, регистрируемые системой мониторинга, позволяют найти только часть потребителей с нелинейными нагрузками, для которых численный критерий – угол фазового сдвига принадлежит диапазону от 90 до 270° (1.4). Данный критерий соответствует только доминирующим в плане генерации токов гармонических составляющих потребителям – генераторам гармоник. Другие потребители являются необнаруженными источниками генерации.

Таким образом, известные методы не позволяют определить абсолютно все источники генерации, которые присутствуют в электротехническом комплексе систем электроснабжения. Поэтому предлагается отличная от известных схем схема замещения в виде трехлучевой звезды, которая, в совокупности с предлагаемыми ниже новыми параметрами КЭ, позволяет найти все источники генерации, включая необнаруженных потребителей – генераторов гармоник.

§ 2.1 Схема замещения в виде трехлучевой звезды

В работе генерация токов гармонических составляющих в ТПЭ потребителей – генераторов гармоник исследуется на интервале времени усреднения ПКЭ. Согласно ГОСТ 32144-2013 [26], интервал усреднения для показателей и параметров, характеризующих несинусоидальность напряжения, составляет 10 минут. Исследование ведется на основе расчета установившегося режима линейных электрических цепей при гармоническом воздействии на частоте n-го порядка.

Для проведения исследований, в том числе аналитических, по обнаружению источников генерации токов гармонических составляющих предлагается использовать схему замещения электротехнического комплекса систем электроснабжения в виде трехлучевой звезды (рисунок 2.1) [133, 139]. Схема замещения на рисунке представлена для случая с двумя источниками генерации токов гармонических составляющих.

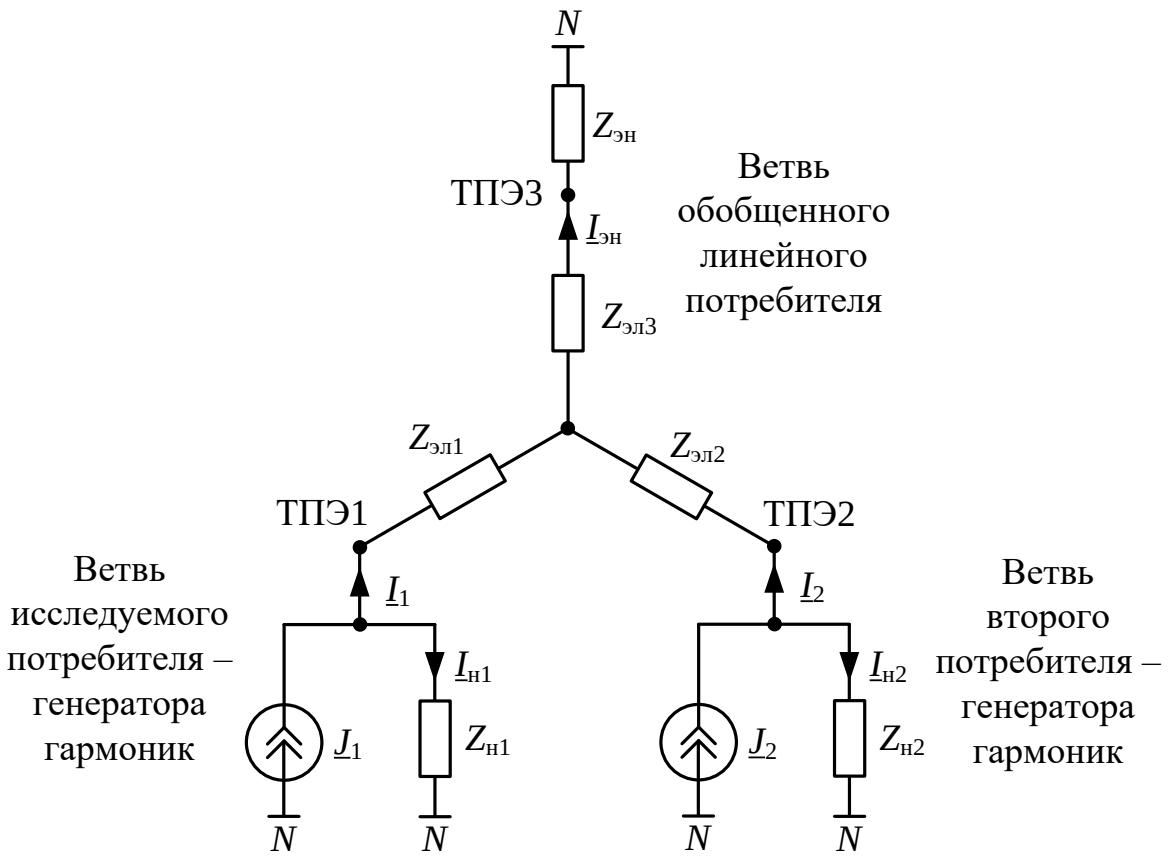


Рисунок 2.1 – Схема замещения в виде трехлучевой звезды

В отдельные лучи звезды выделяются:

- исследуемый потребитель – генератор гармоник;

- второй потребитель – генератор гармоник;

- линейные потребители, включая нагрузку собственных нужд сетевой организации.

Нелинейная нагрузка потребителей – генераторов гармоник на схеме замещения представляется в виде идеальных источников тока $\underline{J}_1$ и $\underline{J}_2$, у которых

внутреннее сопротивление равно бесконечности. Вся линейная нагрузка представляется в виде комплексных сопротивлений $Z_{н1}$, $Z_{н2}$ и $Z_{эн}$.

Все электротехнические устройства сетевой организации, участвующие в передаче и распределении электроэнергии и связывающие между собой потребителей (линии электропередач и силовые трансформаторы) на схеме замещения представляются в виде эквивалентных сопротивлений $Z_{эл1}$, $Z_{эл2}$ и $Z_{эл3}$.

Данное преобразование опирается на первый закон Кирхгофа, который описывает непрерывность протекания электрического тока [8, 142]. Генерируемые источниками токи $\underline{J}_1$ и $\underline{J}_2$ распределяются в электротехническом комплексе и протекают через сопротивления нагрузок пропорционально их значениям. Создаваемые при этом падения напряжения на сопротивлениях нагрузок являются нормируемыми стандартами напряжениями в ТПЭ.

Для полной схемы, представленной на рисунке 1.15, можно записать следующие уравнения:

$$\underline{J}_1 = \underline{I}_1 + \underline{I}_{н1}, \tag{2.1}$$

$$\underline{J}_2 = \underline{I}_2 + \underline{I}_{н2}, \tag{2.2}$$

$$\underline{I}_1 + \underline{I}_2 = \sum_{i=3}^{8} \underline{I}_i, \tag{2.3}$$

$$\underline{J}_1 + \underline{J}_2 = \underline{I}_{н1} + \underline{I}_{н2} + \sum_{i=3}^{8} \underline{I}_i. \tag{2.4}$$

Токи $\underline{I}_{н1}$ и $\underline{I}_{н2}$ не выходят за ТПЭ и протекают внутри потребителя. Токи $\underline{I}_1$ и $\underline{I}_2$, выходящие за ТПЭ, передаются и распределяются по нагрузкам остальных потребителей.

Таким образом, можно предположить, что существуют такие значения эквивалентных сопротивлений $Z_{эл1}$, $Z_{эл2}$ и $Z_{эл3}$, способные обеспечить с допустимой погрешностью такое же распределение напряжений и токов гармонических составляющих в ТПЭ потребителей – генераторов гармоник, как и полная схема замещения.

Тогда преобразование полной схемы замещения, приведенной на рисунке 1.15, в трехлучевую схему замещения происходит следующим образом. Потребители – генераторы гармоник с параметрами $\underline{J}_1$, $\underline{J}_2$, $Z_{н1}$ и $Z_{н2}$ переносятся без изменений в лучи звезды. Остальные линейные потребители и нагрузка собственных нужд сетевой организации с параметрами $Z_{н3}$, $Z_{н4}$, $Z_{н5}$, $Z_{н6}$, $Z_{нСО1}$ и $Z_{нСО2}$ преобразуются и заменяются одним эквивалентным сопротивлением $Z_{эн}$. Сопротивления связывающих линий $Z_{л1}$, $Z_{л2}$, $Z_{л3}$, $Z_{л4}$ и $Z_{л5}$, лежащие в верхней плоскости схемы, также заменяются эквивалентными сопротивлениями звезды $Z_{эл1}$, $Z_{эл2}$ и $Z_{эл3}$.

Для анализа несинусоидального режима в точках передачи потребителей – генераторов гармоник ветвь обобщенного линейного потребителя может быть преобразована и упрощена до одного эквивалентного сопротивления $Z_э = Z_{эн} + Z_{эл3}$. Тогда схема замещения в виде трехлучевой звезды для проведения аналитических исследований может быть представлена в следующем виде (рисунок 2.2).

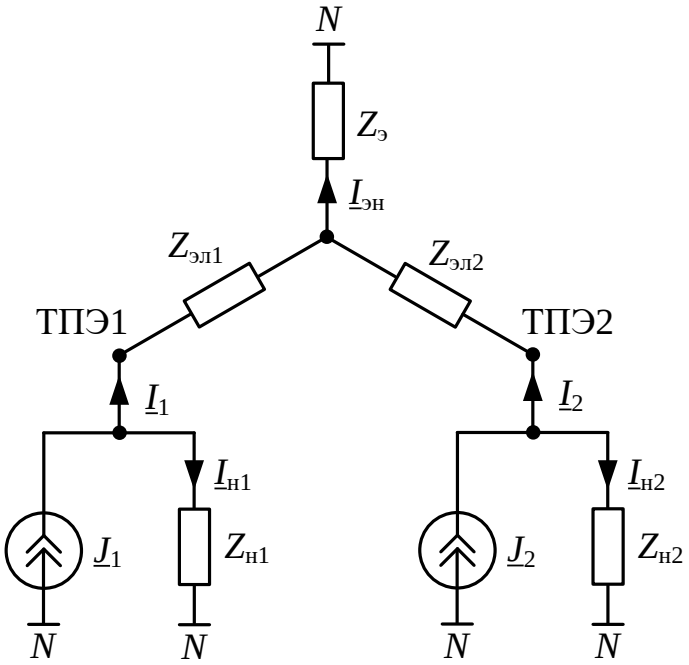


Рисунок 2.2 – Упрощенная схема замещения в виде трехлучевой звезды для аналитического подхода

2.1.1 Определение параметров схемы замещения

Значения источников тока потребителей – генераторов гармоник $\underline{J}_1$ и $\underline{J}_2$, в настоящее время, не могут быть найдены точно при помощи непосредственных измерений [128]. Поэтому в модели предлагается использовать значения, полученные в первом приближении как сумма эмиссии токов от электротехнических устройств с нелинейными характеристиками на рассматриваемой частоте гармонической составляющей или измеренные, в соответствии со способом [119] у потребителей при подключении пассивного фильтра гармоник.

Значения комплексных сопротивлений $Z_{н1}$ и $Z_{н2}$ на рассматриваемой частоте рассчитываются по известным параметрам потребителей (1.22) и (1.23).

Расчет значений сопротивлений трехлучевой звезды $Z_{эл1}$, $Z_{эл2}$ и $Z_э$ проводится при условиях и допущении:

- использована обратная постановка задачи;
- источник тока $\underline{J}_1$ приравнивается к нулю;
- значение сопротивления $Z_{эл1}$ составляет не более 10 % от $Z_{н1}$ допущение);
- не отрицательность активных сопротивлений $R_{эл1}$, $R_{эл2}$ и $R_э$.

Для расчета эквивалентных сопротивлений была поставлена обратная задача, в рамках которой известными величинами являются токи, а неизвестными – сопротивления. В таком случае, по известному распределению токов в схеме замещения могут быть рассчитаны сопротивления, обеспечивающие необходимое распределение.

Поиск значений сопротивлений ведется при значении тока источника $\underline{J}_1 = 0$, что соответствует отключенной нелинейной нагрузке исследуемого потребителя – генератора гармоник. Предлагаемая схема замещения, в таком случае, принимает следующий вид (рисунок 2.3).

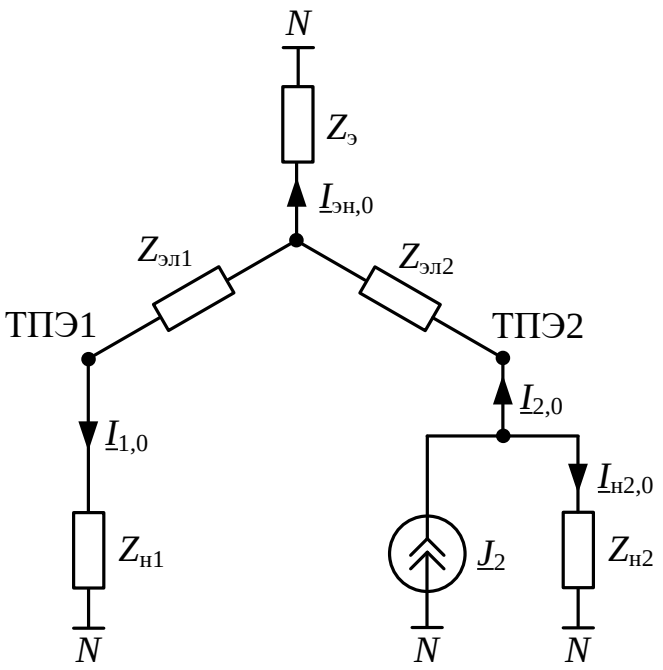


Рисунок 2.3 – Схема замещения при $\underline{J}_1 = 0$ для расчета эквивалентных сопротивлений

По схеме замещения (рисунок 2.3) была составлена система уравнений, состоящая из уравнений, записанных по II закону Кирхгофа:

$$\begin{cases} \underline{I}_{1,0} \cdot \left(Z_{н1} + Z_{эл1}\right) - \underline{I}_{н2,0} \cdot Z_{н2} + \underline{I}_{2,0} \cdot Z_{эл2} = 0 \\ -\underline{I}_{н2,0} \cdot Z_{н2} + \underline{I}_{2,0} \cdot Z_{эл2} + \underline{I}_{эн,0} \cdot Z_{э} = 0. \end{cases} \tag{2.5}$$

Выразим токи в ветвях сопротивлений нагрузок $Z_{н2}$ и $Z_{э}$ через токи в ТПЭ потребителей генераторов гармоник $\underline{I}_{1,0}$ и $\underline{I}_{2,0}$ и ток источника второго потребителя $\underline{J}_2$. Система уравнений (2.5) преобразуется к виду:

$$\begin{cases} \underline{I}_{1,0} \cdot \left(Z_{н1} + Z_{эл1}\right) - \left(\underline{J}_2 - \underline{I}_{2,0}\right) \cdot Z_{н2} + \underline{I}_{2,0} \cdot Z_{эл2} = 0 \\ -\left(\underline{J}_2 - \underline{I}_{2,0}\right) \cdot Z_{н2} + \underline{I}_{2,0} \cdot Z_{эл2} + \left(\underline{I}_{2,0} - \underline{I}_{1,0}\right) \cdot Z_{э} = 0. \end{cases} \tag{2.6}$$

При известных токах в ТПЭ потребителей – генераторов гармоник $\underline{I}_{1,0}$ и $\underline{I}_{2,0}$ последняя система содержит три неизвестные переменные, которые являются параметрами трехлучевой звезды. Поскольку система содержит только два уравнения, то одно из сопротивлений необходимо принять в качестве известной переменной. Такой переменной является $Z_{эл1}$.

При проектировании линий электропередач значения их сопротивлений для снижения в них падения напряжения и потерь мощности и энергии при передаче стараются делать как можно меньше. По сравнению с сопротивлениями нагрузок, их значения малы и составляют не более 10 %. Поэтому значение $Z_{эл1}$ как эквивалента линии электропередач и трансформаторов также может быть принято в пределах от 0 до 10 % относительно сопротивления $Z_{н1}$. Связь между сопротивлениями может быть обозначена через коэффициент k, который необходим для выбора конкретных значений сопротивлений из множества допустимых решений:

$$\begin{cases} Z_{эл1} = k \cdot Z_{н1} \\ k = 0..0{,}1. \end{cases} \tag{2.7}$$

Крайнее значение диапазона, равное нулю, отражает отсутствие сопротивления.

Остальные параметры звезды рассчитываются в зависимости от значения $Z_{эл1}$. Из системы (2.6) значения оставшихся неизвестных сопротивлений равны:

$$Z_{эл2} = \frac{-\underline{I}_{1,0} \cdot \left(Z_{эл1} + Z_{н1}\right) + \left(\underline{J}_2 - \underline{I}_{2,0}\right) \cdot Z_{н2}}{\underline{I}_{2,0}}, \tag{2.8}$$

$$Z_э = \frac{\underline{I}_{1,0} \cdot \left(Z_{эл1} + Z_{н1}\right)}{\underline{I}_{2,0} - \underline{I}_{1,0}}. \tag{2.9}$$

Таким образом, значения сопротивлений трехлучевой звезды могут быть рассчитаны при постановке обратной задачи по значениям токов $\underline{I}_{1,0}$ и $\underline{I}_{2,0}$, определенных расчетным или опытным путем при значении тока $\underline{J}_1 = 0$:

$$\begin{cases} Z_{эл1} = k \cdot Z_{н1} \\ Z_{эл2} = \dfrac{-\underline{I}_{1,0} \cdot \left(Z_{эл1} + Z_{н1}\right) + \left(\underline{J}_2 - \underline{I}_{2,0}\right) \cdot Z_{н2}}{\underline{I}_{2,0}} \\ Z_э = \dfrac{\underline{I}_{1,0} \cdot \left(Z_{эл1} + Z_{н1}\right)}{\underline{I}_{2,0} - \underline{I}_{1,0}} \\ k = 0..0{,}1. \end{cases} \tag{2.10}$$

При помощи коэффициента k ведется подбор таких значений сопротивлений звезды, обеспечивающих необходимое распределение токов гармонических составляющих в ТПЭ. Не исключено, что в некоторых случаях одно из активных сопротивлений по результатам расчета может быть отрицательным, что нарушает его физический смысл, заключающийся в необратимом преобразовании электроэнергии в тепло [67]. Поэтому, при расчете сопротивлений по (2.8) дополнительно должно быть наложено ограничение не отрицательности активных сопротивлений:

$$\begin{cases} R_{эл2} \le 0{,}1 \cdot R_{н2} \\ R_{эл2} \ge 0 \\ R_{э} \ge 0. \end{cases} \qquad (2.11)$$

Алгоритм подбора значения k и определения параметров $Z_{эл1}$, $Z_{эл2}$ и $Z_{э}$ по (2.10) при ограничениях (2.11) можно свести к следующему виду (рисунок 2.4).

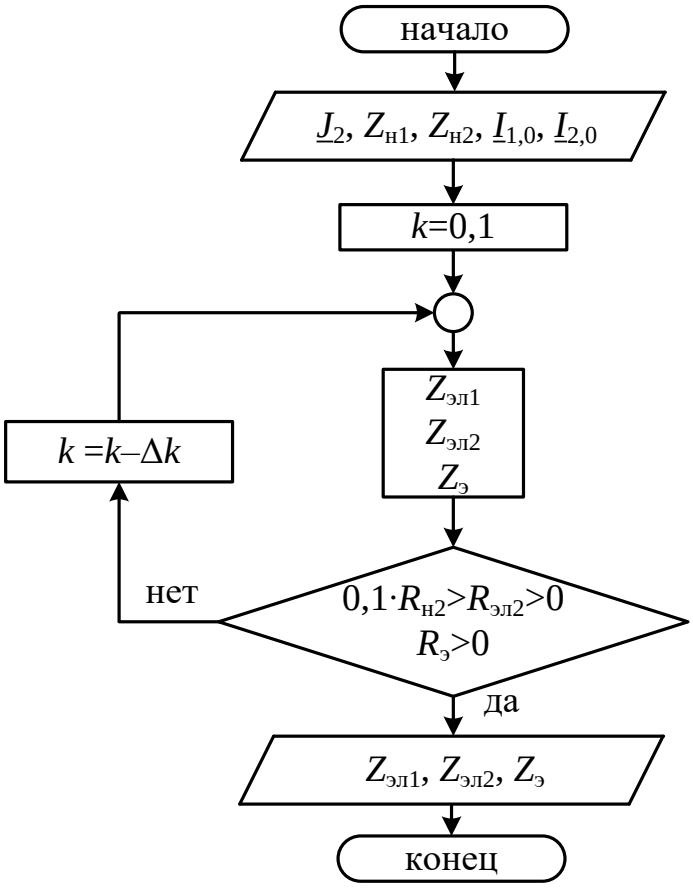


Рисунок 2.4 – Алгоритм определения параметров схемы замещения

Данный алгоритм был реализован в программе расчета параметров трехлучевой схемы замещения (Приложение А, параграф А.1), в которой шрифтом выделены числовые значения – исходные данные для расчета, определяемые составом рассматриваемого электротехнического комплекса систем электроснабжения. Программа представлена в системе компьютерной математики Maple [114]. Помимо расчета необходимых сопротивлений, программа также дополнена расчетом значения источника тока источника второго потребителя – генератора гармоник $\underline{J}_2$ (действующее значение и фазовый угол в градусах) с учетом ограничения по допустимому вкладу в искажение напряжения в ТПЭ1 и ТПЭ2.

Если в электротехническом комплексе присутствуют три и более потребителей – генераторов гармоник, то в предлагаемую схему замещения в ветвь второго потребителя – генератора гармоник вводится обобщенный потребитель – генератор гармоник, параметры которого рассчитываются на основе параметров реальных источников генерации токов гармонических составляющих:

$$\underline{J}_{э2} = \underline{J}_2 + \underline{J}_3 + ... + \underline{J}_M = \sum_{i=2}^{M} \underline{J}_i \,, \tag{2.12}$$

$$Z_{эн2} = \frac{1}{Y_{эн2}},\ Y_{эн2} = Y_{н2} + Y_{н3} + ... + Y_{нM} = \sum_{i=2}^{M} Y_{н,i} \,, \tag{2.13}$$

$$\underline{I}_{э2,0} = \underline{I}_{2,0} + \underline{I}_{3,0} + ... + \underline{I}_{M,0} = \sum_{i=2}^{M} \underline{I}_{i,0} \,, \tag{2.14}$$

где $\underline{J}_{э2}$, $Z_{эн2}$ и $\underline{I}_{э2,0}$ – ток источника, сопротивление и ток в ТПЭ при $\underline{J}_1 = 0$ обобщенного потребителя – генератора гармоник соответственно;

M – число потребителей – генераторов гармоник в электротехническом комплексе.

2.1.2 Определение параметров потребителей – генераторов гармоник для напряжения 6-35 кВ

На схеме замещения для каждой рассматриваемой частоты потребитель – генератор гармоник представляется в виде идеального источника тока $\underline{J}$ и комплексного сопротивления $Z_н$, вывода которых подключаются к общему узлу нейтрали N (рисунок 2.2). Получаемая подобным образом схема замещения является однофазной и должна быть составлена для каждой из фаз в отдельности. При этом существуют различия при определении параметров потребителей – генераторов гармоник, что обусловлено режимом работы нейтрали трансформаторов в сети до 1 кВ и сети 6-35 кВ.

Стоит отметить, что режим работы нейтрали не влияет на определение параметров $Z_{эл1}$, $Z_{эл2}$ и $Z_э$, поскольку данные эквивалентные сопротивления рассчитываются по системе (2.10), в которой предполагается известное распределение токов в электротехническом комплексе систем электроснабжения.

Сеть до 1 кВ является глухозаземленной. Все нейтральные точки потребителей соединены с нейтралью питающего их трансформатора проводником. Нейтральный проводник является путем обратного протекания тока, поэтому, каждая фаза может быть рассмотрена в отдельности независимо от других фаз (взаимоиндукцией фаз пренебрегается). Параметры потребителей – генераторов гармоник, в таком случае, рассчитываются на основе элементарных преобразований последовательно и параллельно соединенных элементов.

Сеть 6-35 кВ работает в режиме изолированной нейтрали. Однозначная связь между нагрузками потребителей, как в случае с глухозаземленной нейтралью, отсутствует. В качестве пути обратного протекания тока одной фазы выступают линейные провода и нагрузки других фаз. В связи с этим можно утверждать, что источник генерации одной фазы будет оказывать влияние на распределение токов в других фазах. Часть токов гармонических составляющих могут замыкаться внутри потребителя и не выходить за ТПЭ. Это обстоятельство

должно учитываться при определении сопротивлений $Z_{н1}$ и $Z_{н2}$ потребителей – генераторов гармоник, которые влияют на распределение токов источников потребителей – генераторов гармоник в предлагаемой схеме замещения.

Для включения в предлагаемую схему замещения трехфазного потребителя – генератора гармоник среднего напряжения он должен быть эквивалентно представлен как ряд однофазных подсистем. Для этого необходимо выполнить следующие действия.

Во-первых, потребитель – генератор гармоник на частоте гармонической составляющей рассматривается обособленно от остального электротехнического комплекса. Составляется его полная схема замещения (рисунок 2.5 а).

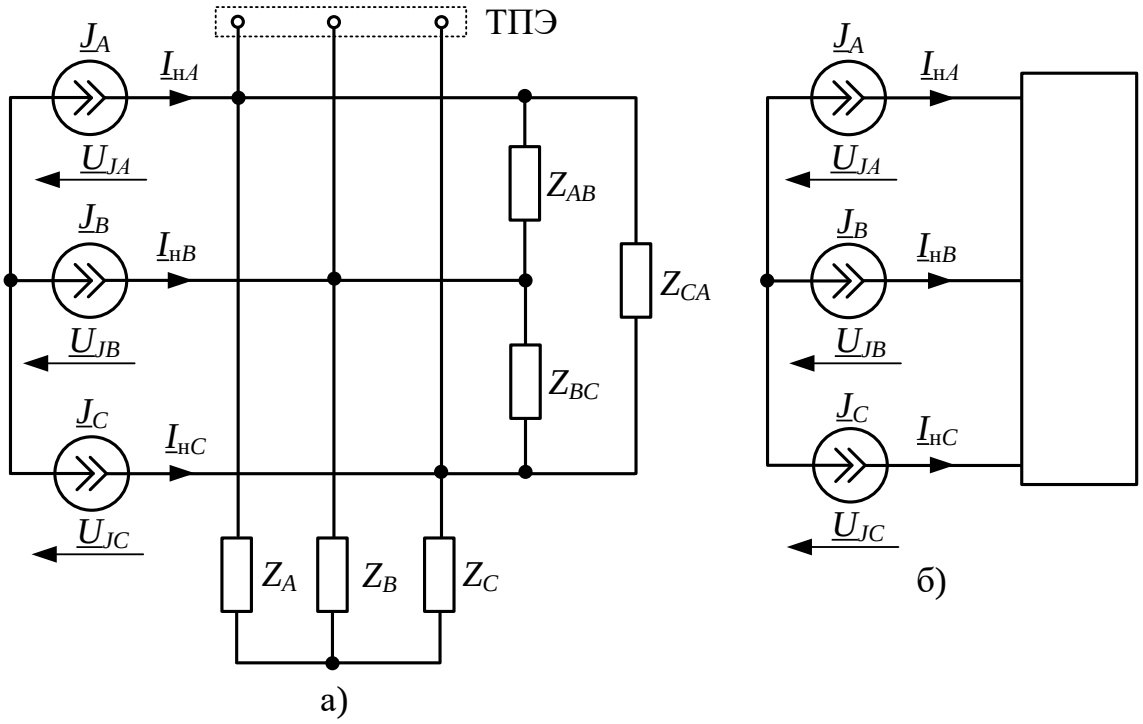


Рисунок 2.5 – Полная трехфазная схема замещения потребителя – генератора гармоник (а) и ее представление в виде пассивного трехполюсника (б)

На рисунке 2.5 а рассматриваемый потребитель представлен трехфазной системой с источником генерации ($\underline{J}_A$, $\underline{J}_B$ и $\underline{J}_C$) и линейными нагрузками, соединенными в звезду (Z_A, Z_B и Z_C) и треугольник (Z_{AB}, Z_{BC} и Z_{CA}).

Далее линейная нагрузка представляется в виде пассивного трехполюсника (рисунок 2.5 б). Трехполюсник представляет собой произвольное соединение

линейных нагрузок. Тогда эквивалентное сопротивление нагрузки в одной фазе, например в фазе *A*, находится по закону Ома:

$$Z_{нA} = \frac{\underline{U}_{JA}}{\underline{J}_A}, \qquad (2.15)$$

где $\underline{U}_{JA}$ – напряжение на источнике тока фазы *A*

Напряжение $\underline{U}_{JA}$ рассчитывается из исходной полной трехфазной схемы замещения потребителя – генератора гармоник (рисунок 2.5 а) и является задачей диагностики электрических цепей, которая может быть быстро решена при использовании современных программных комплексов.

Определяемое по (2.15) сопротивление $Z_н$ является нелинейным. Оно должно пересчитываться при каждом изменении источника тока в одной из фаз. Значения эквивалентных сопротивлений, рассчитанных подобным образом, обеспечивают необходимое распределение токов и напряжений в ветвях потребителей среднего напряжения.

Значения $\underline{J}_A$ и $Z_{нA}$ являются параметрами потребителя – генератора гармоник 6-35 кВ в режиме работы с изолированной нейтралью, которые необходимо использовать в предлагаемой схеме замещения фазы *A* в ветвях потребителей – генераторов гармоник (рисунок 2.2). Для остальных фаз выполняются аналогичные действия и расчеты.

§ 2.2 Достоверность предлагаемой схемы замещения при исследовании несинусоидального режима в ТПЭ

Для дальнейшего применения трехлучевой схемы замещения проводится оценка адекватности ее построения и точности получаемых при помощи нее результатов расчета напряжений и токов гармонических составляющих в ТПЭ на одной из частот гармонического спектра. Точность оценивается относительно результатов, получаемых по полной схеме замещения и принятых в качестве

достоверных. Для этой цели проводится имитационное моделирование электротехнического комплекса в программном комплексе MATLAB Simulink [102]. Проводится сравнение результатов расчета двух моделей. Одна из моделей составлена по полной схеме замещения (рисунок 2.6).

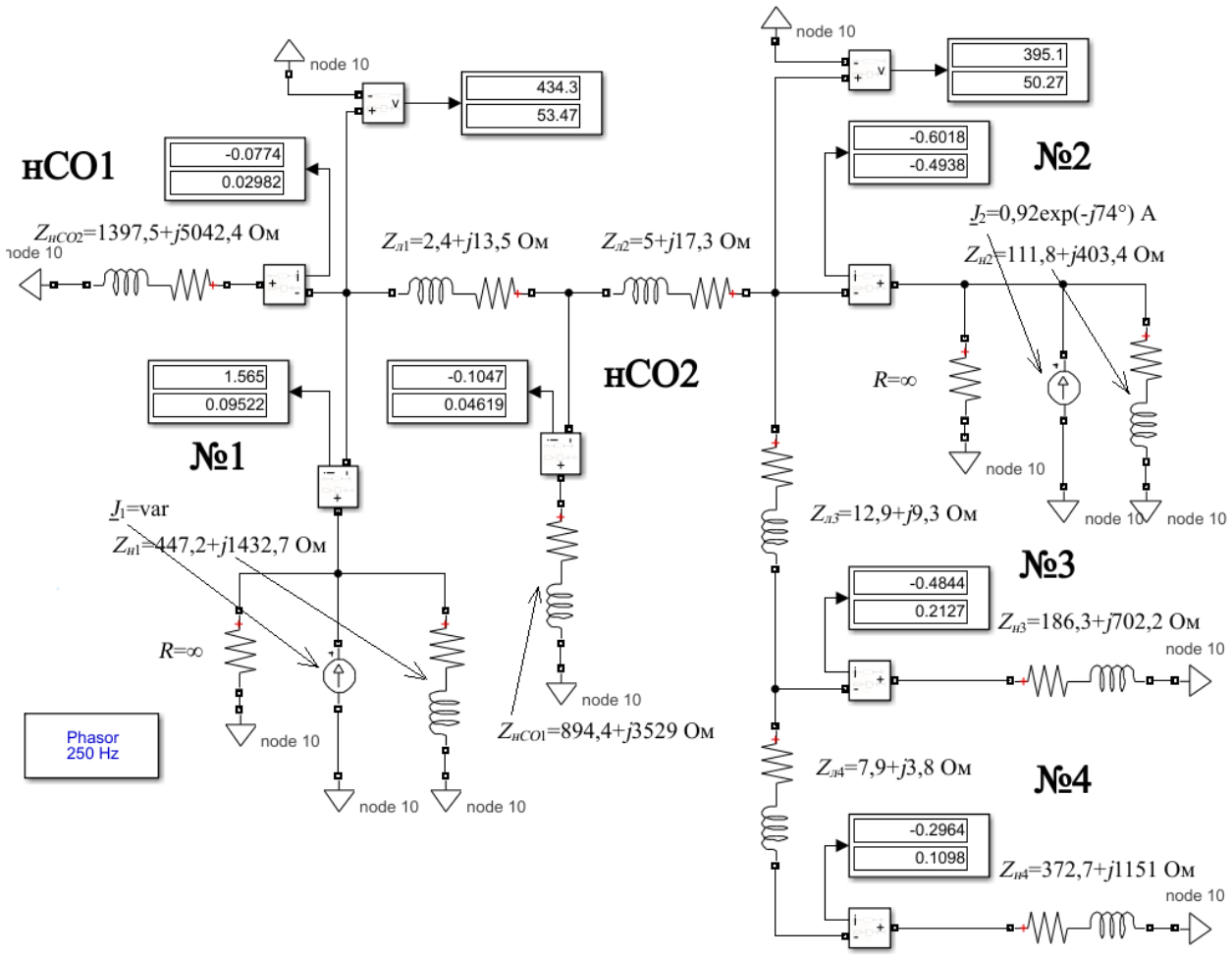


Рисунок 2.6 – Полная схема замещения в MATLAB Simulink

Имитационная модель полной схемы замещения учитывает всех потребителей и связывающие их электротехнические устройства. Схема рассматривается на частоте 250 Гц. Электротехнический комплекс рассматривается в рамках двух потребителей – генераторов гармоник (потребители с нелинейными нагрузками №1 и №2), двух линейных потребителей (потребители №3 и №4), двух нагрузок сетевой организации (нагрузка СО №1 и №2) и линий Л1-Л4. Все параметры потребителей и линий приведены в соответствии с выражениями (1.21) и (1.22) к рассматриваемой частоте.

Потребители – генераторы гармоник представлены идеальным источником тока $\underline{J}$ (нелинейная нагрузка), сопротивлением $Z_н$ (линейная нагрузка) и бесконечным сопротивлением $R=\infty$ для обеспечения симуляции схемы в Simulink.

Параметры потребителей – генераторов гармоник: $\underline{J}_1$ =var, $Z_{н1}$=447,2+ j1432,7 Ом (потребитель №1); $\underline{J}_2 = 0{,}92e^{j30°}$, $Z_{н2}$ = 111,8+j403,4 Ом (потребитель №2).

В общем случае, действующие значения и начальные фазы токов источников $\underline{J}_1$ и $\underline{J}_2$ могут принимать различные значения и не совпадать.

Вторая имитационная модель составлена для трехлучевой схемы замещения (рисунок 2.7).

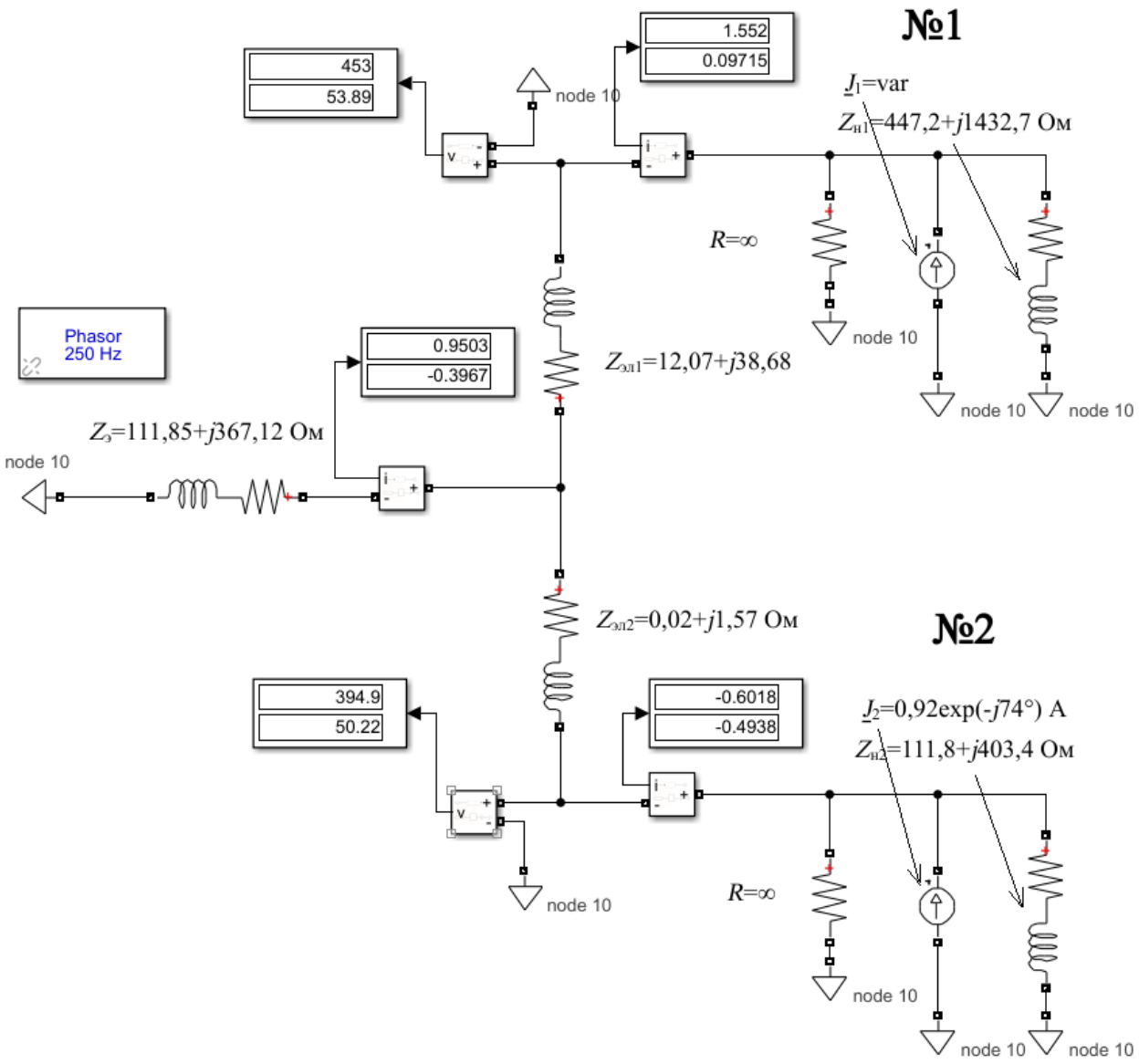


Рисунок 2.7 – Трехлучевая схема замещения в MATLAB Simulink

В соответствии с алгоритмом определения параметров (рисунок 2.4) были рассчитаны при коэффициенте подбора k = 0,027 следующие параметры сопротивлений трехлучевой звезды: $Z_{эл1}$ = 12,0747672 + j38,6817093 Ом, $Z_{эл2}$ = 0,02033342626 + j0,02033342626 Ом, и $Z_э$ = 111,8557588 + j367,1248078 Ом. Параметры потребителей – генераторов гармоник переносятся без изменений.

Аналитический подход предполагает проведение исследования численного критерия – угла фазового сдвига между напряжением и током гармонических составляющих в определенном диапазоне с целью получения анализируемых символьных выражений. Выражение (1.4) предполагает выборку направления потока активной мощности, соответствующего квадранту II и III векторной диаграммы (рисунок 1.10). Эти квадранты соответствуют обнаружению потребителя как источника генерации токов гармонических составляющих.

Выборка направления потока мощности II и III квадранта может быть проведена не только с помощью угла фазового сдвига, но также через положительное значение активного тока относительно выбранного условного положительного направления (УПН) в ТПЭ:

$$I_{\mathrm{a}(n)} > 0. \tag{2.16}$$

Для обнаружения потребителя как источника генерации по (2.16) необходимо, чтобы УПН соответствовало направлению от потребителя в сторону остальной части электротехнического комплекса. Данным УПН соответствуют токи $\underline{I}_1$ и $\underline{I}_2$ на рисунке 2.2.

Использование положительного значения активного тока как критерия источника генерации токов гармонических составляющих является более предпочтительным вариантом при аналитическом подходе, чем использование угла фазового сдвига, по причине получения более поддающихся анализу символьных выражений. В связи с этим, проверка достоверности предлагаемой схемы замещения проводится в рамках определения погрешности для активного тока и модуля напряжения гармонической составляющей при различных значениях тока источника $\underline{J}_1$ исследуемого потребителя – генератора гармоник.

В случае с двумя потребителями – генераторами гармоник получены следующие погрешности при расчете тока (рисунок 2.8, диапазон изменения $\underline{J}_1$ от нуля до $0{,}92e^{j0°}$) и напряжения (рисунок 2.9, диапазон изменения $\underline{J}_1$ от нуля до $2{,}53e^{j0°}$) по предлагаемой схеме замещения относительно полной схемы.

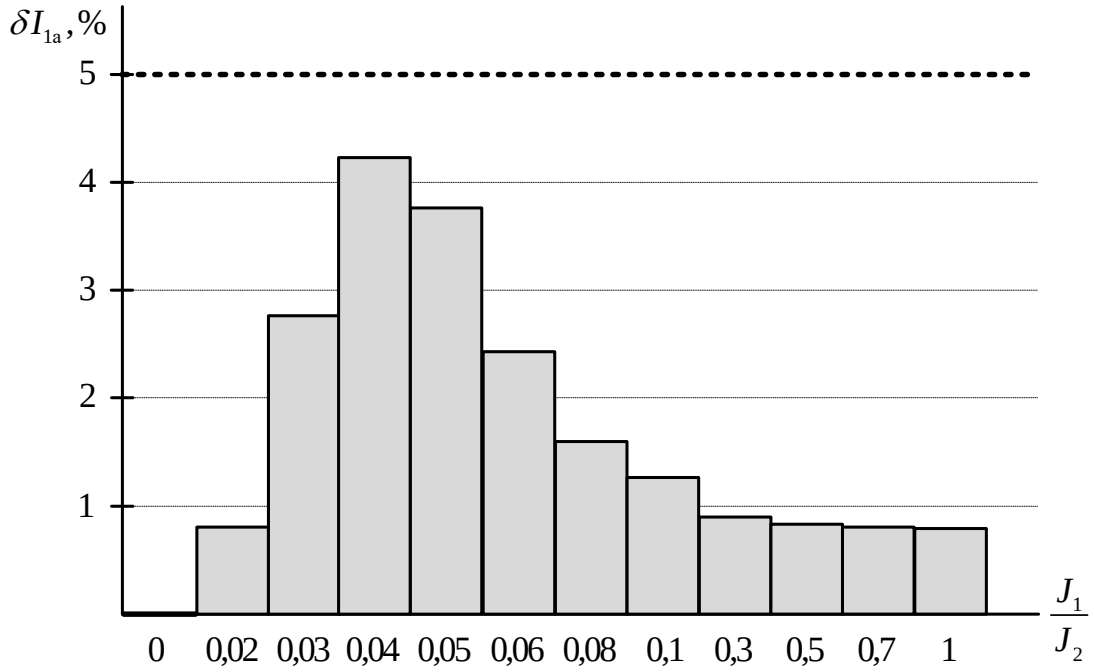


Рисунок 2.8 – Гистограмма погрешности для активного тока

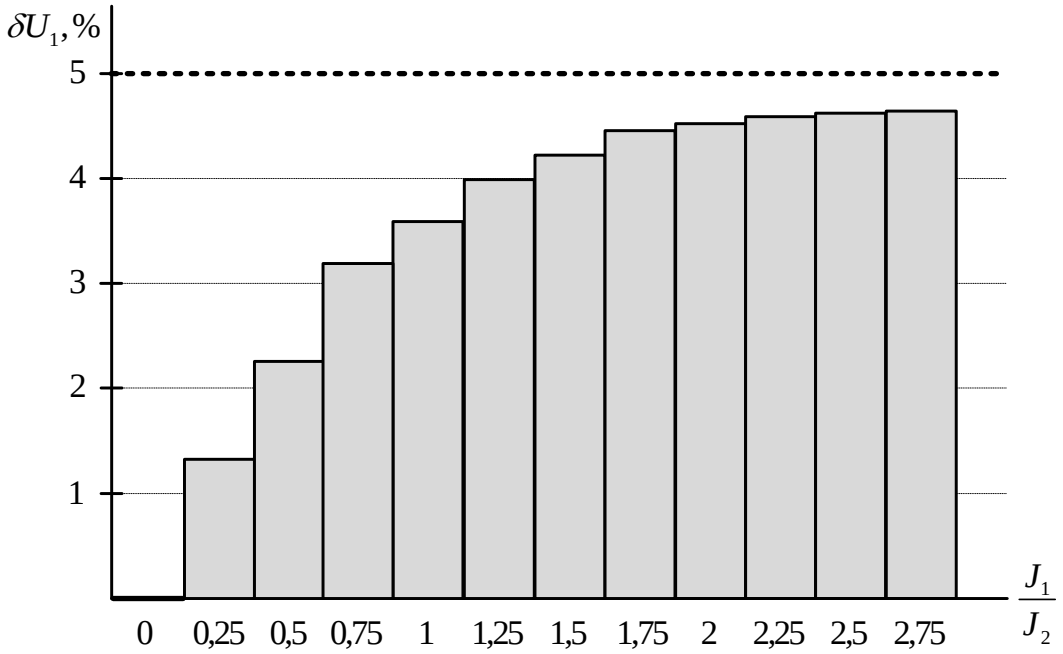


Рисунок 2.9 – Гистограмма погрешности для модуля напряжения

Наибольшая относительная погрешность при определении активного тока в ТПЭ исследуемого потребителя – генератора гармоник по предлагаемой схеме замещения наблюдается вблизи значений тока источника, при которых происходит переход активного тока через ноль (происходит смена направления потока мощности). Диапазон изменения тока источника, при котором происходит скачок погрешности, достаточно мал.

Погрешность при определении модуля напряжения гармонической составляющей в ТПЭ растет прямо пропорционально росту значения источника тока и в районе около 4,6..4,8 % останавливает свой рост.

Таким образом, в случае с двумя источниками генерации токов гармонических составляющих схема замещения в виде трехлучевой обеспечивает точность требуемых расчетов с погрешностью, не превышающей установленные для инженерных расчетов 5 %.

По аналогии с двумя потребителями – генераторами гармоник также были рассмотрены случаи, когда в электротехническом комплексе встречались от 3 до 5 источников генерации токов гармонических составляющих. Для схем различных конфигураций и числом источников генерации были получены следующие погрешности (таблица 2.1).

Таблица 2.1 – Максимальная относительная погрешность расчетов по предлагаемой схеме замещения

№ п/п	**Рассматриваемый случай**	**$\delta I_{1a,max}$, %**	**$\delta U_{1,max}$, %**
1	Схема с двумя 2 генераторами гармоник	4,30	4,70
2	3 генератора гармоник	1,55	1,63
3	4 генератора гармоник	2,27	3,68
4	5 генераторов гармоник	2,55	4,09
5	2 генератора гармоник с резонансом в схеме	0,89	-
6	5 генераторов гармоник с резонансом в схеме	5,78	-

Использование предлагаемой схемы замещения в виде трехлучевой звезды во всех рассмотренных случаях позволяет на 20 % сократить время проведения расчетов токов и напряжений относительно полной схемы замещения с допустимой для инженерных расчетов точностью.

В электротехническом комплексе могут возникать резонансные явления [3, 74, 83, 87], сопровождающиеся протеканием сверхтоков или возникновением перенапряжений. Как известно, резонанс возникает в цепи, содержащей катушку индуктивности и конденсатор, при равенстве индуктивного $X_{L(n)}$ и емкостного $X_{C(n)}$ сопротивлений на определенной частоте гармонической составляющей [128]. При параллельном соединении катушки индуктивности и конденсатора входное сопротивление участка цепи становится равным бесконечности (резонанс токов), а при последовательном их соединении входное сопротивление равно нулю (резонанс напряжений).

При проектировании электротехнических комплексов систем электроснабжения, а также их эксплуатации стараются избегать возникновения резонансных явлений [47, 77], поскольку они могут приводить к авариям и выходу из строя электротехнических устройств [48]. Однако полностью избежать возникновения резонансов невозможно.

В связи с этим, требуется проверка достоверности результатов схемы замещения в виде трехлучевой звезды при резонансе на частоте гармонической составляющей. Поскольку резонанс напряжений или токов представляет собой уменьшенное или увеличенное сопротивление отдельных ветвей цепи, влияющее на распределение токов гармонических составляющих, то предлагаемая схема замещения при расчете ее параметров по системе (2.10) учитывает данные нежелательные явления.

Для оценки адекватности рассматривается полная схема замещения с двумя источниками генерации на частоте 250 Гц при резонансе напряжения с параметрами конденсатора и катушки индуктивности C = 63,66 мкФ и L = 6,36 мГн соответственно (рисунок 2.10).

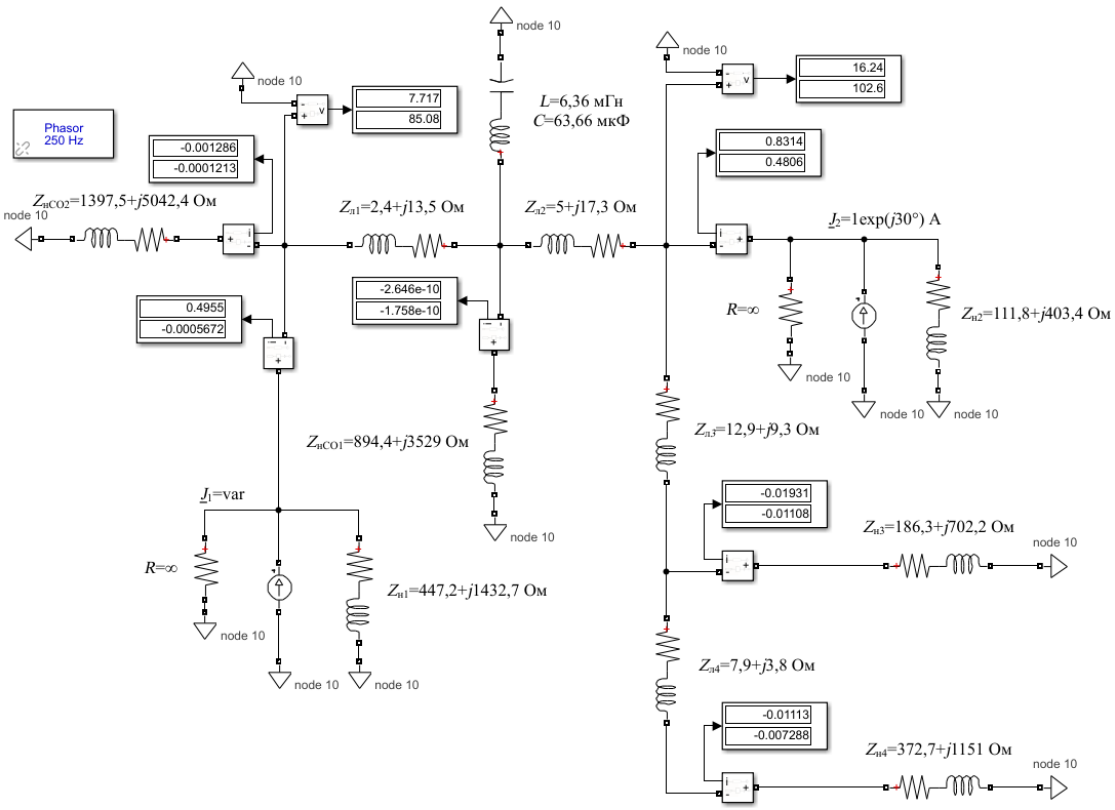


Рисунок 2.10 – Полная схема замещения с резонансом в MATLAB Simulink

Для полной схемы замещения, представленной на рисунке 2.10, параметры трехлучевой схемы замещения представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Параметры трехлучевой схемы замещения при резонансе

Параметр схемы	**Значение, Ом**
$Z_{эл1}$	0+*j*0
$Z_{эл2}$	4,84+*j*16,61
$Z_{э}$	0+*j*0
$Z_{н1}$	447,2+*j*1432,7
$Z_{н2}$	111,8+*j*403,4

Результаты оценки точности предлагаемой схемы замещения при резонансе представлены в п. 5 и 6 таблицы 2.1. В отдельных случаях, погрешность при расчете токов в ТПЭ потребителей – генераторов гармоник увеличивается, но не превышает 10 %. Учитывая случайный и редкий характер появления резонансных явлений, трехлучевая схема замещения обладает достаточной для инженерных расчетов точностью и может быть использована для аналитического подхода.

§ 2.3 Выражения математической модели и ее ограничения

На основании предлагаемой схемы замещения в виде трехлучевой звезды (рисунок 2.2) была выведена математическая модель для исследования обнаружения источников генерации токов гармонических составляющих. Математическая модель позволяет определить принадлежность потребителя – генератора гармоник к категории обнаруженного или необнаруженного. При обнаружении потребителя – генератора гармоник как источника генерации к нему может быть применено управляющее воздействие, направленное на снижение или устранение генерации токов гармонических составляющих.

Определение принадлежности к категории обнаруженного или необнаруженного генератора гармоник ведется по значению активного тока гармонической составляющей в ТПЭ (2.16). Если направление активного тока совпадает с принятым УПН от потребителя в сторону сетевой организации, что соответствует его положительному значению, то потребитель может быть обнаружен как источник генерации токов гармонических составляющих.

При исследовании в качестве переменной величины принимается значение источника тока исследуемого потребителя – генератора гармоник $\underline{J}_1$. Эта же величина будет использована в дальнейшем при формировании аналитических критериев. Для расширения области получаемых результатов математическая модель и переменная $\underline{J}_1$ выражаются в относительных единицах. Расчеты ведутся относительно тока источника второго потребителя – генератора гармоник $\underline{J}_2$. При необходимости результаты также могут быть получены и в именованных единицах.

Цель создания математической модели заключается в исследовании обнаружения потребителя – генератора гармоник как источника генерации токов гармонических составляющих для вывода аналитических критериев, позволяющих получить более общие выводы по обнаружению источников генерации и ответить на поставленные в параграфе 1.3 вопросы. Это позволит

повысить эффективность принимаемых по результатам мониторинга КЭ мер, направленных на снижение или устранение генерации токов гармонических составляющих.

Математическая модель представляет собой набор выражений в относительных единицах вида $y^* = f\left(\frac{\underline{J}_1}{\underline{J}_2}\right)$:

1. Для активных токов гармонической составляющей в ТПЭ потребителей – генераторов гармоник:

$$\frac{I_{1а}}{J_2} = \mathrm{Re}\left(\frac{\underline{I}_1}{\underline{J}_2}\right) = \mathrm{Re}\left(Z_{н1} \cdot \frac{Z_2 + Z_э}{\Delta} \cdot \frac{\underline{J}_1}{\underline{J}_2} - Z_{н2} \cdot \frac{Z_э}{\Delta}\right), \tag{2.17}$$

$$\frac{I_{2а}}{J_2} = \mathrm{Re}\left(\frac{\underline{I}_2}{\underline{J}_2}\right) = \mathrm{Re}\left(Z_{н1} \cdot \frac{Z_э}{\Delta} \cdot \frac{\underline{J}_1}{\underline{J}_2} - Z_{н2} \cdot \frac{Z_1 + Z_э}{\Delta}\right), \tag{2.18}$$

где Δ – главный определитель, равный $Z_э \cdot (Z_1 + Z_2) + Z_1 \cdot Z_2$;

Z_1 – сопротивление ветви исследуемого потребителя – генератора гармоник, равное $Z_{н1} + Z_{эл1}$;

Z_2 – сопротивление ветви второго потребителя – генератора гармоник, равное $Z_{н2} + Z_{эл2}$.

2. Для действующих значений напряжений в ТПЭ потребителей – генераторов гармоник:

$$\frac{U_1}{J_2} = \left| Z_{н1} \cdot \left(\frac{Z_э \cdot Z_2 + Z_{эл1} \cdot (Z_2 + Z_э)}{\Delta} \cdot \frac{\underline{J}_1}{\underline{J}_2} + Z_{н2} \cdot \frac{Z_э}{\Delta} \right) \right|, \tag{2.19}$$

$$\frac{U_2}{J_2} = \left| Z_{н2} \cdot \left(Z_{н1} \cdot \frac{Z_э}{\Delta} \cdot \frac{\underline{J}_1}{\underline{J}_2} + \frac{Z_э \cdot Z_1 + Z_{эл2} \cdot (Z_1 + Z_э)}{\Delta} \right) \right|. \tag{2.20}$$

3. Для *граничных значений* тока источника исследуемого потребителя – генератора гармоник $\underline{J}_1$:

$$\frac{\underline{J}_{гр1}}{\underline{J}_2} = \frac{Z_{н2} \cdot Z_э}{Z_{н1} \cdot (Z_2 + Z_э)}, \tag{2.21}$$

$$\frac{\underline{J}_{\text{гр},2}}{\underline{J}_2} = \frac{Z_{\text{н}2} \cdot \left(Z_1 + Z_{\text{э}}\right)}{Z_{\text{н}1} \cdot Z_{\text{э}}}. \qquad (2.22)$$

Категория обнаруженного потребителя – генератора гармоник соответствует случаю, когда системой мониторинга в ТПЭ зарегистрирован такой угол фазового сдвига гармонических составляющих, находящийся в определенном диапазоне (1.4), что позволяет обнаружить потребителя как источника генерации токов гармонических составляющих. Категория необнаруженного генератора гармоник соответствует обратному случаю, когда системой мониторинга регистрируется мощность гармонических составляющих прямого направления и потребитель не может быть обнаружен как источник генерации.

При изменении тока источника $\underline{J}_1$ существуют такие характерные значения, при которых потребитель может менять свою категорию. При этом происходит смена направления активного тока (мощности) гармонических составляющих в ТПЭ. Такие значения является граничными при определении источников генерации токов гармонических составляющих.

Таким образом, **граничные значения** представляют собой такие значения тока источника исследуемого потребителя – генератора гармоник $\underline{J}_1$, при котором потребители – генераторы гармоник меняют категорию с необнаруженного на обнаруженного и наоборот. Граничное значение $\underline{J}_{\text{гр},1}$ соответствует смене категории исследуемого потребителя – генератора гармоник, а значение $\underline{J}_{\text{гр},2}$ – второго потребителя – генератора гармоник.

4. Для *допустимых значений* тока источника $\underline{J}_1$:

$$\frac{\underline{J}_{1\text{доп},1}}{\underline{J}_2} = \left(\frac{K_{U(n)} \cdot \underline{U}_0}{100 \cdot \sqrt{3} \cdot \underline{J}_2} - \frac{Z_{\text{н}1} \cdot Z_{\text{н}2} \cdot Z_{\text{э}}}{\Delta} \right) \cdot \left(\frac{1}{Z_{\text{н}1}} \cdot \frac{\Delta}{Z_{\text{э}} \cdot Z_2 + Z_{\text{эл}1} \cdot \left(Z_2 + Z_{\text{э}}\right)} \right), \qquad (2.21)$$

$$\frac{\underline{J}_{1\text{доп},2}}{\underline{J}_2} = \left(\frac{K_{U(n)} \cdot \underline{U}_0}{100 \cdot \sqrt{3} \cdot \underline{J}_2} - Z_{\text{н}2} \cdot \frac{Z_{\text{э}} \cdot Z_1 + Z_{\text{эл}2} \cdot \left(Z_1 + Z_{\text{э}}\right)}{\Delta} \right) \cdot \frac{\Delta}{Z_{\text{н}1} \cdot Z_{\text{н}2} \cdot Z_{\text{э}}}, \qquad (2.22)$$

где $\underline{U}_0$ – напряжение, равное стандартному номинальному ($\underline{U}_{ном}$) или согласованному ($\underline{U}_с$).

В случае нулевого значения тока источника исследуемого потребителя – генератора гармоник ($\underline{J}_1$.= 0) напряжения гармонических составляющих в ТПЭ обусловлены только током второго потребителя – генератора гармоник $\underline{J}_2$. При увеличении тока источника $\underline{J}_1$ напряжения в ТПЭ являются результатом генерации двух источников тока. Поскольку в ТПЭ допускается некоторое напряжение гармонических составляющих $\underline{U}_{доп}$, модуль которого нормируется п. 4.2.4 ГОСТ 32144-2013 через коэффициенты гармонических составляющих $K_{U(n)}$ [42], то существуют такие **допустимые значения** тока источника $\underline{J}_1$, при которых исследуемый потребитель – генератор гармоник достигает своего порогового значения допустимого вклада в искажение напряжения $\underline{U}_{1доп}$ в ТПЭ.

Допустимое значение $\underline{J}_{1доп,1}$ соответствует значению тока источника, при котором исследуемый потребитель достигает порога своего допустимого вклада в искажение напряжения в ТПЭ1, а значение $\underline{J}_{1доп,2}$ – порога допустимого вклада в ТПЭ2.

Для обособленного исследования генерации токов гармонических составляющих исследуемым потребителем – генератором гармоник с учетом двухстороннего вклада в искажение напряжения в ТПЭ необходимо ограничить вклад второго потребителя – генератора гармоник. Для этого значение тока источника $\underline{J}_2$ фиксируется и более не изменяется. На его значение, по аналогии с рассмотренным ранее допустимым значением тока источника $\underline{J}_1$, накладывается ограничение по допустимому вкладу.

Ток источника второго потребителя – генератора гармоник рассчитывается исходя из не превышения им своего порогового значения допустимого вклада в искажение напряжения в ТПЭ1 и ТПЭ2:

$$\underline{J}_{2доп,1} = \frac{K_{U(n)} \cdot \underline{U}_0 \cdot \left(1 - d_{1доп,1}\right)}{100 \cdot \sqrt{3}} \cdot \frac{\Delta}{Z_{н1} \cdot Z_{н2} \cdot Z_э}, \qquad (2.23)$$

$$\underline{J}_{2\text{доп},2} = \frac{K_{U(n)} \cdot \underline{U}_0 \cdot \left(1 - d_{1\text{доп},2}\right)}{100 \cdot \sqrt{3}} \cdot \left(\frac{1}{Z_{\text{н}2}} \cdot \frac{\Delta}{Z_{\text{э}} \cdot Z_1 + Z_{\text{эл}2} \cdot \left(Z_1 + Z_{\text{э}}\right)} \right), \qquad (2.24)$$

где $d_{1\text{доп},1}$ и $d_{1\text{доп},2}$ – доли допустимого вклада исследуемого потребителя – генератора гармоник по напряжениям искажения в ТПЭ1 и ТПЭ2.

Из полученных по выражениям значений выбирается наименьшее.

В соответствии с методикой расчета допустимого вклада, изложенной в Правилах [97], если ТПЭ потребителей – генераторов гармоник не совпадают, например, находятся на шинах разных подстанций или отпайках, то доли допустимого вклада $d_{1\text{доп},1}$ и $d_{1\text{доп},2}$ могут быть приняты равными 0,5. Если потребители подключены на одну секцию сборных шин, то доли высчитываются в соответствии с их мощностями.

Выражения (2.23) и (2.24) являются первым ограничением в математической модели. Второе ограничение связано с диапазоном изменения тока источника $\underline{J}_1$.

Как было отмечено выше, с увеличением тока источника растут и гармонические составляющие напряжения в ТПЭ. Очевидно, что при отсутствии резонансных явлений гармонические составляющие напряжения составляют проценты от напряжения основной частоты и могут только в несколько раз превышать установленные стандартами нормы. Поэтому, крайний максимальный предел диапазона изменения тока источника исследуемого потребителя – генератора гармоник ограничивается пятикратным превышением установленных норм для напряжений гармонических составляющих:

$$\frac{\underline{J}_{1\max,1}}{\underline{J}_2} = \left(\frac{5 \cdot K_{U(n)} \cdot \underline{U}_0}{100 \cdot \sqrt{3} \cdot \underline{J}_2} - \frac{Z_{\text{н}1} \cdot Z_{\text{н}2} \cdot Z_{\text{э}}}{\Delta} \right) \cdot \left(\frac{1}{Z_{\text{н}1}} \cdot \frac{\Delta}{Z_{\text{э}} \cdot Z_2 + Z_{\text{эл}1} \cdot \left(Z_2 + Z_{\text{э}}\right)} \right), \qquad (2.25)$$

$$\frac{\underline{J}_{1\max,2}}{\underline{J}_2} = \left(\frac{5 \cdot K_{U(n)} \cdot \underline{U}_0}{100 \cdot \sqrt{3} \cdot \underline{J}_2} - Z_{\text{н}2} \cdot \frac{Z_{\text{э}} \cdot Z_1 + Z_{\text{эл}2} \cdot \left(Z_1 + Z_{\text{э}}\right)}{\Delta} \right) \cdot \frac{\Delta}{Z_{\text{н}1} \cdot Z_{\text{н}2} \cdot Z_{\text{э}}}. \qquad (2.26)$$

Из полученных значений выбирается наибольшее.

§ 2.4 Возможности математической модели

Известные математические модели, направленные на исследование обнаружения источников генерации токов гармонических составляющих, не позволяют оценить области обнаружения и не обнаружения потребителей при изменении параметров схемы замещения, например, тока источника $\underline{J}_1$.

В отличие от них, предлагаемая математическая модель позволяет это сделать. На рисунке 2.11 представлен график зависимости активных токов в ТПЭ потребителей – генераторов гармоник от соотношения токов источников.

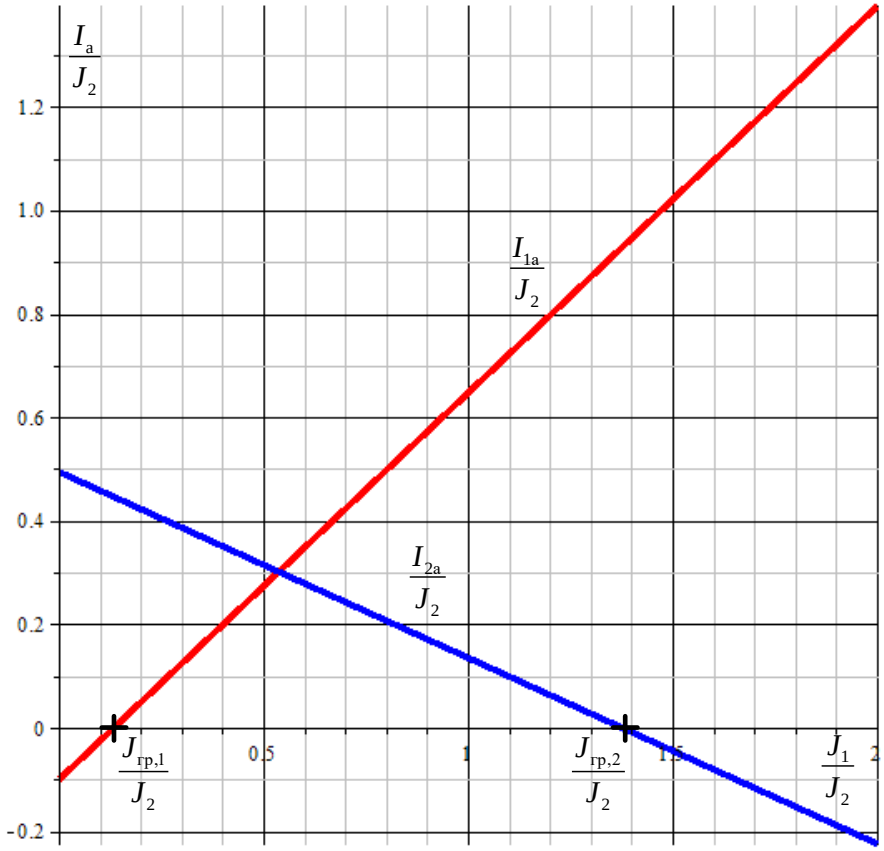


Рисунок 2.11 – График зависимости токов от соотношения токов источников

Для наглядности график ограничен соотношением токов источников, равным двум. Программа расчета в среде Maple, позволяющая его построить, представлена в параграфе А.2 Приложения А.

Данный график имеет практическую значимость для управления КЭ в части несинусоидальности, поскольку позволяет получить информацию о размере зон

обнаружения и не обнаружения потребителя и их долевом соотношении, на основании которых можно: оценить частоту обнаружения потребителя; выделить условия, которые в большей степени влияют на размер зон обнаружения; посмотреть при определенном составе и структуре комплекса может ли потребитель всегда быть обнаруженным или он никогда не будет обнаружен.

На рисунке 2.11 увеличение тока источника исследуемого потребителя – генератора гармоник $\underline{J}_1$ имеет различное влияние на обнаружение источников генерации. Так, увеличение значения $\underline{J}_1$ положительно сказывается на обнаружении исследуемого потребителя – генератора гармоник. Если на промежутке изменения соотношения токов источника от нуля до $\underline{J}_{гр,1}$ потребителя невозможно обнаружить как источник генерации, то с изменением направления тока $\underline{I}_{a1}$ в ТПЭ и переходу к диапазону от $\underline{J}_{гр,1}$ до двух потребителя уже возможно обнаружить, что соответствует зоне обнаруженного генератора гармоник.

Однако рост тока источника $\underline{J}_1$ отрицательно сказывается на обнаружении второго потребителя – генератора гармоник. Если промежуток от нуля до $\underline{J}_{гр,2}$ соответствует обнаруженному генератору гармоник, то после превышения значения $\underline{J}_{гр,2}$ активный ток в ТПЭ второго потребителя – генератора гармоник становится отрицательным и потребитель становится не обнаруживаемым.

Диапазон изменения тока источника исследуемого потребителя – генератора гармоник может быть разбит на следующие зоны:

- от нуля $\underline{J}_{гр,1}$. В данной зоне возможно обнаружение только второго потребителя – генератора гармоник;

- от $\underline{J}_{гр,1}$ до $\underline{J}_{гр,2}$. В этой зоне, соответствующей положительным значения активных токов в обеих ТПЭ генераторов гармоник, возможно обнаружение всех источников генерации токов гармонических составляющих. Данная зона является наиболее желательной в плане подавления источников генерации;

- превышение $\underline{J}_{гр,2}$. В последней зоне возможно обнаружение только исследуемого потребителя – генератора гармоник. Второй потребитель становится необнаруженным источником генерации.

Таким образом, заключение об обнаружении или не обнаружении потребителей как источников генерации возможно на основании граничных значений тока источника $\underline{J}_{гр}$.

Математическая модель также позволяет проследить изменение гармонической составляющей напряжения в ТПЭ потребителей – генераторов гармоник при различном соотношении токов источников (рисунок 2.12, на котором диапазон изменения токов показан от нуля до трех).

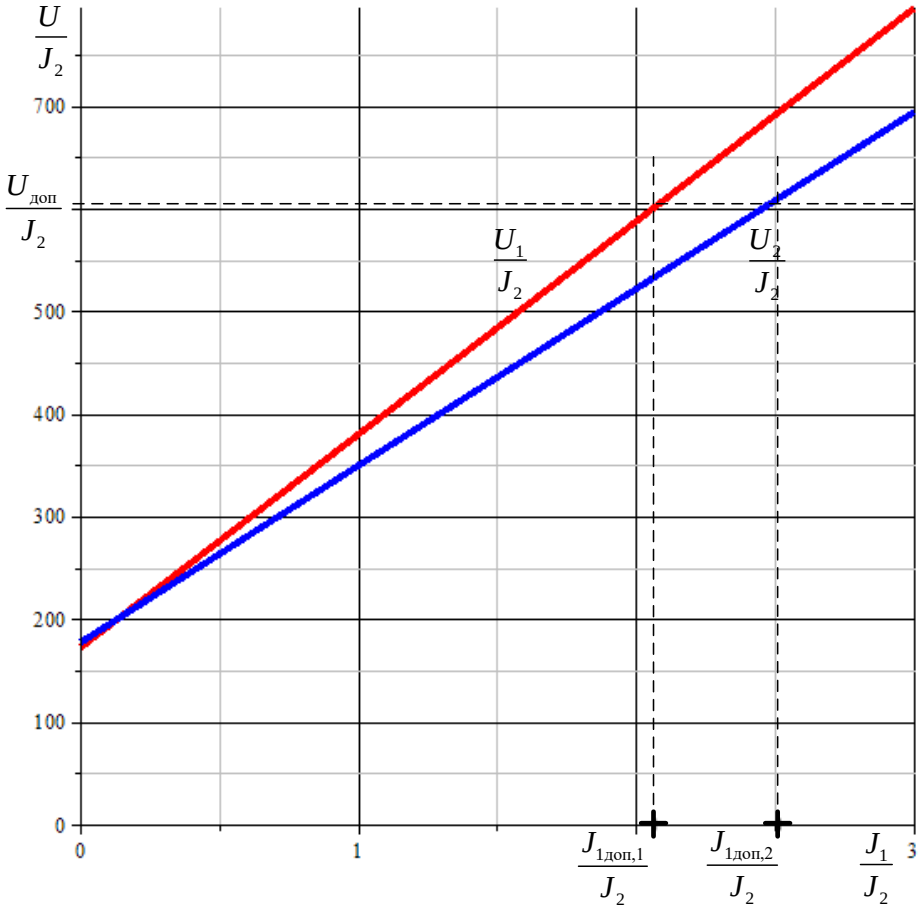


Рисунок 2.12 – График зависимости напряжений в ТПЭ от соотношения токов источников

Увеличение тока источника $\underline{J}_1$ оказывает одинаковое влияние на оба напряжения гармонических составляющих. С ростом $\underline{J}_1$ напряжения также растут.

С учетом допустимых напряжений гармонических составляющих, определяемых нормами ГОСТ 32144-2013 и долевым вкладом, диапазон соотношения токов источников также может быть разбит на несколько зон:

- от нуля до $\underline{J}_{1доп,1}$. В данной зоне отсутствуют нарушения требований стандарта ГОСТ 32144-2013 к КЭ в части несинусоидальности – гармоническая составляющая напряжения на частоте 250 Гц не превышает допустимые 400 В (в относительных единицах – 615 В);

- от $\underline{J}_{1доп,1}$ до $\underline{J}_{1доп,2}$. В ТПЭ1 наблюдается превышение допустимого напряжения гармонической составляющей;

- превышение $\underline{J}_{1доп,2}$. В последней зоне в обеих ТПЭ потребителей – генераторов гармоник превышено допустимое напряжение гармонической составляющей 5-ого порядка.

Совмещая графики активных токов и напряжений гармонических составляющих (рисунок 2.13) получаем полную наглядную информацию по несинусоидальному режиму в ТПЭ с учетом источников генерации, необходимую для принятия мер по подавлению источников генерации.

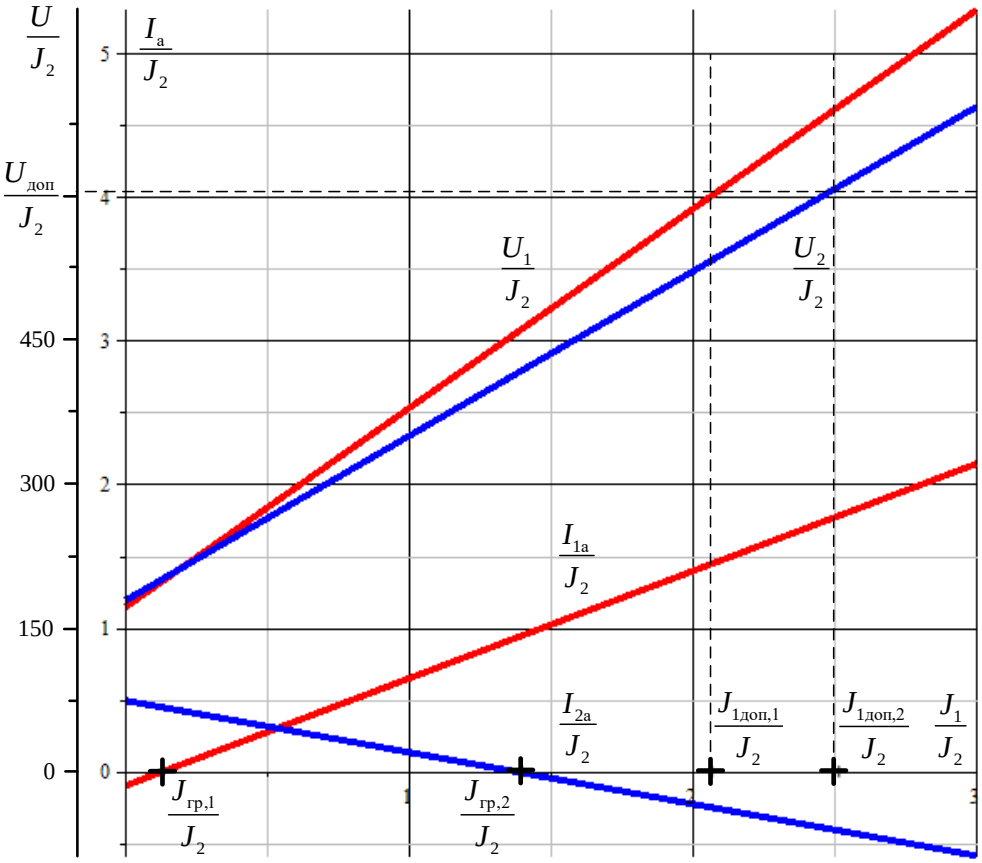


Рисунок 2.13 – График зависимости активных токов и напряжений от соотношения токов источников

Из рисунка 2.13 можно сделать вывод о том, что при ограниченном допустимым вкладом значении тока источника второго потребителя – генератора гармоник (2.23) и (2.24) исследуемый потребитель – генератор гармоник будет обнаружен как источник генерации токов гармонических составляющих раньше, чем будут нарушены требования к КЭ в части несинусоидальности в обеих ТПЭ.

Таким образом, в рассматриваемых условиях для принятия мер, направленных на снижение или устранение генерации токов гармонических составляющих, достаточно измерения только гармонических составляющих напряжения в ТПЭ. При регистрации системой мониторинга превышения установленных норм по ПКЭ – коэффициенту гармонических составляющих напряжения $K_{U(n)}$ – потребитель будет обнаружен как источник генерации токов гармонических составляющих, что позволит применить к нему управляющее воздействие, побуждающее его к участию в инвестиционном проекте установки и эксплуатации ФКУ или АФ.

§ 2.5 Влияние установки фильтров на категорию потребителей – генераторов гармоник

Предлагаемые трехлучевая схема замещения и математическая модель позволяют оценить влияние установки и дальнейшей эксплуатации исследуемым потребителем – генератором гармоник ФКУ или АФ на обнаружение других источников генерации и на вредные последствия протекания токов гармонических составляющих, связанные с генерацией его нелинейной нагрузкой.

Для оценки влияния установки фильтров гармоник на обнаружение источников генерации необходимо провести анализ выражений для активных токов в ТПЭ $I_{1а}$ и $I_{2а}$ до и после установки фильтров. Для оценки влияния установки фильтров на вредные последствия необходимо рассмотреть токи в нагрузке $\underline{I}_{н1}$ и $\underline{I}_{н2}$. При этом УПН токов в ТПЭ должны соответствовать случаю,

когда исследуемый потребитель – генератор гармоник является обнаруженным источником, а второй потребитель – генератор гармоник – необнаруженным. Это соответствует УПН токов в схеме замещения, представленной на рисунке 2.14.

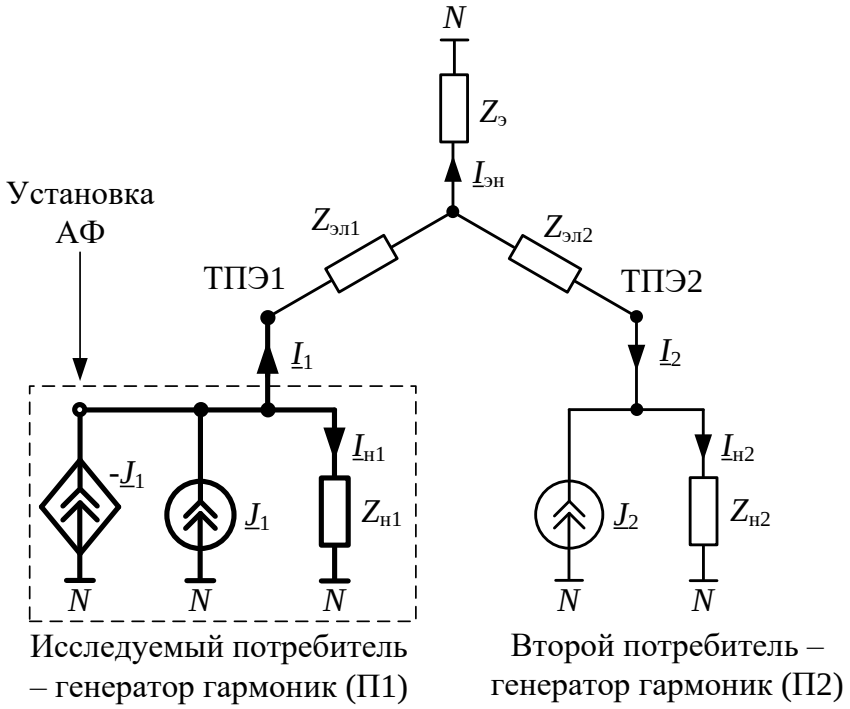


Рисунок 2.14 – Схема замещения для оценки влияния установки фильтров

В схеме на рисунке 2.14 выражения для активных токов в ТПЭ и нагрузках потребителей – генераторов гармоник до установки фильтров имеют вид:

$$I_{1а} = \mathrm{Re}\left(\underline{I}_1\right) = \mathrm{Re}\left(Z_{н1} \cdot \frac{Z_2 + Z_э}{\Delta} \cdot J_1 - Z_{н2} \cdot \frac{Z_э}{\Delta} \cdot J_2 \right) > 0, \tag{2.26}$$

$$I_{2а} = \mathrm{Re}\left(\underline{I}_2\right) = \mathrm{Re}\left(Z_{н1} \cdot \frac{Z_э}{\Delta} \cdot J_1 - Z_{н2} \cdot \frac{Z_1 + Z_э}{\Delta} \cdot J_2 \right) > 0, \tag{2.27}$$

$$\underline{I}_{н1} = \frac{Z_э \cdot Z_2 + Z_{эл1} \cdot \left(Z_2 + Z_э\right)}{\Delta} \cdot J_1 + Z_{н2} \cdot \frac{Z_э}{\Delta} \cdot J_2, \tag{2.28}$$

$$\underline{I}_{н2} = Z_{н1} \cdot \frac{Z_э}{\Delta} \cdot J_1 + \frac{Z_э \cdot Z_1 + Z_{эл2} \cdot \left(Z_1 + Z_э\right)}{\Delta} \cdot J_2. \tag{2.29}$$

В выражениях для токов в нагрузках потребителей присутствуют две составляющие, образованные источниками тока $\underline{J}_1$ и $\underline{J}_2$, которыми представлена нелинейная нагрузка. Таким образом, не зависимо от направления активного тока

в ТПЭ и числа обнаруженных потребителей – генераторов гармоник, вредные последствия обусловлены генерацией токов гармонических составляющих обоих потребителей – генераторов гармоник.

В случае установки АФ исследуемым потребителем – генератором гармоник (на рисунке 2.14 показано подключением управляемого источника тока со значение -$\underline{J}_1$) выражения (2.26)-(2.29) примут вид:

$$I_{1а} = \mathrm{Re}\left(\underline{I}_1\right) = -\mathrm{Re}\left(Z_{н2} \cdot \frac{Z_э}{\Delta} \cdot J_2\right) < 0, \tag{2.30}$$

$$I_{2а} = \mathrm{Re}\left(\underline{I}_2\right) = -\mathrm{Re}\left(Z_{н2} \cdot \frac{Z_1 + Z_э}{\Delta} \cdot J_2\right) < 0, \tag{2.31}$$

$$\underline{I}_{н1} = Z_{н2} \cdot \frac{Z_э}{\Delta} \cdot J_2, \tag{2.32}$$

$$\underline{I}_{н2} = \frac{Z_э \cdot Z_1 + Z_{эл2} \cdot \left(Z_1 + Z_э\right)}{\Delta} \cdot J_2. \tag{2.33}$$

Во всех выражениях отсутствует составляющая, связанная с током $\underline{J}_1$ (она компенсируется управляемым током АФ -$\underline{J}_1$). Таким образом, установка АФ потребителем – генератором гармоник позволила не только устранить вредные последствия, связанные с его генерацией, но и обнаружить второй источник генерации (таблица 2.3). После установки фильтра токи в ТПЭ поменяли свое направление и второй потребитель – генератор гармоник стал обнаруженным.

Таблица 2.3 – Влияние установки фильтров

	Категория потребителей – генераторов гармоник		Вредные последствия	
	до АФ	после АФ	до АФ	после АФ
П1	Обнаруженный	Устранивший генерацию	Связаны с генерацией	Не связаны с генерацией
П2	Необнаруженный	Обнаруженный	Связаны с генерацией	Связаны с генерацией

Выводы по второй главе

1. Для проведения аналитического подхода по обнаружению источников генерации токов гармонических составляющих предложена трехлучевая схема замещения с выделением в первый луч исследуемого потребителя – генератора гармоник, во второй луч – остальных потребителей – генераторов гармоник, и в третий луч – линейных потребителей, включая нагрузку собственных нужд сетевой организации.

2. Использование предлагаемой схемы замещения позволяет на 20 % и более сократить время проведения расчетов относительно полной схемы замещения с погрешностью, не превышающей 5 % в общем случаи и 10 % при резонансных явлениях.

3. На основании трехлучевой схемы замещения выведена математическая модель для исследования обнаружения источников генерации токов гармонических составляющих. Граничные значения в математической модели представляют собой такие характерные значения тока источника исследуемого потребителя – генератора гармоник $\underline{J}_1$, при котором потребители – генераторы гармоник меняют категорию с необнаруженного источника генерации на обнаруженного и наоборот.

4. График изменения активных токов и действующих значений напряжений гармонических составляющих от соотношения токов источников показал, что в частных случаях для обнаружения потребителя – генератора гармоник достаточно регистрации системой мониторинга превышения допустимых нормативных значений напряжений гармонических составляющих в ТПЭ.

5. Установка и эксплуатация ФКУ или АФ потребителями – генераторами гармоник позволяет не только устранить вредные последствия протекания токов гармонических составляющих, связанные с их генерацией, но и положительно повлиять на обнаружение других источников генерации токов гармонических составляющих в электротехническом комплексе.

ГЛАВА 3 АНАЛИТИЧЕСКИЕ КРИТЕРИИ ОБНАРУЖЕНИЯ ИСТОЧНИКОВ ГЕНЕРАЦИИ ТОКОВ ГАРМОНИЧЕСКИХ СОСТАВЛЯЮЩИХ

Известные численные критерии не позволяют определить все источники генерации, поэтому при проведении мониторинга КЭ часть потребителей – генераторов гармоник будет обнаружена, другая – не обнаружена. В связи с этим, для повышения эффективности принимаемых по результатам мониторинга мер, направленных на снижение генерации токов гармонических составляющих, необходима также информация по влиянию различных факторов на обнаружение потребителя как источника генерации, о размере зон обнаруженного или необнаруженного потребителя – генератора гармоник. Получить подобного рода информацию возможно при более общем, аналитическом подходе [133].

§ 3.1 Анализ аналитических критериев

При аналитическом походе рассматривается математическая модель, полученная на основе предлагаемой схемы замещения в виде трехлучевой звезды.

Для получения аналитических критериев требуется провести исследование характерных при обнаружении потребителей как источников генерации токов гармонических составляющих точек, соответствующих граничным значениям тока источника исследуемого потребителя – генератора гармоник $\underline{J}_{гр,1}$ и $\underline{J}_{гр,2}$.

3.1.1 Первый аналитический критерий

Из графика зависимости активных токов, приведенного на рисунке 2.10, следует, что исследуемый потребитель – генератор гармоник может быть

обнаружен как источник генерации при условии превышения своего граничного значения тока источника $\underline{J}_{гр,1}$. Таким образом, в общем случае аналитический критерий для обнаружения источников генерации токов гармонических составляющих будет иметь следующий вид:

$$J_1 > J_{гр,1}. \tag{3.1}$$

С учетом (2.21), записанного для $\underline{J}_{гр,1}$, критерий представится в виде:

$$J_1 > \left| \frac{Z_{н2} \cdot Z_э}{Z_{н1} \cdot \left(Z_2 + Z_э\right)} \cdot \underline{J}_2 \right|, \tag{3.2}$$

или в относительных единицах:

$$\frac{J_1}{J_2} > \left| \frac{Z_{н2} \cdot Z_э}{Z_{н1} \cdot \left(Z_2 + Z_э\right)} \right|. \tag{3.3}$$

Первый аналитический критерий (3.1)-(3.3) представляет собой универсальный инструмент, по которому можно судить об обнаружении или не обнаружении потребителей – генераторов гармоник при наличии информации о токах источниках и сопротивлениях предлагаемой трехлучевой схемы замещения.

Аналитический критерий позволяет обнаружить такого потребителя – генератора гармоник, у которого ток источника $\underline{J}_1$ находится в диапазоне изменения от граничного значения $\underline{J}_{гр,1}$ до рассматриваемого максимального $\underline{J}_{1max}$. Если ток источника исследуемого потребителя – генератора гармоник находится в пределах от нуля до граничного значения $\underline{J}_{гр,1}$, то потребитель не обнаруживается.

Выведенный из предлагаемой схемы замещения критерий является общим и не требует изменения символьного выражения. При этом он должен быть рассмотрен для каждой частоты гармонического спектра и каждого из потребителей генераторов гармоник при конкретных значениях сопротивлений трехлучевой схемы замещения.

Порядок формирования трехлучевой схемы замещения и применения первого аналитического критерия для исследуемого потребителя – генератора гармоник (П1) представлен на рисунке 3.1.

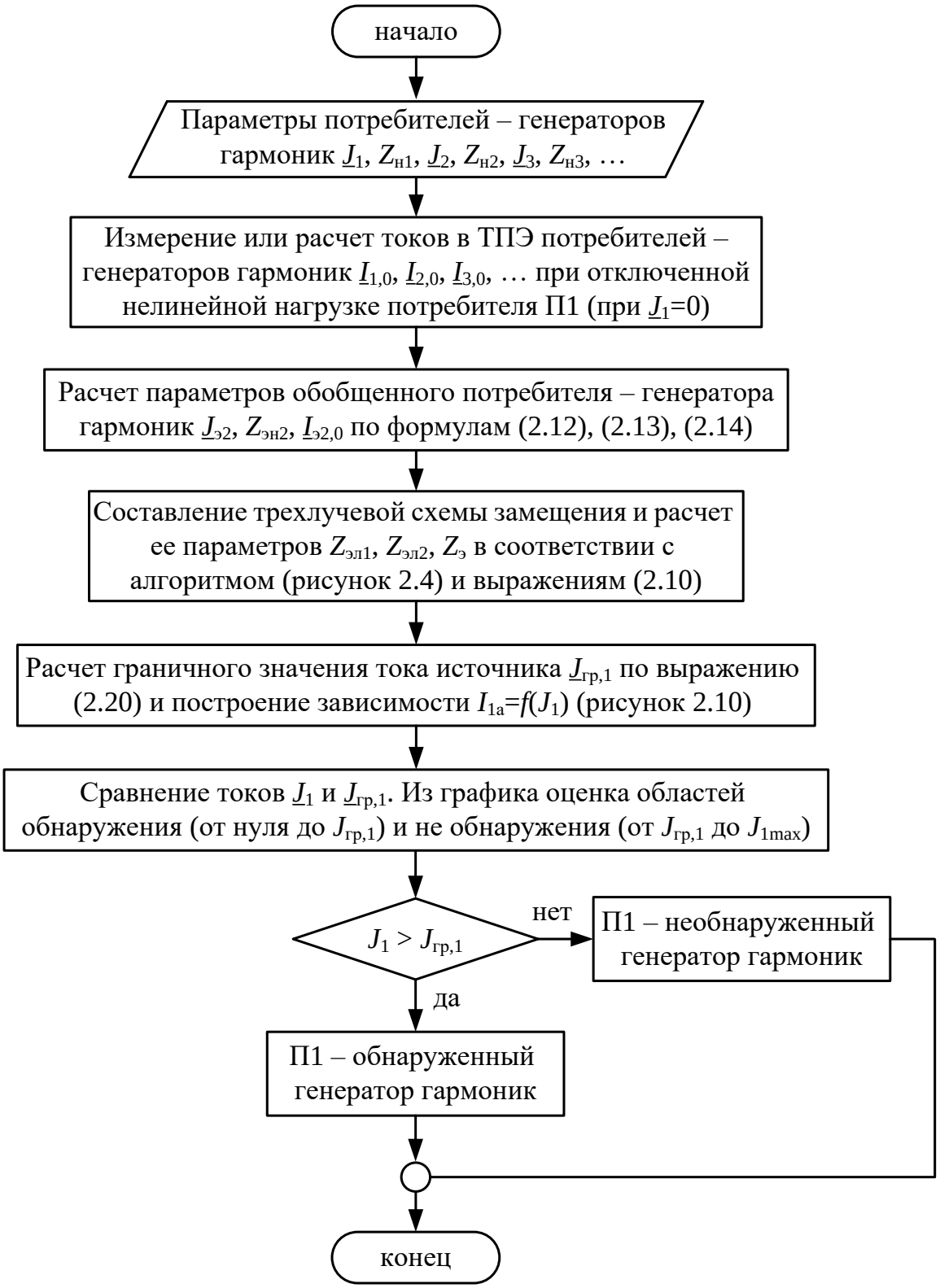


Рисунок 3.1 – Порядок формирования и применения первого аналитического критерия при выявлении источников генерации

В большинстве случаев информации, полученной с помощью представленного критерии недостаточно для принятия мер по результатам

мониторинга, поскольку часть источников генерации токов гармонических составляющих не будет обнаружена, а это значит, что часть потребителей электротехнического комплекса не будет задействована в мероприятиях, направленных на снижение или устранение генерации токов гармонических составляющих.

Поэтому для повышения эффективности управления КЭ в части несинусоидальности важным является получение аналитических критериев, описывающих частные случаи не обнаружения ни одного источника генерации и обнаружения всех источников генерации. При этом в последнем случае предлагаемая схема замещения в виде трехлучевой звезды позволяет получить адекватные результаты, только если в электротехническом комплексе присутствуют два источника генерации. Если источников будет больше, то необходимая информация о каждом из них растворяется в получаемых результатах для обобщенного потребителя – генератора гармоник.

3.1.2 Второй аналитический критерий

Второй критерий рассматривает случай, когда не удается обнаружить ни один из источников генерации токов гармонических составляющих. Такой случай возможен, если активные токи в ТПЭ обоих потребителей – генераторов гармоник рассматриваемой трехлучевой звезды имеют отрицательное значение. Для этого случая второй аналитический критерий может быть записан в виде:

$$J_{\text{гр},1} > J_{\text{гр},2}\,. \tag{3.4}$$

В данный критерий подставляются выражения для граничных значений тока источника исследуемого потребителя – генератора гармоник:

$$\left|\frac{Z_{\text{н}2}\cdot Z_{\text{э}}}{Z_{\text{н}1}\cdot\left(Z_2+Z_{\text{э}}\right)}\cdot \underline{J}_2\right| > \left|\frac{Z_{\text{н}2}\cdot\left(Z_1+Z_{\text{э}}\right)}{Z_{\text{н}1}\cdot Z_{\text{э}}}\cdot \underline{J}_2\right|, \tag{3.5}$$

и упрощается полученное выражение:

$$\left|Z_э \cdot \left(Z_1 + Z_2\right) + Z_1 \cdot Z_2\right| < 0. \quad (3.6)$$

Анализ (3.6) показывает, что случай, описываемый критерием невозможен. Модуль сопротивления всегда больше нуля или равен нулю в случае бесконечной мощности электрических нагрузок потребителей.

Таким образом, критерий показывает, что в электротехническом комплексе систем электроснабжения один из потребителей – генераторов гармоник всегда будет обнаружен как источник генерации токов гармонических составляющих. Именно на него в первую очередь направляется управляющее воздействие, побуждающего его к установке и эксплуатации ФКУ или АФ.

3.1.3 Третий аналитический критерий

Третий критерий описывает случай обнаружения обоих источников генерации токов гармонических составляющих в электротехническом комплексе с двумя потребителями – генераторами гармоник. Такой случай соответствует ситуации, когда активные токи в ТПЭ обоих потребителей имеют положительные значения. При этом модули граничных значений $\underline{J}_{гр,1}$ и $\underline{J}_{гр,2}$ соотносятся между собой следующим образом:

$$J_{гр,1} < J_{гр,2}. \quad (3.7)$$

Полученное соотношение по аналогии со вторым критерием упрощается:

$$\left|Z_э \cdot \left(Z_1 + Z_2\right) + Z_1 \cdot Z_2\right| > 0. \quad (3.8)$$

Анализ (3.8) показывает, что случай, описываемый им, возможен. Всегда существуют условия, при которых активные токи в ТПЭ будут положительны и оба потребителя – генератора гармоник могут быть обнаружены. Ток источника исследуемого потребителя – генератора гармоник, при котором возможно обнаружение обоих источников генерации, находится в диапазоне значений:

$$\underline{J}_1 \in \left(\underline{J}_{\text{гр},1}, \underline{J}_{\text{гр},2}\right). \tag{3.9}$$

В полученное выражение подставляются граничные значения:

$$\underline{J}_1 \in \left(\frac{Z_{\text{н}2} \cdot Z_{\text{э}}}{Z_{\text{н}1} \cdot \left(Z_2 + Z_{\text{э}}\right)} \cdot \underline{J}_2, \frac{Z_{\text{н}2} \cdot \left(Z_1 + Z_{\text{э}}\right)}{Z_{\text{н}1} \cdot Z_{\text{э}}} \cdot \underline{J}_2\right), \tag{3.10}$$

или в относительных единицах:

$$\frac{\underline{J}_1}{\underline{J}_2} \in \left(\frac{Z_{\text{н}2} \cdot Z_{\text{э}}}{Z_{\text{н}1} \cdot \left(Z_2 + Z_{\text{э}}\right)}, \frac{Z_{\text{н}2} \cdot \left(Z_1 + Z_{\text{э}}\right)}{Z_{\text{н}1} \cdot Z_{\text{э}}}\right). \tag{3.11}$$

Данный диапазон относительных значений тока источника исследуемого потребителя – генератора гармоник характеризуется наибольшей эффективностью управления КЭ в части несинусоидальности, поскольку ко всем источникам генерации может быть применено стимулирующее воздействие, направленное на снижение или устранение генерации токов гармонических составляющих.

Диапазон относительных значений тока источника $\underline{J}_1$ в (3.11) преобразуется и приводится к виду:

$$\frac{\underline{J}_1}{\underline{J}_2} \in \left(\frac{Z_{\text{н}2}}{Z_{\text{н}1}} \cdot \frac{Z_{\text{э}}}{\left(Z_2 + Z_{\text{э}}\right)}, \frac{Z_{\text{н}2}}{Z_{\text{н}1}} \cdot \frac{Z_{\text{э}}}{\left(Z_2 + Z_{\text{э}}\right)} \cdot \left(1 + \frac{Z_1 \cdot Z_2 + Z_{\text{э}} \cdot \left(Z_1 + Z_2\right)}{Z_{\text{э}}^2}\right)\right). \tag{3.12}$$

Вводится обозначение $\frac{Z_1 \cdot Z_2 + Z_{\text{э}} \cdot \left(Z_1 + Z_2\right)}{Z_{\text{э}}^2} = a$. Тогда последнее выражение принимает вид:

$$\frac{\underline{J}_1}{\underline{J}_2} \in \left(\frac{Z_{\text{н}2}}{Z_{\text{н}1}} \cdot \frac{Z_{\text{э}}}{\left(Z_2 + Z_{\text{э}}\right)}, \frac{Z_{\text{н}2}}{Z_{\text{н}1}} \cdot \frac{Z_{\text{э}}}{\left(Z_2 + Z_{\text{э}}\right)} \cdot \left(1 + a\right)\right). \tag{3.13}$$

Коэффициент a определяет прирост граничного значения $\underline{J}_{\text{гр},1}$ или величину диапазона тока источника $\underline{J}_1$, на котором возможно обнаружение обоих источников генерации токов гармонических составляющих:

$$\frac{\underline{J}_{\text{гр},2} - \underline{J}_{\text{гр},1}}{\underline{J}_{\text{гр},1}} = a = \frac{Z_1 \cdot Z_2 + Z_{\text{э}} \cdot \left(Z_1 + Z_2\right)}{Z_{\text{э}}^2}. \tag{3.14}$$

Рассчитав коэффициент a можно оценить долю диапазона от $\underline{J}_{гр,1}$ до $\underline{J}_{гр,2}$ в допустимом диапазоне изменения тока источника, на котором нарушения требований к синусоидальной форме кривой напряжения не фиксируются, или в общем рассматриваемом диапазоне, ограниченном пятикратным превышением установленных норм по показателю $K_{U(n)}$.

Для рассмотренного во второй главе электротехнического комплекса с параметрами потребителей – генераторов гармоник ($\underline{J}_1$ = var, $\underline{J}_2 = 0{,}92e^{j30°}$, $Z_{н1} = 447{,}2 + j1432{,}7$ Ом и $Z_{н2} = 111{,}8 + j403{,}4$ Ом) и трехлучевой схемы замещения ($Z_{эл1} = 12{,}07 + j38{,}68$ Ом, $Z_{эл2} = 0{,}02 + j0{,}02$ Ом и $Z_э = 111{,}85 + j367{,}12$ Ом) доли диапазона тока источника $\underline{J}_1$, на котором возможно обнаружение обоих источников генерации токов гармонических составляющих, в допустимом и общем рассматриваемом диапазонах изменения составляют 61 % и 12 % соответственно.

3.1.4 Четвертый аналитический критерий

Целью вывода четвертого критерия является синтез условий, при которых источник генерации всегда может быть обнаружен. Это возможно в случае, если отсутствует область необнаруженного генератора гармоник, которому соответствует граничное значение $\underline{J}_{гр,1}$ равное нулю:

$$J_{гр,1} = 0, \tag{3.15}$$

или записанное с учетом (2.21):

$$\frac{Z_{н2} \cdot Z_э}{Z_{н1} \cdot \left(Z_2 + Z_э\right)} = 0. \tag{3.16}$$

Равенство (3.16) выполняется, если сопротивление нагрузки второго потребителя – генератора гармоник $Z_{н2}$ или сопротивление ветви обобщенного линейного потребителя $Z_э$ равно нулю.

Таким образом, условием, когда исследуемый потребитель – генератор гармоник всегда может быть обнаружен как источник генерации, является бесконечная мощность линейной нагрузки хотя бы одного из остальных потребителей электротехнического комплекса (с учетом принятого допущения о замене нелинейной нагрузки идеальным источником тока). На практике такая ситуация невозможна. У потребителя с нелинейной нагрузкой всегда будет существовать область необнаруженного генератора гармоник.

Выведенные из математической модели аналитические критерии в виду общности применяемого подхода не требуют постоянных пересчетов при изменении состава и схемы электротехнического комплекса систем электроснабжения сетевой организации и промышленных предприятий.

§ 3.2 Оценка влияния факторов на граничное значение

Граничное значение $\underline{J}_{\text{гр},1}$ позволяет оценить степень обнаружения исследуемого потребителя – генератора гармоник. Чем выше $\underline{J}_{\text{гр},1}$, тем больший размер имеет область необнаруженного генератора гармоник и тем сложнее определить потребителя как источник генерации. Полученная математическая модель позволяет оценить влияние различных факторов на граничное значение, т.е. на степень обнаружения потребителей – генераторов гармоник.

Оценка влияния факторов на граничное значение проводится в серии однофакторных исследований, в которых один из факторов принимается в качестве переменной, а остальные фиксируются. Для проведения однофакторных исследований были разработаны подходы, позволяющие определенным образом фиксировать часть факторов и изменять исследуемый фактор.

В работе рассматривается влияние сопротивления ветви обобщенного линейного потребителя и собственного линейного сопротивления исследуемого потребителя – генератора гармоник на граничное значение.

3.2.1 Оценка влияния сопротивления ветви обобщенного линейного потребителя

Для первого однофакторного исследования был разработан подход, представленный в таблице 3.1 и на рисунке 3.2.

Таблица 3.1 – Подход к проведению первого однофакторного исследования

$\underline{I}_{1,0}[N]$	$Z_{эл1}$	$Z_{эл2}$	$\underline{I}_{2,0}[N]$	$Z_{э}[N]$	$J_{гр,1}[N]$	$I_{1а}[N]= f(J_1,Z_{э}[N],\ldots)$
$\underline{I}_{1,0,1}$	$Z_{эл1}$	$Z_{эл2}$	$\underline{I}_{2,0,1}$	$Z_{э,1}$	$J_{гр,1,1}$	$I_{1а,1}= f(J_1,Z_{э,1},\ldots)$
$\underline{I}_{1,0,2}$			$\underline{I}_{2,0,2}$	$Z_{э,2}$	$J_{гр,1,2}$	$I_{1а,2}= f(J_1,Z_{э,2},\ldots)$
…			…	…	…	…
$\underline{I}_{1,0,N}$			$\underline{I}_{2,0,N}$	$Z_{э,N}$	$J_{гр,1,N}$	$I_{1а,N}= f(J_1,Z_{э,N},\ldots)$
				$J_{гр,1}=f(Z_{э})$		

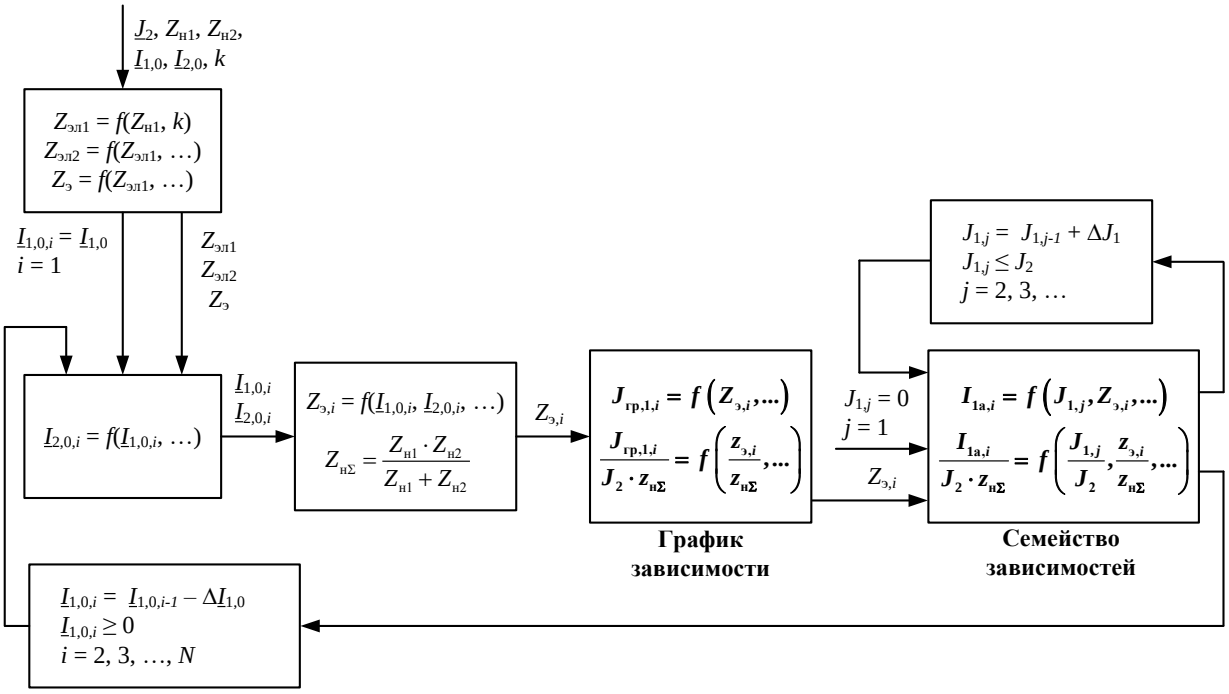


Рисунок 3.2 – Блок схема алгоритма для проведения первого однофакторного исследования

Исследуемым фактором является сопротивление ветви обобщенного линейного потребителя $Z_э$. Поскольку значение сопротивления $Z_э$ является параметром трехлучевой схемы замещения, то его изменение проводится посредством уменьшения до нуля значения тока в ТПЭ исследуемого потребителя – генератора гармоник $\underline{I}_{1,0}$ (УПН тока соответствует направлению, принятом при расчете параметров схемы замещения и показанном на рисунке 2.3):

$$\begin{cases} \underline{I}_{1,0,i} = \underline{I}_{1,0,i-1} - \Delta\underline{I}_{1,0} \\ \underline{I}_{1,0,i} \geq 0 \\ i = 2,3,...,N. \end{cases} \tag{3.17}$$

Результатами исследования являются:

- график зависимости (рисунок 3.3) граничного значения тока источника исследуемого потребителя – генератора гармоник, выраженного в единицах $\frac{J_{гр,1}}{J_2 \cdot z_{нΣ}}$, от соотношения сопротивлений нагрузок ветви обобщенного линейного потребителя и линейных нагрузок потребителей – генераторов гармоник $\frac{z_э}{z_{нΣ}}$;

- семейство зависимостей (рисунок 3.4) активного тока в ТПЭ в единицах $\frac{I_{1а}}{J_2 \cdot z_{нΣ}}$ от соотношения токов источников $\frac{J_1}{J_2}$ при различных отношениях модулей сопротивлений нагрузок ветви обобщенного линейного потребителя и потребителей – генераторов гармоник $\frac{z_э}{z_{нΣ}}$, где $z_{нΣ} = \left|\frac{Z_{н1} \cdot Z_{н2}}{Z_{н1} + Z_{н2}}\right|$.

Программы однофакторных исследований для Maple 17 приведены в параграфах А.3 и А.4 Приложения А. В рассмотренном примере расчетный диапазон изменения отношения модулей сопротивлений $\frac{z_э}{z_{нΣ}}$ составляет от 1,17 до 0. На рисунке 3.4 для наглядности перехода активных токов через ноль диапазон соотношения токов источников $\frac{J_1}{J_2}$ ограничен 0,6.

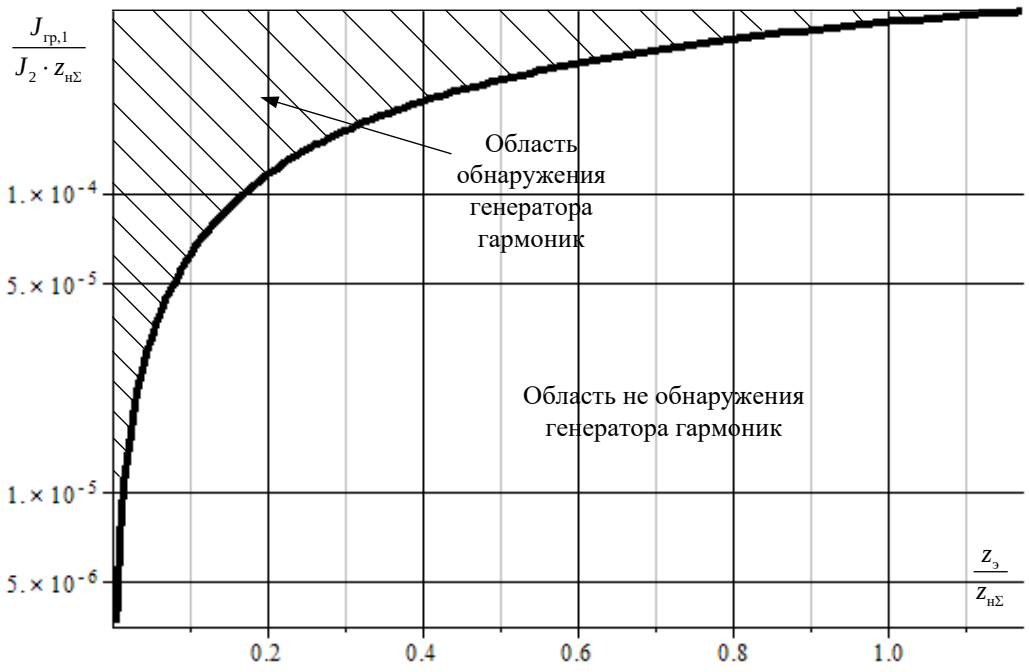


Рисунок 3.3 – График зависимости граничного значения от сопротивления ветви обобщенного линейного потребителя

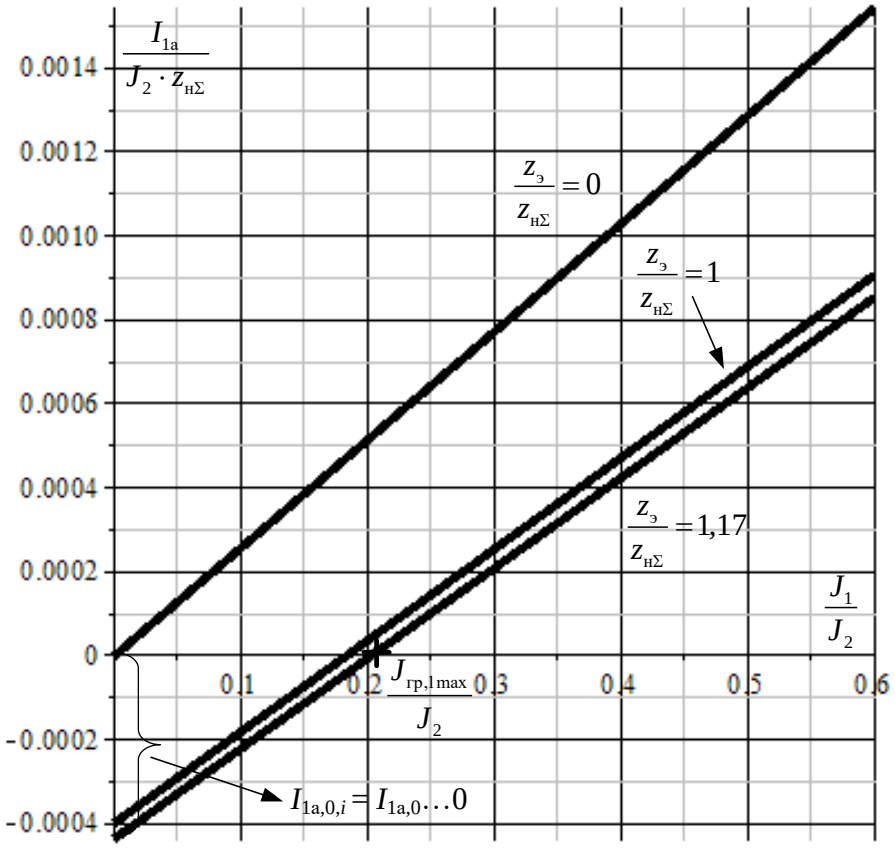


Рисунок 3.4 – Семейство зависимостей активного тока от соотношения токов источников при различных сопротивлениях $Z_э$

Расчетная зависимость граничного значения делит область графика (рисунок 3.3) на две области, в которых потребитель – генератор гармоник является обнаруженным или необнаруженным источником генерации токов гармонических составляющих. При этом область необнаруженного генератора гармоник превалирует.

С ростом значения $Z_э$ область необнаруженного потребителя – генератора гармоник резко возрастает и при небольшом превышении равенства сопротивлений нагрузок ветви обобщенного линейного потребителя и потребителей – генераторов гармоник насыщается и перестает расти. Дальнейшее увеличение сопротивления трехлучевой звезды $Z_э$ не оказывает существенного влияния на степень обнаружения источников генерации токов гармонических составляющих.

3.2.2 Оценка влияния сопротивления нагрузки исследуемого потребителя – генератора гармоник

Для второго однофакторного исследования был разработан подход, представленный в таблице 3.2 и на рисунке 3.5.

Таблица 3.2 – Подход к проведению второго однофакторного исследования

$Z_{эл1}$	$Z_{эл2}$	$Z_э$	$Z_{н1}[N]$	$J_{гр,1}[N]$	$I_{1а}[N]= f(J_1,Z_{н1}[N],\ldots)$
$Z_{эл1}$	$Z_{эл2}$	$Z_э$	$Z_{н1,1}$	$J_{гр,1,1}$	$I_{1а,1}= f(J_1,Z_{н1,1},\ldots)$
			$Z_{н1,2}$	$J_{гр,1,2}$	$I_{1а,2}= f(J_1,Z_{н1,2},\ldots)$
			…	…	…
			$Z_{н1,N}$	$J_{гр,1,N}$	$I_{1а,N}= f(J_1,Z_{н1,N},\ldots)$
			$J_{гр,1}=f(Z_{н1})$		

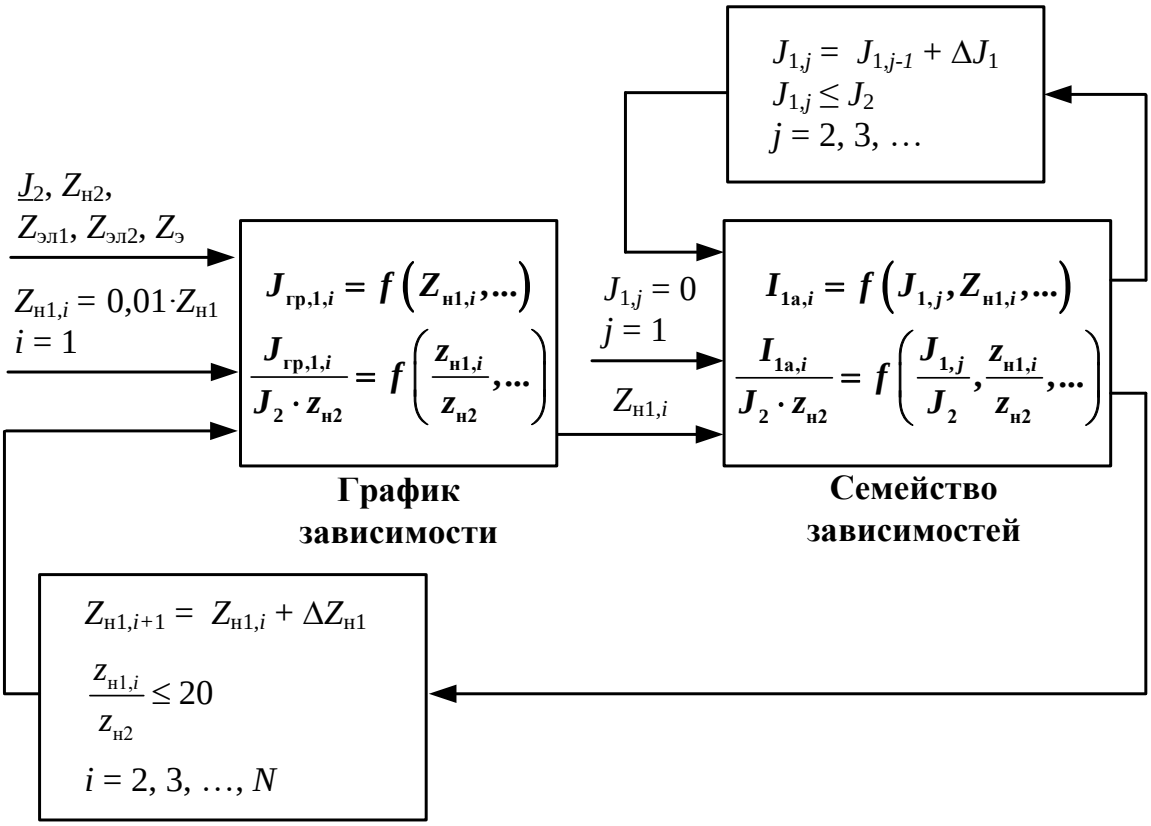


Рисунок 3.5 – Блок схема алгоритма для проведения второго однофакторного исследования

Исследуемым фактором во втором случае является собственное сопротивление линейной нагрузки исследуемого потребителя – генератора гармоник $Z_{н1}$. Изменение значения сопротивления $Z_{н1}$ происходит напрямую.

Параметры трехлучевой схемы замещения рассчитываются при одном из значений сопротивления линейной нагрузки $Z_{н1}$, фиксируются и более не меняются. Для расширения результатов сопротивление линейной нагрузки $Z_{н1}$ выражено через отношение $\frac{z_{н1}}{z_{н2}}$.

Результатами исследования в соответствии с разработанным для второго однофакторного исследования подходом являются:

- график зависимости (рисунок 3.6) граничного значения тока источника, выраженного в единицах $\frac{J_{кр,1}}{J_2 \cdot z_{н2}}$, от соотношения сопротивлений нагрузок

исследуемого потребителя – генератора гармоник и второго потребителя – генератора гармоник $\frac{z_{н1}}{z_{н2}}$;

- семейство зависимостей (рисунок 3.7) активного тока в ТПЭ в единицах $\frac{I_{1а}}{J_2 \cdot z_{н2}}$ от соотношения токов $\frac{J_1}{J_2}$ при различных отношениях модулей сопротивлений линейных нагрузок потребителей – генераторов гармоник $\frac{z_{н1}}{z_{н2}}$.

Во втором рассмотренном примере расчетный диапазон изменения отношения модулей сопротивлений линейных нагрузок $\frac{z_{н1}}{z_{н2}}$ составляет от 0,035 до 19,94. На рисунке 3.7 для наглядности перехода активных токов через ноль диапазон соотношения токов источников $\frac{J_1}{J_2}$ ограничен 0,6.

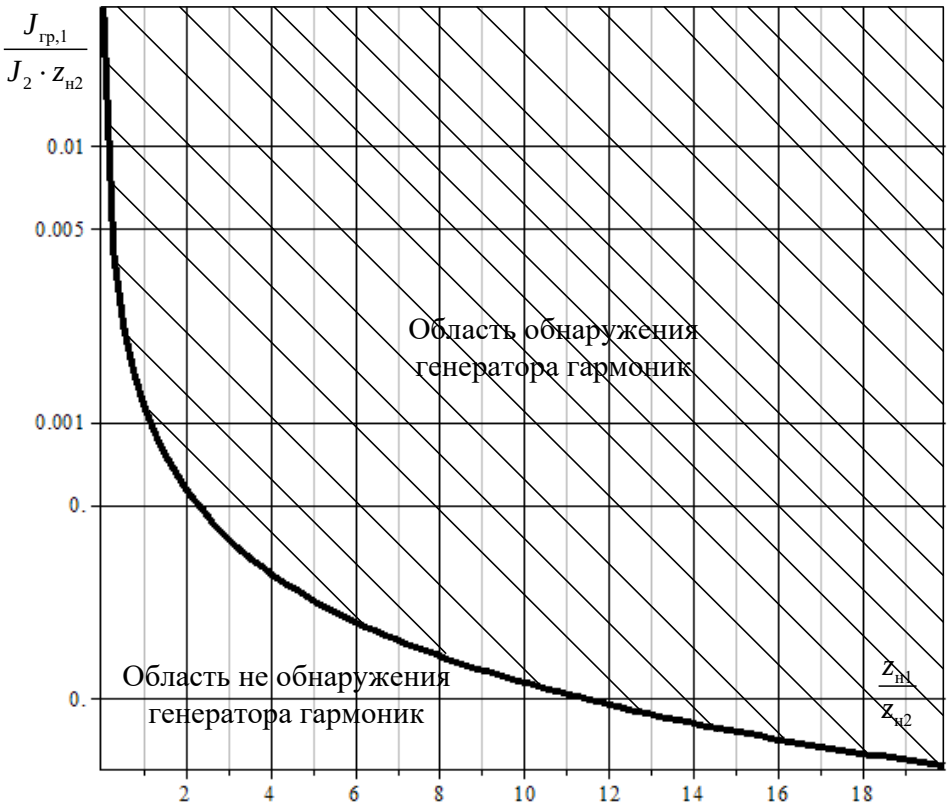


Рисунок 3.6 – График зависимости граничного значения от сопротивления нагрузки исследуемого потребителя – генератора гармоник

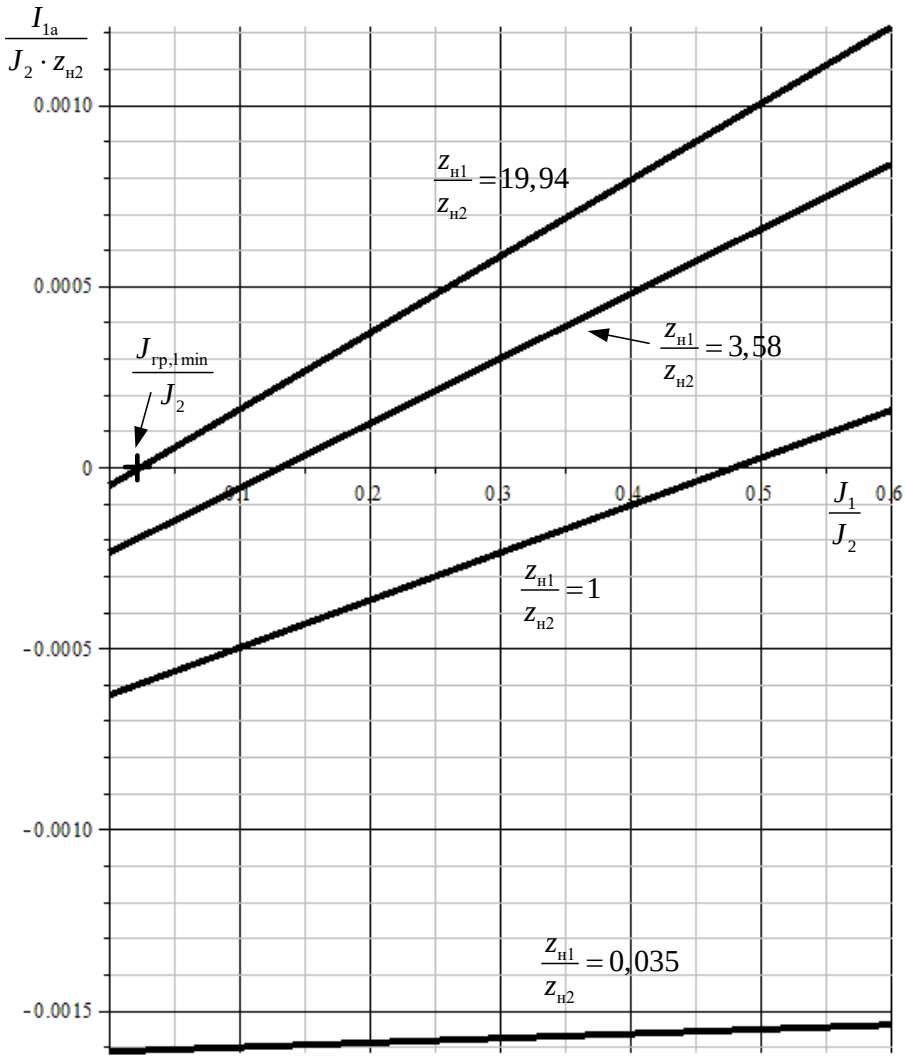


Рисунок 3.7 – Семейство зависимостей активного тока от соотношения токов источников при различных сопротивлениях $Z_{н1}$

Рост отношения сопротивлений линейных нагрузок потребителей – генераторов гармоник, в отличие от предыдущего исследования по влиянию сопротивления ветви обобщенного линейного потребителя на граничное значение тока источника, положительно сказывается на обнаружении источников генерации токов гармонических составляющих: область обнаруженного генератора гармоник резко возрастает.

Однако, не смотря на это, даже при больших значениях отношения $\frac{z_{н1}}{z_{н2}}$, у исследуемого потребителя – генератора гармоник всегда будет присутствовать небольшая область, соответствующая необнаруженному источнику генерации

токов гармонических составляющих, отличная от нуля. На рисунке 3.7 данное положение показывает точка $\frac{J_{\text{гр},1\min}}{J_2}$, отмеченная на оси абсцисс. Данная точка показывает минимально возможное значение граничного тока источника $\underline{J}_1$ в определенных рассматриваемых условиях.

Обобщая полученные результаты, однофакторные исследования позволяют получить следующие прогнозы по обнаружению источников генерации токов гармонических составляющих:

1. С падением мощностей нагрузок линейных потребителей источник генерации токов гармонических составляющих *сложнее* обнаружить.
2. С падением мощностей линейных нагрузок у потребителей – генераторов гармоник источник генерации *легче* обнаружить.

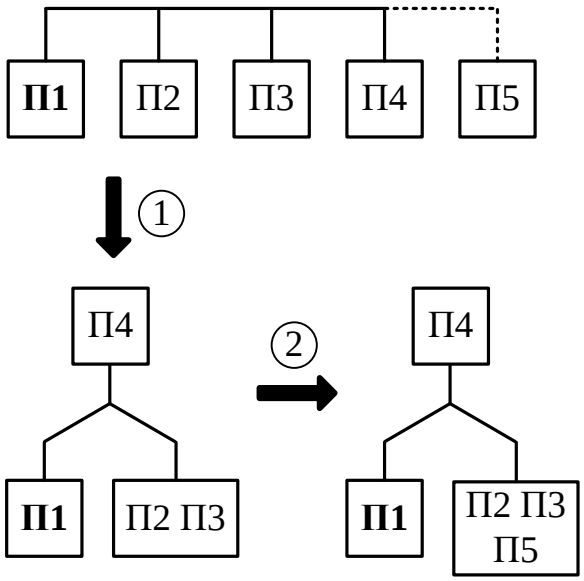
При реальном функционировании электротехнического комплекса, как правило, имеет место комплексное влияние сразу несколько факторов на граничное значение. В таком случае, полученные прогнозы при однофакторных исследованиях будут справедливы при условиях: 1) в комплексе факторов присутствуют сопротивления $Z_э$ или $Z_{н1}$; 2) одно из них многократно превышает остальные факторы. Если же влияние факторов будет соразмерным, то необходимо решать задачу многофакторного исследования с привлечением современных программных аппаратов.

§ 3.3 Оценка обнаружения источников генерации при подключении нового потребителя

Математическая модель и аналитические критерии для обнаружения потребителей – генераторов гармоник могут использоваться сетевой организацией при выдаче условий на технологическое присоединение к своим электрическим сетям промышленных предприятий с нелинейными нагрузками.

Сетевая организация при помощи предлагаемой математической модели получает возможность оценить влияние подключения нового источника генерации токов гармонических составляющих на обнаружение уже присутствующих в электротехническом комплексе систем электроснабжения потребителей – генераторов гармоник. При необходимости, она может выдать дополнительные условия на технологическое присоединение подключаемого потребителя – генераторов гармоник, направленные на снижение или устранение им генерации токов гармонических составляющих.

Для оценки обнаружения источников генерации токов гармонических составляющих при подключении потребителя с нелинейной нагрузкой предлагается алгоритм, который сводится к рекурсивному формированию предлагаемой схемы замещения в виде трехлучевой звезды (рисунок 3.8) [133], расчету параметров ее ветвей и граничных значений тока источника исследуемого потребителя, для которого проводится оценка обнаружения (оцениваемый потребитель).



П1 – *оцениваемый* потребитель – генератор гармоник;
П2, П3 – потребители – генераторы гармоник;
П4 – линейный потребитель;
П5 – *подключаемый* потребитель – генератор гармоник

Рисунок 3.8 – Блок схема для пояснения работы алгоритма

Алгоритм оценки обнаружения при подключении нового потребителя с нелинейными нагрузками (рисунок 3.9) сводится к следующим шагам.

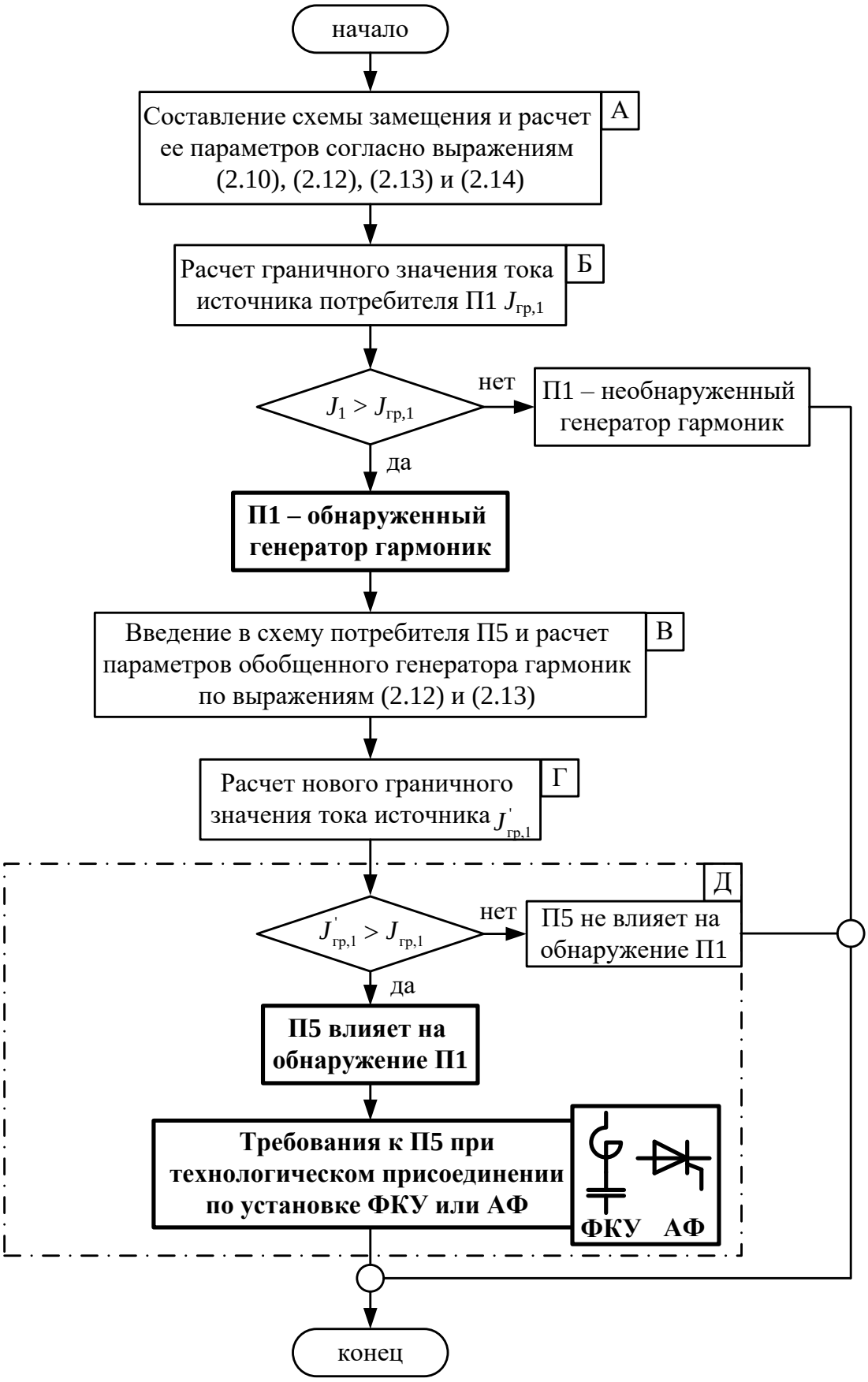


Рисунок 3.9 – Алгоритм оценки обнаружения при подключении потребителя – генератора гармоник

А) Для оценки выбирается один из потребителей – генераторов гармоник, присутствующих в электротехническом комплексе систем электроснабжения (*оцениваемый* потребитель П1). Относительно него составляется трехлучевая схема замещения и рассчитываются ее параметры в соответствии с выражениями (2.7)-(2.14) (шаг 1 на рисунке 3.8).

Б) Согласно выражению (2.21) рассчитывается граничное значение тока источника оцениваемого потребителя – генератора гармоник $J_{гр,1}$. Согласно основному аналитическому критерию, выведенного для общего случая (3.1), делается вывод об обнаружении источника. Определяется категория оцениваемого потребителя: обнаруженный или необнаруженный генератор гармоник.

При управлении КЭ в части несинусоидаьности наибольшую ценность представляет оценка влияния, рассматриваемая для обнаруженного источника генерации, поскольку для него уже может быть сформировано и применяться в течение длительного времени управляющее воздействие, побуждающее его к установке и эксплуатации ФКУ или АФ. Поэтому оценка влияния обязательно проводится для обнаруженного потребителя – генератора гармоник. При небольшом числе потребителей, присоединенных к электрической сети сетевой организации, или обнаруженных потребителей – генераторов гармоник, оценка влияния также может применяться и по отношению к необнаруженным источникам генерации.

В) В трехлучевую схему замещения в ветвь обобщенного потребителя – генератора гармоник вводится новый источник генерации токов гармонических составляющих (*подключаемый* потребитель – генератор гармоник П5) (шаг 2 на рисунке 3.8). Параметры обобщенного потребителя – генератора гармоник (ток источника $\underline{J}_{э2}$ и комплекс сопротивления нагрузки $Z_{эн2}$) пересчитываются согласно выражениям (2.12) и (2.13). Значения сопротивлений трехлучевой звезды $Z_{эл1}$, $Z_{эл2}$ и $Z_{э}$ остаются прежними.

Г) Согласно (2.21) рассчитывается новое граничное значение тока источника оцениваемого потребителя – генератора гармоник $J'_{\text{гр},1}$.

Д) Сравнивается модуль фактического значения тока источника оцениваемого потребителя J_1 с граничными значениями $J_{\text{гр},1}$ и $J'_{\text{гр},1}$, рассчитанными до и после подключения нового источника генерации.

При сравнении, проводимом для обнаруженного потребителя – генератора гармоник, возможно два случая. В первом случае справедливы следующие соотношения между сравниваемыми значениями тока источника:

$$J_1 > J_{\text{гр},1} > J'_{\text{гр},1}, \tag{3.18}$$

$$J_1 > J'_{\text{гр},1} > J_{\text{гр},1}. \tag{3.19}$$

Данные выражения описывают случаи, когда оцениваемый потребитель – генератор гармоник П1 остается обнаруживаемым после подключения нового источника генерации. Поэтому необходимость выдвижения дополнительных условий при технологическом присоединении подключаемого потребителя – генератора гармоник П5, направленных на снижение или устранение генерации токов гармонических составляющих, отсутствует.

В тоже время, подключение нового потребителя – генератора гармоник может увеличить зону не обнаружения оцениваемого потребителя как источника генерации токов гармонических составляющих. Если в (3.19) это не влияет на обнаружение источника генерации, то в будущем при уменьшении фактического значения тока источника $\underline{J}_1$, например, при изменении состава нелинейной нагрузки, потребитель может перестать обнаруживаться. Тогда возникает необходимость рассмотрения второго случая, когда значения тока источника $\underline{J}_1$ недостаточно для обнаружения потребителя – генератора гармоник:

$$J_{\text{гр},1} < J_1 < J'_{\text{гр},1}. \tag{3.20}$$

В таком случае при технологическом присоединении подключаемого потребителя – генератора гармоник П5 необходимо выдать дополнительные

условия по установке и эксплуатации ФКУ или АФ. В свою очередь это позволит не только предотвратить вредные последствия генерации его нелинейной нагрузкой токов гармонических составляющих, но и не оказывать отрицательного влияния на обнаружение присутствующих в электротехническом комплексе систем электроснабжения потребителей – генераторов гармоник.

Применение предлагаемой схемы замещения и математической модели в алгоритме оценки обнаружения при подключении нового источника генерации позволяет обеспечить требуемую точность при расчете активных токов и модулей напряжения гармонических составляющих в ТПЭ. Для электротехнического комплекса систем электроснабжения с двумя и пятью источниками генерации токов гармонических составляющих при расчете активных токов и напряжений в ТПЭ потребителей – генераторов гармоник до и после подключения потребителя – генератора гармоник погрешность не превышает 5 % (таблица 3.3).

Таблица 3.3 – Максимальная относительная погрешность расчетов по предлагаемой схеме замещения при технологическом присоединении (ДО и ПОСЛЕ подключения)

№ п/п	**Рассматриваемый случай**	**$\delta I_{1a,max}$, %**		**$\delta U_{1,max}$, %**	
		ДО	ПОСЛЕ	ДО	ПОСЛЕ
1	Схема с двумя генераторами гармоник и технологическое присоединение нового источника генерации	2,37	3,99	3,54	3,66
2	5 генераторов гармоник и технологическое присоединение нового источника генерации	2,58	2,58	4,11	4,14

В параграфе А.5 Приложения А приведена программа для Maple 17, основанная на предлагаемом в работе алгоритме оценки обнаружения. Программа позволяет рассчитать граничные значения тока источника оцениваемого потребителя – генератора гармоник $J_{гр,1}$ и $J'_{гр,1}$ и проанализировать их разницу при подключении нового источника генерации.

При подключении нового потребителя – генератора гармоник с параметрами $\underline{J}_3 = 0{,}77e^{j45°}$ и $Z_{н3} = 279{,}5085 + j967{,}5878$ Ом в электротехническом комплексе с двумя потребителями – генераторами гармоник, параметры которого представлены на рисунке 2.6, зона не обнаружения оцениваемого первого потребителя увеличилась на 76 % (рисунок 3.10, на котором активный ток представлен в именованных единицах, а диапазон изменения тока источника оцениваемого потребителя ограничен значением 0,3 А).

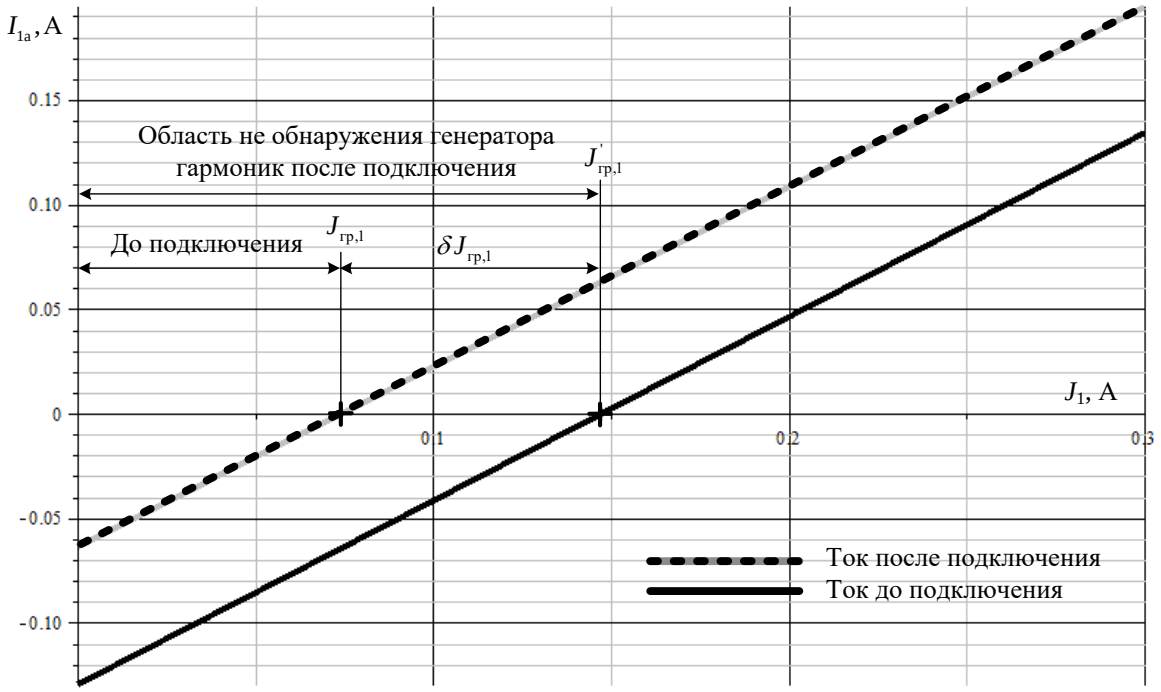


Рисунок 3.10 – Токи в ТПЭ1 до и после подключения нового источника генерации

Выводы по третьей главе

1. Первый основной аналитический критерий (3.1)-(3.3) позволяет обнаружить только таких потребителей – генераторов гармоник, у которых ток источника превышает граничное значение $\underline{J}_{гр,1}$. Если граничное значение не превышается, то потребитель является необнаруженным генератором гармоник.

2. Граничное значение тока источника $\underline{J}_{гр,1}$ позволяет оценить частоту обнаружения того или иного источника генерации.

3. В электротехническом комплексе систем электроснабжения всегда есть обнаруженный потребитель – генератор гармоник.

4. В электротехническом комплексе систем электроснабжения с двумя источниками генерации всегда существуют условия, при которых оба потребителя – генератора гармоник могут быть обнаружены.

5. Условием, при которых потребитель – генератор гармоник всегда может быть обнаружен, является бесконечная мощность линейной нагрузки других потребителей электротехнического комплекса, что возможно только в теории.

6. Первый основной критерий позволяет оценить влияние подключаемого источника генерации токов гармонических составляющих на обнаружение уже присутствующих в комплексе. Для этого необходимо провести сравнение критериев, полученных до и после подключения нового источника.

7. Если в результате подключения к сети сетевой организации нового потребителя – генератора гармоник обнаруженные источники генерации токов гармонических составляющих более не обнаруживаются, то при технологическом присоединении подключаемого потребителя должны быть введены дополнительные условия по подавлению его как источника генерации путем установки и эксплуатации ФКУ или АФ.

8. С падением мощностей нагрузок линейных потребителей источник генерации токов гармонических составляющих сложнее обнаружить.

9. С падением мощностей линейных нагрузок у потребителей – генераторов гармоник источник генерации легче обнаружить.

10. Источники генерации токов гармонических составляющих, у которых токи источников не превышают граничного значения $\underline{J}_{\text{гр},1}$, могут быть обнаружены поочередно, путем устранения генерации с помощью ФКУ или АФ уже обнаруженными источниками. После этого будет выполняться первый основной критерий обнаружения для очередного необнаруженного источника генерации. Для достижения этой цели, помимо аналитических критериев, необходимы новые параметры КЭ.

ГЛАВА 4 АЛГОРИТМ ПООЧЕРЕДНОГО ОБНАРУЖЕНИЯ И ПОДАВЛЕНИЯ ИСТОЧНИКОВ ТОКОВ ГАРМОНИЧЕСКИХ СОСТАВЛЯЮЩИХ

§ 4.1 Объем искаженной электроэнергии как новый количественный параметр оценки качества электроэнергии

В настоящее время известные численные и предлагаемые более общие аналитические критерии позволяют определить только часть источников генерации токов гармонических составляющих, присутствующих в электротехническом комплексе систем электроснабжения. При применении критериев используются показатели и параметры КЭ, которые регистрируются системой мониторинга в ТПЭ потребителей и характеризуют несинусоидальный режим в данных точках электротехнического комплекса.

Как было показано в предыдущих главах, при управлении КЭ в части несинусоидальности важным является не только обнаружить потребителей – генераторов гармоник, но и побудить их к участию в инвестиционном проекте установки и эксплуатации ФКУ ил АФ, что позволит снизить уровень гармонических составляющих в электрической сети. Кроме устранения вредных последствий протекания токов гармонических составляющих, это позволит также обнаружить других потребителей – генераторов гармоник, которые не были ранее обнаружены как источники генерации при проведении мониторинга КЭ.

Таким образом, на существующем этапе развития техники задача по подавлению источников генерации токов гармонических составляющих должна решаться поэтапно. На первом этапе необходимо стимулировать обнаруженных потребителей – генераторов гармоник к установке ФКУ или АФ. На следующих этапах, вследствие перераспределения токов гармонических составляющих, обнаруживают себя другие необнаруженные ранее источники генерации. По

отношению к ним также необходимо применять управляющее воздействие. Известная система мониторинга показателей и параметров КЭ не пригодна для подобного решения задачи, поскольку она не дает необходимой информации для принятия мер по подавлению источников генерации. Показатели и параметры КЭ, измеряемые ею, не востребуются системой управления.

Необходим новый параметр оценки КЭ в системах электроснабжения, к которому предъявляются следующие требования:

1) параметр должен характеризовать генерацию токов гармонических составляющих потребителя – генератора гармоник;

2) параметр должен быть объемом товара или услугой, что позволит его включить в систему управления КЭ.

Рассматривая в электротехническом комплексе поток энергии основной частоты от поставщика, который передается по электротехническим устройствам сетевой организации к потребителю для осуществления технологических процессов, можно предположить, что потребляемая электроэнергия в определенные интервалы времени при условии отсутствия гармонических составляющих является качественной. Тогда при генерации токов гармонических оставляющих нелинейной нагрузкой потребителей в другие интервалы времени электроэнергии будет искаженной.

В ряде случаев, искаженная электроэнергия в фиксированном интервале времени может быть следствием генерации нелинейной нагрузкой только одного потребителя. Активная мощность гармонических составляющих выходит за ТПЭ. Потребитель является обнаруженным генератором гармоник.

В соответствии с технологическим процессом передачи, распределения и потребления электроэнергии, в сети сетевой организации объем потребляемой электроэнергии, искаженной одним из потребителей – генераторов гармоник, содержится в общем объеме потребляемой электроэнергии, передаваемой всем потребителям [57]. Такой объем искаженной электроэнергии растворяется в общем объеме передаваемой всем потребителям сетевой организации

электроэнергии. Другие потребители в интервалы времени потребления потребителем – генератором гармоник электроэнергии вынуждены потреблять электроэнергию, искаженную этим потребителем. Это одна из особенностей процессов производства, включая генерацию токов гармонических составляющих, и потребления электроэнергии, характеризующаяся равенством генерируемых и потребляемых мощностей в любой момент времени в нормальном режиме работы [21]. Поэтому можно достоверно предположить, что именно с этой электроэнергией при ее потреблении связаны вредные последствия, возникающие у потребителей и сетевой организации.

В самом сложном и наиболее часто встречающемся случае искажение электроэнергии обусловлено генерацией токов гармонических составляющих сразу нескольких потребителей – генераторов гармоник (рисунок 1.3). В таком случае, в электротехническом комплексе протекают, распределяются и потребляются токи гармонических составляющих, генерируемые несколькими источниками генерации. Данное обстоятельство обуславливает обнаружение или не обнаружение потребителей – генераторов гармоник как источников генерации. В разные фиксированные интервалы времени при изменении схемы или состава электротехнического комплекса в зависимости от численного критерия обнаружения (1.4) отдельно взятый потребитель – генератор гармоник может быть как обнаруженным источником генерации, так и необнаруженным.

Объем потребляемой электроэнергии, искаженной токами гармонических составляющих, за определенный период времени может служить количественным параметром для оценки КЭ и расчета значений управляющих факторов в системе управления, например, для расчета стоимости причиненного реального ущерба. Он должен регистрироваться системой мониторинга КЭ в ТПЭ в фиксированные интервалы времени, когда потребитель – генератор гармоник является обнаруженным источником генерации (рисунок 4.1). Предлагаемый параметр является вредоносным технологическим фактором и характеризует степень негативного воздействия на электротехнические устройства комплекса.

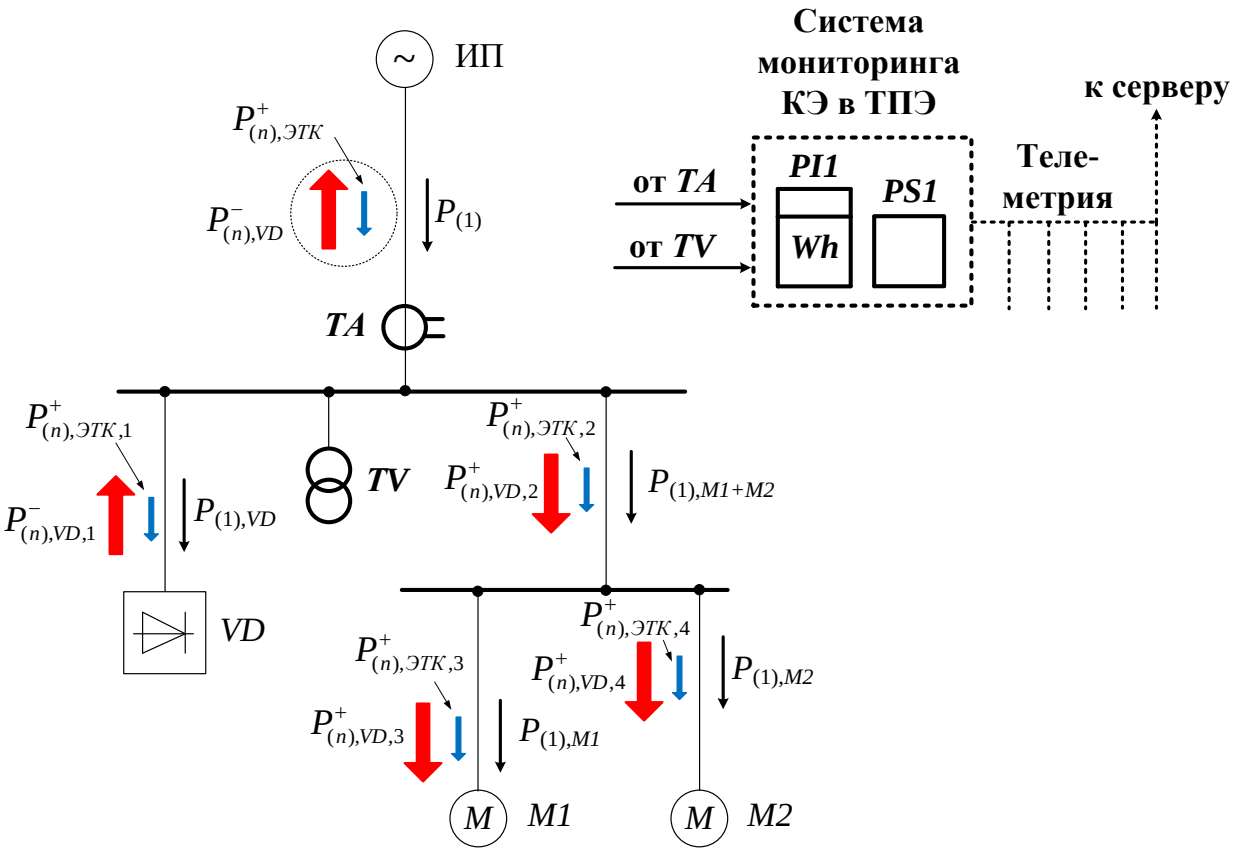


Рисунок 4.1 – Принципиальная схема участка комплекса, поясняющая регистрацию объема искаженной электроэнергии

В диссертационной работе в качестве нового параметра оценки КЭ в системах электроснабжения предлагается использовать **объем искаженной электроэнергии** $W_{иск}$ [кВт·ч], представляющий собой часть объема активной электроэнергии основной частоты, в моменты потребления которой происходит искажение КЭ в ТПЭ по показателям, характеризующим несинусоидальность, возникающую вследствие генерации нелинейной нагрузкой потребителя токов гармонических составляющих [58, 136].

Являясь частью объема потребляемой электроэнергии, поставляемой субъектами электроэнергетики, объем искаженной электроэнергии при юридической оценке однозначно может восприниматься товаром или услугой. Оплата объема искаженной электроэнергии за генерацию токов гармонических составляющих с точки зрения классической системы товарооборота и тарифообразования для широкого круга общественности и законодателей

является вполне понятной. Предлагаемый параметр является характеристикой товара или услуги и может быть включен в нормативные правовые акты.

Условиями регистрации параметра являются обнаружение потребителя как источника генерации токов гармонических составляющих и нарушение требований ГОСТ 32144-2013 в части несинусоидальности (рисунок 4.2).

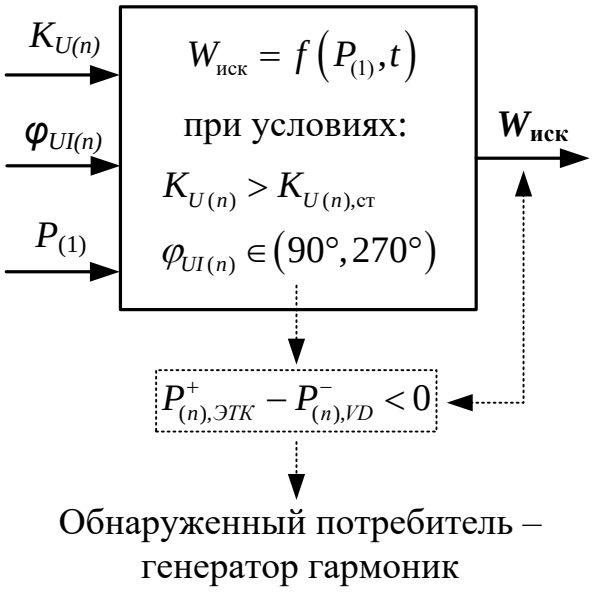


Рисунок 4.2 – Определение объема искаженной электроэнергии

§ 4.2 Определения объема искаженной электроэнергии за период времени нормирования качества электроэнергии

Уровни электромагнитной совместимости существенно влияют на причиняемый ущерб и нормирование КЭ [128]. Если уровни помеховосприимчивости электротехнических устройств не превышаются, то нарушение их функционирования, при протекании токов гармонических составляющих, может наступить не сразу, а спустя некоторое количество времени. Поэтому если ограничить время воздействия электромагнитной помехи или, другими словами, время протекания токов гармонических составляющих, то при их определенных уровнях вредные последствия могут не наблюдаться.

Согласно действующему ГОСТ 32144-2013 [26] время превышения нормально допустимых значений ПКЭ T_1 не должно превышать 5 % интервала времени в течение семи суток, а предельно допустимые значения ПКЭ вовсе не допускается превышать, т.е. время их превышения T_2 равно нулю.

С учетом этого для регистрации предлагаемого параметра КЭ требуется уточнить понятия интервала времени измерения, усреднения и нормирования.

Согласно ГОСТ 30804.4.30-2013 [25], в котором приводятся методы измерения показателей и параметров КЭ, основной интервал времени измерения составляет 10 периодов для частоты 50 Гц. Затем периоды измерения объединяются в более крупные интервалы времени: 3 с, 10 мин или 2 ч.

В п. 4.2.4 ГОСТ 32144-2013 приведены нормы для значений коэффициентов гармонических составляющих напряжения $K_{U(n)}$, усредненных в интервале времени 10 мин (интервал времени усреднения ПКЭ).

Заключение о соответствии электроэнергии требованиям ГОСТ 32144-2013 проводится для всего интервала времени обследования КЭ, который составляет 7 суток. В течение 7 суток ведется непрерывное измерение ПКЭ в ТПЭ, регистрируются значения, превышающие нормально и предельно допустимые значения. На основании этого делается заключение о соответствии или несоответствии требованиям государственных стандартов электроэнергии в течение интервала времени нормирования КЭ.

С учетом нормирования значений показателей $K_{U(n)}$ и допустимых времен превышения T_1 и T_2 условия регистрации объема искаженной электроэнергии могут быть представлены следующим образом:

- на десятиминутном интервале времени усреднения ПКЭ в ТПЭ наблюдается превышение установленных норм по показателю $K_{U(n)}$;

- мощность гармонических составляющих $P_{(n)}$ в ТПЭ имеет обратное направление (от потребителя в электрическую сеть сетевой организации);

- рассматриваемый десятиминутный интервал времени усреднения входит в семисуточный интервал времени нормирования КЭ, на котором установлено

несоответствие электроэнергии требованиям ГОСТ 32144-2013 по показателям, характеризующим несинусоидальность питающего напряжения.

Регистрация системой мониторинга объема искаженной электроэнергии подобным образом не противоречит требованиям стандарта ГОСТ 32144-2013.

Был разработан способ определения объема искаженной электроэнергии за период времени нормирования, защищенный патентом РФ [91]. На его основе предлагается алгоритм, представленный на рисунке 4.3.

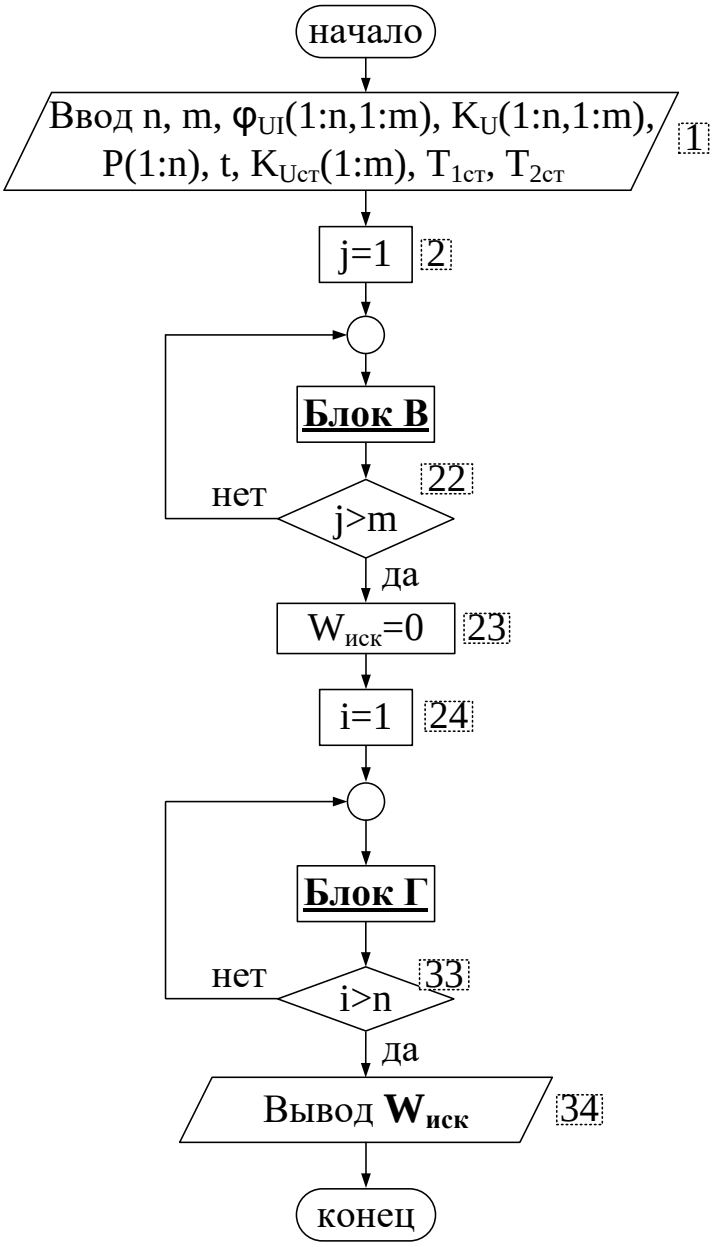


Рисунок 4.3 – Блок схема алгоритма определения объема искаженной электроэнергии

Работа алгоритма ведется независимо для каждой из фаз трехфазной системы и предполагает работу с двумерными массивами, где i и n – порядковый номер интервала усреднения (счетчик строк), j – порядковый номер гармонических составляющих (счетчик столбцов), n и m – номера последних интервалов усреднения и гармонической составляющей.

Для удобства алгоритм разбит на несколько функциональных блоков.

Блок А. Оценка превышения допустимых значений ПКЭ при обнаруженном потребителе – генераторе гармоник.

Блок Б. Оценка времени превышения допустимых значений ПКЭ.

Блок В. Отбор объема искаженной электроэнергии из общего объема потребляемой электроэнергии.

Блок Г. Обработка результатов работы Блока В.

Исходными данными для расчета значения объема искаженной электроэнергии является следующая информация (элемент 1):

- угол фазового сдвига между напряжением и током гармонических составляющих φ_{UI} (1:n,1:m);

- коэффициенты гармонических составляющих напряжения $K_{U(n)}$ (1:n,1:m);

- активная мощность основной частоты или активная потребляемая мощность, полученная прибором учета электроэнергии, P (1:n).

Все исходные данные должны соответствовать одинаковым 10-минутным интервалам усреднения в течение рассматриваемого интервала времени.

Нормы для КЭ в части несинусоидальности приводятся в составе:

- значений коэффициентов $K_{U\text{ст}}$ (1:m) для напряжений 0,38; 6-25; 35 кВ согласно таблицам 1-3 п. 4.2.4 ГОСТ 32144-2013;

- нормируемых значений времен превышения нормально и предельно допустимых значений ПКЭ $T_{1\text{ст}}$, $T_{2\text{ст}}$.

На первом этапе ведется отбор значений для объема искаженной электроэнергии из общего объема потребляемой электроэнергии за период времени нормирования (блок В, блок схема которого приведена на рисунке 4.4.).

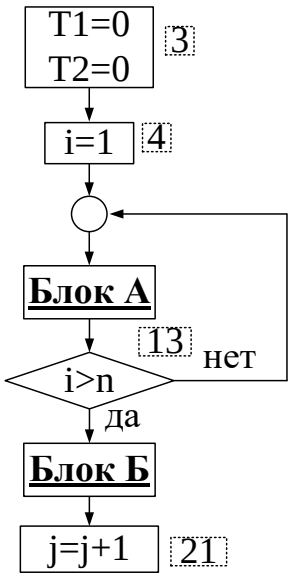


Рисунок 4.4 – Блок схема алгоритма для блока В

Отбор значений мощностей для $W_{иск}$ ведется в блоке А с учетом оценки превышения $K_{U(n)}$ при обнаруженном генераторе гармоник (рисунок 4.5).

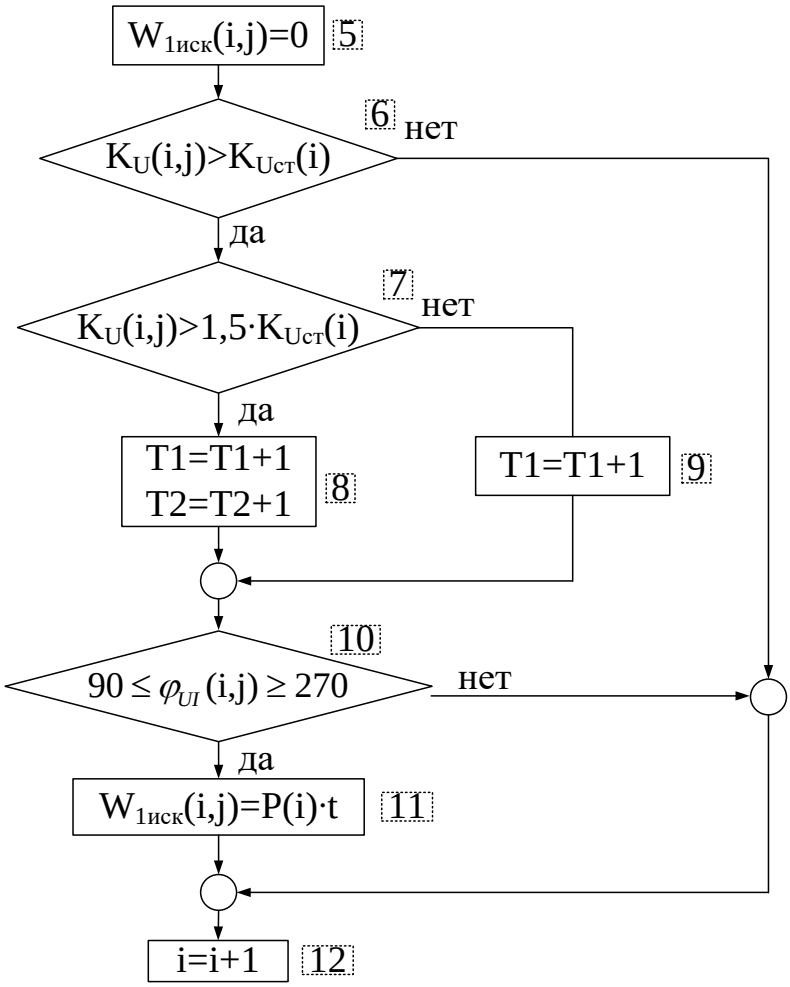


Рисунок 4.5 – Блок схема алгоритма для блока А

В элементах 6 и 7 проверяется превышение значений $K_{U(n)}$ над нормально и предельно допустимыми значениями. Далее в элементе 10 проводится оценка угла фазового сдвига для выявления источника генерации. Если источником является потребитель, то происходит первичный отбор потребляемой на 10-минутном интервале времени активной мощности.

При отборе мощностей также учитывается оценка времени превышения допустимых значений ПКЭ (блок Б на рисунке 4.6).

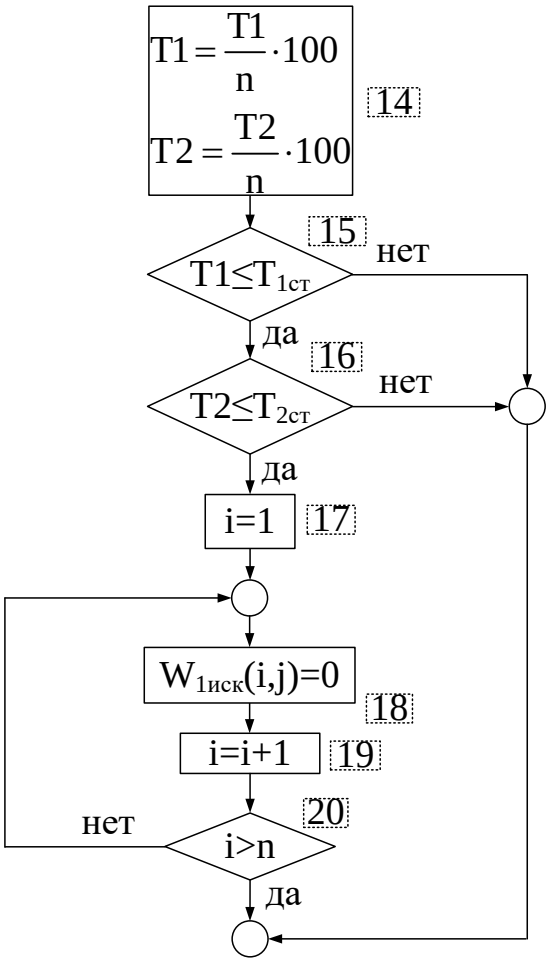


Рисунок 4.6 – Блок схема алгоритма для блока Б

Для этого рассчитываются фактические времена выхода ПКЭ за нормы (элемент 14), которые сравниваются со стандартными значениями $T_{1ст}$ и $T_{2ст}$. Если на семисуточном интервале отсутствуют превышения допустимого времени, то $W_{иск}$ на отобранных 10-минутных интервалах времени обнуляются (элемент 18).

Результатом проводимых в блоке В операций является двумерный массив объема искаженной электроэнергии $W_{1иск}$ следующего вида:

$$W_{1\text{иск}} = \begin{bmatrix} W_{1\text{иск }1,1} & W_{1\text{иск }1,2} & \dots & W_{1\text{иск }1,m} \\ W_{1\text{иск }2,1} & W_{1\text{иск }2,2} & \dots & W_{1\text{иск }2,m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ W_{1\text{иск }n,1} & W_{1\text{иск }n,2} & \dots & W_{1\text{иск }n,m} \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Часть элементов массива (4.1), если потребитель не является источником генерации или отсутствуют нарушения требований к КЭ, принимают нулевое значение. Во всех отличных случаях элементы имеют ненулевые значения.

В (4.1) на нескольких интервалах усреднения могут встретиться одинаковые объемы искаженной электроэнергии, если нарушения по $K_{U(n)}$ были зафиксированы сразу на нескольких частотах гармонических составляющих. Поэтому, для корректного представления результатов алгоритм дополнен блоком Г, для которого на рисунке 4.7 представлена блок схема.

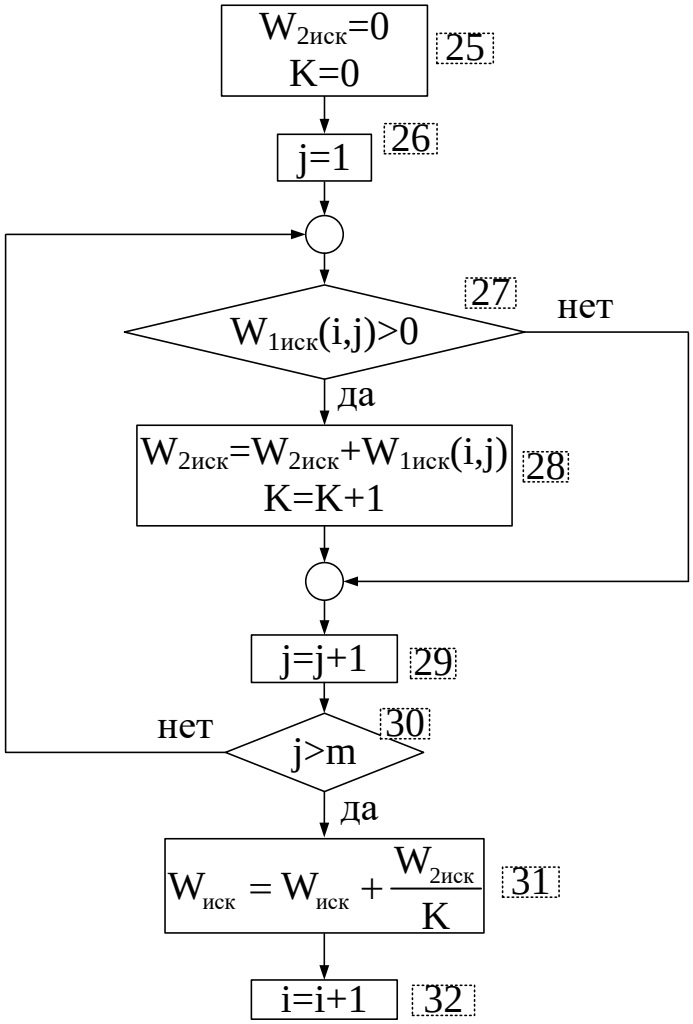


Рисунок 4.7 – Блок схема алгоритма для блока Г

Согласно элементам 28 и 31, объем искаженной электроэнергии представляет собой сумму объемов, найденных на каждом интервале усреднения с учетом коррекции на повторно отобранные объемы $W_{1\text{иск}\,i,j}$.

Таким образом, результатом проведения операций всего алгоритма является фазный объем искаженной электроэнергии $W_{\text{иск}}$ за семисуточный период времени нормирования КЭ (элемент 34).

Возможные значения и диапазон значений объема искаженной электроэнергии представлены в таблице 4.1, в которой $W_{\text{норм.КЭ}}$ – объем электроэнергии основной частоты, потребленной за интервал времени нормирования КЭ.

Таблица 4.1 – Возможные варианты значений объема искаженной электроэнергии

	Значение $W_{\text{иск}}$		
	Обнаруженный потребитель – генератор гармоник	Необнаруженный потребитель – генератор гармоник	Линейный потребитель
Зафиксированы нарушения требований ГОСТ 32144-2013	$\left(0;W_{\text{норм.КЭ}}\right]$	0	0
Нет нарушений требований ГОСТ 32144-2013	0	0	0

§ 4.3 Коэффициент искажения электроэнергии

Предлагаемый параметр оценки КЭ должен регистрироваться системой мониторинга в ТПЭ за период времени нормирования. При этом ГОСТ

30804.4.30-2013, в зависимости от стационарности используемых измерителей, предусматривает следующие виды мониторингов:

- непрерывный мониторинг, при котором в ТПЭ стационарно находятся средства измерения КЭ или многофункциональные приборы учета с функцией контроля КЭ. Это позволяет непрерывно вести обследование КЭ в ТПЭ и регистрировать объем искаженной электроэнергии на любом интервале времени;

- периодический мониторинг, при котором в ТПЭ на постоянной основе отсутствуют средства измерения КЭ. В таком случае необходимо пользоваться услугами сертифицированных электролабораторий, с которыми заключается договор на обследование КЭ в ТПЭ с определенной периодичностью, например, один раз в месяц. При этом лаборатории должны располагать необходимыми переносными средствами измерения КЭ. Измерения проводятся в течение периода времени нормирования КЭ, по результатам которых потребителю предоставляется информация по несинусоидальному режиму и выдается заключение о соответствии электроэнергии требованиям ГОСТ 32144-2013;

- одиночный мониторинг, при котором в ТПЭ на постоянной основе также отсутствуют средства измерения КЭ. В отличие от случая периодического мониторинга, измерения проводятся разово с привлечением услуг сертифицированных электролабораторий.

Определяемый по предлагаемому алгоритму объем искаженной электроэнергии является частью объема потребляемой электроэнергии, а значит, соответствует определенному периоду времени, равному одной неделе. Другому интервалу времени будет соответствовать другой объем потребляемой электроэнергии. Поэтому в случае периодического или одиночного мониторинга КЭ, количественная оценка генерации потребителем токов гармонических составляющих, выраженная в абсолютных единицах (предлагаемый параметр КЭ $W_{иск}$) не является корректной. Необходима также оценка, выраженная в относительных единицах.

В связи с этим предлагается второй новый параметр КЭ – **коэффициент искажения электроэнергии** $d_{иск}$, определяемый для интервала времени нормирования КЭ по выражению:

$$d_{иск} = \frac{W_{иск}}{W_{норм.КЭ}}. \quad (4.2)$$

Коэффициент искажения электроэнергии характеризует долю искажения электроэнергии потребителем – генератором гармоник в общем объеме его потребления за период времени нормирования и может использоваться на других интервалах времени. Поскольку коэффициент искажения выражает объем искаженной электроэнергии в относительных единицах, то он не требует нормирования.

Алгоритм определения объема искаженной электроэнергии, дополненный расчетом коэффициента искажения электроэнергии, реализован в компьютерной программе *«Расчет объема искаженной токами гармоник электроэнергии в сети до 1 кВ»* (Приложение Б) [110]. Программа за период времени нормирования КЭ обеспечивает расчет объема искаженной электроэнергии $W_{иск}$ и коэффициента искажения электроэнергии $d_{иск}$, а также определяет порядок гармонической составляющей, на которой присутствуют нарушения требований к форме кривой питающего напряжения.

Программа позволяет сократить время, необходимое для определения источников генерации токов гармонических составляющих, и дать количественную оценку степени искажения синусоидальной формы кривой напряжения нелинейной нагрузкой рассматриваемого потребителя. Если потребитель является необнаруженным источником генерации токов гармонических составляющих или не содержит нелинейных нагрузок, а также в его ТПЭ отсутствуют нарушения требований ГОСТ 32144-2013 в части несинусоидальности, то объем искаженной электроэнергии, как и коэффициент искажения электроэнергии, будет равен нулю. Генерация токов гармонических составляющих не фиксируется программой.

Программа предназначена для специалистов лабораторий по контролю КЭ (акт внедрения в лабораторию филиала ПАО «Россети Волга» приведен в Приложении Г), федеральных и региональных служб по регулированию тарифов, сетевых компаний, энергосбытовых организаций и электросетевого хозяйства потребителей. Все исходные данные для работы программы могут быть получены при помощи большинства современных средств измерения КЭ, оснащенных токовыми клещами и представленных на рынке [28, 32].

Программа может быть непосредственно реализована в микропроцессорных устройствах и многофункциональных приборах учета с функцией контроля КЭ, например, Ресурс-Е4 [115] или BINOM3 [73], и интегрирована в автоматизированные системы учета электроэнергии, основной целью которых является сбор информации о количестве электроэнергии и величин ее параметров для дальнейшего использования [66] в системах управления энергопотреблением, в том числе системе управления КЭ.

§ 4.4 Определение объема искаженной электроэнергии за расчетный период

Объема искаженной электроэнергии $W_{иск}$ и коэффициента искажения электроэнергии $d_{иск}$ в дальнейшем используются для решения задачи по снижению или устранению генерации токов гармонических составляющих. Поэтому, с учетом перспективы дальнейшего применения, удобнее всего определять значения предлагаемых параметров КЭ за интервал времени, равный расчетному периоду оплаты за потребляемую электроэнергию. Расчетный период оплаты электроэнергии равен одному месяцу. В этом случае достигается наибольшая эффективность от их применения в системе управления при формировании управляющего воздействия.

При определении объема искаженной электроэнергии за расчетный период требуется рассмотреть случаи непрерывного мониторинга с постоянной установкой в ТПЭ средств измерения КЭ и периодический или одиночный мониторинг с привлечением услуг сертифицированных лабораторий.

В случае если в электротехническом комплексе систем электроснабжения присутствует система непрерывного мониторинга, то объем искаженной электроэнергии за расчетный период складывается из объемов искаженной электроэнергии, найденных за периоды времени нормирования КЭ:

$$W_{\text{иск,р/п}} = \sum_{i=1}^{D} W_{\text{иск},i}\,, \tag{4.4}$$

где D – количество периодов времени нормирования КЭ на расчетном периоде.

В общем случае в расчетный период входит не целое число периодов времени нормирования КЭ ввиду несовпадения их размерностей. Поэтому к расчетному периоду необходимо отнести полностью входящие в него интервалы времени нормирования КЭ, а также интервал времени нормирования (при наличии), который выпал на начало расчетного периода и по отношению к нему является неполным (рисунок 4.8).

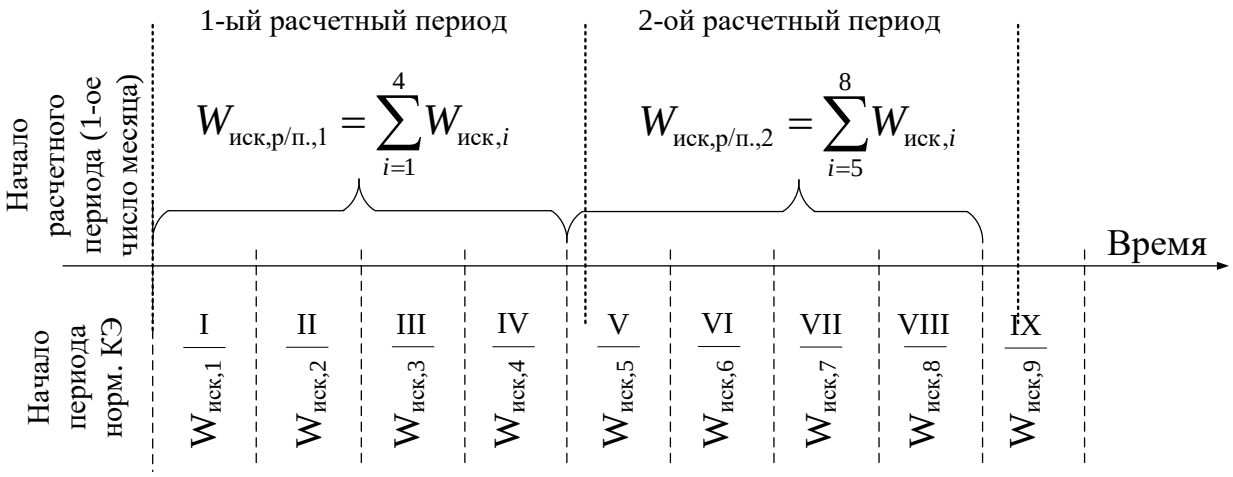


Рисунок 4.8 – Определение объема искаженной электроэнергии за расчетный период при наличии системы непрерывного мониторинга

На рисунке 4.8 к первому расчетному периоду относятся периоды нормирования с первого по четвертый. Соответственно, объем искаженной электроэнергии за первый расчетный период $W_{\text{иск,р/п.,1}}$ составляет сумма объемов искаженной электроэнергии, зарегистрированных системой мониторинга за первые четыре периода нормирования КЭ. Объем искаженной электроэнергии на пятом интервале времени нормирования, который входит как в первый, так и второй расчетные периоды, необходимо учитывать во втором расчетном периоде.

Во втором случае при отсутствии системы непрерывного мониторинга показателей и параметров КЭ объем искаженной электроэнергии за расчетный период определяется по известным коэффициентам искажения электроэнергии:

$$W_{\text{иск,р/п}} = d_{\text{иск}} \cdot W_{\text{р/п}}, \tag{4.5}$$

где $W_{\text{р/п}}$ – объем электроэнергии, потребленной за расчетный период.

При этом проводятся следующие операции. На расчетном периоде привлекаются специалисты сертифицированных лабораторий, которые проводят обследование КЭ в течение периода времени нормирования КЭ, для которого определяется объем искаженной электроэнергии и рассчитывается коэффициент искажения электроэнергии $d_{\text{иск}}$. Далее объем искаженной электроэнергии для этого расчетного периода и следующего за ним вплоть до новых измерений КЭ и расчета нового коэффициента искажения электроэнергии $d_{\text{иск}}$ определяется по последнему известному значению $d_{\text{иск}}$ (рисунок 4.9).

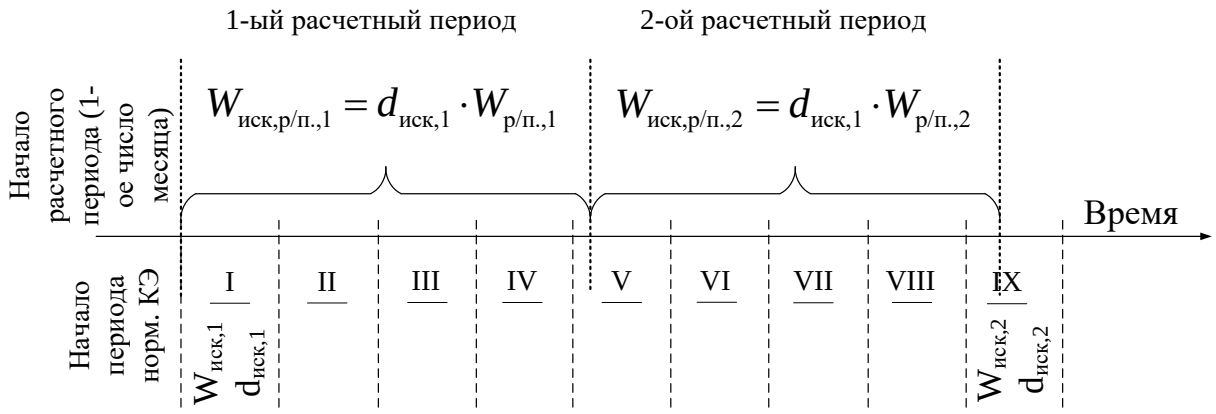


Рисунок 4.9 – Определение объема искаженной электроэнергии за расчетный период при отсутствии системы непрерывного мониторинга

На рисунке 4.9 для расчета объема искаженной электроэнергии на первом и втором расчетном периодах используется значение коэффициента $d_{иск,1}$, полученного по результатам мониторинга КЭ на первом интервале времени нормирования. Далее при проведении нового мониторинга на девятом периоде времени нормирования рассчитывается новое значение коэффициента искажения электроэнергии $d_{иск,2}$, по которому будут определяться объемы искаженной электроэнергии на третьем и следующих за ним расчетных периодах.

Определяемое при непрерывном, одиночном или периодическом мониторинге значение объема искаженной электроэнергии за период времени нормирования КЭ характеризует генерацию токов гармонических составляющих потребителем – генератором гармоник. При определении объема искаженной электроэнергии за расчетный период данная величина в системе управления становится *оплачиваемым параметром* за генерацию токов гармонических составляющих при применении воздействующих факторов. Оплата объема искаженной электроэнергии, проводимая потребителем – генератором гармоник за расчетный период, является для него стимулирующим фактором, который побуждает его к участию в инвестиционном проекте установки и эксплуатации ФКУ или АФ.

Стимулирование подобным образом потребителей – генераторов гармоник к устранению генерации токов гармонических составляющих соответствует задачам цифровизации энергетики России в рамках концепции создания нового класса потребителей – активных потребителей, управляющих режимами потребления электроэнергии [6, 103]. В данном случае, потребитель – генератор гармоник является активным в рамках устранения генерации своей нелинейной нагрузкой токов гармонических составляющих. Тем самым, снижается несинусоидальность напряжения и повышается эффективность и экономичность функционирования электротехнического комплекса систем электроснабжения сетевой организации и промышленных предприятий с нелинейными нагрузками.

§ 4.5 Порядок действий при поочередном поиске и подавлении источников генерации

Регистрация новых параметров КЭ базируется на численном методе обнаружения источников генерации с использованием углов фазового сдвига в диапазоне от 90 до 270° (1.4). Их дальнейшее применение вместе с основным аналитическим критерием, который позволяет провести оценку влияния нового источника генерации на обнаружение других источников, дает возможность сетевой организации определить необнаруженных ранее потребителей – генераторов гармоник как источники генерации. При этом обнаружение всех потребителей – генераторов гармоник достигается при непрерывном, периодическом или одиночном мониторинге на длительном интервале времени при постепенном включении потребителей в процесс снижения или устранения генерации токов гармонических составляющих, т.е. при поочередном подавлении источников генерации.

Таким образом, для решения задачи по снижению уровня гармонических составляющих напряжения до нормативных значений необходим комплекс цикличных мероприятий. С учетом обнаружения только части источников генерации токов гармонических составляющих, каждый цикл мероприятий должен быть направлен на обнаружение возможной части потребителей – генераторов гармоник и их стимулирование к участию в инвестиционном проекте установки и эксплуатации ФКУ или АФ. При этом цикл за циклом будет наблюдаться раскручивание «маховика», обеспечивающего снижение уровня гармонических составляющих напряжения. Со временем:

- будет накапливаться стимулирующий эффект для обнаруженных потребителей – генераторов гармоник, побуждающий их к снижению или устранению генерации токов гармонических составляющих;

- будет расти число потребителей – генераторов гармоник, принявших решение об участии в проекте установки и эксплуатации ФКУ или АФ;

- с ростом установленных в электротехническом комплексе систем электроснабжения ФКУ и АФ, как следствие, будет расти число обнаруженных источников генерации токов гармонических составляющих.

Установка и эксплуатация ФКУ или АФ обнаруженными потребителями – генераторами гармоник позволяет найти необнаруженных потребителей – генераторов гармоник на других интервалах времени нормирования КЭ или расчетных периодах. *Алгоритм поочередного обнаружения и подавления источников генерации токов гармонических составляющих* сводится к виду, приведенному на рисунке 4.10.

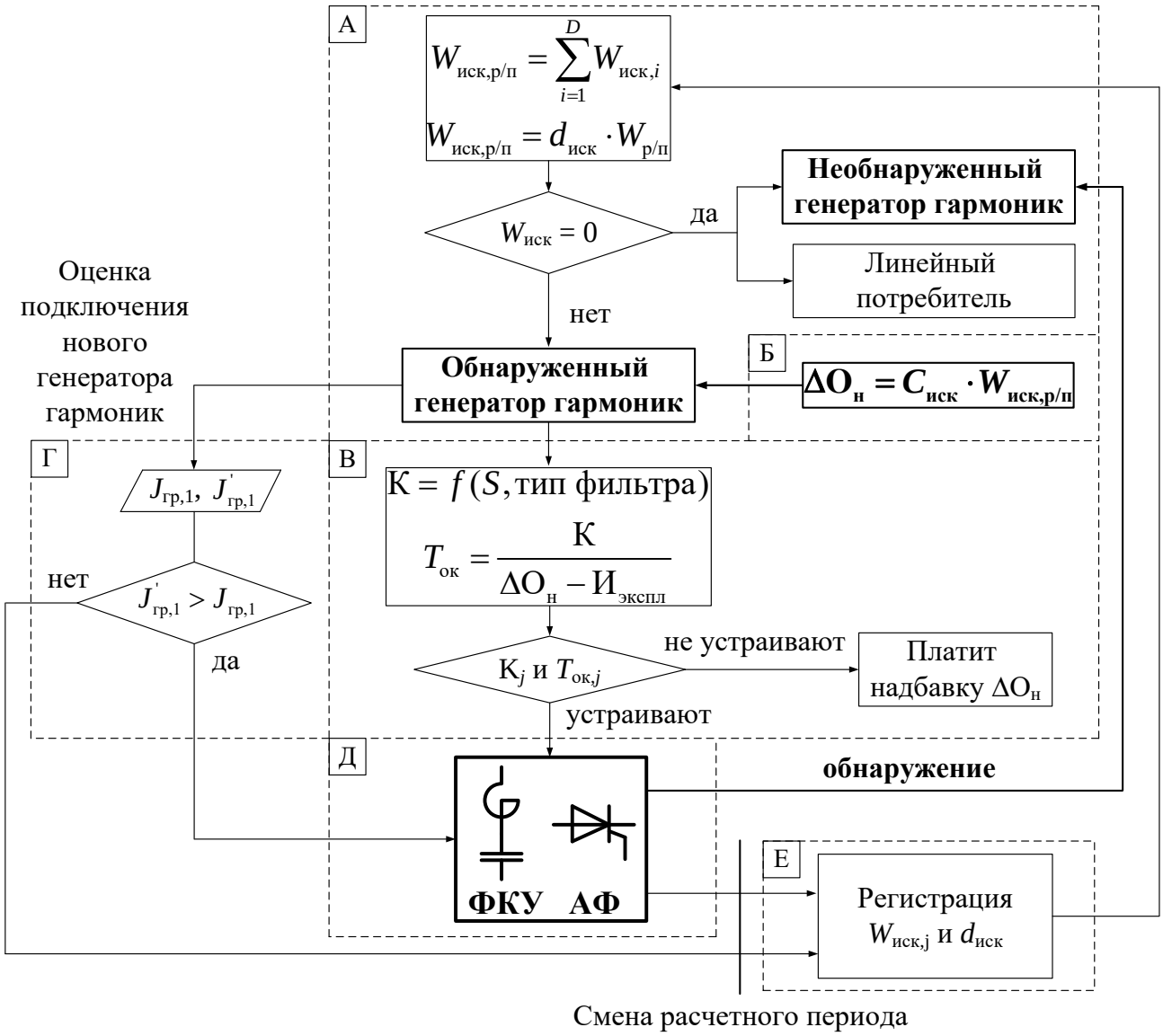


Рисунок 4.10 – Алгоритм поочередного обнаружения и подавления источников генерации

Алгоритм сводится к следующим основным шагам.

А) Начало расчетного периода. На первом этапе по результатам проводимого непрерывного, одиночного или периодического мониторинга КЭ за расчетный период согласно (4.4) или (4.5) рассчитывается объем искаженной электроэнергии $W_{иск,р/п}$. По числовому значению $W_{иск,р/п}$ определяется категория потребителей. Если значение $W_{иск,р/п}$ отлично от нуля, то потребителя следует отнести к категории обнаруженного источника генерации токов гармонических составляющих. В обратном случае, потребитель либо содержит только линейную нагрузку и активно не влияет на несинусоидальный режим, либо является необнаруженным генератором гармоник.

Б) По величине $W_{иск,р/п}$ для обнаруженных потребителей – генераторов гармоник в системе управления КЭ формируется управляющее воздействие, направленное на снижение или устранение генерации токов гармонических составляющих (рассматривается в следующей главе). Для потребителей – генераторов гармоник оно представляет собой доходную часть инвестиционного проекта установки ФКУ или АФ.

В) При применении управляющего воздействия потребитель – генератор гармоник имеет два вариант действий. В первом варианте он оплачивает объем искаженной электроэнергии, т.е. вредные последствия генерации своей нелинейной нагрузкой токов гармонических составляющих. Во втором варианте принимает решение об участии в инвестиционном проекте установке и эксплуатации ФКУ или АФ. Выбор того или иного варианта проводится при технико-экономической оценке инвестиционного проекта, которая подробно будет рассмотрена ниже [134, 138]. При этом, чем дольше оказывается управляющее воздействие на потребителя – генератора гармоник и чем больше его аккумулирующее значение, тем больше вероятность принятия решения потребителем в пользу установки фильтров.

Г) Оценка ввода в электротехнический комплекс систем электроснабжения нового потребителя – генератора гармоник при помощи граничных значений

основного аналитического критерия $J_{гр,1}$ и $J'_{гр,1}$. Граничные значения рассчитываются для одного или нескольких из обнаруженных потребителей – генераторов гармоник до и после подключения нового потребителя соответственно. В случае, если новый потребитель с нелинейными нагрузками увеличивает граничные значения токов источников обнаруженных потребителей – генераторов гармоник, то при его технологическом присоединении выдвигаются условия по подавлению его как источника генерации при помощи установки и эксплуатации ФКУ или АФ.

Данный пункт является дополнительным при условии формирования схемы замещения в виде трехлучевой звезды относительно обнаруженного потребителя – генератора гармоник и возможности расчета ее параметров.

Д) Установка и эксплуатация ФКУ или АФ заинтересованными в снижении генерации токов гармонических составляющих потребителями, а также потребителями, к которым выдвинуты дополнительные условия при технологическом присоединении. Это позволяет устранить вредные последствия протекания токов гармонических составляющих, связанные с их генерацией, и положительно повлиять на обнаружение других потребителей – генераторов гармоник, которые ранее не были обнаружены.

Е) Окончание рассматриваемого расчетного периода и переход к следующему, что соответствует окончанию одного цикла комплекса мероприятий. Возвращение в начало алгоритма (переход к пункту А).

На следующем расчетном периоде за счет перераспределения токов гармонических составляющих в электротехническом комплексе происходит обнаружение необнаруженных ранее потребителей – генераторов гармоник. Операции по поиску источников генерации и принятие мер по результатам мониторинга КЭ с регистрацией новых параметров КЭ и расчету, по возможности, аналитических критериев продолжаются до тех пор, пока генерация в электротехническом комплексе не будет снижена или устранена до допустимых уровней.

В таблице 4.2 представлена динамика объемов искаженной электроэнергии за расчетные периоды времени для потребителей – генераторов гармоник, которые поочередно приняли решение об установке ФКУ или АФ в результате применения управляющего воздействия.

Таблица 4.2 – Динамика объемов искаженной электроэнергии

Категория потребителя	$W_{иск}$, кВт·ч					
	Периоды нормирования КЭ				Р/п №1	
	I	II	III	IV		
Потребитель 1 – обнаруженный генератор гармоник	0	$W_{иск,2,1}$	$W_{иск,3,1}$	0	$W_{иск,р/п.,1,1}$	
Потребитель 2 – обнаруженный генератор гармоник	$W_{иск,1,2}$	$W_{иск,2,2}$	$W_{иск,3,2}$	$W_{иск,4,2}$	$W_{иск,р/п.,1,2}$	**ФКУ АФ**
Потребитель 3 – необнаруженный генератор гармоник	0	0	0	0	0	
Категория потребителя	$W_{иск}$, кВт·ч					
	Периоды нормирования КЭ				Р/п №2	
	V	VI	VII	VIII		
Потребитель 1 – обнаруженный генератор гармоник	0	$W_{иск,6,1}$	$W_{иск,7,1}$	$W_{иск,7,1}$	$W_{иск,р/п.,2,1}$	**ФКУ АФ**
Потребитель 2, устранивший генерация	0	0	0	0	0	ФКУ АФ
Потребитель 3 – обнаруженный генератор гармоник	$W_{иск,5,3}$	0	$W_{иск,7,3}$	0	$W_{иск,р/п.,2,3}$	

Продолжение таблицы 4.2

Категория потребителя	$W_{иск}$, кВт·ч					
	Периоды нормирования КЭ				Р/п №3	
	IX	X	XI	XII		
Потребитель 1, устранивший генерация	0	0	0	0	0	ФКУ АФ
Потребитель 2, устранивший генерация	0	0	0	0	0	ФКУ АФ
Потребитель 3 – обнаруженный генератор гармоник	$W_{иск,9,3}$	$W_{иск,10,3}$	$W_{иск,11,3}$	$W_{иск,12,3}$	$W_{иск,р/п.,3,3}$	**ФКУ АФ**
Категория потребителя	$W_{иск}$, кВт·ч					
	Периоды нормирования КЭ				Р/п №4	
	XIII	XIV	XV	XVI		
Потребитель 1, устранивший генерация	0	0	0	0	0	ФКУ АФ
Потребитель 2, устранивший генерация	0	0	0	0	0	ФКУ АФ
Потребитель 3, устранивший генерация	0	0	0	0	0	ФКУ АФ

На первом расчетном периоде наибольшее стимулирующее воздействие было оказано на потребителя 2, имеющего наибольшее значение зарегистрированного на каждом интервале времени нормирования КЭ объема искаженной электроэнергии $W_{иск,р/п.,1,2}$. Он принимает решение установить

фильтры гармоник. В результате, на следующем расчетном периоде это приводит к обнаружению потребителя 3 как источника генерации токов гармонических составляющих и увеличению объема искаженной электроэнергии потребителем 1, который также принимает решение об установке ФКУ или АФ.

На третьем расчетном периоде последний из рассматриваемых потребителей – генераторов гармоник также принял решение об участии в инвестиционном проекте, направленном на снижение или устранение генерации.

В результате, на четвертом расчетном периоде все потребители – генераторы гармоник устранили генерацию токов гармонических составляющих, что позволяет снизить уровень гармонических составляющих напряжения до нормируемых значений и повысить эффективность функционирования электротехнического комплекса систем электроснабжения.

Таким образом, регистрация системой мониторинга показателей и параметров КЭ за интервал времени нормирования объема искаженной электроэнергии $W_{иск}$ и коэффициента искажения электроэнергии $d_{иск}$ при их дальнейшем использовании позволяет существенно повысить процент обнаруженных источников генерации токов гармонических составляющих при их поочередном подавлении.

В схеме, приведенной в первой главе на рисунке 1.8 а, после формирования стимулирующего воздействия и установки широкополосного фильтра обнаруженным потребителем генератором гармоник, подключенным в ТПЭ1, углы фазового сдвига между напряжением и током в ТПЭ2 изменятся и примут следующие значения (таблица 4.3). Поскольку первый потребитель устранил генерацию, то рассматривать его более не имеет смысла. В отличие от углов фазового сдвига для схемы без широкополосного фильтра, приведенных в таблице 1.3 для ТПЭ2, второй потребитель – генератора гармоник становится обнаруженным источником генерации на всех частотах гармонических составляющих.

Таблица 4.3 – Углы сдвига в ТПЭ2 после установки широкополосного фильтра

Частота, Гц	Угол сдвига между напряжением и током, градусы
100 (h2)	194,3
150 (h3)	232,0
200 (h4)	239,5
300 (h6)	193,6
500 (h10)	171,7
700 (h14)	91,2
900 (h18)	282,4
1100 (h22)	212,3
	Обнаруженный генератор гармоник

§ 4.6 Технико-экономическая оценка инвестиционного проекта установки и эксплуатации фильтров гармоник

При формировании управляющего воздействия в системе управления КЭ, направленного на снижение или устранение генерации токов гармонических составляющих, используются предлагаемые параметры КЭ, регистрируемые системой мониторинга в ТПЭ потребителей. Оплата по объему искаженной электроэнергии за расчетный период для потребителей – генераторов гармоник является доходной частью инвестиционного проекта установки и эксплуатации ФКУ или АФ. При участии в таком проекте, потребители – генераторы гармоник снижают генерацию токов гармонических составляющих, что отражается на регистрируемом для них объеме искаженной электроэнергии, который принимает нулевой значение. В результате, управляющее воздействие при достижении своей цели снимается с потребителя – генератора гармоник и он перестает оплачивать вредные последствия генерации своей нелинейной нагрузкой токов гармонических составляющих.

Решение об участии в инвестиционном проекте установки и эксплуатации ФКУ или АФ потребитель – генераторов гармоник принимает на основе технико-экономического анализа с учетом своих финансовых возможностей (пункт В алгоритма обнаружения необнаруженных генераторов гармоник).

Известно достаточно большое количество показателей для расчета эффективности и оценки инвестиционного проекта: чистый дисконтированный доход, внутренняя норма доходности, период окупаемости и т.д. [79]. Поскольку инвестиционный проект предполагает установку ФКУ или АФ, которые позволяют снизить генерацию токов гармонических составляющих и привести характеризующий ее оплачиваемый параметр к нулю (прибыль проекта обусловлена только тем, что потребитель – генератор гармоник перестает оплачивать вредные последствия), то для оценки пригоден период окупаемости $T_{ок}$. В качестве дополнительного показателя в данном случае также могут быть рассмотрены инвестиции (капиталовложения) в проект К.

Инвестиции К и период окупаемости $T_{ок}$ инвестиционного проекта определяются принятыми решениями по снижению или устранению генерации токов гармонических составляющих. Учитывая представленные на рынке устройства, потребителю – генератору гармоник для подавления токов гармонических составляющих доступно несколько вариантов. Для решения этой задачи могут использоваться ФКУ или АФ различной мощности.

В первой главе были рассмотрены достоинства и недостатки ФКУ и АФ для подавления токов гармонических составляющих. ФКУ при низкой цене обладают неуправляемостью параметров, что ограничивает их эффективное применение случаем со спокойной нагрузкой. АФ при более высокой цене является динамичным устройством и способен менять свои характеристики в процессе эксплуатации, например, в случае с резкопеременной нагрузкой.

При расчете установленной мощности выбранных ФКУ или АФ необходимо учитывать выполняемые устройствами функции, поскольку кроме своего прямого назначения по подавлению токов гармонических составляющих

они также способны проводить компенсацию реактивной мощности (КРМ). КРМ фильтрами требует увеличения их мощности.

Так, на частоте ниже резонансной, ФКУ имеет емкостной характер и генерирует реактивную мощность. Мощность ФКУ при выполнении им функции по подавлению токов гармонических составляющих и КРМ может быть оценена по выражению [128]:

$$Q_{\text{уст}}^{\text{ПГ+КРМ}} = \omega \cdot C \left(\frac{n^2}{n^2 - 1} \cdot U_{(1)} \right)^2 + \frac{I_{(n)}^2}{n \cdot \omega \cdot C}, \tag{4.6}$$

где ω – основная угловая частота (314 рад/с);

C – емкость конденсаторов, используемых в фильтре.

При выполнении же функции только по подавлению токов гармонических составляющих, установленная мощность ФКУ рассчитывается по выражению:

$$Q_{\text{уст}}^{\text{ПГ}} = \frac{2}{\sqrt{n}} \cdot \frac{n^2}{n^2 - 1} \cdot U_{(1)} \cdot I_{(n)}. \tag{4.7}$$

Для АФ, если он выполняет функции по подавлению гармоник и корректирует коэффициент активной мощности за счет КРМ, выражение для его установленной мощности имеет вид [12, 92]:

$$S_{\text{уст}}^{\text{ПГ+КРМ}} = P_{(1)} \cdot \left(\sqrt{\frac{1}{\cos^2 \varphi} - 1} - \sqrt{\frac{1}{\cos^2 \varphi_{\text{ж}}} - 1} \right), \tag{4.8}$$

где $\cos\varphi_{\text{ж}}$ – желаемый коэффициент мощности после установки АФ.

Если АФ используется только для снижения уровня токов гармонических составляющих, то его установленная мощность равна:

$$S_{\text{уст}}^{\text{ПГ}} = \frac{P_{(1)}}{\cos \varphi} \cdot \frac{K_I}{\sqrt{1 + K_I^2}}, \tag{4.9}$$

где K_I – коэффициент токов гармонических составляющих.

Для проведения технического-экономического анализа потребителем – генератором гармоник предлагается алгоритм, представленный на рисунке 4.11 (на рисунке ПГ – подавление гармоник).

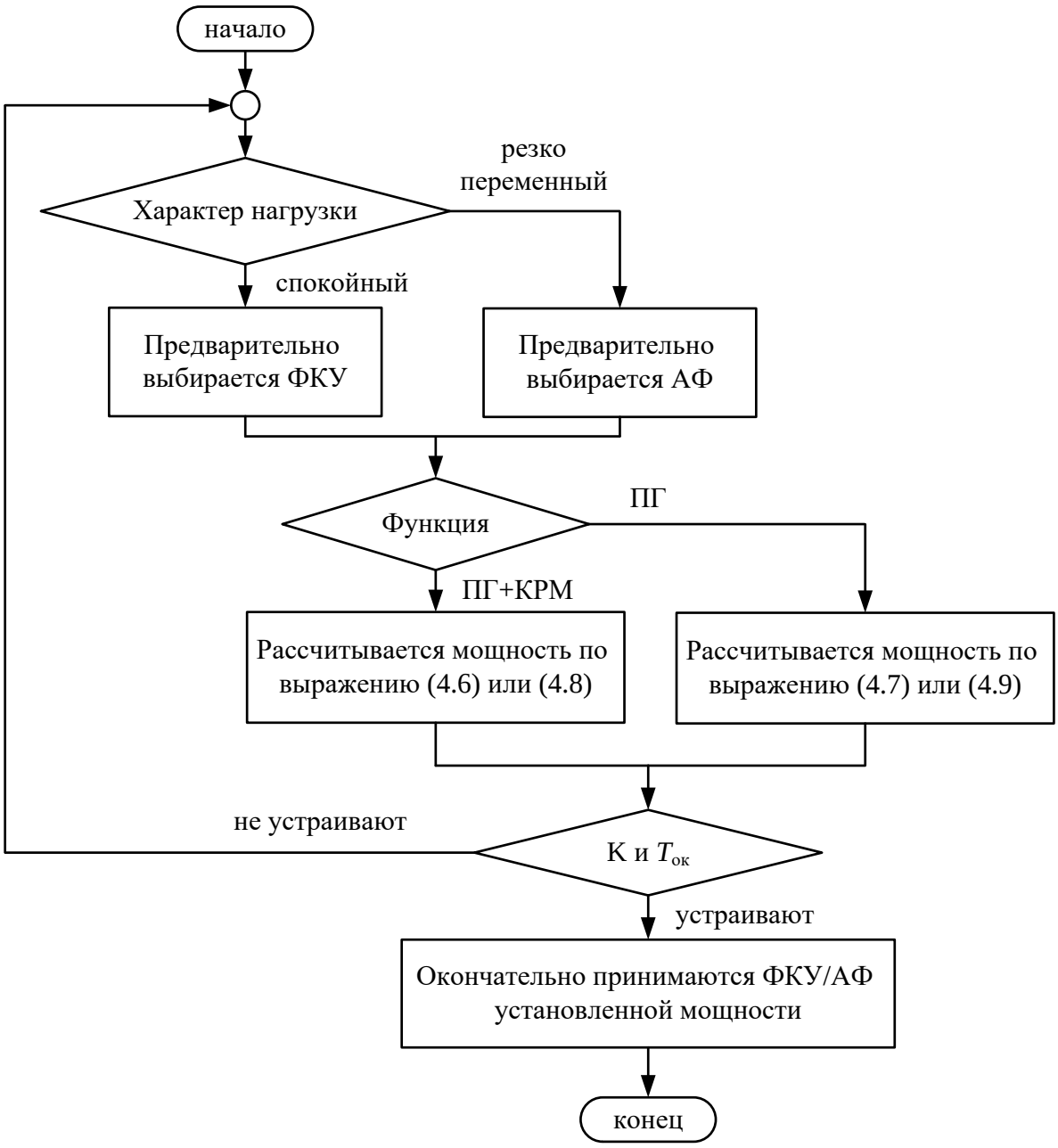


Рисунок 4.11 – Алгоритм выбора устройств подавления токов гармонических составляющих

Алгоритм учитывает такие факторы, влияющие на тип и установленную мощность устройств подавления, как характер потребления нелинейной нагрузки и функции, требуемые от устройства подавления. Потребитель – генератор гармоник в зависимости от характера потребления нагрузки может выбрать дешевые или дорогие устройства подавления. При этом установленная мощность устройства может быть снижена путем использования его только для подавления токов гармонических составляющих.

Алгоритм выбора позволяет найти оптимальные для потребителя – генератора гармоник тип и мощность устройства подавления, на закупку и установку которых требуются капиталовложения инвесторов К.

Решение инвесторов об участии в инвестиционном проекте установки и эксплуатации ФКУ или АФ принимается по значению периода окупаемости, который учитывает затраты и доходы проекта. В случае применения управляющего фактора системы управления, выраженного в виде оплаты стоимости вредных последствий, период окупаемости для *j*-того потребителя – генератора гармоник рассчитывается следующим образом:

$$T_{\text{ок},j} = \frac{\text{К}_j}{\text{Д}_j - \text{И}_{\text{экспл},j}}, \tag{4.10}$$

где Д_j – предполагаемый доход *j*-того потребителя – генератора гармоник при реализации инвестиционного проекта;

$\text{И}_{\text{экспл},j}$ – годовые издержки на эксплуатацию ФКУ или АФ.

Предполагаемый доход является величиной стоимости вредных последствий, которую потребитель – генератор гармоник перестает оплачивать при снижении генерации до допустимых уровней.

Выводы по четвертой главе

1. Для оценки генерации потребителями – генераторами гармоник токов гармонических составляющих предложены новые параметры КЭ.

Объем искаженной электроэнергии, $W_{\text{иск}}$ [кВт·ч]: часть объема активной электроэнергии основной частоты, в моменты потребления потребителем которой происходит искажение качества электроэнергии в его точке передачи электроэнергии по показателям, характеризующим несинусоидальность, возникающую вследствие генерации нелинейной нагрузкой данного потребителя токов гармонических составляющих.

Коэффициент искажения электроэнергии, $d_{иск}$: отношение объема искаженной электроэнергии за период времени нормирования качества электроэнергии к объему потребленной за этот же период времени электроэнергии.

2. Преимуществом параметров является возможность их включения в систему управления КЭ при условии совершенствования последней.

3. В системе управления значение объема искаженной электроэнергии за расчетный период времени $W_{иск,р/п}$ является оплачиваемым параметром за генерацию токов гармонических составляющих при формировании управляющих факторов. Оплата объема искаженной электроэнергии за расчетный период для потребителей – генераторов гармоник является стимулирующим фактором, который побуждает его к участию в инвестиционном проекте, направленном на снижение или устранении генерации токов гармонических составляющих.

4. Алгоритм поочередного обнаружения и подавления источников генерации токов гармонических составляющих использует объем искаженной электроэнергии $W_{иск}$ и коэффициент искажения электроэнергии $d_{иск}$, а также граничные значения основного аналитического критерия, рассчитываемых и применяемых при оценке подключения нового источника генерации. Это способствуют росту числа установленных и эксплуатируемых в электротехническом комплексе ФКУ и АФ, что в свою очередь позволяет:

- повысить процент обнаруженных источников генерации токов гармонических составляющих при их поочередном подавлении;

- устранить вредные последствия, связанные с генерацией нелинейной нагрузкой потребителей токов гармонических составляющих и их протеканием по элементам систем электроснабжения;

- повысить надежность, экономичность и эффективность всего электротехнического комплекса систем электроснабжения сетевой организации и промышленных предприятий с нелинейными нагрузками за счет снижения уровня гармонических составляющих напряжения до нормируемых значений.

ГЛАВА 5 РЕКОМЕНДАЦИИ ПО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ЗАКОНОДАТЕЛЬСТВА ДЛЯ СНИЖЕНИЯ НЕСИНУСОИДАЛЬНОСТИ НАПРЯЖЕНИЯ

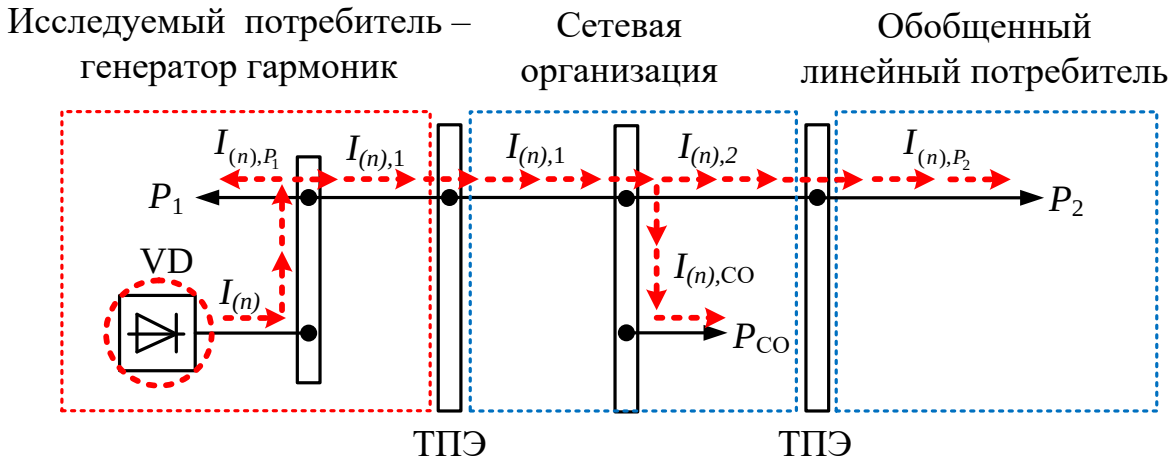
Предлагаемые параметры КЭ (объем искаженной электроэнергии и коэффициент искажения электроэнергии) регистрируются системой мониторинга показателей и параметров КЭ в ТПЭ потребителей. Их значения за расчетный период передаются в систему управления КЭ, которая должна использовать их при формировании управляющего воздействия, направленного на снижение или устранение генерации токов гармонических составляющих.

В условиях действующей системы управления КЭ применение новых параметров и аналитических критериев для подавления источников генерации ограничено. В силу ее настоящей структуры (рисунок 1.6), обусловленной нормативными техническими документами и законодательными актами [62, 157], предлагаемые параметры не могут использоваться. Поэтому необходимо совершенствование энергетического законодательства.

§ 5.1 Новый подход к построению системы управления качеством электроэнергии

Действующая система управления КЭ не учитывает специфики генерации, распределения и протекания токов гармонических составляющих в электротехническом комплексе электроснабжения.

Процесс генерации нелинейными нагрузками потребителей токов гармонических составляющих связан с вредными последствиями, наступающими при протекании и распределении токов для всех элементов электротехнического комплекса систем электроснабжения, электрически и магнитно связанных с нелинейными нагрузками (рисунок 5.1).



P_{CO} – нагрузка собственных нужд сетевой организации;
– направление распространения гармонических составляющих тока

Рисунок 5.1 – Упрощенная схема, иллюстрирующая распространение токов гармонических составляющих

Анализ схемы показывает, что технологический процесс поставки сетевой организацией электроэнергии основной частоты, необходимой потребителям для обеспечения их технологических процессов, в электротехническом комплексе с нелинейными нагрузками сопровождается передачей токов гармонических составляющих. При этом в части распространения токов гармонических составляющих предполагается участие [57]:

- потребителей, нелинейные нагрузки которых генерируют токи гармонических составляющих за ТПЭ в электрическую сеть сетевой организации (обнаруженные и необнаруженные потребители – генераторы гармоник);
- сетевой организации;
- остальных потребителей сетевой организации, которые не являются источниками генерации токов гармонических составляющих в электротехническом комплексе систем электроснабжения (линейные потребители и потребители – генераторы гармоник, устранившие генерацию – *потребители гармоник*).

Потребители – генераторы гармоник являются источниками появления токов гармонических составляющих в сети сетевой организации, виновными в

снижении уровня КЭ в ТПЭ других потребителей в части несинусоидальности и причиной возникновения вредных последствий при протекании токов гармонических составляющих в электрических сетях других участников правоотношений.

В электрических сетях потребителей гармоник и сетевой организации возникают вредные последствия при протекании токов гармонических составляющих, источниками которых они не являются.

При возникновении вредных последствий между участниками электротехнического комплекса в правовом поле возникают отношения, которые регламентируются нормативными правовыми актами. Возможны правоотношения между каждым потребителем – генератором гармоник и сетевой организацией, а также между каждым потребителем – генератором гармоник и другими потребителями сетевой организации, вынужденными принимать токи гармонических составляющих. Правоотношения позволяют определить обязательства и ответственность в случае их нарушения, необходимые для достижения цели по снижение генерации токов гармонических составляющих.

В существующей нормативной правовой базе, все документы которой приведены в параграфе 1.2, обозначены и установлены правоотношения только между потребителями – генераторами гармоник и сетевой организацией. Правоотношения напрямую или через посредника между потребителями – генераторами гармоник и потребителями, вынужденными потреблять токи гармонических составляющих, в существующей нормативной правовой базе не обозначены.

Таким образом, при существующем подходе к построению системы управления КЭ в части несинусоидальности участниками правоотношений являются сетевая организация и каждый из подключенных к ее электрической сети потребителей электроэнергии.

Для анализа эффективности системы управления в части снижения генерации токов гармонических составляющих достаточно рассмотреть два

варианта правоотношений между сетевой организацией и потребителями. В первом варианте – это сетевая организация и один из потребителей, который вынужден потреблять токи гармонических составляющих, а в другом – сетевая организация и один из потребителей – генераторов гармоник, являющийся их источником. При этом протекание токов гармонических составляющих в комплексе может быть обусловлено как одним, так и несколькими источниками генерации.

В обоих вариантах на сетевую организацию и потребителя возлагаются обязательства [94, 99] друг перед другом по поддержанию значений ПКЭ, обусловленных генерацией токов гармонических составляющих нелинейными нагрузками, в ТПЭ на уровне требований ГОСТ 32144-2013. Обязательства прописываются в договоре энергоснабжения, заключаемом между сетевой организацией и потребителем. Если одна из сторон не выполняет обязательства, то согласно ст. 547 ГК РФ [29] предусмотрена ответственность, выраженная в оплате стоимости причиненного реального ущерба.

В первом варианте сетевая организация несет ответственность перед потребителем за генерацию в его электрическую сеть токов гармонических составляющих. Потребитель, вынужденный принимать токи гармонических составляющих, по действующим правилам, может предъявлять претензии к сетевой организации и требовать возмещения причиненного ущерба. Однако сетевая организация не является источником генерации. Она не является тем участником правоотношений, который должен снизить или устранить генерацию токов гармонических составляющих. В соответствии со схемой, приведенной на рисунке 5.1, токи гармонических составляющих генерируются нелинейными нагрузками потребителей и транзитом через сеть сетевой организации поступают в электрические сети других потребителей. Сетевая организация является посредником в процессе протекания и распределения токов гармонических составляющих.

Претензии потребителя гармоник в данном случае оказываются направленными не по адресу. Отсюда неправомерность применения любой ответственности при нарушении обязательств и, соответственно, выдвижении претензии потребителя к сетевой организации в действующей системе управления. Управляющий фактор, который должен обеспечить снижение или устранение генерации токов гармонических составляющих, при существующем подходе к построению не эффективен. Применяться не может в силу неправомерности направления претензий в адрес сетевой организации. Адресатом должен быть потребитель – генератор гармоник. Однако предъявление претензий в его адрес в данном случае, в силу отсутствия правоотношений между потребителями сетевой организации, также не правомерно.

Во втором варианте потребитель – генератор гармоник несет ответственность перед сетевой организацией. Сетевая организация, по действующим правилам, может предъявлять претензии к потребителю с нелинейными нагрузками. Требовать возмещения ущерба, связанного с генерацией и протеканием токов гармонических составляющих в своей электрической сети и сетях других потребителей гармоник. Однако сетевая организация имеет основание на возмещение только той части ущерба, которая обусловлена протеканием токов гармонических составляющих в своей электрической сети. Вторая часть ущерба обусловлена протеканием токов гармонических составляющих в электрических сетях других потребителей и не имеет отношения к сетевой организации.

Относительно возмещения первой части причиненного сетевой организации реального ущерба, характерно следующее. Оплата ущерба реализована посредством действующей системы тарифообразования. Анализ Методических указаний по расчету регулируемых тарифов и цен на электроэнергию [101] показывает, что сетевая организация учитывает стоимость вредных последствий протекания токов гармонических составляющих при расчете тарифа на передачу электроэнергии.

Осуществление деятельности сетевой организации оплачивается потребителями по тарифу на передачу электроэнергии. При расчете и обосновании тарифа учитываются все затраты, связанные с передачей электроэнергии. В процессе эксплуатации в сетевой организации проводятся ремонт и замена оборудования, вышедшего из строя, и т. д. Не исключено, что среди причин, повлиявших на выход из строя оборудования, присутствуют причины, связанные с протеканием токов гармонических составляющих.

Затраты на устранение ущерба, связанного с вредными последствиями протекания токов гармонических составляющих, выделить невозможно. На сегодняшний день, они включены на ряду с другими в общие затраты на содержание электрических сетей и учитываются при расчете и обосновании тарифа на передачу электроэнергии. Стало быть, в силу сложившихся обстоятельств, первая часть ущерба возмещена потребителями – генераторами гармоник через тариф и не может взиматься повторно, например, по решению арбитражного суда. Не может использоваться как управляющий фактор в системе управления.

Вторая часть ущерба вызвана протеканием токов гармонических составляющих в сетях других потребителей. Требовать возмещения этой части ущерба от потребителя – генератора гармоник сетевая организация не имеет права. Оплата ущерба оказывается направленной не по адресу. Адресатами оплаты второй части ущерба должны быть потребители, вынужденные принимать токи гармонических составляющих. В системе управления оплата второй части ущерба не эффективна и не может использоваться сетевой организацией по отношению к потребителю – генератору гармоник.

Таким образом, регистрация системой мониторинга новых параметров КЭ для снижения уровня напряжений и токов гармонических составляющих не имеет смысла, поскольку построение системы управления не обеспечивает формирование управляющего воздействия и его применение к источникам генерации токов гармонических составляющих.

В связи с этим требуется новый подход к построению системы управления, в котором сторонами правоотношений являются каждый потребитель – генератор гармоник с одной стороны, и все другие потребители, вынужденные потреблять токи гармонических составляющих, с другой стороны (рисунок 5.2).

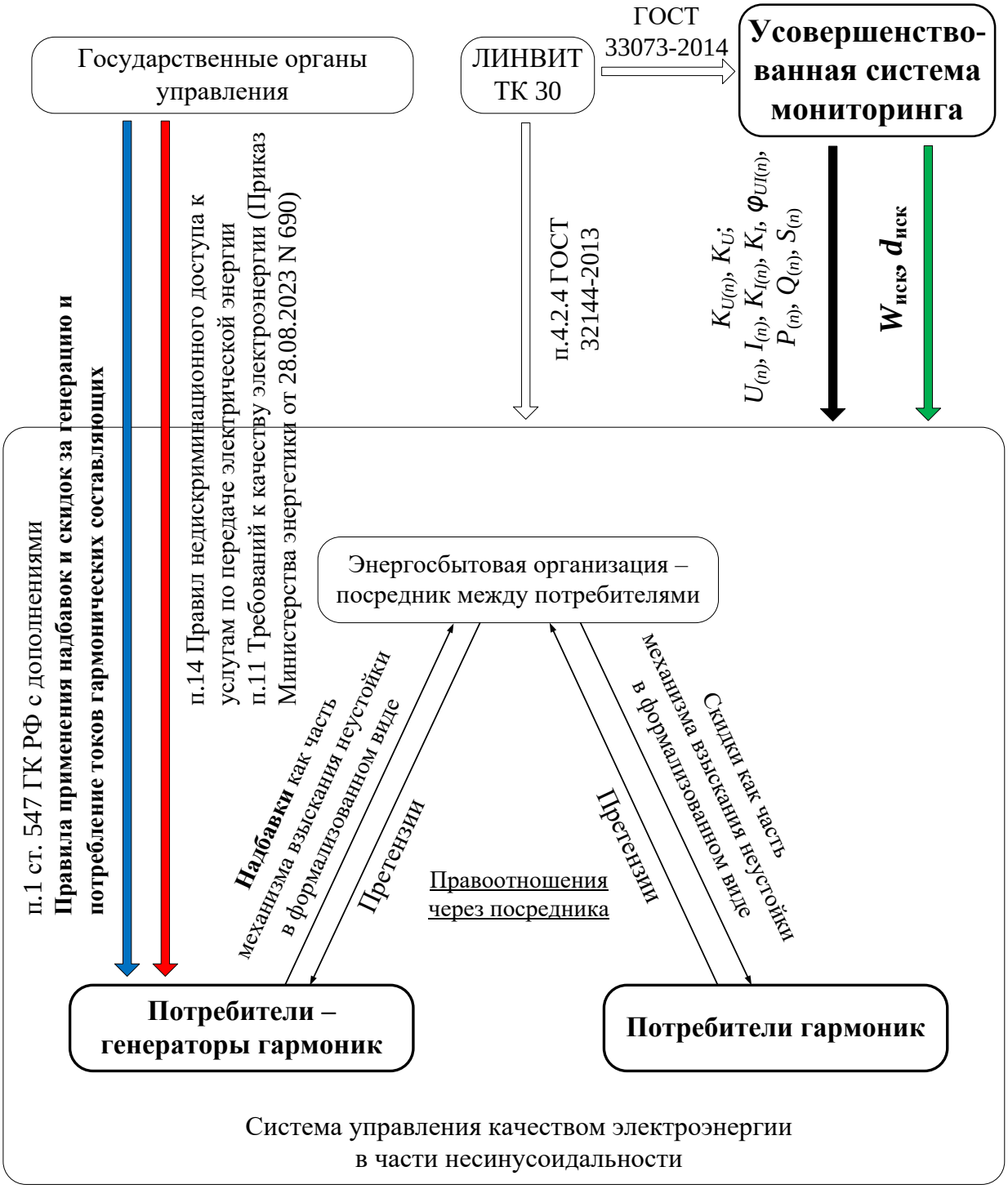


Рисунок 5.2 – Предлагаемая система управления КЭ

При этом обязательства по поддержанию значений показателей K_U и $K_{U(n)}$ на уровне требований ГОСТ 32144-2013 потребитель – генератор гармоник непосредственно несет перед остальными потребителями. Тогда для обеспечения исполнения обязательств предусматривается ответственность – возмещение стоимости причиненного ущерба, связанного с протеканием токов гармонических составляющих. Это служит управляющим фактором в системе управления КЭ.

В каждом случае потребитель – генератор гармоник наносит ущерб другим потребителям сетевой организации. Сумма ущерба, наносимого каждому потребителю гармоник, должна быть предъявлена источнику генерации. При нескольких источниках, каждый из них причиняет ущерб потребителю, вынужденному потреблять токи гармонических составляющих.

Возникает необходимость узаконить правоотношения между потребителями электротехнического комплекса систем электроснабжения. Прямых договорных отношений между ними не предусмотрено. Однако существуют договорные отношения между каждым потребителем и сетевой организацией через посредника, которым является организация, осуществляющая энергосбытовую деятельность – гарантирующий поставщик или иная энергосбытовая организация. Предлагается использовать эти отношения для регулирования правоотношений между потребителями для управления КЭ. Возложить на энергосбытовую организацию посреднические функции в системе управления.

§ 5.2 Оценка стоимости вредных последствий генерации и потребления токов гармонических составляющих

При формировании управляющих факторов, побуждающих потребителей – генераторов гармоник к снижению или устранению генерации токов гармонических составляющих, используется значение стоимости вредных

последствий, наступающих для элементов электротехнического комплекса при протекании токов гармонических составляющих.

В настоящее время стоимость вредных последствий генерации и потребления токов гармонических составляющих, согласно п. 1 ст. 547 ГК РФ [29], выражается суммой причиненного реального ущерба, которую, как было указано в первой главе, в условиях эксплуатации рассчитать крайне затруднительно [24]. Невозможно определить, в какой степени на преждевременный выход из строя электротехнических устройств сетевой организации и потребителей оказал какой-либо источник генерации токов гармонических составляющих. Преждевременный выход из строя возможен по целому ряду причин. Это дефекты при их изготовлении, результаты нарушения технологий эксплуатации, погодные условия, катаклизмы, ошибочные действия персонала и т.п. Среди этих причин, возможно, присутствует генерация токов гармонических составляющих. Однако доля ее воздействия на преждевременный выход из строя практически неопределима. Дело усложняется тем, что потребителей – генераторов гармоник может быть достаточно много, причем часть из них является необнаруженными источниками генерации. Технологические процессы потребителей электроэнергии не находятся в статическом состоянии, они динамичны. При этом изменяется состав и мощность нелинейной нагрузки, что обуславливает переменный характер генерации. Необходимо также учитывать тот факт, что воздействие токов и напряжений гармонических составляющих на преждевременный выход из строя имеет кумулятивный характер и зависит от их величины и длительности. Кому из участников правоотношений и в какой пропорции адресовать реальный ущерб, причиненный при протекании и потреблении токов гармонических составляющих, неизвестно. Этот реальный ущерб является скрытым и неопределенным, хотя не вызывает сомнения что он существует [20, 34].

Не исключена ситуация, при которой предъявляемая величина ущерба, подлежащая возмещению, может достигать значительных величин. В таком

случае, сумма реального ущерба может быть несоизмерима со стоимостью электроэнергии, искаженной токами гармонических составляющих потребителей, в сети сетевой организации и платежеспособностью участников правоотношений. Система управления не должна допускать таких ситуаций. Сумма реального ущерба должна быть разумной.

Не смотря на то, что вопросами определения ущерба занимались и занимаются многие ученые [20, 52], утвержденных методик расчета ущерба не существует [46, 52, 54, 135, 158], что порождает трудности при формировании управляющего воздействия в системе управления КЭ. Правовая система не имеет оснований для вынесения решений по возмещению причиненного реального ущерба при отсутствии значения его величины [69, 112]. Возникает необходимость применения в системе управления КЭ в части несинусоидальности другого способа оценки стоимости вредных последствий генерации и потребления токов гармонических составляющих.

При известном способе оценки стоимости вредных последствий цель системы управления при формировании управляющего воздействия может быть записана следующим образом: обеспечение справедливости за счет возмещения причиненного реального ущерба. Генерация токов гармонических составляющих наносит ущерб, который возмещается источниками генерации. При этом не учитываются возможности потребителей – генераторов гармоник к уменьшению генерации токов гармонических составляющих.

Новый способ оценки стоимости вредных последствий предполагает отказаться от определения суммы причиненного реального ущерба. Стоимость вредных последствий оценивать таким образом, чтобы она могла обеспечить доходность инвестиционного проекта установки и эксплуатации ФКУ или АФ с учетом их цены и приемлемого срока окупаемости [60].

В таком случае, меняется цель управления КЭ в части несинусоидальности. Вместо обеспечения справедливости за счет возмещения причиненного реального ущерба, новая цель предполагает снижение или устранение генерации токов

гармонических составляющих за счет установки и эксплуатации ФКУ или АФ, что позволит уменьшить уровень гармонических составляющих в электротехническом комплексе.

Такой новый подход к решению задачи оценки стоимости вредных последствий позволит не сосредотачиваться на определении размера размытых затрат потребителей, связанных с причиняемым им реальным ущербом при протекании токов гармонических составляющих. Использование затрат, связанных с доходностью инвестиционного проекта установки и эксплуатации ФКУ или АФ, обеспечивает более эффективное стимулирующее воздействие на потребителей – генераторов гармоник.

При новом способе сумму реального ущерба, причиненного электротехническим устройствам потребителям, предлагается заменить затратами на осуществление деятельности по снижению или устранению генерации токов гармонических составляющих за счет установки и эксплуатации ФКУ или АФ и реализовать в форме взыскания неустойки. В отличие от реального ущерба, неустойка является договорной величиной, не требующей привязки к конкретным ценам на вышедшие из строя электротехнические устройства.

Стоит отметить, что использование неустойки в системе управления исключается ст. 547 ГК РФ. Эта статья является специальным правилом регулирования правоотношений по договору энергоснабжения относительно участников процесса генерации и потребления токов гармонических составляющих и декларирует применение возмещения причиненного реального ущерба. Тем не менее, ряд авторов публикаций не соглашаются с этим и представляют этот момент как несовершенство законодательства [31, 69, 111]. Правомерность использования взыскания неустойки подтверждается общими правилами регулирования правоотношений согласно ст. 12 ГК РФ [30].

При новом способе оценки стоимости вредных последствий находится сумма неустойки, которую должен возместить потребитель – генератор гармоник. Если таких потребителей несколько, то каждому из них предъявляется

определенная сумма неустойки. В целом по сетевой организации сумма неустойки складывается из сумм неустоек, предъявляемых каждому источнику генерации токов гармонических составляющих. Воздействующий эффект системы управления при таком способе максимальный на каждого потребителя – генератора гармоник. При этом возможно два варианта:

1) потребитель – генератор гармоник платит неустойку, сумма которой соизмерима с затратами на осуществление деятельности по снижению или устранению генерации токов гармонических составляющих;

2) он устанавливает в дальнейшем и эксплуатирует ФКУ или АФ, что обеспечивает ликвидацию связанных с его генерацией вредных последствий протекания токов гармонических составляющих и позволяет обнаружить необнаруженные ранее источники генерации токов гармонических составляющих, что соответствует задаче приведенного на рис. 4.10 алгоритма обнаружения необнаруженных потребителей – генераторов гармоник.

Потребители, вынужденные принимать токи гармонических составляющих, получают компенсацию в виде части неустойки, предъявленной для оплаты всем потребителям – генераторам гармоник. Для упрощения расчетов эти части могут определяться по долевому принципу пропорционально потребляемой электроэнергии.

Таким образом, каждый обнаруженный потребитель – генератор гармоник получает счет на оплату неустойки, размер которой определяется ценой технических устройств подавления токов гармонических составляющих – ФКУ или АФ. При этом потребитель может только эпизодически и кратковременно генерировать токи гармонических составляющих при их незначительной величине. Как более интенсивный в отношении генерации потребитель, так и менее интенсивный могут иметь соразмерные суммы неустойки, определяемые ценой фильтров соответствующей мощности и определенного типа. Это накладывает более тяжелые условия оплаты неустойки для потребителей с меньшей интенсивностью генерации токов гармонических составляющих.

В свою очередь, наиболее тяжелые вредные последствия связаны с таким потребителем – генератором гармоник, у которого наблюдается наибольшая по величине и длительности генерация токов гармонических составляющих. Соразмерные суммы неустоек для потребителей – генераторов гармоник при различной степени наносимого ими ущерба могут препятствовать использованию предлагаемого способа оценки стоимости вредных последствий на практике. По этой причине необходимо приравнять условия взыскания неустойки для всех потребителей – генераторов гармоник. Значение неустойки, главным образом, должно определяться не столько ценой устройств подавления токов гармонических составляющих, сколько оплачиваемым параметром, характеризующим генерацию токов гармонических составляющих рассматриваемого потребителя – генератора гармоник. Таким оплачиваемым параметром в четвертой главе работы предлагается использовать объем искаженной электроэнергии за расчетный период времени $W_{\text{иск,р/п}}$, регистрируемый системой мониторинга показателей и параметров КЭ в ТПЭ при непрерывном мониторинге или рассчитываемый по коэффициентам искажения электроэнергии при одиночном или периодическом мониторинге.

Еще одним недостатком неустойки в ее настоящем виде является сложность ее применения при возмещении стоимости вредных последствий. Взыскание неустойки имеет периодический характер. Каждая сумма неустойки должна выплачиваться по решению арбитражного суда при выдвижении претензий. Учитывая поэтапный характер решения задачи по подавлению источников генерации, где значимым является систематическое воздействие на каждого из обнаруженных потребителей – генераторов гармоник, неустойка сама по себе не обладает должной эффективностью. Для повышения эффективности ее применения в системе управления КЭ в части несинусоидальности неустойку необходимо трансформировать и выразить формализованным образом в виде ежемесячных надбавок и скидок за генерацию и потребление токов гармонических составляющих.

§ 5.3 Механизм применения надбавок и скидок в системе управления

В системе управления КЭ в качестве воздействующего фактора, стимулирующего потребителя – генератора гармоник к участию в инвестиционном проекте установки и эксплуатации ФКУ или АФ, предлагается использовать надбавку за генерацию токов гармонических составляющих. Надбавка, в свою очередь, является частью механизма взыскания неустойки в формализованном виде.

Надбавки $\Delta О_н$ применяются к потребителям – генераторам гармоник за генерацию ими токов гармонических составляющих, с которыми связаны вредные последствия. При этом стоимость вредных последствий оценивается затратами на снижение или устранение генерации токов гармонических составляющих.

Значение надбавки для конкретного потребителя – генератора гармоник представляет собой оплату объема искаженной электроэнергии за расчетный период времени, который характеризует генерацию токов гармонических составляющих.

Для расчета размера надбавки необходимо значение удельной стоимости искаженной токами гармонических составляющих электроэнергии. Она находится делением необходимых капиталовложений на установку и эксплуатацию ФКУ или АФ на зарегистрированный системой мониторинга объем искаженной электроэнергии.

Применение надбавок предусмотрено для потребителей – генераторов гармоник. Надбавки как управляющий фактор в системе управления дополняются скидками $\Delta О_{ск}$ за потребления токов гармонических составляющих, которые компенсируют вредные последствия протекания токов гармонических составляющих для линейных потребителей и потребителей, установивших фильтры гармоник. Кроме того, скидки позволяют повысить привлекательность участия в процессе снижения или устранения генерации токов гармонических составляющих среди потребителей сетевой организации.

В соответствии с новым подходом к построению системы управления КЭ, скидки должны быть зависимы от значений надбавок. Представлять собой значение суммы надбавок, распределенной между потребителями, вынужденными принимать токи гармонических составляющих, по долевому принципу. Представленный, таким образом, формализованный способ оценки и возмещения стоимости вредных последствий предполагает денежную компенсацию в форме скидки линейным потребителям и потребителям, устранившим генерацию, за счет потребителей – генераторов гармоник путем применения надбавки.

Финансовая схема платежей, возникающая при применении надбавок и скидок за генерацию и потребление токов гармонических составляющих, в связи с отсутствием прямых договорных отношений между потребителями, интегрируется в существующую схему финансовых отношений между потребителями и поставщиками электроэнергии. Взимание платежей в форме надбавки и компенсация стоимости вредных последствий в виде скидки возлагается на гарантирующего поставщика или иные энергосбытовые организации.

При взимании платежей и их распределении необходимо, чтобы сумма оплаты в форме надбавок $\Delta О_{н,j}$ каждому j-тому из M потребителей – генераторов гармоник сетевой организации была равна сумме оплаты в форме скидок $\Delta О_{ск,i}$ каждому i-тому из L потребителей сетевой организации, вынужденных принимать токи гармонических составляющих:

$$\sum_{j=1}^{M} \Delta О_{н,j} = \sum_{i=1}^{L} \left| \Delta О_{ск,i} \right|. \qquad (5.1)$$

В правой части выражения (5.1) знак модуля отражает противоположность направления финансовых процессов взимания надбавок и их распределения в виде скидок.

При выполнении данного условия обеспечивается независимость двух финансовых процессов. Один из них – это процесс оплаты потребителями

потребляемой электроэнергии в адрес субъектов электроэнергетики, участвующих в процессе поставки электроэнергии – генерирующей компании, сетевой организации, энергосбытовой организации, системного оператора, администратора торгового рынка. Второй – процесс оплаты потребителями – генераторами гармоник стоимости вредных последствий протекания токов гармонических составляющих в адрес потребителей гармоник. Последний процесс оплаты представляет собой механизм стимулирования потребителей к участию в снижении или устранении генерации токов гармонических составляющих.

Когда (5.1) не выполняется, образуется разница между суммами взимаемых оплат $\sum_{j=1}^{M} \Delta О_{н,j}$ и компенсируемых выплат $\sum_{i=1}^{L} \left| \Delta О_{ск,i} \right|$. Для сетевой организации как субъекта электроэнергетики разница представляет собой дополнительный незапланированный расход или доход в зависимости от соотношения сумм оплат и выплат. Это делает валовую выручку от оплаты услуг по передаче электроэнергии не соответствующей экономически обоснованным затратам на передачу электроэнергии в сетевой организации. Нарушается принцип экономической обоснованности затрат, установленный законодательством для естественных монополий [129].

Известный механизм стимулирования потребителей к участию в снижении или устранении генерации токов гармонических составляющих, действовавший в период с 1991 до 2001 г.г. [43], не предполагал необходимость выполнения условия, записанного с помощью выражения (5.1), что связано с возможным нарушением принципа экономической обоснованности затрат. В литературных источниках отмечено, что это одна из основных причин отмены применения надбавок (скидок) как не соответствующих действующему законодательству [56, 59]. Правомерность обеспечивается только в том случае, если значения сумм оплат по надбавкам и выплатам по скидкам не будут влиять на размер валовой

выручки, сформированной на основании применения экономически обоснованного тарифа, что возможно при выполнении (5.1).

§5.4 Методика расчета надбавок и скидок для потребителей сетевой организации

5.4.1 Расчет оплат по надбавкам за генерацию токов гармонических составляющих и выплат по скидкам за их потребление

Для расчета значений надбавок за генерацию и скидок за потребление необходимо рассмотреть два случая [61, 156].

В первом случае в электротехническом комплексе присутствует только один потребитель – генератор гармоник, для которого за расчетный период системой мониторинга зарегистрирован некоторый объем искаженной электроэнергии $W_{\text{иск,р/п.,1}}$. Тогда надбавка за генерацию $\Delta\text{О}_{\text{н,1}}$ для него определяется следующим образом:

$$\Delta\text{О}_{\text{н,1}} = C_{\text{иск,1}} \cdot W_{\text{иск,р/п.,1}}, \tag{5.2}$$

где $C_{\text{иск,1}}$ – удельная стоимость электроэнергии, искаженной токами гармонических составляющих потребителя и представляющая собой удельные затраты на подавление токов гармонических составляющих при искажении качества одного кВт·ч электроэнергии.

Скидка $\Delta\text{О}_{\text{ск},i}$ каждому i-тому из L потребителей сетевой организации, вынужденных принимать токи гармонических составляющих, представляет собой компенсацию стоимости вредных последствий и оплачивается потребителем – генератором гармоник. В соответствии с рассмотренным в предыдущем параграфе механизмом, скидка представляет собой часть надбавки или затрат на осуществление деятельности потребителя – генератора гармоник по снижению

или устранению генерации токов гармонических составляющих. Распределение суммы надбавки в виде скидок между потребителями ведется в зависимости от доли потребления ими электроэнергии d_i, определяемой по выражению:

$$d_i = \frac{W_i}{\sum_{i=1}^{L} W_i}, \tag{5.3}$$

где W_i – объем потребляемой за расчетный период электроэнергии i-тым потребителем гармоник.

С учетом условия, записанного в (5.1), выражение для определения скидки имеет следующий вид:

$$\Delta\text{О}_{\text{ск},i} = -\Delta\text{О}_{\text{н},1} \cdot d_i = -C_{\text{иск},1} \cdot W_{\text{иск,р/п.},1} \cdot \frac{W_i}{\sum_{i=1}^{L} W_i}. \tag{5.4}$$

Отрицательное значение скидки указывает на компенсацию (выплату) потребителю гармоник.

Во втором случае, если в сетевой организации не один, а M потребителей – генераторов гармоник, то выражения (5.2) для каждого j-того потребителя – генератора гармоник и (5.4) для каждого i-того потребителя гармоник примут вид:

$$\Delta\text{О}_{\text{н},j} = C_{\text{иск},j} \cdot W_{\text{иск,р/п.},j}, \tag{5.5}$$

$$\Delta\text{О}_{\text{ск},i} = -\left(\sum_{j=1}^{M} C_{\text{иск},j} \cdot W_{\text{иск,р/п.},j}\right) \cdot d_i = -\left(\sum_{j=1}^{M} C_{\text{иск},j} \cdot W_{\text{иск,р/п.},j}\right) \cdot \frac{W_i}{\sum_{i=1}^{L} W_i}. \tag{5.6}$$

Значение надбавки определяет размер финансирования деятельности потребителя – генератора гармоник по снижению или устранению генерации токов гармонических составляющих. Этот размер зависит от значения удельной стоимости затрат $C_{\text{иск},j}$. Важно, чтобы удельная стоимость затрат на осуществление деятельности потребителя – генератора гармоник обеспечивала их заинтересованность в реализации проекта установки и эксплуатации ФКУ или АФ.

5.4.2 Расчет надбавки за генерацию токов гармонических составляющих

Потребитель – генератор гармоник принимает решение об участии в проекте установки ФКУ или АФ на основе анализа технико-экономических показателей проекта, рассмотрен в параграфе 4.6.

Доходной частью инвестиционного проекта для потребителя – генератора гармоник является значение оплаты по надбавке $\Delta О_{н,j}$, которая предъявляется к нему за генерацию токов гармонических составляющих. При установке фильтров потребитель – генератор гармоник перестает ее получать. Происходит перераспределение денежных потоков: за место оплаты стоимости вредных последствий потребитель – генераторов гармоник участвует в проекте, направленном на снижение генерации токов гармонических составляющих, что позволяет устранить связанный с ним ущерб. С учетом этого, период окупаемости инвестиционного проекта (4.10) может быть записан следующим образом:

$$T_{ок,j} = \frac{К_j}{C_{иск,j} \cdot W_{иск,р/п.,j} - И_{экспл,j}}. \quad (5.7)$$

Из полученного выражения может быть выведена формула для расчета удельной стоимости затрат на осуществление деятельности потребителя – генератора гармоник по снижению или устранению генерации токов гармонических составляющих:

$$C_{иск,j} = \frac{\frac{К_j}{T_{ок,j}} + И_{экспл,j}}{W_{иск,р/п.j}}. \quad (5.8)$$

Для расчета удельной стоимости затрат с учетом возможностей потребителей – генераторов гармоник требуется выбрать тип фильтра и рассчитать его установленную мощность. Определить стоимость выбранных фильтров гармоник по данным заводов изготовителей. Задаться привлекательным

для инвесторов периодом окупаемости, который, в настоящее время, может составлять нескольких месяцев.

Подобным образом должна быть рассчитана удельная стоимость затрат для каждого j-того потребителя – генератора гармоник сетевой организации. В общем случае полученные значения удельных затрат будут различными для потребителей в пределах сетевой организации. Индивидуализация удельной стоимости сильно усложняет методику их расчета и применение на практике. С этих позиций, удельная стоимость затрат для всех потребителей – генераторов гармоник одной рассматриваемой сетевой организации должна быть приведена к одному значению подобно котловому тарифу на передачу электроэнергии.

В таком случае, приведенную удельную стоимость затрат, одинаковую для всех потребителей – генераторов гармоник сетевой организации, можно представить как одну из составляющих тарифа на электроэнергию и назвать *надбавкой за генерацию гармоник* $C_{\text{иск}}$, руб./ кВт·ч. Значение надбавки может быть выбрано одним из приведенных ниже способов.

1. В качестве надбавки за генерацию выбирается минимальное значение из рассчитанных у всех потребителей – генераторов гармоник удельной стоимости затрат:

$$C_{\text{иск}} = \min\left[C_{\text{иск},j}\right]. \tag{5.9}$$

Такой тариф обеспечивает полное финансирование проекта установки и эксплуатации ФКУ или АФ у потребителя – генератора гармоник, для которого рассчитана выбранная минимальная удельная стоимость затрат. Для остальных потребителей – генераторов гармоник стимулирующий эффект будет ниже: финансирование будет частичным. Данный подход позволяет избежать избыточного финансирования для потребителей с меньшим значением удельной стоимости затрат, чем принятого в качестве общего котлового.

2. Для выбора надбавки необходимо первоначально определить наиболее интенсивного потребителя – генератора гармоник в отношении генерации им токов гармонических составляющих. Затем для найденного потребителя –

генератора гармоник рассчитать стоимость удельных затрат и принять его значение в качестве надбавки за генерацию $C_{иск}$, согласно которому будут вестись расчеты надбавок для остальных потребителей – генераторов гармоник:

$$\begin{cases} C_{иск} = C_{иск,j} \\ W^{-}_{(n)\Sigma,j} = \max. \end{cases} \quad (5.10)$$

Наиболее интенсивный искажающий потребитель может быть обнаружен по максимальному значению энергии гармонических составляющих обратного направления [49].

Второй предлагаемый подход обеспечивает наибольшее стимулирующее воздействие для всех потребителей – генераторов гармоник электротехнического комплекса.

Для корректного выбора надбавки за генерацию $C_{иск}$ из удельных стоимостей затрат для потребителей – генераторов гармоник $C_{иск,j}$ необходимо унифицировать условия их расчета:

- для сохранения стимулирующего эффекта независимо от типа выбранных устройств подавления токов гармонических составляющих при оценке инвестиций K_j в (5.8) принять, что для снижения или устранения генерации используются АФ;

- при оценке установленной мощности АФ учитывать то обстоятельство, что они также могут выполнять функцию КРМ, что приводит к увеличению их мощности. Для КРМ могут использоваться более дешевые конденсаторные установки, поэтому расчет требуемой мощности АФ следует выполнять только при выполнении им функции подавления токов гармонических составляющих (4.9).

Значение надбавки $C_{иск}$ может регулироваться государственными органами регулирования тарифов. Оно может быть изменено в большую или меньшую сторону по сравнению с принятым значением по выражениям (5.9) или (5.10) с целью получения достаточно управляющего воздействия на потребителей - генераторов гармоник.

5.4.3 Оценка адекватности предлагаемой методики

Для оценки адекватности предложенной методики проводится оценочный расчет относительных значений надбавок и скидок на примере потребителей небольшой сетевой организации.

Рассматривается сетевая организация с общим числом подключенных к ее электрической сети промышленных предприятий, равным шести, из которых три являются потребителями – генераторами гармоник, а другие три – линейными потребителями ($M = L = 3$).

В качестве надбавки за генерацию токов гармонических составляющих принимается значение удельной стоимости для второго потребителя – генератора гармоник:

$$C_{\text{иск}} = C_{\text{иск},2} = \frac{\dfrac{\text{К}_2}{T_{\text{ок},2}} + \text{И}_{\text{экспл},2}}{W_{\text{иск,р/п.},2}}.$$

По результатам мониторинга КЭ за расчетный период для каждого из потребителей – генераторов гармоник были зарегистрированы объемы искаженной электроэнергии $W_{\text{иск,р/п.},1}$, $W_{\text{иск,р/п.},2}$ и $W_{\text{иск,р/п.},3}$, которые могут быть записаны в соответствии с долевым принципом распределения так, что $\sum d_{\text{иск,р/п}} = 1$:

$$d_{\text{иск,р/п.},1} = \frac{W_{\text{иск,р/п.},1}}{\sum_{j=1}^{3} W_{\text{иск,р/п.},j}} = 0{,}1;\ d_{\text{иск,р/п.},2} = \frac{W_{\text{иск,р/п.},2}}{\sum_{j=1}^{3} W_{\text{иск,р/п.},j}} = 0{,}5;\ d_{\text{иск,р/п.},3} = \frac{W_{\text{иск,р/п.},3}}{\sum_{j=1}^{3} W_{\text{иск,р/п.},j}} = 0{,}4.$$

Проводится расчет надбавок для потребителей – генераторов гармоник с учетом введенного долевого распределения объемов искаженной электроэнергии ($W_{\text{иск,р/п.},j} = d_{\text{иск,р/п.},j} \cdot \sum_{j=1}^{3} W_{\text{иск,р/п.},j}$):

$$\Delta \text{О}_{\text{н},1} = C_{\text{иск}} \cdot d_{\text{иск,р/п.},1} \cdot \sum_{j=1}^{3} W_{\text{иск,р/п.},j} = 0{,}1 \cdot C_{\text{иск}} \cdot \sum_{j=1}^{3} W_{\text{иск,р/п.},j};$$

$$\Delta \text{О}_{\text{н},2} = C_{\text{иск}} \cdot d_{\text{иск,р/п.},2} \cdot \sum_{j=1}^{3} W_{\text{иск,р/п.},j} = 0{,}5 \cdot C_{\text{иск}} \cdot \sum_{j=1}^{3} W_{\text{иск,р/п.},j};$$

$$\Delta \text{О}_{\text{н},3} = C_{\text{иск}} \cdot d_{\text{иск,р/п.},3} \cdot \sum_{j=1}^{3} W_{\text{иск,р/п.},j} = 0{,}4 \cdot C_{\text{иск}} \cdot \sum_{j=1}^{3} W_{\text{иск,р/п.},j},$$

или в относительных единицах от общей суммы оплат по надбавкам по сетевой организации:

$$\Delta \text{О}^{*}_{\text{н},1} = \frac{\Delta \text{О}_{\text{н},1}}{\sum \Delta \text{О}_{\text{н}}} = 0{,}1 \cdot \frac{C_{\text{иск}} \cdot \sum_{j=1}^{3} W_{\text{иск,р/п.},j}}{C_{\text{иск}} \cdot \sum_{j=1}^{3} W_{\text{иск,р/п.},j}} = 0{,}1;$$

$$\Delta \text{О}^{*}_{\text{н},2} = \frac{\Delta \text{О}_{\text{н},2}}{\sum \Delta \text{О}_{\text{н}}} = 0{,}5 \cdot \frac{C_{\text{иск}} \cdot \sum_{j=1}^{3} W_{\text{иск,р/п.},j}}{C_{\text{иск}} \cdot \sum_{j=1}^{3} W_{\text{иск,р/п.},j}} = 0{,}5;$$

$$\Delta \text{О}^{*}_{\text{н},3} = \frac{\Delta \text{О}_{\text{н},3}}{\sum \Delta \text{О}_{\text{н}}} = 0{,}4 \cdot \frac{C_{\text{иск}} \cdot \sum_{j=1}^{3} W_{\text{иск,р/п.},j}}{C_{\text{иск}} \cdot \sum_{j=1}^{3} W_{\text{иск,р/п.},j}} = 0{,}4.$$

Результаты расчета надбавок сводятся в таблицу 5.1.

Таблица 5.1 – Результаты оценочного расчета надбавок и скидок

	Потребители – генераторы гармоник			Потребители – генераторы гармоник		
	j=1	j=2	j=3	i=1	i=2	i=3
Надбавка $\Delta \text{О}^{*}_{\text{н},j}$	0,1	0,5	0,4	-	-	-
Скидка $\Delta \text{О}^{*}_{\text{ск},i}$	-	-	-	-0,6	-0,2	-0,2

Далее проводится расчет скидок для линейных потребителей. По аналогии с долевым распределением объема искаженной электроэнергии между потребителями – генераторами гармоник, скидки распределяются в соответствии с долевым потреблением электроэнергии d_i:

$$d_1 = \frac{W_1}{\sum_{i=1}^{3} W_i} = 0,6;\ d_2 = \frac{W_2}{\sum_{i=1}^{3} W_i} = 0,2;\ d_3 = \frac{W_3}{\sum_{i=1}^{3} W_i} = 0,2.$$

В соответствии с выражением (5.6) рассчитываются выплаты по скидкам для линейных потребителей:

$$\Delta \text{О}_{\text{ск},1} = -C_{\text{иск}} \cdot \sum_{j=1}^{3} W_{\text{иск,р/п.},j} \cdot d_1 = -0,6 \cdot C_{\text{иск}} \cdot \sum_{j=1}^{3} W_{\text{иск,р/п.},j};$$

$$\Delta \text{О}_{\text{ск},2} = -C_{\text{иск}} \cdot \sum_{j=1}^{3} W_{\text{иск,р/п.},j} \cdot d_2 = -0,2 \cdot C_{\text{иск}} \cdot \sum_{j=1}^{3} W_{\text{иск,р/п.},j};$$

$$\Delta \text{О}_{\text{ск},3} = -C_{\text{иск}} \cdot \sum_{j=1}^{3} W_{\text{иск,р/п.},j} \cdot d_3 = -0,2 \cdot C_{\text{иск}} \cdot \sum_{j=1}^{3} W_{\text{иск,р/п.},j},$$

или в относительных единицах от общей суммы оплат по надбавкам по сетевой организации:

$$\Delta \text{О}^*_{\text{ск},1} = \frac{\Delta \text{О}_{\text{ск},1}}{\sum \Delta \text{О}_{\text{н}}} = -0,6 \cdot \frac{C_{\text{иск}} \cdot \sum_{j=1}^{3} W_{\text{иск,р/п.},j}}{C_{\text{иск}} \cdot \sum_{j=1}^{3} W_{\text{иск,р/п.},j}} = -0,6;$$

$$\Delta \text{О}^*_{\text{ск},2} = \frac{\Delta \text{О}_{\text{ск},2}}{\sum \Delta \text{О}_{\text{н}}} = -0,2 \cdot \frac{C_{\text{иск}} \cdot \sum_{j=1}^{3} W_{\text{иск,р/п.},j}}{C_{\text{иск}} \cdot \sum_{j=1}^{3} W_{\text{иск,р/п.},j}} = -0,2;$$

$$\Delta \text{О}^*_{\text{ск},3} = \frac{\Delta \text{О}_{\text{ск},3}}{\sum \Delta \text{О}_{\text{н}}} = -0,2 \cdot \frac{C_{\text{иск}} \cdot \sum_{j=1}^{3} W_{\text{иск,р/п.},j}}{C_{\text{иск}} \cdot \sum_{j=1}^{3} W_{\text{иск,р/п.},j}} = -0,2.$$

Результаты по расчету скидок также сводятся в таблицу 5.1.

Результаты оценочного расчета надбавок и скидок в относительных единицах на примере потребителей сетевой организации показывают, что предложенная методика вполне приемлема. Она позволяет определить значение затрат на подавление токов гармонических составляющих в соответствии с объемом искаженной электроэнергии за расчетный период и распределить их между потребителями – генераторами гармоник в форме надбавок. Дополнительная выручка, получаемая от применения надбавок, распределяется между линейными потребителями в форме скидок. Независимо от числа потребителей – генераторов гармоник и числа потребителей гармоник сумма надбавок и сумма скидок равны между собой:

$$\sum_{j=1}^{3} \Delta O^{*}_{н,j} = 0,1 + 0,5 + 0,4 = 1;$$

$$\sum_{i=1}^{3} \Delta O^{*}_{ск,i} = -\left(0,6 + 0,2 + 0,2\right) = -1;$$

$$\sum_{j=1}^{3} \Delta O^{*}_{н,j} = \sum_{i=1}^{3} \left|\Delta O^{*}_{ск,i}\right|.$$

Таким образом, методика расчета надбавок и скидок использует оплату электроэнергии по тарифу на осуществление деятельности потребителя – генератора гармоник по снижению или устранению генерации токов гармонических составляющих, что способствует росту числа установленных ФКУ или АФ в электротехническом комплексе систем электроснабжения. При этом, предлагаемая методика полностью независима и самодостаточна. Она не связана с Методическими указаниями по расчету регулируемых тарифов и цен на электроэнергию [101] и не изменяет экономически обоснованной валовой выручки сетевой организации, что позволяет реализовать ее на практике и включить в устоявшуюся систему тарифообразования без изменения последней.

Выводы по пятой главе

1. Для получения максимального эффекта от применения предлагаемых параметров КЭ – объема искаженной электроэнергии $W_{иск}$ и коэффициента искажения электроэнергии $d_{иск}$, регистрируемых системой мониторинга, необходимо изменить систему управления КЭ в части несинусоидальности.

2. При новом подходе к построению системы управления КЭ участниками правоотношений, возникающих в результате генерации и потребления токов гармонических составляющих, являются потребители – генераторы гармоник с одной стороны и линейные потребители и потребители, устранившие генерацию, с другой.

3. Стоимость вредных последствий генерации и потребления токов гармонических составляющих предлагается оценивать эквивалентно путем вычисления затрат потребителей – генераторов гармоник на установку и эксплуатацию ФКУ или АФ.

4. Ежемесячные надбавки за генерацию токов гармонических составляющих и скидки за их потребление представляют собой формализованный способ взыскания неустойки, которую оплачивают потребители – генераторы гармоник.

5. Расчет оплаты по надбавке $\Delta О_н$ ведется по приведенному значению удельной стоимости затрат на подавление токов гармонических составляющих $C_{иск}$ как одной из составляющей тарифа на электроэнергию. Оплачиваемым параметром по тарифу является объем искаженной электроэнергии за расчетный период $W_{иск,р/п}$.

6. Оплата по надбавкам за генерацию токов гармонических составляющих для потребителей – генераторов гармоник и ее распределение в виде выплат по скидкам для линейных потребителей и потребителей, устранивших генерацию, является новым управляющим фактором в системе управления, который способствует снижению несинусоидальности напряжения до нормируемых значений.

7. Рекомендации по совершенствованию энергетического законодательства были положены в основу Правил применения надбавок и скидок за генерацию и потребление токов гармонических составляющих (Приложение В). Примеры расчетов, приведенных в Правилах, показывают, что стимулирующий эффект для потребителей – генераторов гармоник при применении надбавок может достигать 18 % относительно оплаты потребляемой электроэнергии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Реализацию цели диссертационной работы обеспечили следующие результаты:

1. Полученная математическая модель электротехнического комплекса систем электроснабжения со схемой замещения в виде трехлучевой звезды позволяет сократить на 20 % время расчетов токов и напряжений гармонических составляющих в ТПЭ по сравнению с полной схемой замещения с погрешностью, не превышающей 5 % в общем случае и 10 % при резонансе напряжения.

2. Выведенные на основе трехлучевой схемы замещения аналитические критерии обнаружения источников генерации, позволяющие в отличие от численных критериев: уменьшить вычислительные затраты при изменении состава и схемы электротехнического комплекса систем электроснабжения, поскольку не требуют постоянных пересчетов, и сделать прогноз по обнаружению при подключении нового потребителя – генератора гармоник.

3. Предлагаемые параметры КЭ – объем искаженной электроэнергии и коэффициент искажения электроэнергии – позволяют повысить число обнаруженных источников генерации при их поочередном подавлении. За численное значение объема искаженной электроэнергии за расчетный период предлагается ввести оплату и тем самым создать стимулирующее воздействие на потребителей – генераторов гармоник для их участия в инвестиционном проекте, направленном на снижение или устранение генерации токов гармонических составляющих.

4. Предлагаемый алгоритм поочередного обнаружения и подавления источников генерации токов гармонических составляющих, использующий основной аналитический критерий и объем искаженной электроэнергии за расчетный период, способствует росту числа установленных ФКУ и АФ в электротехническом комплексе и обеспечивает снижение несинусоидальности напряжения до нормируемых значений.

5. Разработанная компьютерная программа расчета объема искаженной электроэнергии и коэффициента искажения электроэнергии может быть встроена в многофункциональные приборы учета с функцией контроля КЭ и интегрирована в автоматизированные системы учета электроэнергии.

6. Подготовленные рекомендации по совершенствованию энергетического законодательства, направленные на снижение или устранение генерации, и Правила применения надбавок и скидок за генерацию и потребление токов гармонических составляющих создают стимулирующий эффект для потребителей – генераторов гармоник в 18 % относительно оплаты потребляемой электроэнергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анализаторы качества электроэнергии Metrel [Электронный ресурс] // Электроизмерительные приборы Metrel. – URL: https://www.metrel-russia.ru/products/Kachestvo/ (дата обращения: 07.08.2025).

2. Анализаторы качества электроэнергии Sonel [Электронный ресурс] // Электроизмерительные приборы Sonel.– URL: https://www.sonel.ru/ (дата обращения: 10.06.2025).

3. Андаева, З. Т. Исследование резонанса токов при повышение коэффициента мощности / З. Т. Андаева, А. У. Караев // Бюллетень науки и практики. – 2021. – № 5. – С. 282-285.

4. Андреев, В. С. Теория нелинейных электрических цепей / В. С. Андреев. – М.: Радио и связь, 1982. – 60 с.

5. Афанасенко, А. С. Оценка влияния потребителей и энергоснабжающей организации на искажение напряжения в точке общего присоединения / А. С. Афанасенко, Д. С. Федосов // Вестник ИрГТУ. – 2011. – № 11. – С. 190-193.

6. Баев, И. А. Управление спросом на поставку энергоресурсов в условиях развития информационно-коммуникационных технологий / И. А. Баев, И. А. Соловьева, А. П. Дзюба // Известия УрГЭУ. – 2019. – №3. – С. 111-124.

7. Белов, Г. А. Системы управления полупроводниковыми преобразователями / Г. А. Белов. – Чебоксары : ЧГУ имени И.Н. Ульянова, 2023. – 284 с.

8. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи / Л. А. Бессонов. – М.: Издательство Юрайт, 2016. – 701 с.

9. Бородин, М. В. Корректировка стоимости потребленной электроэнергии в зависимости от ее качества / М. В. Бородин, А. В. Виноградов // Промышленная энергетика. – 2013. – № 7. – С. 12-16.

10. Бородин, М. В. Повышение эффективности функционирования систем электроснабжения посредством мониторинга качества электроэнергии : дис. … канд. техн. наук : 05.09.03 / Бородин Максим Владимирович. – Орел, 2013. – 177 с.

11. Бородин, М. В. Редакция методики корректировки стоимости потребленной электроэнергии в зависимости от её качества и алгоритм её реализации в соответствии с ГОСТ на качество электроэнергии / М. В. Бородин, А. В. Виноградов // Вестник НГИЭИ. – 2018. – № 4 (83). – С. 54-64.

12. Боярская, Н. П. Синтез фильтрокомпенсирующих устройств для систем электроснабжения : монография / Н. П. Боярская, В. П. Довгун, Д. Э. Егоров. – Красноярск : СФУ, 2014. – 192 с.

13. Боярская, Н. П. Совершенствование методов компенсации высших гармоник в электрических сетях 0,4-10 кВ : автореф. дис. … канд. техн. наук: 05.14.02 / Боярская Наталия Петровна. – Красноярск, 2011. – 20 с.

14. Булычева, Е. А. Анализ современных методов определения фактического вклада потребителей в общий уровень несинусоидальности напряжения электрической сети. Часть 1. Методы отклонений измеряемых величин / Е. А. Булычева, С. А. Янченко // Промышленная энергетика. – 2019. – № 6. – С. 42-52.

15. Булычева, Е. А. Анализ современных методов определения фактического вклада потребителей в общий уровень несинусоидальности напряжения электрической сети. Часть 2. Методы статистического анализа данных / Е. А. Булычева, С. А. Янченко // Промышленная энергетика. – 2019. – № 7. – С. 34-44.

16. Вагин, Г. Я. Качество электроэнергии. Анализ причин больших ущербов от низкого качества и рекомендации по их снижению / Г. Я. Вагин, А. Л. Куликов, А. А. Севостьянов // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2023. – № 2. – С. 81-87.

17. Вагин, Г. Я. Показатели качества электроэнергии в системах электроснабжения : учеб. пособие / Г. Я. Вагин, А. А. Севостьянов. – Н. Новгород : НГТУ им. Р. Е. Алексеева, 2017. – 188 с.

18. Вагин, Г. Я. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике : учеб. пособие / Г. Я. Вагин, А. Б. Лоскутов, А. А. Севостьянов. – НГТУ им. Р. Е. Алексеева. – Н. Новгород, 2004. – 214 с.

19. Волков, Н. Г. Качество электроэнергии в системах электроснабжения : учебное пособие / Н. Г. Волков. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 152 с.

20. Воронин, В. А. Об экономическом ущербе от снижения качества электроэнергии и источниках его возникновения / В. А. Воронин, Г. М. Лебедев // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2016. – № 3. – С. 79-84

21. Воропай, Н. И. Надежность систем электроснабжения / Н. И. Воропай. – Новосибирск: Наука, 2006.

22. Гамазин, С. И. Определение фактического вклада потребителя в искажении параметров качества электрической энергии / С. И. Гамазин, В. А. Петрович // Промышленная энергетика. – 2003. – №1. – С. 32-38.

23. Гармонический анализ тока замыкания на землю в переходном режиме / М. Н. Атаманов, Н. М. Дрей, Г. М. Михеев, А. Н. Пулин // Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности : материалы II Международной научно-технической конференции, Чебоксары, 18-19 октября 2018 года. – Чебоксары: Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, 2018. – С. 137-144.

24. Геворкян, В. М. Проблема учета фактического вклада субъектов электрических сетей в искажение параметров качества электрической энергии / В. М. Геворкян, С. Н. Михалин // Технологии электромагнитной совместимости. – 2007. – № 1(20). – С. 3-10.

25. ГОСТ 30804.4.30-2013 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Методы измерений показателей качества электрической энергии. – М.: Стандартинформ, 2014. – 52 с.

26. ГОСТ 32144-2013 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Стандартинформ, 2014. – 16 с.

27. ГОСТ 33073-2014 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Контроль и мониторинг качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М. : Стандартинформ, 2015. – 42 с.

28. ГОСТ Р 8.655-2009. Государственная система обеспечения единства измерений. Средства измерений показателей качества электрической энергии. Общие технические требования. – М.: Стандартинформ, 2009. – 37 с.

29. Гражданский кодекс Российской Федерации (часть вторая) от 26.01.1996 № 14-ФЗ (ред. от 12.09.2023) // Собрание законодательства РФ. – 29.01.1996. – № 5. – ст. 410.

30. Гражданский кодекс Российской Федерации (часть первая) от 30.11.1994 № 51-ФЗ (ред. от 08.08.2024) // Собрание законодательства РФ. – 05.12.1994. – № 32. – ст. 3301.

31. Грищенко, Д. О. Распределение мер ответственности участников электроэнергетического рынка за качество электроэнергии / Д. О. Грищенко // Вестник СГСЭУ. – 2013. – № 1. – С. 40-43.

32. Дед, А. В. Обзор современного рынка средств измерений показателей качества электроэнергии / А. В. Дед, С. П. Сикорский, Д. А. Рогозина // Омский научный вестник. – 2017. – № 5. – С. 82-88.

33. Дед, А. В. Результаты измерений показателей качества электроэнергии в системах электроснабжения предприятий и организаций / А. В. Дед, С. П. Сикорский, П. С. Смирнов // Омский научный вестник. – 2018. – № 2. – С. 60-63.

34. Добрусин, Л. Н. Инвестиции в электроэнергетику России и программа повышения их эффективности : доклад / Л .Н. Добрусин // ТЭК России в XXI веке: Итоговые материалы VI Всероссийского энергетического форума, Москва, 01-04 апреля 2008 года.

35. Добуш, Ю. В. Выявление вкладов потребителей в искажения тока и напряжения в электротехнических комплексах промышленных предприятий : автореф. дис. … канд. техн. наук : 05.09.03 / Добуш Юлия Владимировна. – Санкт-Петербург, 2022. – 20 с.

36. Дюдяков, А. А. Анализ эффективности работы гибридного фильтра / А. А. Дюдяков, С. А. Янченко, Д. В. Михеев // Промышленная энергетика. – 2022. – № 7. – С. 26-38.

37. Дюдяков, А. А. Снижение эффективности работы гибридного фильтра в реальных электрических сетях / А. А. Дюдяков, С. А. Янченко // Промышленная энергетика. – 2023. – № 4. – С. 40-47.

38. Ефремов, Л. Г. О структуре потерь при выработке и передаче электроэнергии / Л. Г. Ефремов, Д. Е. Иванов, Г. М. Михеев // Вестник ЧГУ. – 2011. – №3. – С. 71-75.

39. Жежеленко, И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий / И. В. Жежеленко. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 160 с.

40. Жежеленко, И. В. Оценка надежности электрооборудования при пониженном качестве электроэнергии / И. В. Жежеленко, Ю. Л. Саенко, А. В. Горпинич // Вести в электроэнергетике. – 2006. – № 6.

41. Жежеленко, И. В. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях / И. В. Жежеленко, Ю. Л. Саенко. – М. : Энергоатомиздат, 2000. – 252 с.

42. Зыкин, Ф. А. Определение степени участия нагрузок в снижении качества электрической энергии / Ф. А. Зыкин // Электричество. – 1992. – №11. – С. 13-19.

43. Инструкция Роскомцен № 01-17/1443-11, Минтопэнерго РФ № ВК-7539 от 30.11.1993 (ред. от 13.04.1995) «О порядке расчетов за электрическую и тепловую энергию» [Электронный ресурс] // Консультант Плюс. – URL: https://consultant.ru/document/ con_doc_LAW_3031 (дата обращения: 29.07.2025).

44. Итоги 2023 года [Электронный ресурс] // РБК. – 2023. – URL: https://www.rbc.ru/economics/31/01/2024/65ba64589a794776cf49b625 (дата обращения: 01.09.2025).

45. Калинников, К. Системы непрерывного контроля качества электроэнергии электросетевой компании / К. Калинников // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2013. – № 4(19). – С. 54–59.

46. Качество электрической энергии: современное состояние, проблемы и предложения по их решению / Л. И. Коверникова, В. В. Суднова, Р. Г. Шамонов [и др.]; отв. ред. Н. И. Воропай. – Новосибирск: Наука, 2017. – 219 с.

47. Ковалева, Т. В. Резонансные явления в тяговой сети переменного тока / Т. В. Ковалева, О. О. Комякова, Н. В. Пашкова. // Омский научный вестник. – 2020. – № 4(172). – С. 32-35.

48. Коваленко, Д. В. Определение резонансной частоты системы электроснабжения при изменении степени компенсации реактивной мощности и наличии высших гармоник / Д. В. Коваленко // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2017. – № 8-1. – С. 16-21.

49. Коверникова, Л. И. Активные мощности гармоник в узлах присоединения нелинейных нагрузок к сети высокого напряжения / Л. И. Коверникова // Электричество, 2017. – №3. – С. 12-20.

50. Коверникова, Л. И. Алгоритм определения мощности активного фильтра / Л. И. Коверникова, Х. Н. Буй // Технико-экономические проблемы развития регионов : материалы научно-практической конференции с международным участием, Иркутск, 26–27 ноября 2020 года. – Иркутск: ИРНИТУ, 2020. – С. 10-15.

51. Коверникова, Л. И. Мониторинг качества электроэнергии в электрических сетях. Для кого, зачем и как? / Л. И. Коверникова, В. Н. Тульский, Р. Г. Шамонов // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2016. – № 5 (38). – С. 28-37.

52. Коверникова, Л. И. Об управлении качеством электрической энергии в России в прошлом, настоящем и будущем / Л. И. Коверникова, А. В. Серков, Р. Г. Шамонов // Энергетическая политика. – 2018. №1. – С. 75-85.

53. Коломиец, Я. Р. Исследование критерия обнаружения источников генерации токов гармонических составляющих // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: сборник статей XVI Всероссийской научно-технической конференции, Чебоксары, 05-07 июня 2025 года. – Чебоксары: ЧГУ им И. Н. Ульянова, 2025. – С. 188-189.

54. Кононенко, В. Ю. Задачи научно-технической политики в области качества электроэнергии на современном этапе формирования цифровой экономики РФ / В. Ю. Кононенко, А. С. Мурачев, Д. О. Смоленцев // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2018. – № 2 (47). – С. 28-31.

55. Коптяев, Е. Н. Выпрямитель с «боковыми» пульсациями для вставок постоянного тока / Е. Н. Коптяев, В. М. Баланшевич, С. А. Абрамов // Электричество. – 2017. – № 6. – С. 55-59.

56. Кузнецов, А. В. Модель формирования стимулирующего тарифа для управления потоками реактивной мощности и качеством электроэнергии / А. В. Кузнецов, В. В. Чикин, Д. А. Ребровская // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2021. – № 1. – С. 88-95.

57. Кузнецов, А. В. Новый подход к построению модели управления качеством электроэнергии по показателям, обусловленным генерацией гармонических составляющих тока нелинейными нагрузками потребителей / А. В. Кузнецов, В. В. Чикин // Интеллектуальная электротехника. – 2024. – № 1(25). – С. 86-100.

58. Кузнецов, А. В. Новый технический параметр для определения значений правовых управляющих факторов в модели управления качеством электроэнергии / А. В. Кузнецов, В. В. Чикин // Промышленная энергетика. – 2023. – № 11. – С. 49-55.

59. Кузнецов, А. В. Об организационно-правовых аспектах управления режимами электропотребления / А. В. Кузнецов // Электрические станции, 2003. – № 12. – С.52-56.

60. Кузнецов, А. В. Оценка стоимости вредных последствий передачи и потребления электроэнергии пониженного качества в системах электроснабжения / А. В. Кузнецов, В. В. Чикин // Интеллектуальная электротехника. – 2023. – № 2(22). – С. 90-100. – DOI 10.46960/2658-6754_2023_2_90.

61. Кузнецов, А. В. Совершенствование модели управления качеством электроэнергии в системах электроснабжения потребителей сетевой организации с нелинейными нагрузками / А. В. Кузнецов, В. В. Чикин // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2024. – Т. 67. – № 1. – С. 131-140. – DOI 10.17213/0136-3360-2024-1-131-140.

62. Кузнецов, А. В. Управление качеством электроэнергии в электроэнергетической системе / А. В. Кузнецов, В. В. Чикин // Промышленная энергетика. – 2021. – № 5. – С. 53-59. – DOI 10.34831/EP.2021.30.84.008

63. Кулешова, Г. С. Моделирование режимов работы ФКУ на основе гибридного индуктивно-емкостного элемента при изменении параметров электрической сети / Г. С. Кулешова, Д. В. Михеев // Фёдоровские чтения – 2021 : LI международная научно-практическая конференция, Москва, 17-19 ноября 2021 года. – М.: Издательский дом МЭИ, 2021. – С. 198-204.

64. Куликов, А. Л. Оценка искажений напряжения в системах электроснабжения промышленных предприятий / А. Л. Куликов, А. А. Севостьянов, П. В. Илюшин // Электричество. – 2024. – №5. – С. 32-48. – DOI 10.24160/0013-5380-2024-5-32-48.

65. Куликов, А. Л. Применение статистического выборочного контроля при мониторинге показателей качества электрической энергии в современных системах электроснабжения / А. Л. Куликов, П. В. Илюшин, А. А. Севостьянов // Электротехника. – 2022. – №4. – С. 46-53. – DOI 10.53891/00135860_2022_4_46.

66. Лоскутов, А. Б. Автоматизированная система контроля и учета электроэнергии / А. Б. Лоскутов, А. И. Гардин, А. А. Лоскутов. – Нижний Новгород: НГТУ, 2018. – 84 с.

67. Лукманов, В. С. Теоретические основы электротехники. Часть 1. Теория линейных электрических цепей : учебное пособие / В. С. Лукманов. – Уфа: УГАТУ, 2005. – 120 с.

68. Майер, В. Я. Методика определения долевых вкладов потребителя и энергоснабжающей организации в ухудшение качества электроэнергии / В. Я. Майер // Электричество. – 1994. – № 9. – С. 19-24.

69. Машкин, А. Ответственность за снижение качества электроэнергии обзор арбитражной практики [Электронный ресурс] / А. Машкин, А. Якимов, В. Машкин // Новости электротехники. – 2008. – № 6(54). – URL: http://www.news.elteh.ru/arh/2008/54/12.php (дата обращения: 10.08.2025).

70. МВИ-111-002-2014 Методика по определению источника (направления на источник) искажений параметров качества электроэнергии (введ. 26.11.2014) [Электронный ресурс] // База отраслевой НТД. – URL: https://gisprofi.com/gd/documents/mvi-111-002-2014-metodika-po-opredeleniyu-istochnika-napravleniya-na.html (дата обращения: 01.09.2025).

71. Менсон, Дж. Решение проблемы качества электроэнергии – дешевле, чем терпеть от нее убытки / Дж. Менсон // Энергоэксперт. – 2008. – № 4. – С. 49-63.

72. Михеев, Г. М. Электромагнитная совместимость технических средств предприятий по гармоническому составу напряжения / Г. М. Михеев, М. Н. Атаманов, Н. М. Дрей // Электрические станции. – 2019. – № 8. – С. 41-45.

73. Многофункциональные измерители качества электроэнергии BINOM3 [Электронный ресурс] // BINOM3.– URL: http://www.binom3.com /account/?lang=ru (дата обращения: 15.08.2025).

74. Моделирование резонанса токов на высших гармониках при нестационарном режиме работы системы электроснабжения / Д. В. Коваленко, Л. А. Файфер, Б. Ю. Киселёв, [и др.] // Омский научный вестник. – 2018. – № 2(158). – С. 64-69.

75. Мониторинг показателей качества электрической энергии в системах электроснабжения горных предприятий : монография / И. И. Карташев, В. Н. Тульский, Н. М. Кузнецов, А. С. Семёнов. – М.: Перо, 2013. – 142 с.

76. Наумкин, И. Б. Влияние нелинейной нагрузки на качество электроэнергии / И. Б. Наумкин, И. Н. Паскарь, В. М. Завьялов // Вестник КузГТУ. – 2015. – № 4(110). – С. 75-81.

77. Немцев, Г. А. Резонансные явления при эксплуатации систем электроснабжения с фильтрокомпенсирующими устройствами / Г. А. Немцев, А. Г. Немцев, О. В. Федоров // Вестник ЧГУ. – 2012. – № 3. – С. 126-132.

78. Николаев, А. А. Экспериментальные исследования электромагнитной совместимости электроприводов в системе электроснабжения металлургического предприятия / А. А. Николаев, Г. П. Корнилов, Т. Р. Храмшин // Вестник МГТУ им. Г. И. Носова. – 2016. – Т.14. – №4. – С. 96-105.

79. Николаев, М. А. Оценка инвестиционных проектов / М. А. Николаев // Экономический анализ: теория и практика. – 2010. – №4 (169). – С. 8-14.

80. О правомерности применений положений Инструкции о порядке расчетов за электрическую и тепловую энергию, утвержденной Роскомцен и Минтопэнерго России 30 ноября 1993 г. // Информационный бюллетень Федеральной энергетической комиссии Российской Федерации. – 2000. – № 11.

81. О стимулировании повышения качества электроэнергии в действующих электрических сетях : дискуссия. – Промышленная энергетика. – 1984. – № 1. – С. 46-56.

82. О стимулировании повышения качества электроэнергии в действующих электрических сетях : дискуссия. – Промышленная энергетика. – 1984. – № 2. – С. 47-56.

83. Обзор современных исследований по идентификации резонансных режимов, возникающих в элементах электрических сетей промышленных предприятий и коммунально-бытового сектора / Д. В. Коваленко, Е. А. Пугачева, Д. А. Рогозина, А. Е. Фридрих // Омский научный вестник. – 2018. – № 6(162). – С. 103-107.

84. Оценка влияния эмиссии высших гармонических составляющих напряжения и тока от бытовых электроприемников на питающую сеть / Т. В. Анчарова, С. С. Бодрухина, С. А. Цырук, С. А. Янченко // Промышленная энергетика. – 2012. – № 9. – С. 36-42.

85. Оценка надежности потребителей с учетом влияния показателей качества электроэнергии в системах электроснабжения / А. Н. Назарычев, А. Н. Скамьин, Ю. В. Добуш [и др.] // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2022. – № 5(74). – С. 74-79.

86. Оценка теплового режима кабеля, питающего нелинейную нагрузку / В. Н. Тульский, И. И. Карташев, М. Г. Симуткин, Р. Р. Насыров // Промышленная энергетика. – 2012. – № 7. – С. 42-45.

87. Ощепков, В. А. Расчет резонансных режимов в электрических сетях при наличии источников высших гармоник / В. А. Ощепков, Я. Ю. Логунова // Вестник ЮГУ. – 2023. – № 1(68). – С. 147-155.

88. Пассивные фильтры для компенсации гармоник в линиях электропередачи высокого напряжения / Н. П. Боярская, В. П. Довгун, Д. Э. Егоров, А. Ф. Синяговский // Вестник КГЭУ. – 2023. – № 1(57). – С. 144-151.

89. Пат. № 2216747 Российская Федерация, МПК G01R 21/06, G01R 19/00. Способ выявления источников несанкционированного искажения качества электроэнергии / В. С. Соколов. – № 2002106381; заявл. 13.03.2002; опубл. 20.11.2003, Бюл. № 32. – 8 с.

90. Пат. № 2782157 Российская Федерация, МПК G01R 23/20. Способ оценки долевого вклада источников искажений в напряжение питающей сети / А. Н. Скамьин, Я. Э. Шклярский, В. С. Добуш, Д. С. Галкин; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет». – № 2022101623; заявл. 25.01.22; опубл. 21.10.2022.

91. Пат. № 2812689 C1 Российская Федерация, МПК G01R 21/06. Способ определения объема электрической энергии, искаженной гармоническими составляющими тока потребителя / В. В. Чикин, А. В. Кузнецов, заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «УлГТУ» – № 2023106706/28; заявл. 22.03.2023; опубл. 31.01.2024, Бюл. № 4. – 10 с.

92. Поднебенная, С. К. Методика выбора мощности активных фильтрокомпенсирующих устройств / С. К. Поднебенная // Моделирование процессов промышленного оборудования. – 2015. – №2. – С. 37-46.

93. Постановление Правительства РФ от 04.05.2012 № 442 (ред. от 23.11.2024) «О функционировании розничных рынков электрической энергии, полном и (или) частичном ограничении режима потребления электрической энергии» [Электронный ресурс] // Информационно-правовое обеспечение Гарант. – 2012. – URL: https://base.garant.ru/70183216/ (дата обращения: 10.09.2025).

94. Постановление Правительства РФ от 27.12.2004 № 861 (ред. от 20.08.2025) «Об утверждении Правил недискриминационного доступа к услугам по передаче электрической энергии и оказания этих услуг, Правил недискриминационного доступа к услугам по оперативно-диспетчерскому управлению в электроэнергетике и оказания этих услуг, Правил недискриминационного доступа к услугам коммерческого оператора оптового рынка и оказания этих услуг и Правил технологического присоединения энергопринимающих устройств потребителей электрической энергии, объектов по производству электрической энергии, а также объектов электросетевого хозяйства, принадлежащих сетевым организациям и иным лицам, к электрическим сетям» [Электронный ресурс] // Информационно-правовое

обеспечение Гарант. – 2004. – URL: https://base.garant.ru/187740/ (дата обращения: 15.09.2025).

95. Правила применения скидок и надбавок к тарифам за качество электроэнергии. – Промышленная энергетика. – 1990. – № 11. – С. 49-51.

96. Правила применения скидок и надбавок к тарифам за качество электроэнергии. – Промышленная энергетика. – 1991. – № 8. – С. 49-51.

97. Правила присоединения потребителя к сети общего назначения по условиям влияния на качество электроэнергии. – Промышленная энергетика. – 1991. – № 8. – С. 45-48.

98. Правила устройства электроустановок : Все действующие разделы ПУЭ-6 и ПУЭ-7. – Новосибирск: Норматика, 2016. – 464 с.

99. Приказ Министерства энергетики РФ от 28.08.2023 № 690 (зарег. 10.01.2024 № 76809) «Об утверждении требований к качеству электрической энергии, в том числе распределению обязанностей по его обеспечению между субъектами электроэнергетики и потребителями электрической энергии» [Электронный ресурс] // Официальное опубликование правовых актов. – 2023. – URL: http://publication.pravo.gov.ru/ document/0001202401110006 (дата обращения: 09.09.2025).

100. Приказ Министерства энергетики РФ от 28.12.2000 № 167 (ред. от 28.12.2000) «О признании утратившими силу Инструкции о порядке расчетов за электрическую и тепловую энергию и дополнений к ней» [Электронный ресурс] // Контур Норматив. – URL: https://normativ.kontur.ru/document?moduleld=1&documentld=43288 (дата обращения: 09.09.2025).

101. Приказ ФСТ РФ от 06.08.2004 № 20-Э/2 «Об утверждении методических указаний по расчету регулируемых тарифов и цен на электрическую (тепловую) энергию на розничном (потребительском) рынке» (ред. от 15.02.2022) [Электронный ресурс] // Контур Норматив. – 2004. – URL: https://normativ.kontur.ru/document?moduleld=1&documentld=425324 (дата обращения: 07.09.2025).

102. Программный комплекс MATLAB [Электронный ресурс] // Math Works. – URL: https://www.mathworks.com (дата обращения: 10.06.2025).

103. Распоряжение Правительства РФ от 28.12.2021 № 3924-р «Об утверждении стратегического направления в области цифровой трансформации топливно-энергетического комплекса» [Электронный ресурс] // Информационно-правовой портал Гарант. – 2021. – URL: https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/403233017 (дата обращения: 09.09.2025).

104. Распределенный мониторинг качества электрической энергии в интеллектуальных электрических сетях / К. В. Суслов, В. С. Степанов, Н. Н. Солонина, З. В. Солонина // Управление качеством электрической энергии : Сборник трудов Международной научно-практической конференции, Москва, 26-28 ноября декабря 2014 года. – М.: Радуга, 2014. – С. 329-335.

105. Расчёт параметров и анализ работы пассивного фильтра гармоник / М. Н. Атаманов, Н. М. Дрей, А. Г. Зиганшин Г. М. Михеев // Вестник Чувашского университета. – 2020. – № 1. – С. 17–25.

106. Расчет параметров пассивного фильтра гармоник / М. Н. Атаманов, Н. М. Дрей, А. Г. Зиганшин, Г. М. Михеев // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем : Материалы XIII всероссийской научно-технической конференции, Чебоксары, 07 июня 2019 года. – Чебоксары: ЧГУ имени И.Н. Ульянова, 2019. – С. 393-396.

107. Саенко, Ю. Л. Анализ методов определения фактических вкладов в понижение качества электрической энергии по несимметрии и несинусоидальности напряжений / Ю. Л. Саенко, Д. Н. Калюжный // Электрификация транспорта. – 2015. – № 9. – С. 123-133.

108. Саенко, Ю. Л. Принцип наложения в математической модели распределения фактических вкладов линейных источников искажений в искажения напряжений в точке общего присоединения / Ю. Л. Саенко, Д. Н. Калюжный // Электрификация транспорта. – 2015. – № 10. – С. 124-128.

109. Саенко, Ю. Л. Распределение фактических вкладов линейных источников искажений в искажения напряжений в точке общего присоединения по данным локальных измерений / Ю. Л. Саенко, Д. Н. Калюжный, С. В. Свергунов // Электрификация транспорта. – 2016. – № 11. – С. 121-127.

110. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024666783 Российская Федерация. Расчет объема искаженной токами гармоник электроэнергии в сети до 1 кВ : заявл. 09.07.2024 : опубл. 17.07.2024 / В. В. Чикин, Д. А. Нуждов ; заявитель ФГБОУ ВО «УлГТУ».

111. Серков, А. В. Правовая ответственность за нарушение требований к качеству энергии [Электронный ресурс] / А. Серков // Коммунальный комплекс России. – 2016. – № 10(148). – URL: http://gkhprofi.ru/a-serkov-pravovaya-otvetstvennost-za-narushenie-trebovanij-k-kachestvu-energii/ (дата обращения: 30.08.2025).

112. Серков, А. В. Проблемы юридической ответственности за нарушение требований к качеству поставляемой энергии / А. В. Серков // Промышленная энергетика. – 2017. – №1. – С. 48-54.

113. Синтез фильтрокомпенсирующих устройств для систем электроснабжения : коллективная монография / Н. П. Боярская, В. П. Довгун, Д. Э. Егоров [и др.]; под ред. В. П. Довгуна. – Красноярск: СФУ, 2014. – 192 с.

114. Система компьютерной математики Maple [Электронный ресурс] // Maple Soft. – URL: https://www.maplesoft.com (дата обращения: 10.06.2025).

115. Системы измерения качества электроэнергии [Электронный ресурс] // НПП «Энерготехника». – URL: https://www.entp.ru/catalog/Sistemy (дата обращения: 20.08.2025).

116. Скамьин, А. Н. Алгоритмы выбора средств компенсации высших гармоник в сетях горного предприятия / А. Н. Скамьин // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2012. – № 8. – С. 80-85.

117. Скамьин, А. Н. Влияние сопротивления системы на уровень высших гармоник в сети / А. Н. Скамьин, Е. О. Замятин // Введение в энергетику : сборник

материалов II Всероссийской молодежной научно-практической конференции, Кемерово, 23–25 ноября 2016 года. – Кемерово: Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, 2016. – С. 157.

118. Скамьин, А. Н. Компенсация влияния высших гармоник на электрооборудование при их возникновении со стороны сети / А. Н. Скамьин, О. С. Васильков // Управление качеством электрической энергии: Сборник трудов Международной научно-практической конференции, Москва, 05-07 декабря 2018 года. – М.: Радуга, 2018. – С. 157-160.

119. Скамьин, А. Н. Определение параметров нелинейной электрической нагрузки / А. Н. Скамьин // Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики : Сборник тезисов VIII Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 22–23 апреля 2021 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный университет, 2021. – С. 297-299.

120. Скамьин, А. Н. Повышение эффективности функционирования конденсаторных батарей в электрической сети горного предприятия / А. Н. Скамьин // Записки горного института. – 2011. – Т. 189. - С. 107-110.

121. Смирнов, С. С. Вклад потребителя в уровни напряжения высших гармоник в узлах электрической сети / С. С. Смирнов, Л. И. Коверникова // Электричество, 1996. – № 1. – С. 58-64.

122. Соколов, В. С. Идентификация источников искажений качества энергии электрических сетей / В. С. Соколов // Технологии электромагнитной совместимости 2003. – №1. – С. 53-56.

123. Соколов, В. С. Проблемы установления размера ответственности за ухудшение качества электрической энергии и пути их решения / В. С. Соколов, М. А. Ермилов, А. В. Серков [и др.] // Промышленная энергетика. – 2000. – № 8. – С. 52-54.

124. Суднова, В. В. Принципы построения информационно-измерительной системы мониторинга показателей качества электроэнергии и управления

качеством электроэнергии / В. В. Суднова, В. П. Пригода, Р. Р. Хакимов // Энергонадзор и энергобезопасность. – 2006. – № 3. – С. 44–50.

125. Технико-экономические способы повышения эффективности систем электроснабжения сельских потребителей / А. В. Виноградов, В. Е. Большев, А. В. Виноградова [и др.] // Вестник аграрной науки Дона. – 2019. – № 3 (47). – С. 59-67.

126. Тульский, В. Н. Развитие методики определения фактического вклада при оценке качества электрической энергии в точке общего присоединения : дис. … канд. техн. наук : 05.14.02 / Тульский Владимир Николаевич. – М., 2004. – 134 с.

127. Указ Президента РФ от 18.06.2024 № 529 (ред. от 18.06.2024) «Об утверждении приоритетных направлений научно-технологического развития и перечня важнейших наукоемких технологий» [Электронный ресурс] // Официальное опубликование правовых актов. – 2024. – URL: http://publication. pravo.gov.ru /document/0001202406180018 (дата обращения: 02.09.2025).

128. Управление качеством электроэнергии / И. И. Карташев, В. Н. Тульский, Р. Г. Шамонов [и др.]. – М. : Издательский дом МЭИ, 2017. – 347 с.

129. Федеральный закон от 26.03.2003 № 35-ФЗ «Об электроэнергетике» (ред. от 01.01.2023) [Электронный ресурс] // Информационно-правовое обеспечение Гарант. – 2003. – URL: https://base.garant.ru/185656/ (дата обращения: 07.09.2025).

130. Цапенко, А. В. Системы мониторинга качества электрической энергии. Проблемы и пути контроля и управления качеством электроэнергии в электроэнергетике / А. В. Цапенко, В. А. Тухас // Энергонадзор и энергобезопасность. – 2007. – №2. – С. 30-39.

131. Цырук, С. А. Гармонический анализ нелинейных электроприемников офисных центров / С. А. Цырук, С. А. Янченко // Промышленная энергетика. – 2012. – № 3. – С. 54-61.

132. Чернышов, М. О. Гибридные силовые фильтры для трехфазных четырехпроводных сетей / М. О. Чернышов, В. П. Довгун, О. Е. Малошенок // Проблемы энергетики. – 2016. – № 1-2. – С. 11-19.

133. Чикин, В. В. Аналитические критерии обнаружения источников генерации токов гармонических составляющих / В. В. Чикин // Промышленная энергетика. – 2025. – № 8. – С. 18-26. – DOI: 10.71759/esd3-e544.

134. Чикин, В. В. Критерий принимаемого потребителем решения об установке средств повышения качества электроэнергии и компенсации реактивной мощности / В. В. Чикин, А. В. Кузнецов, Д. А. Ребровская // Физико-математические и технические науки как фундамент становления постиндустриального общества: сборник Международной научно-практической конференции, Самара, 01 июня 2020 г. – Уфа: Аэтерна, 2020. – С. 80-82.

135. Чикин, В. В. Модель дифференцированного тарифа для управления спросом на технические устройства повышения качества электроэнергии / В. В. Чикин, А. В. Кузнецов // Промышленная энергетика. – 2022. – № 3. – С. 12-19. – DOI 10.34831/EP.2022.87.14.002.

136. Чикин, В. В. Новые параметры оценки качества электроэнергии в системах электроснабжения потребителей с нелинейными нагрузками / В. В. Чикин, И. И. Салихов // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике : Материалы XIV Всероссийской научно-технической конференции, Чебоксары, 06-08 июня 2024 года. – Чебоксары: ЧГУ имени И.Н. Ульянова, 2024. – С. 236-237.

137. Чикин, В. В. Новые условия для применения надбавок (скидок) к оплате электроэнергии за генерацию и потребление токов гармонических составляющих / В. В. Чикин, А. В. Кузнецов // Системные исследования в энергетике : Материалы IV Международной конференции, Иркутск, 11-15 сентября 2023 года. – Иркутск: Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения РАН, 2023. – С. 137-138.

138. Чикин, В. В. Технико-экономический анализ выбора устройств подавления токов гармонических составляющих / В. В. Чикин, И. И. Салихов // Системные исследования в энергетике 2024: Материалы международной конференции, Иркутск, 20-24 мая 2024 года. – Иркутск: ИСЭМ РАН, 2024.

139. Чикин, В. В. Трехлучевая схема замещения для исследования несинусоидального режима в точках передачи электроэнергии / В. В. Чикин, Я. Р. Коломиец // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем : Материалы XVI Всероссийской научно-технической конференции, Чебоксары, 05-07 июня 2025 года. – Чебоксары: ЧГУ имени И.Н. Ульянова, 2025. – С. 251-252.

140. Чугунов, Г. А. Мониторинг показателей качества электроэнергии / Г. А. Чугунов, А. И. Тищенко, М. Н. Агапов // Ползуновский вестник. – 2010. – № 2. – С. 98-102.

141. Чэпмэн, Д. Цена низкого качества электроэнергии / Д. Чэпмэн // Энергосбережение. – 2004. – № 1.

142. Шандарова, Е. Б. Теоретические основы электротехники : учебное пособие / Е. Б. Шандарова. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 111 с.

143. Шарипов, Л. А. Исследование трехфазной двенадцати пульсной схемы выпрямления тока, применяемая для управления электрическими двигателями постоянного тока / Л. А. Шарипов // Перспективные материалы науки, технологий и производства : Сборник научных статей Международной научно-практической конференции, Курск, 24 мая 2022 года. – Курск: Юго-Западный государственный университет, 2022. – С. 330-334.

144. Широкополосные силовые фильтры гармоник / Н. П. Боярская, В. П. Довгун, Е. С. Шевченко, Д. Э. Егоров // Ползуновский вестник. – 2013. – № 4-2. – С. 34-38.

145. Шклярский, Я. Э. Оценка вклада потребителей в ухудшение показателей качества электроэнергии / Я. Э. Шклярский, Ю. В. Растворова, И. С. Петров // Вопросы электротехнологии, 2019. – №1 (22). – С. 56-63.

146. Шклярский, Я. Э. Способы уменьшения влияния высших гармоник на работу электрооборудования / Я. Э. Шклярский, А. Н. Скамьин // Записки горного института. – 2011. – Т.189. – С. 121-124.

147. Шклярский, Я. Э. Уменьшение влияния высших гармоник на работу электротехнического комплекса горного предприятия / Я. Э. Шклярский, Д. А. Ситников, А. Н. Скамьин // Записки горного института. – 2008. – Т. 178. – С. 162-165.

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

149. Янченко, С. А. Повышение качества электроэнергии в сетях с тяговыми нагрузками / С. А. Янченко, С. А. Цырук // Промышленная энергетика. – 2025. – № 2. – С. 45-51.

150. A European benchmarking of voltage quality regulation / M. Bollen, J. Trhulj, Y. Beyer, [et al.] // A European benchmarking of voltage quality regulation : 22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2013), Stockholm, 2013. – P. 1-4. – DOI: 10.1049/cp.2013.0686.

151. A Methodological Proposal for the Estimation of Optimal Power Quality Levels / G. Cajamarca, H. Torres, A. Pavas, [et al.] // IEEE PES Power Systems Conference and Exposition, Atlanta, USA, 2006. – P. 1774-1779. – DOI: 10.1109/PSCE.2006.296181.

152. A Power Quality Pricing Method Based on Risk Management in Deregulated Electricity Retail Market / J. Wu, H. Zhou, X. Ni, [et al.] // International Conference on Power System Technology (POWERCON), Guangzhou, China, 2018. – P. 843-848. – DOI: 10.1109/POWERCON.2018.8601960.

153. A Power Quality Service Pricing Approach Considering Treatment Expenses and Stop Loss Insurance / M. Su, G. Li, M. Zhou, J. Yang // IEEE Lausanne Power Tech, Lausanne, Switzerland, 2007. – P. 1569-1574. – DOI: 10.1109/PCT.2007.4538549.

154. Anu, G. Identification of Harmonic Injection and Distortion Power at Customer Location / G. Anu, F. M. Fernandez // 19th International Conference on

Harmonics and Quality of Power (ICHQP), Dubai, United Arab Emirates, 2020. – P. 1-5. – DOI: 10.1109/ICHQP46026.2020.9177869.

155. Chikin, V. V. About improving efficiency of state management of electric power quality / V. V. Chikin, A. V. Kuznetsov, Yu. V. Zhukova // Инновационное развитие. – 2018. – №. 8(25). – С. 26-28.

156. Chikin, V. V. New conditions for applying surcharges (discounts) to electricity payments for generation and consumption of harmonic component currents / V. V. Chikin, A. V. Kuznetsov // E3S Web of Conferences. – 2023. – Vol. 470. – P. 01020. – DOI 10.1051/e3sconf/202347001020.

157. Chikin, V. V. On Improvement of the Electric Power Quality Control Mechanism in the Energy System of Russia / V. V. Chikin, A. V. Kuznetsov // 2021 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), Magnitogorsk, 2021. – P. 67-71. – DOI 10.1109/UralCon52005.2021.9559585.

158. Chikin, V. V. Quality management of electric energy and compensation of reactive power in the electric power system by means of stimulating tariffs / V. V. Chikin, A. V. Kuznetsov, D. A. Rebrovskaya // E3S Web of Conferences. – 2020. – Vol. 178. – P. 01080. – DOI 10.1051/e3sconf/202017801080.

159. Cristaldi, L. Harmonic power flow analysis for the measurement of the electric power quality // L. Cristaldi, A. Ferrero. – IEEE Trans. Instrum. Meas. – 1995. – Vol. 44. – P. 683-685.

160. Geng, Y. H. Assessment for Harmonics Emission Level from one particular customer / Y. H. Geng // University of Liege. – 1992.

161. Haghifam, M. R. Developing a new algorithm to participate power quality variations in tariff: an experience in Iran / M. R. Haghifam, M. Daneshgar // 16th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution. Part 1 : Contributions. CIRED, Amsterdam, Netherlands, 2001. – Vol. 2. – DOI: 10.1049/cp:20010751.

162. Harmonic Contribution Quantification for Multiple Harmonic Sources Based on Minimum Impedance Fluctuation / X. Tang, [et al.] // IEEE Access. – 2023 – Vol. 11. – P. 87409-87419. – DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3290198.

163. Harmonic responsibility determination considering background harmonic fluctuation / Ch. Jing, Fu Ling, Z.Tianlei, [et al.] // Electric Power Automation Equipment. 2016. – No. 36(5). – P. 61-65.

164. Li C. A “critical impedance”-based method for identifying harmonic sources / C. Li, W. Xu, T. Tayjasanant // IEEE Trans. Power Delivery. – 2004. – Vol. 19. – No. 2. – P. 671-678.

165. Malekian, K. A novel approach to analyze the harmonic behavior of customers at the point of common coupling / K. Malekian // 9th International Conference on Compatibility and Power Electronics. – 2015. – P. 31-36.

166. Roman, T. G. S. Power quality regulation in Argentina: flicker and harmonics / T. G. S. Roman, J. R. Ubeda // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1998. – Vol. 13. – No. 3. – P. 895-901. – DOI: 10.1109/61.686990.

167. Safargholi, F. On the Dominant Harmonic Source Identification-Part I: Review of Methods / F. Safargholi, K. Malekian, W. Schufft // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2018. – Vol. 33. – No. 3. – P. 1268-1277. – DOI: 10.1109/TPWRD.2017.2751663.

168. Safargholi, F. On the Dominant Harmonic Source Identification-Part II: Application and Interpretation of Methods / F. Safargholi, K. Malekian, W. Schufft // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2018. – Vol. 33. – No. 3. – P. 1278-1287. – DOI: 10.1109/TPWRD.2017.2751673.

169. Schiavo, L. L. Regulation and incentives for improving continuity of supply: the experience of Italy and a comparison with other EU countries // L. L. Schiavo, R. Malaman // CIGRE/IEEE PES International Symposium Quality and Security of Electric Power Delivery Systems, Montreal, QC, Canada, 2003. – P. 241-247. – DOI: 10.1109/QSEPDS.2003.159828.

170. Several Sufficient Conditions for Harmonic Source Identification in Power Systems / B. Wang, G. Ma, J. Xiong, [et al.] // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2018. – Vol. 33. – No. 6. – P. 3105-3113. – DOI: 10.1109/TPWRD.2018.2870051.

171. Swart, P. H. On techniques for localization of sources producing distortion in three-phase networks / P. H. Swart, M. J. Case, J. D. Van Wyk // Eur. Trans. Elect. Power Eng. –1996. – Vol. 6. – No. 6.

172. System voltage quality regulation for continuous disturbances / A. Bracale, G. Carpinelli, P. Caramia, [et al] // IEEE PES General Meeting, Minneapolis, MN, USA, 2010. – P. 1-8. – DOI: 10.1109/PES.2010.5589280.

173. Tanaka, T. A new method of harmonic power detection based on the instantaneous active power in three-phase circuits // T. Tanaka, H. Akagi // IEEE Trans. Power Delivery. – 1995. – Vol. 10. – No. 4. – P. 1737-1742.

174. Xu, W. An investigation on the validity of power-direction method for harmonic source determination / W. Xu, X. Liu, Yi. Liu // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2003. – Vol. 18. No. 1. – P. 214-219. – DOI: 10.1109/TPWRD.2002.803842.

175. Zhou, B. Study on Pricing Method of Power Quality Differentiated Market Service in Distribution Grid / B. Zhou, R. Gong // IEEE Access. – 2019. – Vol. 7. – P. 147021-147028. – DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2945814.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А

Программы для системы компьютерной алгебры Maple 17

А.1 Расчет параметров трехлучевой схемы замещения

```
> restart;
```

Получение выражений для расчета сопротивлений

```
> eq1 := I1*(Zl1+Zn1)-(J2-I2)*Zn2+I2*Zl2 = 0:
  eq2 := -(J2-I2)*Zn2+I2*Zl2+(I2-I1)*Z3 = 0:
> assign(solve({eq1, eq2}, {Z3, Zl2})):
```

Исходные данные

```
> J2 := evalf(.7071067810*exp(I*(30*((1/180)*Pi)))): # Ввод
действующего значения и фазового угла источника тока
второго потребителя - генератора гармоник
  Zn1 := 447.2136+1432.6559*I: # Ввод активного и
реактивного сопротивлений исследуемого потребителя -
генератора гармоник
  Zn2 := 111.8034+403.3921*I: # Ввод активного и
реактивного сопротивлений второго потребителя
  I1 := 0.6959344939e-1+0.4169808688e-1*I: #Ввод активного
и реактивного токов в ТПЭ1 при J1=0
  I2 := .3502299886+.2072529975*I: #Ввод активного и
реактивного токов в ТПЭ2 при J1=0
```

Расчет значений сопротивлений с подбором значения *k*

```
> for k from .1 by -0.1e-2 to 0 do
  Zl1 := k*Zn1:
 if   Re(Zl2(k))<0.1*Re(Zn2)   and   Re(Zl2(k))>0   and
Re(Z3(k))>0 then break
 end if
  end do:
> Rl1 := Re(Zl1); Xl1 := Im(Zl1);
  Rl2 := Re(Zl2); Xl2 := Im(Zl2);
  R3 := Re(Z3); X3 := Im(Z3);
```

```
Rl1 := 12.0747672
Xl1 := 38.6817093
```

```
Rl2 := 0.2033345786e-1
Xl2 := 1.575975067
R3 := 111.8557588
X3 := 367.1248079
```

Расчет нового значения J2 с учетом ограничения по допустимому вкладу в напряжение в ТПЭ1

```
> U0 := 10*10^3*exp(I*(0*((1/180)*Pi))): #Ввод действующего значения и фазового угла напряжения основной частоты
   KU := 4: #Ввод коэффициента гармонической составляющей в процентах
   d21 := .5: #Ввод допустимой доли искажения напряжения вторым потребителем в ТПЭ1
> J2d1 := evalf(KU*U0*d21*(Z3*(Zn1+Zl1+Zn2+Zl2)+(Zn1+Zl1)*(Zn2+Zl2))/((100*sqrt(3))*Zn2*Z3*Zn1)):
   mod_J2d1 := abs(J2d1);
   fazdegr_J2d1 := evalf(180*argument(J2d1)/Pi);
```

```
mod_J2d1 := .6705689711
fazdegr_J2d1 := -73.59252304
```

Расчет нового значения J2 с учетом ограничения по допустимому вкладу в напряжение в ТПЭ2

```
> d22 := .5: #Ввод допустимой доли искажения напряжения вторым потребителем в ТПЭ2
> J2d2 := evalf(KU*U0*d22*(Z3*(Zn1+Zl1+Zn2+Zl2)+(Zn1+Zl1)*(Zn2+Zl2))/((100*sqrt(3))*(Z3*(Zn1+Zl1)+Zl2*(Zn1+Zl1+Z3))*Zn2)):
   mod_J2d2 := abs(J2d2);
   fazdegr_J2d2 := evalf(180*argument(J2d2)/Pi);
```

```
mod_J2d2 := .6497399461
fazdegr_J2d2 := -73.67452269
```

А.2 Построение зависимостей активных токов и модулей напряжения гармонических составляющих в точке передачи электроэнергии

```
> restart;
```

Получение выражений математической модели

```
> eq1 := I1+In1 = J1:
  eq2 := I2+In2 = J2:
  eq3 := I1+I2-Ien = 0:
  eq4 := I1*Zl1+Ien*Z3-In1*Zn1 = 0:
  eq5 := I2*Zl2+Ien*Z3-In2*Zn2 = 0;
  eq6 := In1*Zn1-UJ1 = 0:
  eq7 := In2*Zn2-UJ2 = 0:
> assign(solve({eq1, eq2, eq3, eq4, eq5, eq6, eq7}, {I1,
I2, Ien, In1, In2, UJ1, UJ2})):
> Jgr1 := solve(I1 = 0, J1):
  Jgr2 := solve(I2 = 0, J1):
> J1d1 := (KU*U0/(100*sqrt(3))-
J2*Zn1*Zn2*Z3/(Z3*(Zn1+Zl1+Zn2+Zl2)+(Zn1+Zl1)*(Zn2+Zl2)))*(
Z3*(Zn1+Zl1+Zn2+Zl2)+(Zn1+Zl1)*(Zn2+Zl2))/((Z3*(Zn2+Zl2)+Zl
1*(Zn2+Zl2+Z3))*Zn1):
  J1d2 := (KU*U0/(100*sqrt(3))-
J2*(Z3*(Zn1+Zl1)+Zl2*(Zn1+Zl1+Z3))*Zn2/(Z3*(Zn1+Zl1+Zn2+Zl2
)+(Zn1+Zl1)*(Zn2+Zl2)))*(Z3*(Zn1+Zl1+Zn2+Zl2)+(Zn1+Zl1)*(Zn
2+Zl2))/(Zn1*Zn2*Z3):
  J1max1 := (5*KU*U0/(100*sqrt(3))-
J2*Zn1*Zn2*Z3/(Z3*(Zn1+Zl1+Zn2+Zl2)+(Zn1+Zl1)*(Zn2+Zl2)))*(
Z3*(Zn1+Zl1+Zn2+Zl2)+(Zn1+Zl1)*(Zn2+Zl2))/((Z3*(Zn2+Zl2)+Zl
1*(Zn2+Zl2+Z3))*Zn1):
  J1max2 := (5*KU*U0/(100*sqrt(3))-
J2*(Z3*(Zn1+Zl1)+Zl2*(Zn1+Zl1+Z3))*Zn2/(Z3*(Zn1+Zl1+Zn2+Zl2
)+(Zn1+Zl1)*(Zn2+Zl2)))*(Z3*(Zn1+Zl1+Zn2+Zl2)+(Zn1+Zl1)*(Zn
2+Zl2))/(Zn1*Zn2*Z3):
```

Исходные данные

```
> J2 := evalf(.6497399461*exp(I*(30*((1/180)*Pi)))): # Ввод
действующего значения и фазового угла источника тока
второго потребителя - генератора гармоник
  Zn1 := 447.2136+1432.6559*I: # Ввод активного и
реактивного сопротивлений исследуемого потребителя -
генератора гармоник
  Zn2 := 111.8034+403.3921*I: # Ввод активного и
реактивного сопротивлений второго потребителя
  Zl1 := 12.0747672+38.6817093*I: # Ввод активного и
реактивного сопротивления луча звезды в ветви исследуемого
потребителя
  Zl2 := 0.4663885579e-1+1.616200856*I: # Ввод активного и
реактивного сопротивления луча звезды в ветви второго
потребителя - генератора гармоник
```

```
Z3 := 111.8464265+367.0369002*I: #Ввод активного и
реактивного сопротивления луча звезды в ветви линейного
потребителя
U0 := 10*10^3*exp(I*(0*((1/180)*Pi))): #Ввод
действующего значения и фазового угла напряжения основной
частоты
KU := 4: #Ввод коэффициента гармонической составляющей в
процентах
```

График зависимости активных токов и напряжений в ТПЭ потребителей – генераторов гармоник от соотношения токов источников (рисунок А.1)

```
> J1 := k*J2:
 if evalf(abs(J1max1)) > evalf(abs(J1max2)) then kmax :=
abs(J1max1) else kmax := abs(J1max2)
end if:
> with(plots):
> graf1 := plot(Re(I1)/abs(J2), k = 0 .. kmax/abs(J2),
color = red, thickness = 4, linestyle = 1): #Построение
активного тока в ТПЭ исследуемого потребителя
graf2 := plot(Re(I2)/abs(J2), k = 0 .. kmax/abs(J2),
color = blue, thickness = 4, linestyle = 1): #Построение
активного тока в ТПЭ второго потребителя
graf3 := plot(abs((1/150)*UJ1/J2), k = 0 ..
kmax/abs(J2), color = red, thickness = 4, linestyle = 2):
#Построение действующего значения напряжения в ТПЭ
исследуемого потребителя в масштабе 1:150
graf4 := plot(abs((1/150)*UJ2/J2), k = 0 ..
kmax/abs(J2), color = blue, thickness = 4, linestyle = 2):
#Построение действующего значения напряжения в ТПЭ второго
потребителя в масштабе 1:150
graf5 := plot([[abs(Jgr1/J2), 0]], style = point, color
= red, symbol = box): #Вывод граничного значения Jгр1
graf6 := plot([[abs(Jgr2/J2), 0]], style = point, color
= blue, symbol = box): #Вывод граничного значения Jгр2
graf7 := plot([[abs(J1d1/J2), 0]], style = point, color
= red, symbol = circle): #Вывод допустимого значения
J1доп,1
graf8 := plot([[abs(J1d2/J2), 0]], style = point, color
= blue, symbol = circle): #Вывод допустимого значения
J1доп,2
display([graf1, graf2, graf3, graf4, graf5, graf6,
graf7, graf8]);
```

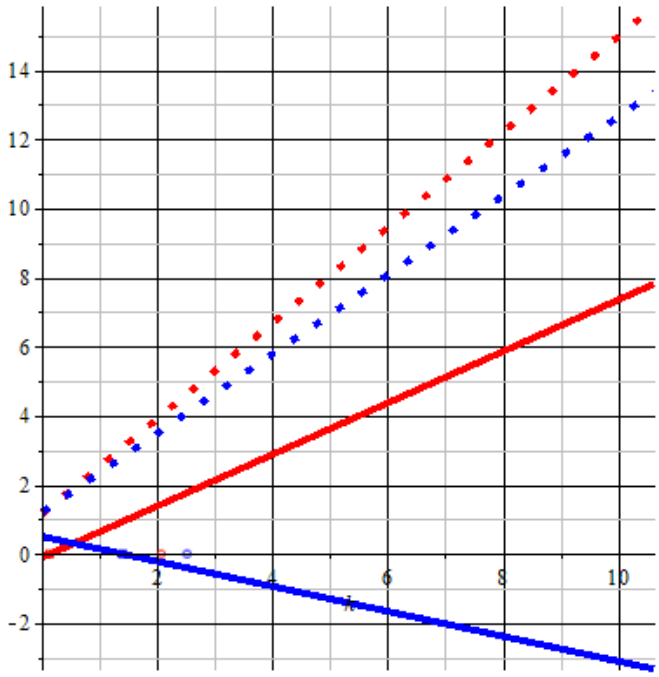


Рисунок А.1 – График зависимостей активных токов и напряжений в ТПЭ1 и ТПЭ2 от соотношения токов источников J_1/J_2

А.3 Влияние сопротивления ветви обобщенного линейного потребителя на граничное значение

```
> restart;
  Digits := 20:
```

Получение выражений математической модели с возможностью расчета сопротивлений трехлучевой звезды

```
> eq1 := I1+In1 = J1:
  eq2 := I2+In2 = J2:
  eq3 := I1+I2-Ien = 0:
  eq4 := I1*Zl1+Ien*Z3-In1*Zn1 = 0:
  eq5 := I2*Zl2+Ien*Z3-In2*Zn2 = 0:
> assign(solve({eq1, eq2, eq3, eq4, eq5}, {I1, I2, Ien,
In1, In2})):
  J1max1 := (5*KU*U0/(100*sqrt(3))-
J2*Zn1*Zn2*Z3/(Z3*(Zn1+Zl1+Zn2+Zl2)+(Zn1+Zl1)*(Zn2+Zl2)))*(
Z3*(Zn1+Zl1+Zn2+Zl2)+(Zn1+Zl1)*(Zn2+Zl2))/((Z3*(Zn2+Zl2)+Zl
1*(Zn2+Zl2+Z3))*Zn1):
```

```
   J1max2 := (5*KU*U0/(100*sqrt(3))-
J2*(Z3*(Zn1+Zl1)+Zl2*(Zn1+Zl1+Z3))*Zn2/(Z3*(Zn1+Zl1+Zn2+Zl2
)+(Zn1+Zl1)*(Zn2+Zl2)))*(Z3*(Zn1+Zl1+Zn2+Zl2)+(Zn1+Zl1)*(Zn
2+Zl2))/(Zn1*Zn2*Z3):
> I1f := I1:
> eq6 := I1_0*(Zl1+Zn1)-(J2-I2_0)*Zn2+I2_0*Zl2 = 0:
   eq7 := -(J2-I2_0)*Zn2+I2_0*Zl2+(I2_0-I1_0)*Z3 = 0:
> assign(solve({eq6, eq7}, {Z3, Zl2})):
> assign(solve({Zl2 = a}, {I2_0})):
   I2_0det := I2_0:
```

Исходные данные

```
> J2 := evalf(.6497399461*exp(I*(30*((1/180)*Pi)))): # Ввод
действующего значения и фазового угла источника тока
второго потребителя - генератора гармоник
   Zn1 := 447.2136+1432.6559*I: # Ввод активного и
реактивного сопротивлений исследуемого потребителя -
генератора гармоник
   Zn2 := 111.8034+403.3921*I: # Ввод активного и
реактивного сопротивлений второго потребителя
   I1 := 0.6395073727e-1+0.3831811646e-1*I: #Ввод
активного и реактивного токов в ТПЭ1 при J1=0
   I2 := .3218042960+.1904238561*I: #Ввод активного и
реактивного токов в ТПЭ2 при J1=0
   U0 := 10*10^3*exp(I*(0*((1/180)*Pi))): #Ввод
действующего значения и фазового угла напряжения основной
частоты
   KU := 4: #Ввод коэффициента гармонической составляющей в
процентах
```

Расчет значений сопротивлений с подбором значения *k*

```
> for k from .1 by -0.1e-2 to 0 do
   Zl1 := k*Zn1:
  if    Re(Zl2(k))<0.1*Re(Zn2)    and    Re(Zl2(k))>0    and
Re(Z3(k))>0 then break
  end if
   end do:
```

Расчет граничного значения и сопротивления ветви обобщенного линейного потребителя при изменении тока в ТПЭ

```
> a := Zl2:
> J1max11 := evalf(abs(J1max1)):
   J1max22 := evalf(abs(J1max2)):
> b := 100: # Ввод шага разбиения, определяющего количество
расчетных точек при формировании массива данных
```

```
   I1_01 := I1_0:
   d := 1;
   det := 1/(b-1):
for i  to b-1 do
   I1_0:=I1_01*d:
   d:=d-det:
   I2_0:=I2_0det:
   X[i]:=(abs(Z3))/(abs((Zn1*Zn2)/(Zn1+Zn2))): #
Формирование массива отношений сопротивлений нагрузок ветви
обобщенного линейного потребителя и потребителей -
генераторов гармоник
   Y[i] := abs(solve(I1 = 0,
J1))/(abs(J2)*abs(Zn1*Zn2/(Zn1+Zn2))) # Формирование
массива граничных значений
   end do :
> F := [`$`([X[n], Y[n]], n = 1 .. b)]:
```

График зависимости граничного значения от соотношения сопротивлений нагрузок ветви обобщенного линейного потребителя и линейных нагрузок потребителей – генераторов гармоник (рисунок А.2)

```
> with(plots):
   graf1 := logplot(F, x = X[1] .. X[b-1], style = line,
color = black, thickness = 4, linestyle = 1): #Построение
расчетной зависимости (Jгр, 1)/(J2*zн) = f(z*э/zн)
   display([graf1]);
```

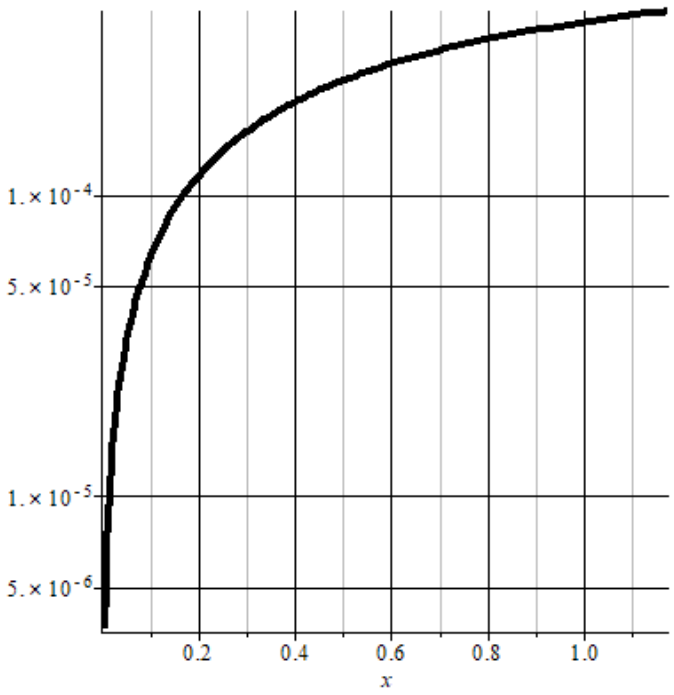


Рисунок А.2 – График зависимости граничного значения от отношения $Z_э/Z_{н\sum}$

Семейство зависимостей активного тока в ТПЭ исследуемого потребителя - генератора гармоник от соотношения токов источников при различных отношениях модулей сопротивлений нагрузок ветви обобщенного линейного потребителя и потребителей – генераторов гармоник (рисунок А.3)

```
> k := 'k':
   J1 := k*J2:
   if J1max11 > J1max22 then kmax := J1max11 else kmax :=
J1max22
   end if
> k1 := X[1];
   Z3 := k1*abs(Zn1*Zn2/(Zn1+Zn2)):
   graf2 := plot(Re(I1f)/(abs(J2)*abs(Zn1*Zn2/(Zn1+Zn2))),
k = 0 .. kmax/abs(J2), color = black, thickness = 4,
linestyle = 1): #Построение активного тока в ТПЭ
исследуемого потребителя при первом элементе массива
отношений сопротивлений нагрузок
> k2 := 1;
   Z3 := k2*abs(Zn1*Zn2/(Zn1+Zn2)):
   graf3 := plot(Re(I1f)/(abs(J2)*abs(Zn1*Zn2/(Zn1+Zn2))),
k = 0 .. kmax/abs(J2), color = black, thickness = 4,
linestyle = 1): #Построение активного тока в ТПЭ
исследуемого потребителя при равенстве сопротивлений
нагрузок
> k3 := X[b-1];
   Z3 := k3*abs(Zn1*Zn2/(Zn1+Zn2)):
   graf4 := plot(Re(I1f)/(abs(J2)*abs(Zn1*Zn2/(Zn1+Zn2))),
k = 0 .. kmax/abs(J2), color = black, thickness = 4,
linestyle = 1): #Построение активного тока в ТПЭ
исследуемого потребителя при последнем элементе массива
отношений сопротивлений нагрузок
> display([graf2, graf3, graf4]);
```

```
k1 := 1.1726041181433652914
k2 := 1
k3 := 0.55072606121942528853e-2
```

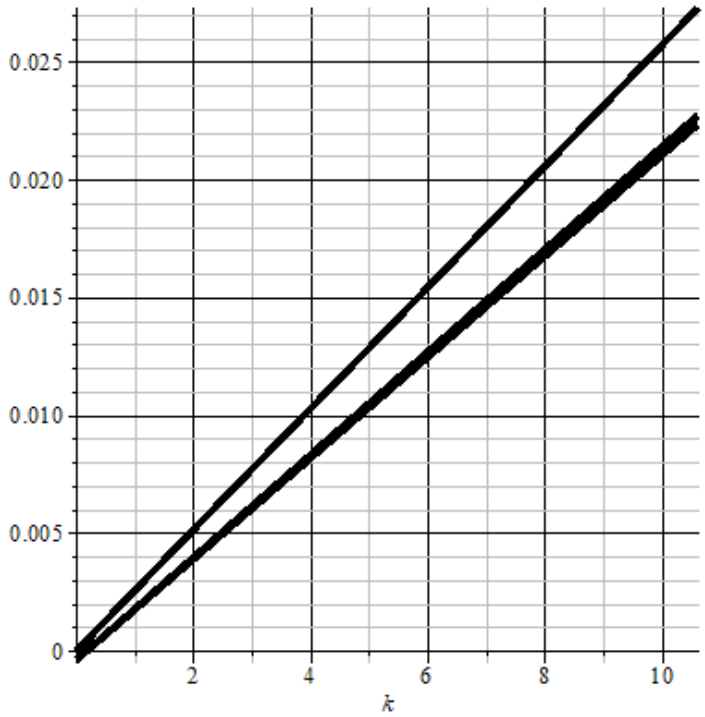


Рисунок А.3 – График зависимостей активных токов от соотношений токов источников J_1/J_2 при различных отношениях $Z_э/Z_{н\sum}$

А.4 Влияние сопротивления линейной нагрузки исследуемого потребителя – генератора гармоник на граничное значение

```
> restart;
  Digits := 20:
```

Получение выражений математической модели

```
> eq1 := I1+In1 = J1:
  eq2 := I2+In2 = J2:
  eq3 := I1+I2-Ien = 0:
  eq4 := I1*Zl1+Ien*Z3-In1*Zn1 = 0:
  eq5 := I2*Zl2+Ien*Z3-In2*Zn2 = 0:
> assign(solve({eq1, eq2, eq3, eq4, eq5}, {I1, I2, Ien,
In1, In2})):
> I1f := I1:
  J1max1 := (5*KU*U0/(100*sqrt(3))-
J2*Zn1*Zn2*Z3/(Z3*(Zn1+Zl1+Zn2+Zl2)+(Zn1+Zl1)*(Zn2+Zl2)))*(
Z3*(Zn1+Zl1+Zn2+Zl2)+(Zn1+Zl1)*(Zn2+Zl2))/((Z3*(Zn2+Zl2)+Zl
1*(Zn2+Zl2+Z3))*Zn1):
```

```
   J1max2 := (5*KU*U0/(100*sqrt(3))-
J2*(Z3*(Zn1+Zl1)+Zl2*(Zn1+Zl1+Z3))*Zn2/(Z3*(Zn1+Zl1+Zn2+Zl2
)+(Zn1+Zl1)*(Zn2+Zl2)))*(Z3*(Zn1+Zl1+Zn2+Zl2)+(Zn1+Zl1)*(Zn
2+Zl2))/(Zn1*Zn2*Z3):
   J1max11 := evalf(abs(J1max1)):
   J1max22 := evalf(abs(J1max2)):
```

Исходные данные

```
> J2 := evalf(.6497399461*exp(I*(30*((1/180)*Pi)))): # Ввод
действующего значения и фазового угла источника тока
второго потребителя - генератора гармоник
   Zn1 := 447.2136+1432.6559*I: # Ввод активного и
реактивного сопротивлений исследуемого потребителя -
генератора гармоник
   Zn2 := 111.8034+403.3921*I: # Ввод активного и
реактивного сопротивлений второго потребителя
   Zl1 := 12.0747672+38.6817093*I: # Ввод активного и
реактивного сопротивления луча звезды в ветви исследуемого
потребителя
   Zl2 := 0.4663885579e-1+1.616200856*I: # Ввод активного и
реактивного сопротивления луча звезды в ветви второго
потребителя - генератора гармоник
   Z3 := 111.8464265+367.0369002*I: #Ввод активного и
реактивного сопротивления луча звезды в ветви линейного
потребителя
   U0 := 10*10^3*exp(I*(0*((1/180)*Pi))): #Ввод
действующего значения и фазового угла напряжения основной
частоты
   KU := 4: #Ввод коэффициента гармонической составляющей в
процентах
```

Расчет граничного значения тока источника при изменении сопротивления нагрузки

```
> b := 300: # Ввод шага разбиения, определяющего количество
расчетных точек при формировании массива данных
   B := 20: # Ввод максимального отношения сопротивлений
нагрузок потребителей - генераторов гармоник
   Zn1_0 := Zn1:
   d := 0.1e-1:
   det := B/(b-1):
for i  to bч do
   Zn1 := Zn1_0*d:
   d := d+det:
   X[i] := abs(Zn1)/abs(Zn2): #Формирование массива
отношений сопротивлений нагрузок потребителей - генераторов
```

```
гармоник
   Y[i] := abs(solve(I1 = 0, J1))/(abs(J2)*abs(Zn2)): #
Формирование массива граничных значений
   if X[i] > B then break
  end if
   end do :
> F := [`$`([X[n], Y[n]], n = 1 .. i-1)]: #Формирование
массива данных для построения расчетной зависимости
граничного значения от соотношения сопротивлений
```

График зависимости граничного значения тока источника исследуемого потребителя - генератора гармоник от соотношения сопротивлений линейных нагрузок потребителей – генераторов гармоник (рисунок А.4)

```
> with(plots):
   graf1 := logplot(F, x = X[1] .. X[i-1], style = line,
color = black, thickness = 4, linestyle = 1): #Построение
расчетной зависимости (Jгр, 1)/(J2*zн2) = f(zн1/zн2)
   display([graf1]);
```

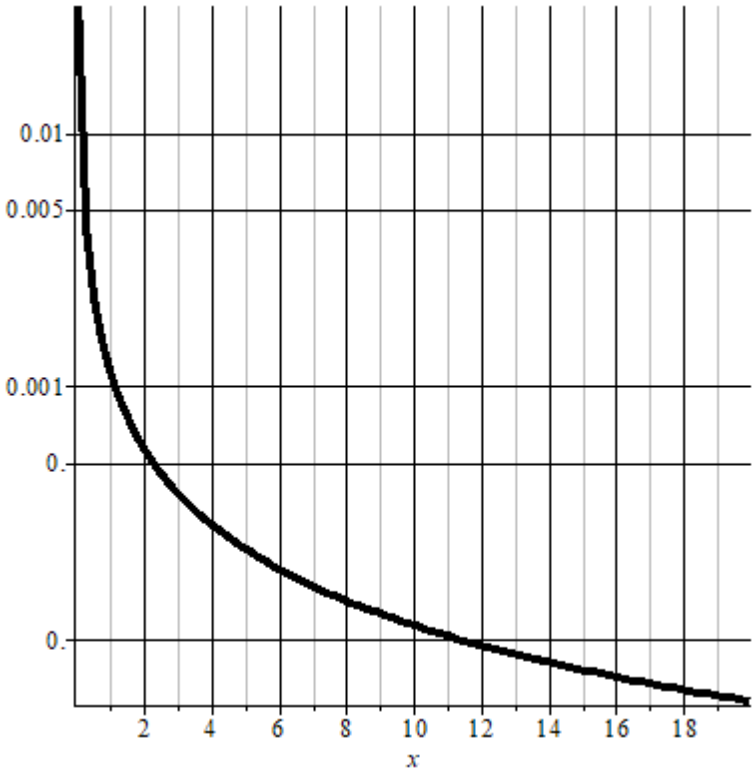


Рисунок А.4 – График зависимости граничного значения от отношения $Z_{н1}/Z_{н2}$

Семейство зависимостей активного тока в ТПЭ исследуемого потребителя - генератора гармоник от соотношения токов источников при различных отношениях модулей сопротивлений линейных нагрузок потребителей – генераторов гармоник (рисунок А.5)

```
> k := 'k':
   J1 := k*J2:
   if J1max11 > J1max22 then kmax := J1max11 else kmax :=
J1max22
   end if
> k1 := X[1];
   Zn1 := k1*Zn2:
   graf2 := plot(Re(I1)/(abs(J2)*abs(Zn2)), k = 0 ..
kmax/abs(J2), color = black, thickness = 4, linestyle = 1):
#Построение активного тока в ТПЭ исследуемого потребителя
при первом элементе массива отношений сопротивлений
нагрузок
> k2 := 1;
   Zn1 := k2*Zn2:
   graf3 := plot(Re(I1)/(abs(J2)*abs(Zn2)), k = 0 ..
kmax/abs(J2), color = black, thickness = 4, linestyle = 1):
#Построение активного тока в ТПЭ исследуемого потребителя
при равенстве сопротивлений нагрузок
> Zn1 := Zn1_0:
   k3 := abs(Zn1)/abs(Zn2):
   graf4 := plot(Re(I1)/(abs(J2)*abs(Zn2)), k = 0 ..
kmax/abs(J2), color = black, thickness = 4, linestyle = 1):
#Построение активного тока в ТПЭ исследуемого потребителя
при сопротивлении линейной нагрузки, по которому рассчитаны
параметры трехлучевой схемы замещения
> k4 := X[i-1]:
   Zn1 := k4*Zn2:
   graf5 := plot(Re(I1f)/(abs(J2)*abs(Zn1*Zn2/(Zn1+Zn2))),
k = 0 .. kmax/abs(J2), color = black, thickness = 4,
linestyle = 1): #Построение активного тока в ТПЭ
исследуемого потребителя при последнем элементе массива
отношений сопротивлений нагрузок
> display([graf2, graf3, graf4, graf5]);
```

```
k1 := 0.35853736046077789152e-1
k2 := 1
k3 := 3.5853736046077789152
k4 := 19.941272410457158061
```

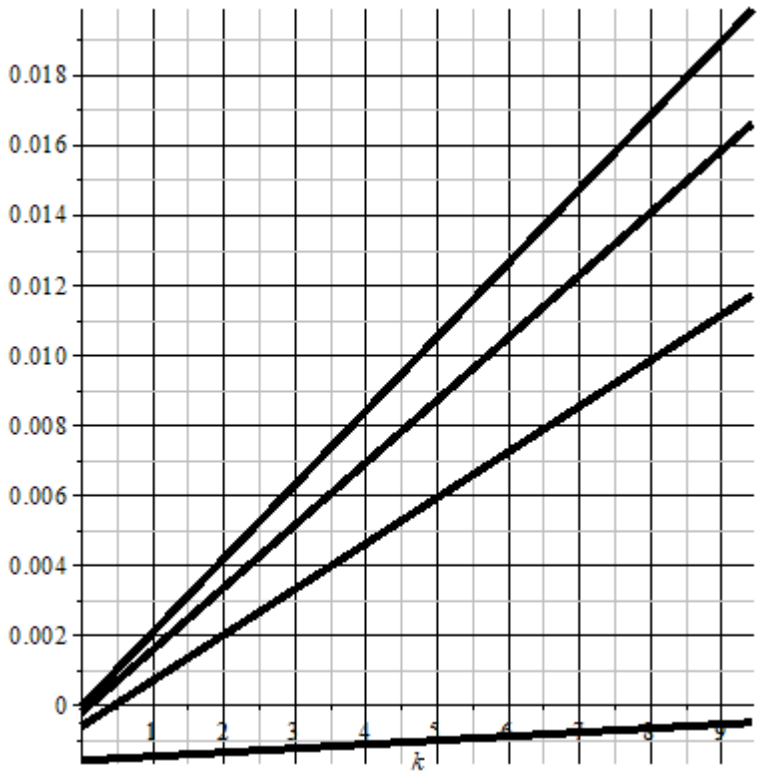


Рисунок А.5 – График зависимостей активных токов от соотношений токов источников J_1/J_2 при различных отношениях $Z_{н1}/Z_{н2}$

А.5 Оценка влияния подключения нового источника генерации токов гармонических составляющих на обнаружение потребителей – генераторов гармоник

```
> restart;
```

Получение выражений математической модели

```
> eq1 := I1+In1 = J1:
  eq2 := I2+In2 = J2:
  eq3 := I1+I2-Ien = 0:
  eq4 := I1*Zl1+Ien*Z3-In1*Zn1 = 0:
  eq5 := I2*Zl2+Ien*Z3-In2*Zn2 = 0;
> assign(solve({eq1, eq2, eq3, eq4, eq5}, {I1, I2, Ien,
In1, In2})):
> Jgr1 := solve(I1 = 0, J1):
> J1max1 := (5*KU*U0/(100*sqrt(3))-
J2*Zn1*Zn2*Z3/(Z3*(Zn1+Zl1+Zn2+Zl2)+(Zn1+Zl1)*(Zn2+Zl2)))*(
```

```
Z3*(Zn1+Zl1+Zn2+Zl2)+(Zn1+Zl1)*(Zn2+Zl2))/((Z3*(Zn2+Zl2)+Zl
1*(Zn2+Zl2+Z3))*Zn1):
   J1max2 := (5*KU*U0/(100*sqrt(3))-
J2*(Z3*(Zn1+Zl1)+Zl2*(Zn1+Zl1+Z3))*Zn2/(Z3*(Zn1+Zl1+Zn2+Zl2
)+(Zn1+Zl1)*(Zn2+Zl2)))*(Z3*(Zn1+Zl1+Zn2+Zl2)+(Zn1+Zl1)*(Zn
2+Zl2))/(Zn1*Zn2*Z3):
```

Исходные данные (без учета подключаемого потребителя - генератора гармоник)

```
> J2 := evalf(.6497399461*exp(I*(30*((1/180)*Pi)))): # Ввод
действующего значения и фазового угла источника тока
второго потребителя - генератора гармоник
   Zn1 := 447.2136+1432.6559*I: # Ввод активного и
реактивного сопротивлений исследуемого потребителя -
генератора гармоник
   Zn2 := 111.8034+403.3921*I: # Ввод активного и
реактивного сопротивлений второго потребителя
   Zl1 := 12.0747672+38.6817093*I: # Ввод активного и
реактивного сопротивления луча звезды в ветви исследуемого
потребителя
   Zl2 := 0.4663885579e-1+1.616200856*I: # Ввод активного и
реактивного сопротивления луча звезды в ветви второго
потребителя - генератора гармоник
   Z3 := 111.8464265+367.0369002*I: #Ввод активного и
реактивного сопротивления луча звезды в ветви линейного
потребителя
   U0 := 10*10^3*exp(I*(0*((1/180)*Pi))): #Ввод
действующего значения и фазового угла напряжения основной
частоты
   KU := 4: #Ввод коэффициента гармонической составляющей в
процентах
```

Расчет граничного значения тока источника Jгр1

```
> mod_Jgr1 := abs(Jgr1); #Вывод действующего значения
Jгр,1
   mod_Jgr1m := evalf(sqrt(2))*abs(Jgr1): #Расчет
амплитудного значения значения Jгр1
   fazdegr_Jgr1 := evalf(180*argument(Jgr1)/Pi): #Расчет
фазового угла граничного значения Jгр1
> with(plots):
  if evalf(abs(J1max1)) > evalf(abs(J1max2)) then J1max :=
abs(J1max1) else J1max := abs(J1max2)
  end if:
> graf1 := plot(Re(I1), J1 = 0 .. J1max, color = gray,
thickness = 4, linestyle = 1) #Построение активного тока в
```

ТПЭ исследуемого потребителя без учета подключаемого потребителя - генератора гармоник

```
graf2 := plot([[Re(Jgr1), 0]], style = point, color = black, symbol = cross) #Вывод на график граничного значения Jгр1
```

$$mod_Jgr1 := 0.8650658298e-1$$

Расчет параметров обобщенного потребителя - генератора гармоник (с учета подключаемого потребителя - генератора гармоник)

```
> J3 := .77*exp(I*(0*((1/180)*Pi))): #Ввод действующего значения и фазового угла источника тока подключаемого потребителя - генератора гармоник
  Zn3 := 279.5085+967.5878*I: #Ввод активного и реактивного сопротивлений подключаемого потребителя
> J2 := evalf(J2+J3):
  mod_J2 := abs(J2):
  mod_J2m := evalf(sqrt(2))*abs(J2): # Расчет амплитудного значения тока источника обобщенного потребителя - генератора гармоник
  fazdegr_J2 := evalf(180*argument(J2)/Pi): #Расчет фазового угла тока источника обобщенного потребителя - генератора гармоник
  Zn2 := Zn2*Zn3/(Zn2+Zn3): #Расчет сопротивления нагрузки обобщенного потребителя - генератора гармоник
```

Расчет нового граничного значения тока источника Jгр1'

```
> new_mod_Jgr1 := abs(Jgr1); #Вывод нового действующего значения Jгр,1'
  new_mod_Jgr1m := evalf(sqrt(2))*abs(Jgr1): #Расчет амплитудного значения значения Jгр1'
  new_fazdegr_Jgr1 := evalf(180*argument(Jgr1)/Pi): #Расчет фазового угла граничного значения Jгр1'
> graf3 := plot(Re(I1), J1 = 0 .. J1max, color = black, thickness = 4, linestyle = 1): #Построение активного тока в ТПЭ исследуемого потребителя с учетом подключаемого потребителя - генератора гармоник
  graf4 := plot([[Re(Jgr1), 0]], style = point, color = black, symbol = cross): #Вывод на график граничного значения Jкр1'
```

$$new_mod_Jgr1 := .1522926840$$

График зависимости активных токов в ТПЭ оцениваемого потребителя – генератора гармоник от тока источника J1 (рисунок А.6)

```
> display(graf1, graf2, graf3, graf4);
   del_Jgr1 := 100*abs((mod_Jgr1-new_mod_Jgr1)/mod_Jgr1);
#Расчет изменения граничного значения тока источника при подключении нового потребителя
```

```
del_Jgr1 := 76.04750847
```

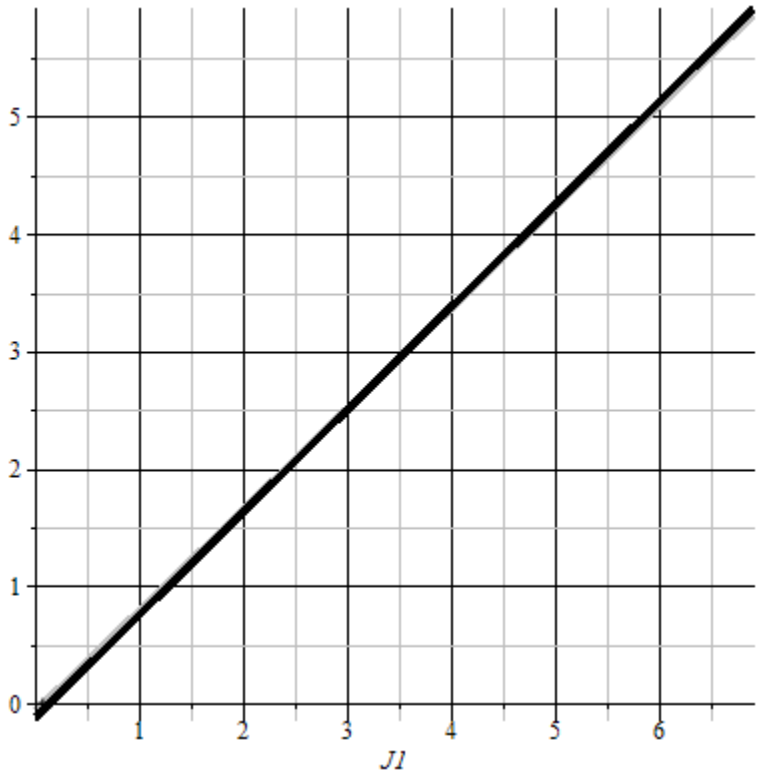


Рисунок А.6 – График зависимостей активных токов в ТПЭ1 от тока источника $\underline{J}_1$

Приложение Б

Расчет объема искаженной токами гармоник электроэнергии в сети до 1 кВ

Назначение программы.

Программа предназначена для расчета параметров качества электроэнергии, характеризующих несинусоидальность напряжения в электрических сетях до 1 кВ в точке передаче электроэнергии потребителю за период времени 7 суток. Программа может применяться в федеральных и региональных службах по регулированию тарифов, сетевых и энергосбытовых организациях, службах электросетевого хозяйства потребителей.

Программа обеспечивает выполнение следующих функций:

- расчет объема искаженной электроэнергии;
- расчета коэффициента искажения электроэнергии;
- определение порядка гармоники, на которой есть нарушения требований к качеству электроэнергии.

Исходные данные и получаемые результаты.

Расчеты в программе ведутся независимо для каждой из фаз (алгоритм для определения объема искаженной электроэнергии, приведенный в четвертой главе, используется три раза для каждой из фаз).

Исходные данные загружаются в программу из файлов Excel.

Информация об исходных данных (берется для трех фаз *A*, *B* и *C*):

i – порядковый номер строки (счетчик строк);

j – порядковый номер столбца (счетчик столбцов);

n – размерность массива (для строк) (определяется исходными данными из файлов Excel);

m – размерность массива (для столбцов) (определяется исходными данными из файлов Excel);

$\varphi_{UI}(1{:}n,1{:}m)$, $K_{U(n)}(1{:}n,1{:}m)$ - двухмерные массивы (каждый считывается из своего файла Excel для каждой фазы);

$P(1{:}n)$ – одномерный массив (считывается из файла Excel общего для всех фаз);

$K_{U\text{ст}}(1{:}m)$ – одномерный массив (заносится в программу и остается постоянным);

t – некоторое число (заносится в программу и остается постоянным)

$T_{1\text{ст}}$, $T_{2\text{ст}}$ – некоторые числа (заносится в программу и остается постоянным).

Структура исходных данных представлена в таблице Б.1 (все эти данные считываются из файлов Excel (для каждого массива свой файл Excel)).

Таблица Б.1 – Структура исходных данных

Фаза *A*	**Фаза *B***	**Фаза *C***
$\varphi_{UI,A}$	$\varphi_{UI,B}$	$\varphi_{UI,C}$
$K_{U(n),A}$	$K_{U(n),B}$	$K_{U(n),C}$
P_A	P_B	P_C

В программу заносятся следующие константы:

$t = 1/6$;

$T_{1\text{ст}} = 5$;

$T_{2\text{ст}} = 0$;

$K_{U\text{ст}}$ = [2 5 1 6 0,5 5 0,5 1,5 0,5 3,5 0,2 3 0,2 0,3 0,2 2 0,2 1,5 0,2 0,2 0,2 1,5 0,2 1,5 0,2 0,2 0,2 1,5 0,2 1,5 0,2 0,2 0,2 1,5 0,2 1,5 0,2 0,2 0,2].

Результат работы алгоритма: значения $W_{\text{иск}}$ и $d_{\text{иск}}$ отдельно для фаз и всей трехфазной системы.

Структура результатов работы алгоритма программы представлена в таблице Б.2 (результаты выводятся для каждой фазы).

Таблица Б.2 – Результаты работы программы

Фаза *A*	**Фаза *B***	**Фаза *C***
$W_{\text{иск,A}}$	$W_{\text{иск,B}}$	$W_{\text{иск,C}}$
$d_{\text{иск,A}}$	$d_{\text{иск,B}}$	$d_{\text{иск,C}}$

Дополнительно также выводятся значения $W_{иск}$ и $d_{иск}$ для трехфазной системы (рассчитываются на основе результатов для фаз):

$$W_{иск} = W_{иск,A} + W_{иск,B} + W_{иск,C}, \quad (Б.1)$$

$$d_{иск} = \frac{d_{иск,A} + d_{иск,B} + d_{иск,C}}{3}. \quad (Б.2)$$

Интерфейс программы.

Ввод исходных данных в программу для расчета предлагаемых параметров КЭ осуществляется в окне «Исходные данные для расчета» (рисунок Б.1.).

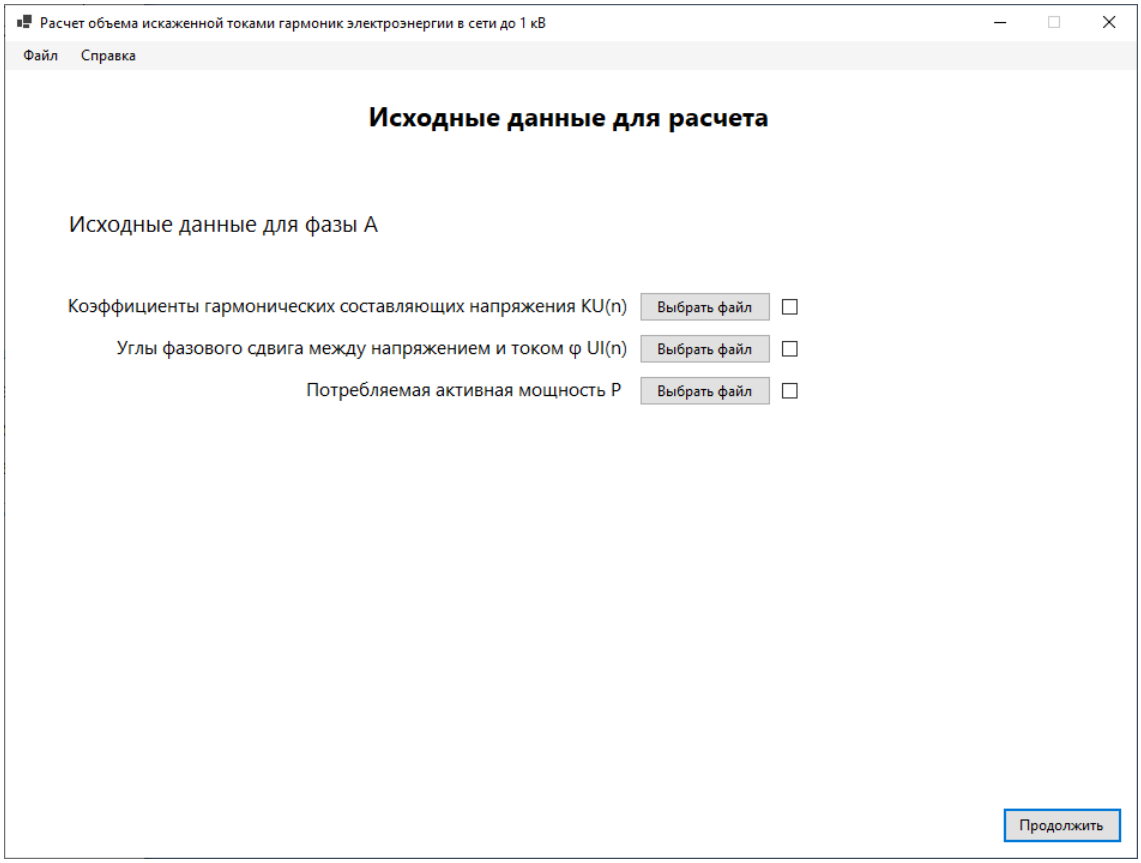


Рисунок Б.1 – Окно «Исходные данные для расчета»

Исходные данные вводятся для каждой фазы в отдельности. В программу необходимо загрузить файлы Excel с коэффициентами гармонических составляющих напряжения, углами фазового сдвига и потребляемой мощности.

Во вкладке «Справка» содержится помощь по корректному введению исходных данных, необходимых для расчета (рисунок Б.2), и сведения о программе (рисунок Б.3).

Исходные данные

Для корректного проведения расчета необходимо подготовить и загрузить исходные данные в соответствии с приведенными рекомендациями.

Общие положения

Все исходные данные для каждой из фаз должны быть представлены в табличном виде (файлы формата электронных таблиц Excel) и взяты со 2-ой по 40-ой порядок гармонических составляющих за интервал времени усреднения показателей качества электроэнергии, равный 10 минутам. В программе используются только фазные значения величин и коэффициентов.

Проверка нарушений требований к качеству электроэнергии по показателям, характеризующим несинусоидальность

Для проверки нарушений требований используются коэффициенты гармонических составляющих напряжения KU(n). В программе оценивается не только превышение допустимых значений показателей качества электроэнергии, но также и время их превышения.

Коэффициенты гармонических составляющих напряжения KU(n) необходимо загрузить в следующем виде (скачать пример для фазы А):

A3 | 0,029999999329

	A	B	C	D	E
1					
2	$K_{Ua(2)}$	$K_{Ua(3)}$	$K_{Ua(4)}$	$K_{Ua(5)}$	$K_{Ua(6)}$
3	0,03	2,03	0,03	0,46	0,05
4	0,04	2,00	0,03	0,41	0,04
5	0,03	1,65	0,04	0,56	0,05
6	0,20	1,68	0,18	0,56	0,06

Строка – коэффициенты одного 10-минутного интервала времени (строки

Рисунок Б.2 – Окно «Исходные данные» в меню «Справка»

О программе

Программа предназначена для расчета параметров качества электроэнергии, характеризующих несинусоидальность напряжения в электрических сетях до 1 кВ в точке передаче электроэнергии потребителю за период времени нормирования качества электроэнергии (7 суток).

Рассчитываемыми параметрами качества электроэнергии являются:

– **Объем искаженной электроэнергии, Wиск [кВт·ч]:** Часть объема активной электроэнергии основной частоты, в моменты потребления потребителем которой происходит искажение качества электроэнергии в его точке передачи электроэнергии по показателям, характеризующим несинусоидальность, возникающую вследствие генерации нелинейной нагрузкой данного потребителя токов гармонических составляющих.
– **Коэффициент искажения электроэнергии, dиск:** Отношение объема искаженной электроэнергии за период времени нормирования качества электроэнергии к объему потребленной за этот же период времени электроэнергии.

Если по результатам расчета значения Wиск и dиск отличны от нуля хотя бы для одной из фаз, то рассматриваемый потребитель является генератором гармоник. В обратном случае, если все значения Wиск и dиск равны нулю, то потребитель на рассматриваемом промежутке времени не нарушает требований к качеству электроэнергии в части несинусоидальности.

Рисунок Б.3 – Окно «О программе» в меню «Справка»

При проведении расчета в зависимости от ситуации с искажением КЭ в ТПЭ в части несинусоидальности, генерации нелинейной нагрузкой рассматриваемого потребителя токов гармонических составляющих и его обнаружения как источника генерации логика вывода результатов показана на рисунке Б.4.

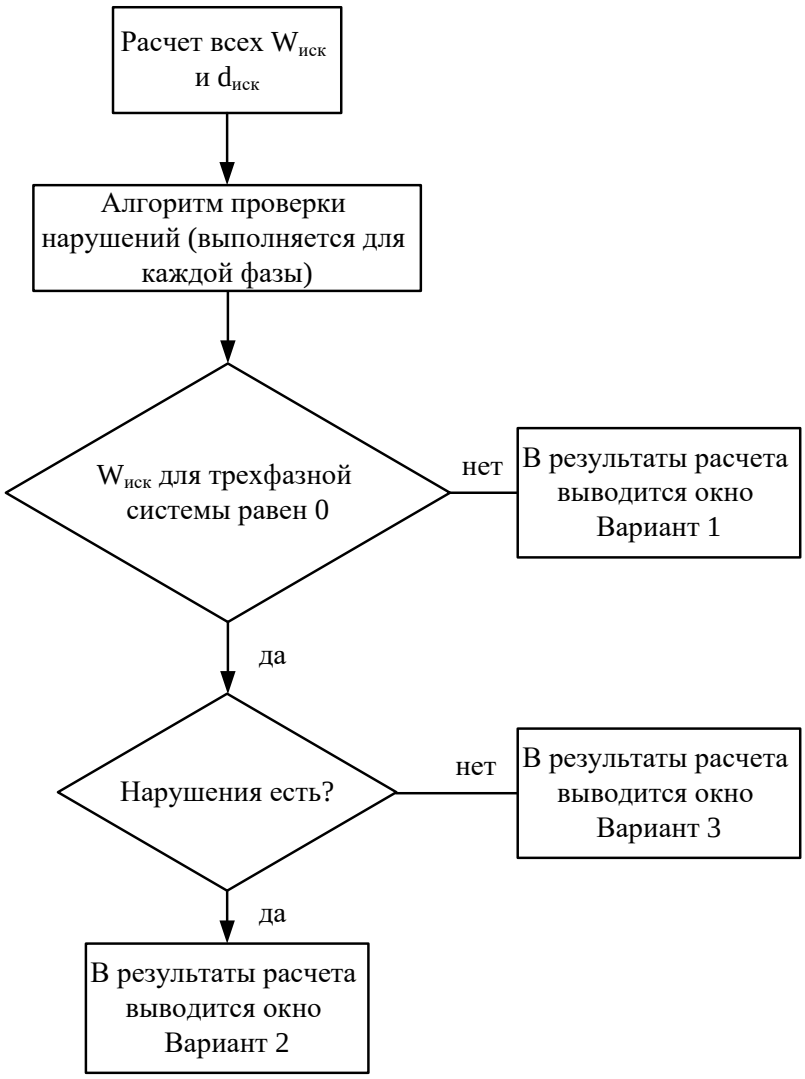


Рисунок Б.4 – Логика вывода результатов расчета

В соответствии с приведенной логикой программа предоставляет результаты в одном из окон. Возможны следующие варианты вывода результатов, для каждого из которых приведены соответствующие рекомендации.

Вариант 1 (рисунок Б.5). В ТПЭ выявлены нарушения требований к КЭ в части несинусоидальности, виновником которых является рассматриваемый потребитель – генератор гармоник. Для данного потребителя рекомендуется

установка ФКУ или АФ для снижения или устранения генерации токов гармонических составляющих.

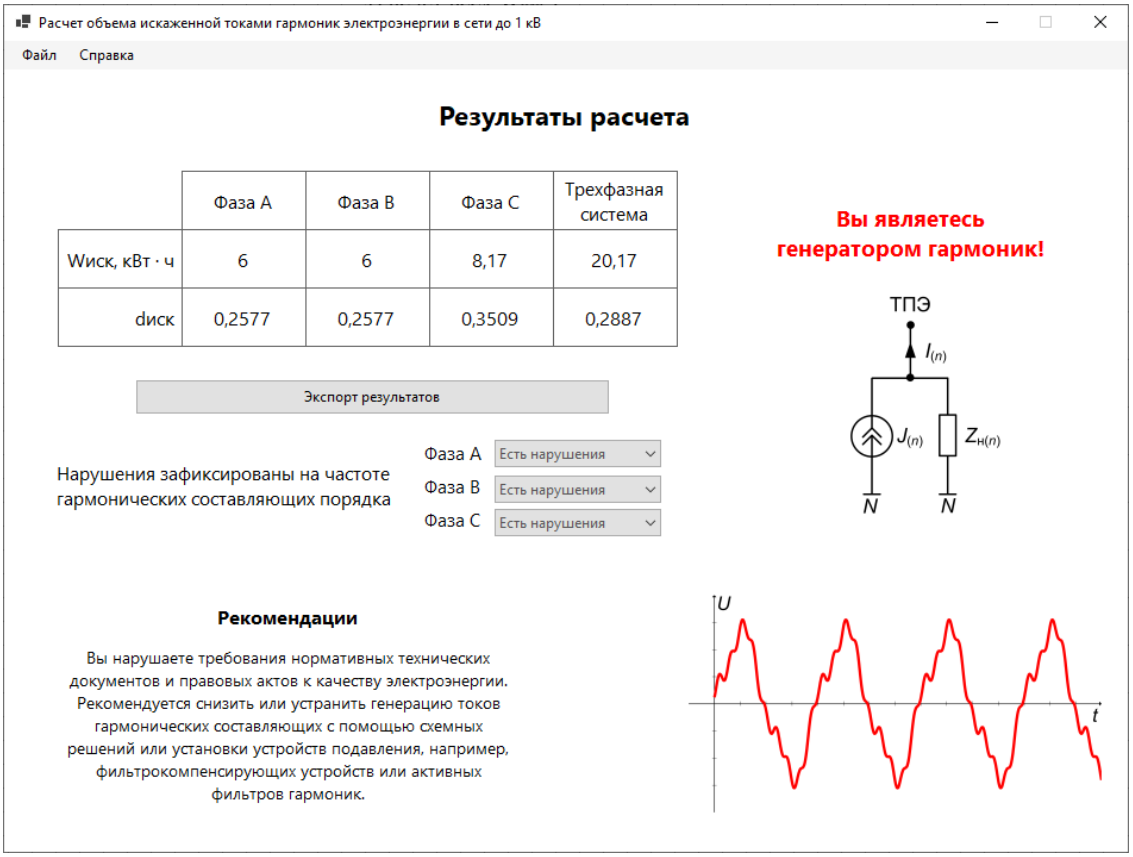


Рисунок Б.5 – Окно «Результаты расчета» (Вариант 1)

Вариант 2 (рисунок Б.6). В ТПЭ выявлены нарушения требований к КЭ в части несинусоидальности, которые не связаны с генерацией токов гармонических составляющих нагрузкой рассматриваемого потребителя. Данный вариант возможен, если потребитель является необнаруженным генератором гармоник (однако он может себя проявить как источник генерации на другом интервале времени нормирования КЭ) или потребитель вовсе не содержит нелинейных нагрузок. Во втором случае потребителю рекомендуется обратиться в сетевую организацию с вопросом качества поставляемой электроэнергии.

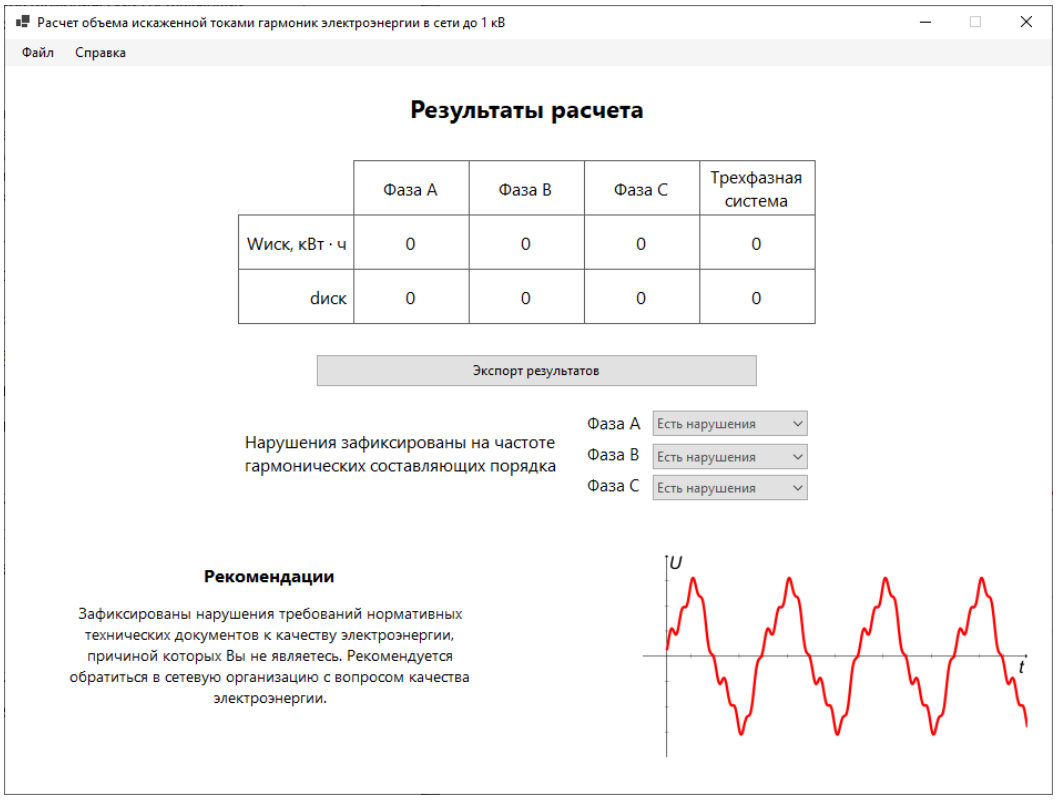


Рисунок Б.6 – Окно «Результаты расчета» (Вариант 2)

Вариант 3 (рисунок Б.7). В ТПЭ не выявлены нарушения требований к КЭ в части несинусоидальности, поэтому рекомендации отсутствуют.

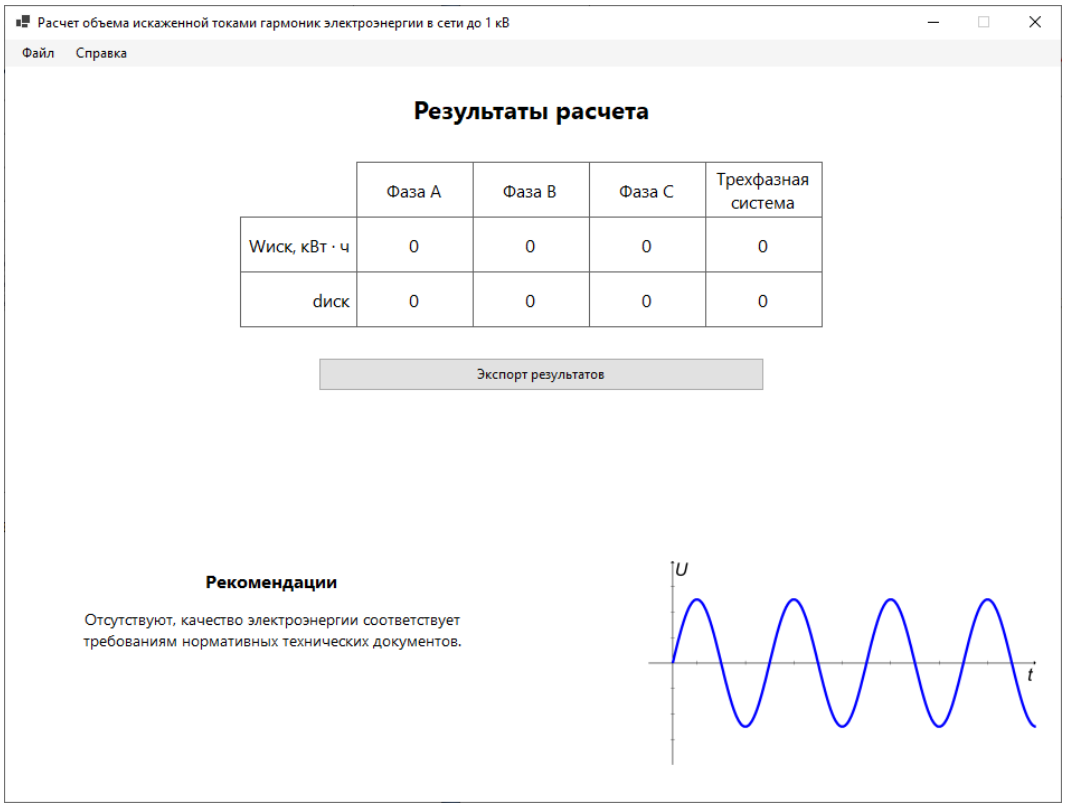


Рисунок Б.7 – Окно «Результаты расчета» (Вариант 3)

Приложение В

Правила применения надбавок и скидок за генерацию и потребление токов гармонических составляющих

1. Область применения

Настоящие правила устанавливают порядок применения надбавок за генерацию и скидок за потребление токов гармонических составляющих для потребителей сетевой организации. Надбавки $\Delta О_н$, руб. применяются к потребителям – генераторам гармоник, которые являются источниками генерации токов гармонических составляющих. Скидки $\Delta О_{ск}$, руб. применяются к потребителям, которые вынуждены потреблять токи гармонических составляющих.

2. Механизм применения надбавок и скидок для потребителей сетевой организации

Для всех потребителей сетевой организации устанавливается надбавка за генерацию гармоник $C_{иск}$, руб./кВт·ч как одна из составляющих тарифа на электроэнергию. Оплачиваемым параметром для нее является зарегистрированный в ТПЭ объем электроэнергии, искаженной токами гармонических составляющих потребителя (объем искаженной электроэнергии), за расчетный период $W_{иск,р/п}$, кВт·ч. Применение надбавки или скидки для потребителя сетевой организации определяется значением $W_{иск,р/п}$. Если значение $W_{иск,р/п}$ отлично от нуля, то потребитель относится к категории генератора гармоник и оплачивает сумму надбавки $\Delta О_н$ (штраф) по составляющей тарифа – надбавке за генерацию гармоник $C_{иск}$. Если значение $W_{иск,р/п}$ равно нулю, то потребитель является неискажающим и ему полагается выплата, предоставляемая в виде скидки $\Delta О_{ск}$.

3. Порядок регистрации объема искаженной электроэнергии за расчетный период

Структура регистрации значения $W_{\text{иск,р/п}}$ может быть представлена в виде следующей блок-схемы (рисунок В.1).

Рисунок В.1 – Структура определения объема искаженной электроэнергии

Значение $W_{\text{иск,р/п}}$ регистрируется системой мониторинга КЭ в ТПЭ в течение расчетного периода. При наличии в сетевой организации установленной в ТПЭ системы непрерывного мониторинга КЭ значение $W_{\text{иск,р/п}}$ представляет собой сумму объемов электроэнергии, искаженной токами гармонических составляющих потребителя, за периоды времени нормирования КЭ $W_{\text{иск},k}$:

$$W_{\text{иск,р/п}} = \sum_{k=1}^{D} W_{\text{иск},k}, \qquad \text{(В.1)}$$

где D – количество интервалов времени нормирования КЭ, относящихся к рассматриваемому расчетному периоду.

К расчетному периоду относятся выпавший на его начало и входящие полностью в него интервалы времени нормирования КЭ.

При отсутствии системы непрерывного мониторинга пользуются услугами электроизмерительных лабораторий, оказывающих услуги по анализу и контролю КЭ. В таком случае проводится одиночный или периодический мониторинг КЭ,

по результатам которого для одного периода времени нормирования КЭ требуется определить коэффициент искажения электроэнергии $d_{иск}$:

$$d_{иск} = \frac{W_{иск}}{W_{норм.КЭ}}, \qquad (В.2)$$

где $W_{норм.КЭ}$ – объем электроэнергии основной частоты, потребленной за соответствующий интервал времени нормирования КЭ, кВт·ч.

Тогда для рассматриваемого расчетного периода и следующих за ним, вплоть до новых измерений, значение $W_{иск,р/п}$ определяется по коэффициенту искажения электроэнергии в соответствии с выражением:

$$W_{иск,р/п} = d_{иск} \cdot W_{р/п}, \qquad (В.3)$$

где $W_{р/п}$ – объем электроэнергии основной частоты, потребленной за расчетный период, кВт·ч.

Значение $W_{иск}$ определяется суммой таких объемов электроэнергии основной частоты за 10-минутные интервалы времени, во время потребления которых соблюдаются следующие условия:

1) на рассматриваемом 10-минутном интервале времени, равном времени усреднения ПКЭ наблюдается превышение установленных норм по показателю $K_{U(n)}$;

2) мощность гармонических составляющих $P_{(n)}$ в ТПЭ имеет обратное направление (от потребителя в электрическую сеть сетевой организации);

3) рассматриваемый 10-минутный интервал времени входит в семисуточный интервал времени нормирования КЭ, на котором установлено несоответствие электроэнергии требованиям ГОСТ 32144-2013 по показателям, характеризующим несинусоидальность.

4. Расчет надбавки за генерацию гармоник для сетевой организации

Надбавка за генерацию гармоник устанавливается Государственными органами регулирования в сфере энергетики в пределах сетевой организации и представляет собой средства, необходимые энергосбытовой организации на

покрытие стоимости вредных последствий протекания токов гармонических составляющих, возникающих у неискажающих потребителей.

Значение $C_{иск}$ определяется удельной стоимостью затрат j-того потребителя – генератора гармоник на снижение или устранение генерации токов гармонических составляющих, приходящихся на один кВт·ч искаженной электроэнергии $C_{иск,j}$, руб./кВт·ч. Предусмотрено два варианта выбора значения $C_{иск}$.

В первом варианте в качестве значения $C_{иск}$ принимается наименьшая удельная стоимость затрат из рассчитанных для всех потребителей – генераторов гармоник сетевой организации:

$$C_{иск} = \min\left[C_{иск,j}\right]. \qquad (В.4)$$

Во втором варианте в качестве значения $C_{иск}$ принимается значение удельной стоимости затрат наиболее интенсивного потребителя – генератора гармоник в отношении генерации токов гармонических составляющих. Наиболее интенсивный потребитель – генератор гармоник определяется по максимальному значению энергии гармонических составляющих $W_{(n)}$ обратного направления. Расчет значения $C_{иск,j}$ для j-того потребителя – генератора гармоник необходимо вести с учетом финансовых возможностей потребителя – генератора гармоник и инвестиционной привлекательности проекта, направленного на снижение или устранение генерации токов гармонических составляющих:

$$C_{иск,j} = \frac{\dfrac{К_j}{T_{ок,j}} + И_{экспл,j}}{W_{иск,р/п.,j}}, \qquad (В.5)$$

где $К_j$ – инвестиции (капиталовложения) в проект j-того потребителя – генератора гармоник, определяемые стоимостью устройств подавления токов гармонических составляющих, руб.;

$И_{экспл,j}$ – ежемесячные издержки на эксплуатационное обслуживание устройств подавления токов гармонических составляющих, руб.;

$T_{ок,j}$ – привлекательный для инвесторов период окупаемости инвестиционного проекта, направленного на снижение или устранение генерации токов гармонических составляющих, месяцев.

Выбранное значение $C_{иск}$ может корректироваться в большую или меньшую сторону с целью получения достаточного экономического воздействия на потребителей – генераторов гармоник.

5. Условия применения надбавок и скидок в системе тарифообразования

При применении надбавок и скидок между потребителями сетевой организации должны быть предусмотрены договорные отношения, устанавливающие обязательства потребителей по поддержанию значений ПКЭ, характеризующих несинусоидальность, в ТПЭ на уровне требований ГОСТ 32144-2013 и ответственность в случае их нарушения. При отсутствии таких отношений применение надбавок за генерацию и скидок за потребление токов гармонических составляющих необходимо осуществлять через систему тарифообразования. Функции по взиманию платежей с потребителей – генераторов гармоник в виде оплат по надбавкам и их распределению между неискажающими потребителями в виде выплат по скидкам возложить на энергосбытовую организацию. Использование системы тарифообразования накладывает условие на расчет значений оплат по надбавкам и выплат по скидкам:

$$\sum_{j=1}^{M} \Delta О_{н,j} = \sum_{i=1}^{L} \left| \Delta О_{ск,i} \right|, \qquad (В.6)$$

где $\sum_{j=1}^{M} \Delta О_{н,j}$ – сумма оплат в форме надбавок каждому j-тому из M потребителей – генераторов гармоник сетевой организации, руб.;

$\sum_{i=1}^{L} \Delta О_{ск,i}$ – сумма выплат в форме скидок каждому i-тому из L неискажающих потребителей сетевой организации.

Соблюдение условия (В.6) при расчете оплат по надбавкам и выплат по скидкам обеспечивает правомерность применения надбавок и скидок и независимость двух финансовых процессов. Один из процессов – это оплата потребителями потребляемой электроэнергии в адрес субъектов электроэнергетики, участвующих в процессе поставки электроэнергии, второй – оплата потребителями – генераторами гармоник стоимости вредных последствий протекания токов гармонических составляющих в адрес остальных потребителей.

6. Расчет оплат по надбавке для потребителей – генераторов гармоник

За генерацию токов гармонических составляющих потребитель – генератор гармоник оплачивает надбавку в соответствии с зарегистрированным в его ТПЭ значением $W_{\text{иск,р/п}}$. Значение оплаты по надбавке для j-того потребителя – генератора гармоник сетевой организации $\Delta\text{О}_{\text{н},j}$ определяется по выражению:

$$\Delta\text{О}_{\text{н},j} = C_{\text{иск}} \cdot W_{\text{иск,р/п.},j}. \qquad (\text{В.7})$$

7. Расчет выплат по скидкам для линейных потребителей

За потребление токов гармонических составляющих неискажающий потребитель получает выплату в виде скидки. С учетом условия (В.6), обеспечивающего правомерность применения надбавок и скидок, выплата по скидке для потребителя представляет собой часть суммы оплат по надбавкам, взимаемых с M потребителей – генераторов гармоник. Распределение суммы оплат по надбавкам между неискажающими потребителями сетевой организации ведется по долевому принципу в зависимости от потребления электроэнергии:

$$d_i = \frac{W_{\text{р/п},i}}{\sum_{i=1}^{L} W_{\text{р/п},i}}. \qquad (\text{В.8})$$

Значение выплаты по скидке для i-того потребителя сетевой организации $\Delta\text{О}_{\text{ск},i}$ определяется по выражению:

$$\Delta\text{О}_{\text{ск},i} = -\left(\sum_{j=1}^{M} C_{\text{иск}} \cdot W_{\text{иск,р/п.},j}\right) \cdot d_i = -\left(\sum_{j=1}^{M} C_{\text{иск}} \cdot W_{\text{иск,р/п.},j}\right) \cdot \frac{W_{\text{р/п.},i}}{\sum_{i=1}^{L} W_{\text{р/п.},i}}. \qquad (\text{В.9})$$

8. Примеры расчетов

Пример 1. Определить значение $C_{иск,j}$ для наиболее интенсивного в отношении генерации токов гармонических составляющих потребителя – генератора гармоник при установке им на шинах ГРП ФКУ мощностью, необходимой только для подавления гармоник. Данные потребителя: $U_с$ = 10 кВ, $P_{уст}$ = 2100 кВт, cosφ = 0,83. В расчетах принять $T_{ок}$ = 24 мес., $И_{экспл}$ = 0,1·К/12, стоимость одного квар мощности ФКУ q_0 = 2,8 тыс. руб./квар. Системой мониторинга КЭ на шинах ГРП за расчетный период были зарегистрированы $I_{(5)}$ = 0,18·$I_{(1)}$, $I_{(7)}$ = 0,11·$I_{(1)}$, $W_{иск,р/п}$ = 27540 кВт·ч.

Определяем токи гармонических составляющих на шинах ГРП потребителя – генератора гармоник:

$$I_{(1)} = \frac{P_{уст}}{\sqrt{3}\cdot U_с \cdot \cos\varphi} = \frac{2100}{\sqrt{3}\cdot 10\cdot 0{,}83} = 146 \text{ А};$$

$$I_{(5)} = 0{,}18\cdot 146 = 26{,}3 \text{ А};$$

$$I_{(7)} = 0{,}11\cdot 146 = 16 \text{ А}.$$

Определяем установленную мощность ФКУ, необходимую только для подавления гармоник:

$$Q_{уст}^{ПГ5} = \frac{2}{\sqrt{n}}\cdot\frac{n^2}{n^2-1}\cdot U_c \cdot I_{(n)} = \frac{2}{\sqrt{5}}\cdot\frac{5^2}{5^2-1}\cdot 10\cdot 26{,}3 = 245 \text{ квар};$$

$$Q_{уст}^{ПГ7} = \frac{2}{\sqrt{7}}\cdot\frac{7^2}{7^2-1}\cdot 10\cdot 16 = 123{,}5 \text{ квар};$$

$$Q_{уст\Sigma}^{ПГ} = Q_{уст}^{ПГ5} + Q_{уст}^{ПГ7} = 245 + 123{,}5 = 368{,}5 \text{ квар}.$$

Принимаем ближайшую мощность ФКУ, предлагаемую заводом изготовителем, 450 квар. Оценим капиталовложения в установку ФКУ мощностью 450 квар:

$$К = q_0 \cdot Q_{уст\Sigma}^{ПГ} = 2{,}8\cdot 450 = 1260 \text{ тыс. руб.}$$

Проведем расчет значения $C_{иск,j}$ по выражению (Д.5):

$$C_{иск,1} = \frac{\frac{1260}{24} + \frac{0{,}1\cdot 1260}{12}}{27540}\cdot 1000 = \mathbf{2{,}3} \text{ руб./кВт}\cdot\text{ч}.$$

Пример 2. Определить значения сумм $\Delta О_{н,j}$ и $\Delta О_{ск,i}$ для потребителей сетевой организации. В качестве значения надбавки за генерации гармоник принять значение $C_{иск,1}$ из предыдущего примера. Данные о потребителях сетевой организации за расчетный период представлены в таблице В.1. По результатам одиночного мониторинга КЭ в ТПЭ потребителей №3 и №5 рассчитаны $d_{иск,3} = 0$ и $d_{иск,5} = 0{,}31$. Оценить стимулирующий эффект для потребителей генераторов гармоник при оплате потребляемой за расчетный период электроэнергии по тарифу $b_0 = 7{,}9$ руб./кВт·ч.

Таблица В.1 – Данные о потребителях сетевой организации

	$W_{иск,р/п}$, кВт·ч	$W_{р/п}$, кВт·ч
Потребитель 1	27540	43023
Потребитель 2	3067	18066
Потребитель 3	-	12181
Потребитель 4	0	29688
Потребитель 5	-	33481

Рассчитаем значения $W_{иск,р/п}$ для потребителей №3 и №5 по (В.3):

$$W_{иск,р/п,3} = 0 \cdot 12181 = 0 \text{ кВт} \cdot \text{ч};$$

$$W_{иск,р/п,5} = 0{,}31 \cdot 33481 = 10379 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Определим оплаты по надбавкам для потребителей – генераторов гармоник по (В.7) и общую сумму оплат по сетевой организации:

$$\Delta О_{н,1} = 2{,}3 \cdot 27540 = \mathbf{63342} \text{ руб.};$$

$$\Delta О_{н,2} = 2{,}3 \cdot 3067 = \mathbf{7054} \text{ руб.};$$

$$\Delta О_{н,5} = 2{,}3 \cdot 10379 = \mathbf{23871} \text{ руб.};$$

$$\sum_{j=1}^{3} \Delta О_{н,j} = 63342 + 7054 + 23871 = 94267 \text{ руб.}$$

Определим выплаты по скидкам для неискажающих потребителей, используя долевое распределение общей суммы оплат по надбавкам для потребителей – генераторов гармоник по выражению (В.9):

$$\Delta О_{ск,3} = -94267 \cdot \frac{12181}{41869} = -\mathbf{27425} \text{ руб};$$

$$\Delta О_{ск,4} = -94267 \cdot \frac{29688}{41869} = -\mathbf{66842} \text{ руб}.$$

Оценим стимулирующий эффект за расчетный период для потребителей – генераторов гармоник относительно оплаты за потребляемую электроэнергию:

$$О_1 = b_0 \cdot W_{р/п.,1} = 7{,}9 \cdot 43023 = 339882 \text{ руб}; \ \delta_1 = \frac{\Delta О_{н,1}}{О_1} = \frac{63342}{339882} \cdot 100\% = \mathbf{18{,}6}\%;$$

$$О_2 = 7{,}9 \cdot 18066 = 142721 \text{ руб}; \ \delta_2 = \frac{7054}{142721} \cdot 100\% = \mathbf{5}\%;$$

$$О_5 = 7{,}9 \cdot 33481 = 264500 \text{ руб}; \ \delta_5 = \frac{23871}{264500} \cdot 100\% = \mathbf{9}\%.$$

Приложение Г

Документы о внедрении результатов диссертационной работы

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение
высшего образования
**«УЛЬЯНОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(УлГТУ)**
Северный Венец ул., д.32,
г.Ульяновск, 432027, Россия
Тел.: (8422) 43-06-43; факс (8422) 43-02-37
e-mail: rector@ulstu.ru http://www.ulstu.ru
ОКПО 02069378, ОГРН 1027301160226
ИНН/КПП 7325000052/732501001

_____ № _____
На _____ от _____

УТВЕРЖДАЮ:
Врио ректора УлГТУ
_____ Л.С. Ямпольский
«23» _____06_____ 2025 г.

АКТ
о внедрении в учебный процесс результатов
диссертационной работы Чикина В.В.

Мы, нижеподписавшиеся, исполняющий обязанности заведующего кафедрой «Электроснабжение», кандидат технических наук Юренков Ю.П. и декан энергетического факультета, кандидат технических наук, доцент Дубов А.Л. составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы соискателя Чикина В.В. внедрены: в практические работы по дисциплине «Электромагнитная совместимость» для бакалавров направления «Электроэнергетика и электротехника» (профиль «Электроснабжение») 13.03.02; в практические работы по дисциплине «Менеджмент качества электроэнергии в электроэнергетической системе» для магистрантов направления «Электроэнергетика и электротехника» (профиль «Электроэнергетические системы, сети, их режимы, устойчивость и надежность») 13.04.02.

И.о. заведующего кафедрой «Электроснабжение» — Ю.П. Юренков

Декан энергетического факультета — А.Л. Дубов

УТВЕРЖДАЮ:
Директор Филиала
ПАО «Россети Волга» -
«Ульяновские распределительные сети»
_____ С.Я. Анисимович
«28» 07 2025 г.

АКТ
об использовании диссертационной работы
Чикина Владислава Владимировича

Мы, нижеподписавшиеся, начальник лаборатории по контролю качества электроэнергии Дикарин Д.Е. и начальник отдела технологического развития и инноваций Соловьев М.С. составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы соискателя Чикина В.В. в виде программы (Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ 2024666783 Российская Федерация. Расчет объема искаженной токами гармоник электроэнергии в сети до 1 кВ [Текст] / В.В. Чикин (RU), Д.А. Нуждов (RU); заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет» (RU). – № 2024666783; заявл. 09.07.2024; опубл. 17.07.2024. – 1 с.) использованы при оценке влияния потребителей на качество электроэнергии в части несинусоидальности.

Использование программы позволяет сократить время, необходимое для определения источников генерации токов гармонических составляющих, и дать количественную оценку степени искажения синусоидальной формы кривой напряжения нелинейной нагрузкой потребителя.

Начальник лаборатории по контролю качества электроэнергии — Д.Е. Дикарин

Начальник отдела технологического развития и инноваций — М.С. Соловьев