

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Санкт-Петербургский горный университет»

*На правах рукописи*

Добуш Юлия Владимировна



ВЫЯВЛЕНИЕ ВКЛАДОВ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ В ИСКАЖЕНИЯ ТОКА И  
НАПРЯЖЕНИЯ В ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСАХ  
ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель  
доктор технических наук, профессор  
Шклярский Я.Э.

Санкт-Петербург – 2022

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	5
<b>ГЛАВА 1 АНАЛИЗ МЕТОДОВ ВЫЯВЛЕНИЯ ИСТОЧНИКОВ ИСКАЖЕНИЙ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ</b> .....	13
1.1 Анализ научно-технической задачи определения источников высших гармоник, нормирование высших гармоник в электрических сетях.....	13
1.2 Классификация методов определения источников искажений и их вкладов .....	16
1.3 Метод активных двухполюсников .....	16
1.4 Метод потока активной мощности.....	17
1.5 Метод, основанный на реактивной мощности.....	18
1.6 Метод неактивной мощности .....	19
1.7 Метод, основанный на мощности искажений.....	20
1.8 Метод соотношения напряжения и токов .....	21
1.9 Метод проекций напряжений и токов.....	22
1.10 Метод, основанный на применении фильтрокомпенсирующего устройства .....	22
1.11 Метод, основанный на изменении параметров трансформатора.....	23
1.12 Патенты РФ.....	24
1.13 Выводы по главе 1 .....	25
<b>ГЛАВА 2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВАРИАНТОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВКЛАДА ПОТРЕБИТЕЛЯ И СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ В ИСКАЖЕНИЕ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ В ТОЧКЕ ОБЩЕГО ПРИСОЕДИНЕНИЯ</b> .....	27
2.1 Разработка метода определения вклада потребителя в искажение тока и напряжения .....	27

2.2	Оценка факторов, влияющих на расчет вклада потребителя в искажение тока и напряжения.....	30
2.2.1	Потребители смешанной структуры .....	31
2.2.2	Сопrotивление линии от ТОП до потребителей.....	38
2.2.3	Потребители с емкостной нагрузкой.....	45
2.2.4	Дополнительные искажения со стороны СЭС .....	46
2.3	Алгоритм определения вклада в искажения тока и напряжения в точке общего присоединения .....	49
2.4	Сравнение разработанного алгоритма и существующих способов определения источников искажений.....	51
2.5	Выводы по главе 2 .....	54

### **ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВКЛАДОВ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ И СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ В ИСКАЖЕНИЕ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ В ТОЧКЕ ОБЩЕГО ПРИСОЕДИНЕНИЯ.....**

3.1	Структура лабораторного стенда .....	56
3.2	Перечень экспериментальных исследований.....	57
3.2.1	Эксперименты без искажений со стороны системы электроснабжения и без емкостных нагрузок.....	58
3.2.2	Эксперименты без искажений со стороны системы электроснабжения и с емкостными нагрузками .....	60
3.2.3	Эксперименты при наличии искажений со стороны системы электроснабжения и без емкостных нагрузок.....	66
3.2.4	Эксперименты при наличии искажений со стороны системы электроснабжения и с емкостными нагрузками .....	68
3.2.5	Эксперимент с искажениями только со стороны системы электроснабжения .....	72

3.3	Выводы по главе 3 .....	74
<b>ГЛАВА 4 ИССЛЕДОВАНИЕ ВАРИАНТОВ ВЫЯВЛЕНИЯ ВКЛАДОВ</b>		
<b>ПОТРЕБИТЕЛЕЙ И СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ В ИСКАЖЕНИЕ</b>		
<b>ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ В ТОЧКЕ ОБЩЕГО ПРИСОЕДИНЕНИЯ ПУТЕМ</b>		
<b>ИММИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ</b>		
<b>ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЯ.....</b>		
		76
4.1	Схема системы электроснабжения предприятия.....	76
4.2	Расчет параметров схемы замещения .....	78
4.3	Имитационное моделирование системы электроснабжения предприятия .....	82
4.3.1	Моделирование системы электроснабжения предприятия без фильтра и внешних искажений .....	82
4.3.2	Моделирование системы электроснабжения предприятия с фильтром и без внешних искажений.....	88
4.3.3	Моделирование системы электроснабжения предприятия с внешними искажениями и фильтром.....	92
4.4	Выводы по главе 4 .....	99
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>		101
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....</b>		105
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ А АКТ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ</b>		
<b>ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ В УЧЕБНЫЙ ПРОЦЕСС.....</b>		120
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Б СПРАВКА О РЕЗУЛЬТАТАХ ВНЕДРЕНИЯ</b>		
<b>ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ В ПРОИЗВОДСТВЕННУЮ</b>		
<b>ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ .....</b>		121
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ В СВИДЕТЕЛЬСТВО О ГОСУДАРСТВЕННОЙ</b>		
<b>РЕГИСТРАЦИИ ИЗОБРЕТЕНИЯ .....</b>		122

## ВВЕДЕНИЕ

### Актуальность темы

В настоящее время увеличивается соотношение нелинейной нагрузки к линейной среди всех потребителей электрической энергии и в частности, среди промышленных потребителей. Кроме того, прослеживается тенденция все более широкого использования технологий, позволяющих повышать энергоэффективность [56; 64] и автоматизацию технологических процессов. Однако, данные меры предусматривают внедрение полупроводниковых преобразователей частоты, выпрямителей и инверторов, а также нелинейных нагрузок иного рода, что безусловно приводит к ухудшению качества электроэнергии.

Широко известны отрицательные воздействия высших гармоник электрического тока и напряжения в сетях электроснабжения [71; 88], заключающиеся, например, в резком возрастании напряжения на емкостных сопротивлениях конденсаторных батарей, что приводит к выходу из строя данных устройств [29]. Также высшие гармоники тока вызывают затруднения при расчете реактивной мощности [51; 90; 99], так как нет единой теории, позволяющей достоверно определить данное значение при таких условиях. Кроме того, несинусоидальный ток уменьшает пропускную способность кабельных линий, приводит к дополнительным тепловым потерям во всех элементах энергосистемы предприятия [11; 12], снижает точность работы систем автоматики. В совокупности, данные негативные воздействия приводят к снижению срока службы оборудования [75; 87], к переплатам за электроэнергию, к ухудшению качества выходной продукции.

На сегодняшний день качество электроэнергии нормирует ГОСТ 32144-2013 [4], регламентирующий ряд показателей, в том числе суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения, вызванный искажением формы напряжения из-за нелинейных потребителей. При этом не существует метода, позволяющего определить источник искажений напряжений и токов.

Другими словами, невозможно достоверно в процентном соотношении рассчитать долю вклада потребителя в ухудшение качества электроэнергии в точке общего присоединения (ТОП) в связанных распределительных системах промышленных предприятий, тем самым отделив искажения потребителя от искажений со стороны системы электроснабжения (СЭС) [33; 40; 91].

Однако, существует необходимость разработки такого метода [26; 35], так как точная оценка вклада потребителя в общие искажения обеспечит возможность применения мер к потребителям [28; 94], которые генерируют наибольшие искажения, тем самым ухудшают качество электроэнергии не только на своем предприятии, но и на предприятиях, подключенных к той же системе электроснабжения [52; 104; 106]. В дополнение, анализ, проведенный на основе метода выявления источников высших гармоник, возможно использовать в качестве обоснования выбора места подключения устройств компенсации искажений [44; 65; 74; 100].

Таким образом, разработка метода выявления источника высших гармоник в связанных сетях промышленных предприятий является актуальной [93; 98], особенно в вопросе оценки вклада таких источников в ухудшение качества электроэнергии в точке общего подключения [66; 85; 101; 103].

### **Степень разработанности темы исследования**

Проблемой компенсации высших гармоник тока занимались как российские ученые (Абрамович Б.Н., Шклярский Я.Э., Розанов Ю.К., Мещеряков В.М., Хабибуллин М.М.), так и зарубежные (Akagi H., Tenti P., Litran S.P., Popescu M.). Предложены конфигурации пассивных, активных, гибридных фильтров высших гармоник, однако, не учитывались вклады потребителей в искажения тока.

Над разработкой методов выявления источника высших гармоник работали многие российские ученые, в частности, Гамазин С.И. и Петрович В.А. [3], Майер В.Я. [13], Смирнов С.С. [36; 37], Саенко Ю.Л. [32], Тульский В.Н. [39], Карташев И.И. [10], Сысун В.И. [15]. Одним из наиболее освещенных методов является метод активных двухполосников. Однако, имеются существенные недостатки, не позволяющие применять его на практике, а именно,

необходимость знать параметры эквивалентных сопротивлений, что значительно усложняет процесс его реализации.

Также был разработан ряд методов, суть которых заключается в расчете мощностей высших гармоник и определении их знаков. Это может быть активная мощность (Akagi H. [47], Swart P.H., Case M.J., Wyk Van [107], Cristaldi L., Ferrero A. [57]), реактивная мощность (Wilsun Xu [110], Chun Li [108]), неактивная мощность (Barbaro P.V. [41]), мощность искажений (Stevanović D., Petković P. [105]). Такие методы не дают достоверной информации о вкладе потребителей в процентном соотношении.

Далее, существуют методы, основанные на анализе векторов токов и напряжений в ТОП. Такие методы предлагались как российскими учеными (Зиновьев Г.С. [19], Баглейбтер О.И [18], Геворкян В.М. [20], Висящев А.Н. [23], Зельвянский А.Я. [17]), так и зарубежными (Malekian K. [83], Fernandez F.M. [50; 67], Chandramohan Nair P.S. [67]). Некоторые из этих методов могут давать результат о вкладе потребителей и СЭС в процентном соотношении, но часть из них требуют определения сопротивления СЭС и потребителя, что может быть затруднительно, а часть из них основаны на спорных математических выкладках.

Таким образом, подтверждается необходимость разработки нового метода [40] определения источников высших гармоник для официального регулирования ответственности сторон в области качества электроэнергии с точки зрения генерации искажений и их компенсации.

Содержание диссертации соответствует паспорту специальности по п.1 «Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, изучение системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем», п.4 «Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях».

**Объект исследования** – электротехнические комплексы предприятий, имеющие в своем составе нелинейную нагрузку.

**Предмет исследований** – искажения тока и напряжения, вызванные потребителями и системой электроснабжения в точке общего присоединения.

**Научная задача** – выявление вклада потребителей и системы электроснабжения в искажения тока и напряжения в точке общего присоединения.

Таким образом, основной **целью работы** является развитие общей теории связанных распределительных систем среднего напряжения с точки зрения выявления вкладов потребителей в искажения с дальнейшим распределением ответственности за генерирование искажений тока и напряжения между потребителями и системой электроснабжения.

Поставленная в диссертационной работе цель достигается посредством решения нижеуказанных задач:

1. Обзор существующих методов выявления источников высших гармоник тока и напряжения в связанных энергосистемах промышленных предприятий.

2. Создание математической модели двух предприятий, питающихся от общей системы электроснабжения и содержащих нелинейную нагрузку для выработки подхода по оценке величины, указывающей на доли вклада отдельных потребителей в искажения напряжения и тока в ТОП, для различных типов потребителей и режимов их работы, при различных внешних воздействиях, вызванных искажениями со стороны СЭС.

3. Разработка способа определения источников высших гармоник и оценки их вкладов в несинусоидальность напряжения и тока в ТОП.

4. Подтверждение теоретических результатов на основе проведения экспериментов на лабораторном стенде, включающем различную линейную и нелинейную нагрузки электротехнических комплексов промышленных предприятий.

5. Разработка иммитационной модели части СЭС предприятия для оценки эффективности применения предлагаемого способа.

**Идея работы** – выявление вклада потребителей в искажения тока и напряжения в точке общего присоединения в связанных распределительных



системах промышленных предприятий на основании определения проекций токов высших гармоник потребителей на ток СЭС и проекций токов высших гармоник потребителей и токов СЭС на ток фильтра.

### **Научная новизна**

1. Предложено использование коэффициента вклада  $K_D^{(h)}$ , рассчитываемого как проекция вектора тока высшей гармоники потребителя на вектор тока высшей гармоники в ТОП по отношению к модулю вектора тока высшей гармоники в ТОП, что позволит определить вклад рассматриваемого потребителя в ухудшение качества тока и напряжения в ТОП.

2. Предложено использование коэффициента вклада  $K_{D/\Phi}^{(h)}$ , рассчитываемого как проекция вектора тока СЭС или потребителя на вектор тока фильтра высших гармоник на резонансной частоте по отношению к модулю вектора тока фильтра высших гармоник на резонансной частоте, что позволит определить вклад внешней СЭС или потребителя в ухудшение качества тока и напряжения в ТОП

3. Разработан алгоритм распределения ответственности за генерацию искажений между потребителями и СЭС, отличающийся тем, что вначале определяется вклад СЭС на основании коэффициента вклада  $K_D^{(h)}$ , а рассчитываются вклады потребителей, подключенных к ТОП, на основании коэффициента  $K_D^{(h)}$ .

4. Выявлены зависимости коэффициентов вкладов, характерные для типичных видов нагрузок промышленных предприятий.

5. Выявлено, что при коэффициенте вклада СЭС  $K_{D\text{ СЭС}/\Phi}^{(h)}$ , превышающем 44,3%, коэффициенты вкладов  $K_D^{(h)}$  могут не коррелироваться с реальными вкладами потребителей.

### **Теоретическая и практическая значимость**

1. Разработан алгоритм, позволяющий поэтапно определить вклад СЭС в ухудшение качества электроэнергии в ТОП, а затем распределить ответственность за генерацию токов высших гармоник между потребителями.

2. Выявлено, что величина коэффициента вклада  $K_{D\text{ СЭС/Ф}}^{(h)}$  напрямую связана с эффективностью компенсации искажения тока и напряжения с точки зрения коэффициента нелинейных искажений тока (THDi), коэффициента нелинейных искажений напряжения (THDu), коэффициента мощности на первой гармонике ( $\cos\varphi(1)$ ) и действующего значения тока 5ой гармоники в Топ. Чем ближе значение  $K_{D\text{ СЭС/Ф}}^{(h)}$  к нулю – тем выше эффективность компенсации.

3. Результаты исследования в соответствии с актом от 21.02.2022 внедрены в учебный процесс Горного университета при реализации специальных программ, также результаты работы приняты к внедрению в электротехнической лаборатории ООО «АСТЕРО», что подтверждается соответствующей справкой о внедрении от 15.02.2022.

4. Обоснована необходимость изменения нормативно-правовой базы в области регулирования качества электроэнергии

#### **Методология и методы исследований**

В работе использовалось математическое и компьютерное моделирование в программной среде Matlab Simulink на основании теории электрических цепей и теории систем электроснабжения, а также метод лабораторного эксперимента.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Точность и достоверность оценки вкладов потребителей и системы электроснабжения в искажения тока и напряжения в точке общего присоединения при отсутствии внешних искажений и при их наличии может быть достигнута применением вновь введенных коэффициентов вкладов, соответствующих проекциям векторов токов высших гармоник потребителей на векторы тока системы электроснабжения и соответствующих проекциям векторов токов высших гармоник потребителей и системы электроснабжения на векторы тока фильтра.

2. Применение разработанного алгоритма выявления вкладов в искажения тока и напряжения позволит определить точки присоединения компенсирующих устройств в связанной системе электроснабжения предприятия на основании

коэффициента вклада системы электроснабжения относительно фильтра, который указывает на эффективность использования компенсирующего устройства с точки зрения синусоидальности тока и напряжения в рассматриваемом узле.

**Степень достоверности результатов исследования** обусловлена использованием стандартных методов математического и имитационного моделирования; проведением лабораторных экспериментов на стенде, включающем в себя типичную для промышленных предприятий линейную нагрузку, нелинейную нагрузку, компенсатор реактивной мощности и фильтр высших гармоник; результатами внедрения в электротехнической лаборатории ООО «АСТЕРО», а также апробацией результатов исследования на международных конференциях и публикациями в рецензируемых журналах.

#### **Апробация результатов**

Основные положения и научные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на выступлениях на следующих международных научных конференциях: «59-ая научная конференция по горному делу», Краковская горно-металлургическая академия, (2018); IV Всероссийская научно-практическая конференция «Энергетика и энергосбережение: теория и практика», (2018); «IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIconRus)» (2019); Международный семинар «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики IPDME-2019» (2019); XVII Всероссийская конференции-конкурс студентов и аспирантов «Актуальные проблемы недропользования» (2019); XV International Forum-Contest of Students and Young Researchers «Topical Issues of Rational Use of Natural Resources» (2019); 14ый Фрайберг - Санкт-Петербургский коллоквиум молодых ученых (2019); постерная сессия «Инновационные исследования в горном деле» в рамках III Российско-Британского сырьевого диалога (2019); Young Researchers Day of the 12th German-Russian Raw Materials Conference (2019); Международная научно-практическая конференция «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2020» (2020); XVIII Всероссийская конференция-конкурс студентов и аспирантов «Актуальные проблемы

недропользования» (2020); Международный научно-технический семинар «Новые подходы к повышению качества электрической энергии» (2020); XVI International Forum-Contest of Students and Young Researchers “Topical Issues of Rational Use of Natural Resources” (2020); XIX Всероссийская конференция-конкурс студентов и аспирантов «Актуальные проблемы недропользования» (2021); Международный научно-технический семинар «New concepts for improving power quality - 2021», (2021); XVII International Forum-Contest of Students and Young Researchers “Topical Issues of Rational Use of Natural Resources” (2021); Международная научная Электро-энергетическая конференция ISEPC (2021); I Международная междисциплинарная научно-практическая конференция «Человек в Арктике» (2021).

**Личный вклад автора** заключается в постановке цели и задач диссертационного исследования; анализе зарубежной и отечественной научной литературы по теме исследования, проведении лабораторных экспериментов с последующей обработкой первичных данных, проведении компьютерного моделирования и получении искомых зависимостей.

### **Публикации**

Результаты диссертационного исследования представлены в достаточной степени в 18 печатных работах, в том числе в 2 – в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, в 4 статьях – в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получен 1 патент.

### **Структура диссертации**

Диссертация состоит из оглавления, введения, 4 глав с выводами по каждой из них, заключения и списка литературы, включающего 112 наименований и 3 приложений. Диссертация изложена на 122 страницах машинописного текста, содержит 44 рисунка и 19 таблиц.

## **ГЛАВА 1 АНАЛИЗ МЕТОДОВ ВЫЯВЛЕНИЯ ИСТОЧНИКОВ ИСКАЖЕНИЙ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ**

### **1.1 АНАЛИЗ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ЗАДАЧИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИСТОЧНИКОВ В ВЫСШИХ ГАРМОНИК, НОРМИРОВАНИЕ ВЫСШИХ ГАРМОНИК В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ**

В настоящее время, как было указано во введении, в спектрах тока и напряжений промышленных предприятий наблюдаются высшие гармонические составляющие.

Основным источником высших гармоник являются нелинейные нагрузки. Нелинейные потребители актуальны для большинства сфер промышленности, например, горнодобывающей и перерабатывающей, металлургической, нефтяной и др.

Большая доля частотно-регулируемых приводов перекачки сырой нефти и готовой продукции определяет актуальность данного вопроса в нефтеперерабатывающей отрасли. Кроме того, силовые полупроводниковые преобразователи частоты используются при подготовке исходного сырья, охлаждении, транспортировке продуктов к конечным потребителям или в места промежуточного хранения [9; 25; 30].

Горнодобывающая отрасль также насыщена нелинейными потребителями, например, часто используется частотно-регулируемый привод конвейеров, установок вентиляции шахтного воздуха, проходческих и очистных комбайнов [14; 31; 53; 62; 84; 89].

Кроме того, множество мощных источников высших гармоник находятся в металлургических комбинатах, к примеру, электролизеры на алюминиевом производстве, сварочное оборудование, приводы прокатных станков, оборудование по резке металлов [2].

Также, полупроводниковое силовое оборудование является неотъемлемой частью электроэнергетических комплексов возобновляемой энергетики [43; 45; 54; 69; 72; 73; 76; 79; 80].

Очевидно, что описанная задача актуальна для широкого спектра сфер промышленности, потребляющих значительное количество электроэнергии.

Высшие гармоники в сетях промышленных предприятий приводят к ряду негативных последствий от ложного срабатывания автоматики до выхода из строя оборудования [63; 69; 81; 102]. Множество отрицательных воздействий приводят к снижению эффективности производства и к ухудшению качества выходной продукции [33].

В связи с этим, вопрос компенсации искажений напряжения становится актуальным [6; 42; 46; 48; 55; 82; 86]. Однако стоит отметить, что вопрос компенсации высших гармоник тока и напряжения напрямую связан с вопросом определения источника искажений [27; 92]. С одной стороны, распределение ответственности за генерацию токов высших гармоник между потребителями и СЭС может определить финансовую ответственность сторон за проведение мер по компенсации искажений [7; 61]. С другой стороны, данные, полученные в результате определения источника искажения, могут стать обоснованием для определения максимально эффективного места подключения компенсирующих устройств и расчета их параметров, а также для определения алгоритма управления потребляемой мощностью [34; 103].

При определении источников искажений напряжения и тока необходимо опираться на нормативную базу, как установленную на территории Российской Федерации, так и на международные стандарты. В настоящее время российскими законами регулируется качество электроэнергии. В частности, ГОСТ 32144-2013 [4] регламентирует показатели качества электрической энергии, среди которых:

1.  $K_{U(n)}$  – коэффициенты гармонических составляющих напряжения (до 40-го порядка), определяемые по выражению 1.1:

$$K_{U(n)} = \frac{U_{(n)}}{U_{(1)}}, \quad (1.1)$$

где  $U_{(n)}$  – амплитудное значение гармоники напряжения порядка  $n$ ;

$U_{(1)}$  – амплитудное значение основной гармоники напряжения.

2.  $K_U$  – суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения (отношения среднеквадратического значения суммы всех гармонических составляющих до 40-го порядка по отношению к среднеквадратичному значению основной гармоники напряжения), определяемый по выражению 1.2:

$$K_U = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} U_{(n)}^2}}{U_{(1)}}. \quad (1.2)$$

Следует отметить, что высшие гармоники тока в ГОСТ 32144-2013 не нормируются. Однако, очевидно, что искажения напряжения по большей части вызваны искажениями тока.

Международный стандарт IEEE 519-2014 [78] ограничивает как искажения напряжения, так и тока.

В стандарте IEC 61000-3-6 [5; 77] описывается процедура, согласно которой эмиссия гармонических составляющих должна оцениваться путем сравнения векторов напряжений до и после подключения исследуемой нагрузки ТОП. Такой подход обоснован в случае, если рассматривается подключение нового потребителя, но его применение затруднительно для мониторинга с соблюдением непрерывности технологического процесса.

В приведенных стандартах не учитывается определение источников высших гармоник тока и напряжения. Учитывая актуальность рассмотренной задачи, необходимо проанализировать существующие методы определения вкладов источников высших гармоник в искажение напряжения и тока в ТОП. Для этого в работе приведена классификация методов.

## **1.2 КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИСТОЧНИКОВ ИСКАЖЕНИЙ И ИХ ВКЛАДОВ**

Предложены различные подходы к решению проблемы выявления источников высших гармоник в промышленных сетях предприятий, подключенных к общей системе электроснабжения.

В целом, все методы можно условно разделить на следующие группы:

- Методы, с использованием измерения показаний в одной точке – ТОП,
- Методы, для реализации которых необходимо проводить измерение в двух или более точках.

Вторая группа методов была разработана для того, чтобы можно было оценить влияние нескольких потребителей одновременно, что безусловно дает более точную информацию, но значительно осложняется тем, что возникает необходимость проведение высокоточных измерений с обеспечением их синхронности, что является сложной технической задачей, особенно с учетом территориальной отдаленности точек измерения. Примером такого метода может служить работа [59].

С учетом вышеописанного, а также принимая во внимание то, что критически важной является информация является ли предприятие в целом источником высших гармоник, и, соответственно, является ли оно виновником ухудшения качества электроэнергии или искажения появляются на предприятии вследствие некачественной работы внешней системы электроснабжения, обзор литературы будет сфокусирован на анализе первой группы методов.

## **1.3 МЕТОД АКТИВНЫХ ДВУХПОЛЮСНИКОВ**

В работе [70] был разработан метод активных двухполюсников. Дальнейшим усовершенствование этого метода показано в [1; 38].



Суть метода заключается в замещении системы электроснабжения на эквивалентное сопротивление и источник напряжения или тока. В свою очередь нагрузка заменяется на эквивалентное сопротивление и источники тока высших гармоник.

Подобное замещение означает, что и потребитель, и система представляют собой активный двухполюсник. Для каждой исследуемой частоты используется своя схема замещения, а результирующие значения рассчитываются методом наложения.

Каждый двухполюсник содержит источник тока или напряжения заданной частоты. На основании этих величин оценивается вклад каждого из двухполюсников в напряжение в точке, в которой проводится измерение.

Существенным ограничением для использования данного метода является то, что предполагается изменение вклада в общее искажение только со стороны одного из активных двухполюсников. Однако, в реальных условиях изменения происходят как со стороны потребителя, так и со стороны системы электроснабжения одновременно. Это означает, что использование метода активных двухполюсников при таких условиях будет приводить к вычислительным ошибкам при оценке вклада в искажения каждой из сторон.

#### **1.4 МЕТОД ПОТОКА АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ**

В [47; 107] был предложен метод потока активной мощности для выявления источника искажений в сетях электроснабжения. Используется поток активной мощности высших гармоник в точке общего подключения предприятий, чтобы определить доминирующий источник искажений. В дальнейшем, концепция была применена в промышленном оборудовании контроля качества электроэнергии [57]. Адаптация данного способа к трехфазным сетям реализована в [58; 68].

Необходимыми данными для расчета активной мощности высших гармоник являются гармонические составляющие тока и напряжения в точке общего подключения, полученные в результате измерений. Далее векторы напряжения и

тока раскладываются на составляющие согласно преобразованию Фурье. Проводится расчет активных мощностей для каждой гармоники по выражениям (1.3):

$$\begin{cases} P_k = \operatorname{Re}(\dot{U}_k \cdot I_k^*) & k \geq 0 \\ P_k = \operatorname{Re}(U_k^* \cdot \dot{I}_k) & k < 0 \end{cases} \quad (1.3)$$

где  $\dot{U}_k, \dot{I}_k$  – значения напряжения и тока  $k$ -ой составляющей;

$U_k^*$  и  $I_k^*$  – сопряженные значения напряжения и тока  $k$ -ой составляющей.

На основании полученных величин делается вывод об источнике искажений, однако, точность метода была поставлена под сомнение в последующих работах [109–111]. Используя принцип суперпозиции, авторы показали, что метод, основанный на направлении активной мощности теоретически некорректен. Активная мощность, потребляемая на высших гармониках, зависит от параметров электрической системы, линейной нагрузки и топологии системы. В случаях, когда сопротивление системы мало (жесткая сеть), падения напряжения в линии незначительны и расчет активной мощности на высших гармониках затруднен вследствие невозможности точно измерить амплитуды и начальные фазы напряжений высших гармоник.

## 1.5 МЕТОД, ОСНОВАННЫЙ НА РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

В [112] был предложен метод, основанный на реактивной мощности. Предполагается, что направление потока активной мощности в большей степени зависит от фазового сдвига между двумя эквивалентными источниками высших гармоник, чем от их амплитуд [109; 112]. Таким образом, метод, предлагаемый ранее Р. Н. Swart, не может быть применен для определения основного эквивалентного источника.

Кроме того, в [110] было разъяснено, что поток реактивной мощности может в значительной степени зависеть и от амплитуд двух эквивалентных источников искажений. Однако, авторами было отмечено, что одного направления потока реактивной мощности недостаточно для формирования

критерия определения доминантного источника высших гармоник. В связи с этим авторы теории развили предложенную им ранее концепцию [108]. Был введен новый критерий – критический импеданс (критическое полное сопротивление). Для расчета критического импеданса необходимы следующие данные: эквивалентный импеданс системы электроснабжения  $Z_u$  и потребителя  $Z_c$  на всех гармониках, а также данные измерений напряжения и токов в точке общего подключения предприятия к системе электроснабжения. Это является одним из основных недостатков метода.

Подробно недостатки этого метода рассмотрены в статьях [95; 96]. Можно отметить тот факт, что при произведении расчетов рассматривается диапазон значений общего эквивалентного импеданса потребителя и системы  $Z_{tot}$ , что ведет к появлению диапазона импеданса потребителя  $Z_c$ . В свою очередь, это ведет к изменению не только амплитуды, но и угла общего эквивалентного импеданса. Это приводит к ошибкам в расчете реактивной мощности, а значит и к ошибкам в расчете предложенного показателя – критического импеданса. Таким образом, этот метод невозможно использовать для точной количественной оценки вкладов потребителей.

## 1.6 МЕТОД НЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

Метод неактивной мощности [41] основан на различии значений фундаментальной реактивной мощности  $Q_1$  (1.4), реактивной мощности согласно теории Фризе  $Q_F$  (1.5), а также среднеквадратичной мощности  $S_Q$  (1.6) согласно Шарону:

$$Q_1 = U_1 \cdot I_1 \sin \varphi_1; \quad (1.4)$$

$$Q_F = \sqrt{S^2 - P^2}; \quad (1.5)$$

$$S_Q = U \sqrt{\sum_n I_n^2 \sin^2 \varphi_n} = \sqrt{S^2 - P^2 - S_C^2}; \quad (1.6)$$

где  $U_1$  – амплитуда напряжения первой гармоники;

$I_1$  – амплитуда тока первой гармоники;

$\varphi_1$  – разность фаз между напряжением и током первой гармоники;

$P$  – активная мощность;

$S$  – полная мощность;

$U$  – среднеквадратичное значение напряжения;

$I_n$  – ток  $n$ -ой гармоники;

$\varphi_n$  – разность фаз между напряжением и током  $n$ -ой гармоники;

$S_c$  – добавочная реактивная мощность.

В случае синусоидальных значений тока и напряжения все три значения мощностей будут равны, а при наличии нелинейной нагрузки, вызывающей искажения, будут различны, и чем больше наличие нелинейных искажений, тем больше разница в значениях  $Q_I$  и  $Q_F$ . Также можно сказать, что значение  $S_Q$  будет находится в пределах между  $Q_I$  и  $Q_F$ . При несинусоидальном напряжении и линейной нагрузке, составляющие  $S_Q$  и  $Q_I$  близки друг другу, при синусоидальном напряжении и нелинейной нагрузке  $S_Q$  и  $Q_F$  близки по значениям благодаря большим искажениям в токе, потребляемым нелинейной нагрузкой. Для трехфазной сети данные мощности предлагается рассчитывать, как алгебраическую сумму каждой составляющей во всех фазах.

Сами авторы предложенного метода отмечают, что сформулированный ими способ не является абсолютно достоверным, однако его использование совокупности с методом потока активных мощностей безусловно способно давать более точный результат.

## 1.7 МЕТОД, ОСНОВАННЫЙ НА МОЩНОСТИ ИСКАЖЕНИЙ

Метод был предложен в [105]. Основой метода является мощность искажений, определяющаяся по формуле (1.7):

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2}, \quad (1.7)$$

где  $S$  – полная мощность;

$P$  – активная мощность;

$Q$  – реактивная мощность.

Очевидно, что при значении  $D > 0$  можно сделать вывод о наличии нелинейной нагрузки в сети, что и является основным положением предлагаемого метода.

Одним из преимуществ, описываемых авторами, является возможность применения разработанного ими метода в современных электронных измерительных приборах, изначально установленных на предприятии, а именно все из них способны регистрировать показания  $P$ ,  $Q$  и  $U$ . Таким образом, применив незначительные изменения в программном обеспечении оборудования возможно расширить его возможности до необходимых пределов.

Однако стоит отметить, что значение мощности искажений  $D$  напрямую зависит от метода определения реактивной мощности  $Q$ , а в связи с тем, что существует значительное число методов расчета реактивной мощности, возникает необходимость определения эталонного метода, что является затруднительным, поскольку до сих пор по этому вопросу в научном сообществе не существует единого мнения. При этом как показано в работе [97], полученные согласно различным подходам значения реактивной мощности могут значительно отличаться, что ставит под сомнение точность предлагаемого метода мощности искажений.

## 1.8 МЕТОД СООТНОШЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ И ТОКОВ

В [83] в качестве критерия для определения источника искажений было принято соотношение между векторами напряжения и тока в ТОП. Для расчета такого соотношения необходимо производить измерения указанных параметров, а также знать эквивалентное гармоническое сопротивление как системы, так и потребителя.

Разработанный метод может быть применен для следующих целей:

- Определение основного эквивалентного источника высших гармоник
- Определение соотношения значение эквивалентных источников.

Используя этот метод, возможно не только определить основной источник высших гармоник, но и определить вклад каждой из сторон в показатели качества

электрической энергии в точке подключения. В таком случае, важно определять не только соотношение амплитуд, но и соотношение углов векторов напряжения и тока, так как разность углов показывает, компенсируют ли искажения сети и предприятия друг друга или усиливают.

Однако, как и для метода потока активной мощности необходимо проводить высокоточные измерения углов и фаз гармоник и также знать эквивалентное гармоническое сопротивление как системы, так и потребителя, что является существенным недостатком данного метода.

## **1.9 МЕТОД ПРОЕКЦИЙ НАПРЯЖЕНИЙ И ТОКОВ**

В [67] распределение ответственности за генерирование токов высших гармоник между СЭС и потребителем предлагается осуществлять следующим образом. Для каждой гармоники отдельно в ТОП измеряются амплитуды и фазы токов и напряжений. Затем рассчитываются нормализованные векторы тока и напряжения. Далее рассчитываются проекции нормализованного вектора тока и напряжения в ТОП на их векторную сумму.

Недостатком такого метода является то, что при наличии индуктивного сопротивления потребителя угол сдвига между нормализованным вектором тока и напряжения изменится, а значит изменится и вклад потребителя в искажение напряжения в ТОП, что приведет к ошибочной оценке, так как сама индуктивность не является источником высших гармоник.

## **1.10 МЕТОД, ОСНОВАННЫЙ НА ПРИМЕНЕНИИ ФИЛЬТРОКОМПЕНСИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА**

В диссертации [16] и патенте [22] предложен метод с использованием фильтра высших гармоник. Суть метода заключается в изменении сопротивления фильтрокомпенсирующего устройства (ФКУ) с одновременным измерением тока нагрузки. При наличии источника высших гармоник со стороны потребителя, ток

исследуемой гармонике, потребляемый предприятием, падает при уменьшении активного сопротивления фильтра. Обратную зависимость можно проследить при наличии искажений со стороны системы.

Полученная зависимость определяет источник искажений, оказывающий наибольшее влияние на конденсаторные батареи, как на наиболее уязвимое звено предприятия:

- если полученная функция имеет вогнутый характер, либо выпуклый с наличием максимума – наибольшее влияние на установки конденсаторных батарей будут иметь искажения в напряжении, вызванные питающей сетью;

- если функция имеет выпуклый вид, то наибольшее влияние оказывает искажение тока, вызванного нелинейной нагрузкой самого предприятия.

Из описания решения видно, что данный метод не дает точной оценки влияния источников высших гармоник в процентном соотношении.

## **1.11 МЕТОД, ОСНОВАННЫЙ НА ИЗМЕНЕНИИ ПАРАМЕТРОВ ТРАНСФОРМАТОРА**

Данный метод также описывается в диссертации Бунтеева Ю.Е [16].

Суть метода заключается в расчете суммарного коэффициента искажения напряжения на основе показаний, снятых с точки общего подключения предприятия при условии изменения сопротивления системы. Такое изменение обеспечивается устройством регулирования под нагрузкой, которым оснащен вводный трансформатор.

Для начала необходимо описать изменение коэффициента искажения напряжения во вторичной обмотке трансформатора. Были рассмотрены два случая. Вначале при увеличении искажений со стороны системы электроснабжения искажения со стороны нагрузки оставались неизменными, во втором случае – наоборот.

Установлено, что при наличии источника исключительно со стороны нагрузки, либо со стороны питающей сети зависимости параметров качества

электроэнергии от коэффициента трансформации являются линейными и однозначно указывают на наличие источника искажений либо со стороны питающей сети, либо со стороны нагрузки и позволяет оценить общий вклад источников в коэффициент искажений по напряжению во вторичной обмотке трансформатора при их совокупном воздействии, но также не дают точного результата в процентном соотношении [101].

## 1.12 ПАТЕНТЫ РФ

Кроме методов, предложенных зарубежными авторами, преимущественно описанными в предыдущих подразделах, существует ряд методов, защищенных патентами РФ.

1. Способ определения потребителя, искажающего показатели качества электрической энергии в узле энергоснабжающей организации, и его вклада в искажение [18].

2. Способ определения долевых частей нагрузки и энергосистемы в изменении качества напряжения [19].

3. Способ выявления фактического вклада субъектов электрических сетей в искажение качества электрической энергии в точке общего присоединения в электрической сети [20].

4. Способ выявления источника высших гармоник [22].

5. Способ оценки влияния потребителя на искажение напряжения в точке общего присоединения [23].

6. Способ определения фактического вклада источников искажений в значения показателей качества электроэнергии в точке общего присоединения [17].

Недостатки каждого из перечисленных способов подробно описаны в тесте патента, содержащего основные результаты данной диссертации: «Способ оценки вклада нелинейных потребителей в искажение напряжения в точке общего присоединения» [24].



Ни один упомянутых выше методов не соответствует совокупности таких требований, как обоснованность подхода, точность получаемого результата и техническая реализуемость. Кроме того, ни один из существующих методов официально не утвержден государственным или международным стандартом. С другой стороны, корректное определение источников высших гармоник, оказывающих наибольшее влияние на режимы работы сети, является актуальной задачей, так как это связано с дальнейшим выбором наиболее эффективных способов компенсации высших гармоник [21].

### 1.13 ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 1

На основании проведенного анализа заявленной задачи, были сделаны следующие выводы, поставлены цель и задачи исследования:

1. Вопрос компенсации высших гармоник тока и напряжения актуален для большинства сфер промышленности, так как используемые для увеличения энергоэффективности нелинейные потребители ухудшают показатели качества электроэнергии в ТОП.

2. Вопрос определения источника искажения актуален для большинства сфер промышленности, так как высшие гармоники в ТОП могут быть обусловлены как нелинейной нагрузкой самого предприятия, так и внешними искажениями со стороны СЭС.

3. Существующие методы определения источников искажений, основанные на расчете того или иного типа мощности, не позволяют достоверно рассчитать величину вкладов потребителя и СЭС в процентном соотношении.

4. Существующие методы определения источников искажений, основанные на исследовании соотношений векторов токов и напряжений высших гармоник в ТОП, либо требуют дополнительной информации по комплексному сопротивлению как потребителя, так и системы, либо не обеспечивают необходимую точность получаемых результатов.

5. Ни один из существующих методов определения вкладов источников искажений не зафиксирован в качестве рекомендуемого к применению в международных и национальных стандартах.

6. Отсутствие нормирования эмиссий гармонических составляющих тока в ГОСТ 32144-2013 говорит о необходимости обновления нормативно-правовой базы с точки зрения искажений форм токов и определения источника этих искажений.

7. Цель исследования: развитие общей теории связанных распределительных систем среднего напряжения, содержащих нелинейную нагрузку.

8. Задачи исследования:

1) Обзор существующих методов выявления источников высших гармоник тока и напряжения в связанных энергосистемах промышленных предприятий.

2) Создание математической модели двух предприятий, питающихся от общей системы электроснабжения и содержащих нелинейную нагрузку, для разработки коэффициентов  $K_D^{(h)}$  и  $K_{D/\Phi}^{(h)}$ , а также для оценки их величины, указывающей на долю вклада отдельных потребителей в несинусоидальность напряжения и тока в ТОП, для различных типов потребителей и режимов их работы, при различных внешних воздействиях, вызванных искажениями со стороны СЭС.

3) Разработка метода определения источников высших гармоник и оценки их вкладов в несинусоидальность напряжения и тока в ТОП.

4) Подтверждение полученных теоретических результатов на основе проведения экспериментов на лабораторном стенде, включающем линейную и нелинейную нагрузки электротехнических комплексов промышленных предприятий.

5) Разработка компьютерной модели части СЭС предприятия для применения предлагаемого метода и анализа закономерностей, получаемых при имитационном моделировании.

## ГЛАВА 2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВАРИАНТОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВКЛАДА ПОТРЕБИТЕЛЯ И СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ В ИСКАЖЕНИЕ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ В ТОЧКЕ ОБЩЕГО ПРИСОЕДИНЕНИЯ

Для разработки и апробации метода оценки вкладов потребителей в искажения напряжения и тока в ТОП необходимо использовать совокупность методов исследования, характерных для данной области. В частности, в работе используется метод математического и компьютерного моделирования.

### 2.1 РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВКЛАДА ПОТРЕБИТЕЛЯ В ИСКАЖЕНИЕ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ

В ходе разработки метода была составлена эквивалентная схема замещения СЭС с двумя потребителями, представленная на рисунке 2.1.

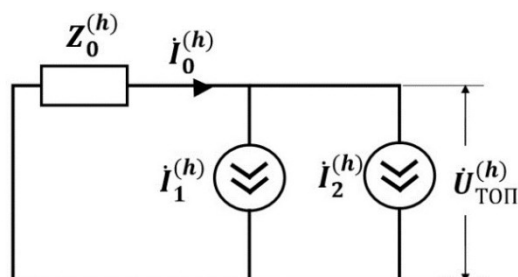


Рисунок 2.1 – Схема замещения двух потребителей, подключенных к ТОП, на  
высших гармониках

На рисунке 2.1  $Z_0^{(h)}$  – комплексное сопротивление СЭС для высшей гармоники  $h$ ;  $i_0^{(h)}$  /  $i_1^{(h)}$  /  $i_2^{(h)}$  – ток высших гармоник СЭС / первого / второго потребителя для высшей гармоники  $h$ ,  $U_{ТОП}^{(h)}$  – напряжение в ТОП для высшей гармоники  $h$ .

Видно, что несинусоидальное напряжение сети  $U_{ТОП}^{(h)}$  пропорционально векторной сумме токов первого и второго потребителя при условии постоянства сопротивления сети  $Z_0^{(h)}$  по формуле (2.1):

$$\dot{U}_{\text{ТОП}}^{(h)} = \dot{i}_0^{(h)} \cdot Z_0^{(h)} = (\dot{i}_1^{(h)} + \dot{i}_2^{(h)}) \cdot Z_0^{(h)}. \quad (2.1)$$

Из приведенного выражения следует два важных вывода. Во-первых, возможен переход от оценки качества напряжения к оценке качества токов, что было указано в главе 1 и что требует особого внимания, так как, например, в российском ГОСТ 32144-2013 регламентируется исключительно суммарный коэффициент искажения по напряжению, но не по току. Во-вторых, необходимо оценивать вклад каждого потребителя в общее искажение напряжения в точке общего присоединения в векторном виде.

В связи с этим, на следующем этапе следует рассмотреть различное взаимное расположение векторов тока. Все возможные варианты были условно разделены на 4 случая, представленные на 2.2.

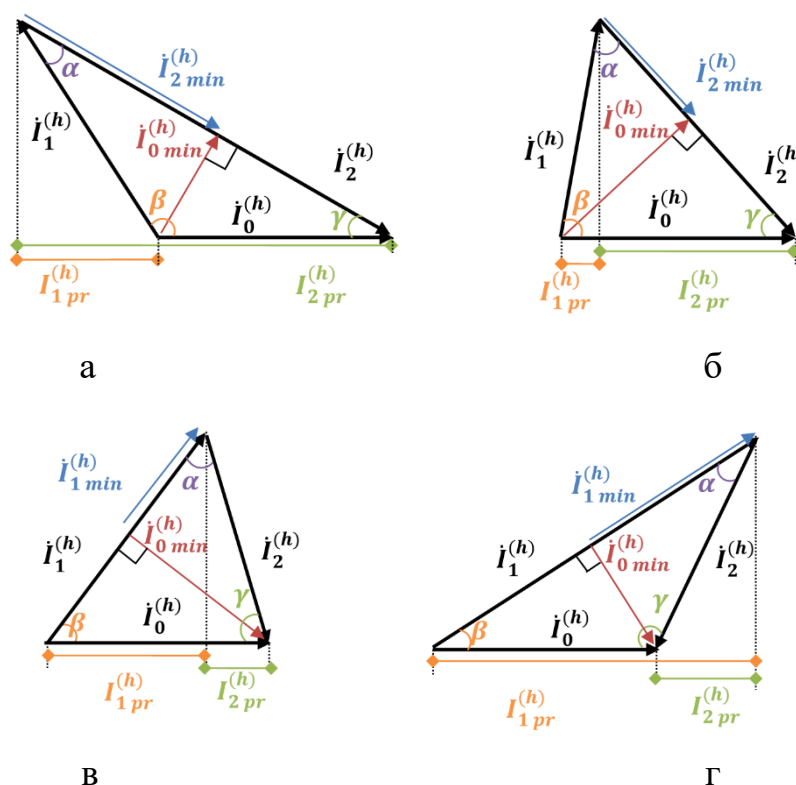


Рисунок 2.2 – Варианты взаимного расположения векторов токов потребителей: а – первый потребитель компенсирует ток второго потребителя; б – оба потребителя являются источниками высших гармоник тока, второй потребитель доминантный; в – оба потребителя являются источниками высших гармоник тока, первый потребитель доминантный; г – второй потребитель компенсирует ток первого

Для каждого случая фаза вектора тока СЭС  $i_0^{(h)}$  принята за ноль. В каждом случае соотношение проекций векторов токов потребителей  $i_1^{(h)} / i_2^{(h)}$  на суммарный вектор тока  $i_0^{(h)}$  различно и равно соответственно  $I_{1pr}^{(h)}$  и  $I_{2pr}^{(h)}$ . На векторных диаграммах отображены углы  $\alpha$  – между векторами  $i_1^{(h)}$  и  $i_2^{(h)}$ ,  $\beta$  – между векторами  $i_1^{(h)}$  и  $i_0^{(h)}$ ,  $\gamma$  – между векторами  $i_2^{(h)}$  и  $i_0^{(h)}$ .

Предлагается рассчитывать вклад первого и второго потребителя в искажения тока и напряжения в Топ на каждой гармонике отдельно через коэффициенты вклада  $K_{D1}^{(h)}$  (2.2) и  $K_{D2}^{(h)}$  (2.3), как соотношение проекции вектора тока высшей гармоники потребителя на суммарный вектор СЭС к суммарному модулю вектора тока по следующим выражениям:

$$K_{D1}^{(h)} = \frac{I_{1pr}^{(h)}}{I_0^{(h)}} \cdot 100\%; \quad (2.2)$$

$$K_{D2}^{(h)} = \frac{I_{2pr}^{(h)}}{I_0^{(h)}} \cdot 100\%. \quad (2.3)$$

Для варианта, показанного на рисунке 2.2 а, вклад первого потребителя  $K_{D1}^{(h)} < 0\%$ , а второго –  $K_{D2}^{(h)} > 100\%$ . Это говорит о том, что второй потребитель является доминирующим источником искажений на гармонике  $h$ , а несинусоидальный ток первого потребителя в некоторой степени компенсирует искажения, генерируемые вторым потребителем. В случае, показанном на рисунке 2.2 г, наоборот,  $K_{D1}^{(h)} > 100\%$ ,  $K_{D2}^{(h)} < 0\%$ , а значит ток второго потребителя компенсирует ток первого.

На рисунке 2.2 б и рисунке 2.2 в представлены промежуточные варианты расположения векторов, где величины обоих коэффициентов вкладов находятся в промежутке от 0 до 100 %. Это означает, что каждый из потребителей содержит в себе нелинейную нагрузку.

Анализируя представленные случаи, можно прийти к выводу, что больший вклад в суммарный вектор тока оказывает больший по модулю вектор тока потребителя вне зависимости от взаимного расположения векторов. То есть в случае, отображенном на рисунке 2.2 а и рисунке 2.2 б, доминирующим

источником искажений является второй потребитель, а в случае, показанном на рисунке 2.2 в и рисунке 2.2 г, – первый потребитель.

Также, для всех вариантов взаимного расположения можно вывести универсальную формулу определения модуля минимально возможного суммарного вектора тока  $I_{0min}^{(h)}$  (2.4), а значит и минимально возможных искажений напряжения:

$$I_{0min}^{(h)} = \text{MIN} \left( I_1^{(h)}; I_2^{(h)} \right) \cdot \sin \alpha, \quad (2.4)$$

где  $\text{MIN} \left( I_1^{(h)}; I_2^{(h)} \right)$  – минимальное из двух значений.

Соответственно, по выражению (2.5) рассчитывается величина вектора  $I_{1/2min}^{(h)}$ , до которого должна быть уменьшена величина вектора тока большего потребителя в случае достижения показателей качества электроэнергии в ТОП значений, не удовлетворяющих требованиям стандартов:

$$I_{1/2min}^{(h)} = \text{MIN} \left( I_1^{(h)}; I_2^{(h)} \right) \cdot \cos \alpha = \frac{I_1^{(h)2} + I_2^{(h)2} - I_0^{(h)2}}{2 \cdot \text{MAX} \left( I_1^{(h)}; I_2^{(h)} \right)}. \quad (2.5)$$

Основные выводы из вышепредставленных математических расчетов:

- влияние каждого потребителя для каждой гармоники  $h$  отдельно оценивается величиной проекции тока высшей гармоники  $h$  этого потребителя на ток высшей гармоники СЭС;
- чем больше амплитуда тока высшей гармоники потребителя, тем больше его вклад;
- для проведения расчетов необходимо знать амплитуду и фазу токов высших гармоник потребителей и СЭС.

## 2.2 ОЦЕНКА ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА РАСЧЕТ ВКЛАДА ПОТРЕБИТЕЛЯ В ИСКАЖЕНИЕ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ

Следующим шагом стала оценка влияния различных факторов на результаты вычислений согласно предлагаемому коэффициенту вклада.

Допущением является выбор и учет следующих факторов:

- наличие потребителей смешанной структуры, включающих в себя линейную и нелинейную нагрузку;
- влияние сопротивления линий, соединяющих потребителей с ТОП;
- наличие потребителей с емкостной нагрузкой, например, с компенсаторами реактивной мощности и фильтрами высших гармоник;
- наличие дополнительных искажений со стороны СЭС.

Далее рассмотрено влияние каждого из указанных факторов отдельно.

### 2.2.1 Потребители смешанной структуры

В предыдущей схеме (рисунок 2.1) не учитывалось влияние токов высших гармоник первого потребителя на потребляемый ток второго и наоборот. Так как реальные потребители невозможно разделить на исключительно источники или исключительно потребители высших гармоник, то в следующей схеме замещения (рисунок 2.3) потребители электроэнергии представлены не только источниками тока, но и линейной нагрузкой, для того чтобы отразить двойственную природу потребителей с точки зрения генерации и потребления высших гармоник.

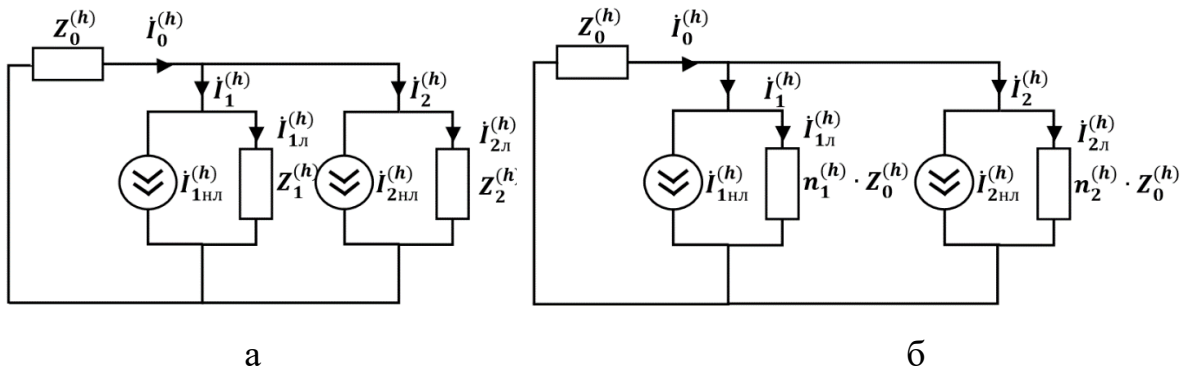


Рисунок 2.3 – Уточненная схема замещения для оценки точности расчетов: а – на высших гармониках; б – на высших гармониках с введенными коэффициентами

На рисунке 2.3  $i_0^{(h)}$  – ток высших гармоник СЭС,  $Z_0^{(h)}$  – комплексное сопротивление СЭС для высшей гармоники  $h$ ;  $i_1^{(h)}$  /  $i_2^{(h)}$  – ток высших гармоник первого / второго потребителя;  $i_{1\text{нл}}^{(h)}$  /  $i_{2\text{нл}}^{(h)}$  – несинусоидальный ток, генерируемый нелинейной нагрузкой первого / второго потребителя;  $i_{1\text{л}}^{(h)}$  /  $i_{2\text{л}}^{(h)}$  –

несинусоидальный ток, потребляемый линейной нагрузкой первого / второго потребителя.

Для упрощения расчетов были введены коэффициенты  $n_1^{(h)}$  и  $n_2^{(h)}$ , показывающие соотношения комплексных сопротивлений предприятий  $Z_1^{(h)}$  и  $Z_2^{(h)}$  к сопротивлению СЭС  $Z_0^{(h)}$ . Следует учитывать, что введенные коэффициенты (2.6), (2.7) также являются комплексными величинами.

$$n_1^{(h)} = \frac{Z_1^{(h)}}{Z_0^{(h)}}, \quad (2.6)$$

$$n_2^{(h)} = \frac{Z_2^{(h)}}{Z_0^{(h)}}. \quad (2.7)$$

По методу наложения возможно рассмотреть схему на рисунке 2.3 как суперпозицию двух схем на рисунке 2.4 а и рисунке 2.4 б:

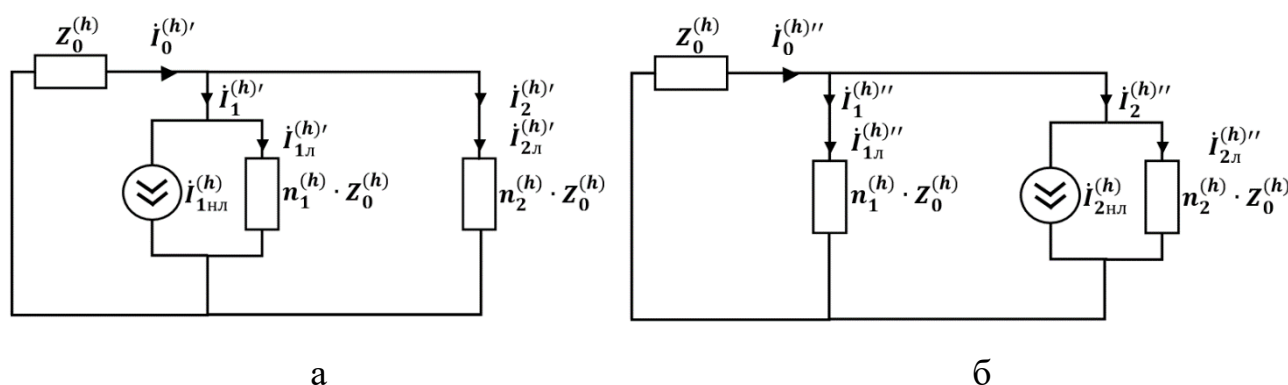


Рисунок 2.4 – Схемы замещения по методу наложения: а – с источником высших гармоник первого потребителя; б – с источником высших гармоник второго потребителя

Обе схемы представляют собой источник с тремя параллельными комплексными сопротивлениями. Для удобства дальнейших расчетов определим значения следующих эквивалентных сопротивлений, структура которых указана на рисунке 2.5:



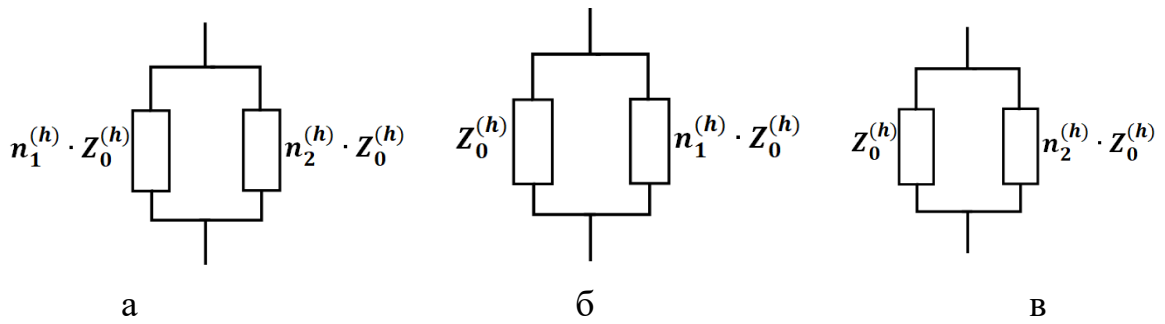


Рисунок 2.5 – Эквивалентное сопротивление а –  $Z_{123}^{(h)}$ ; б –  $Z_{013}^{(h)}$ ; в –  $Z_{023}^{(h)}$

Величину эквивалентного сопротивления  $Z_{123}^{(h)}$ , представляющего собой параллельное сопротивление сопротивлений  $Z_1^{(h)}$  и  $Z_2^{(h)}$ , можно рассчитать по формуле (2.8), величину эквивалентного сопротивления  $Z_{013}^{(h)}$  – по формуле (2.9), величину эквивалентного сопротивления  $Z_{023}^{(h)}$  – по формуле (2.10).

$$Z_{123}^{(h)} = \frac{n_1^{(h)} \cdot Z_0^{(h)} \cdot n_2^{(h)} \cdot Z_0^{(h)}}{n_1^{(h)} \cdot Z_0^{(h)} + n_2^{(h)} \cdot Z_0^{(h)}} = \frac{n_1^{(h)} \cdot n_2^{(h)}}{n_1^{(h)} + n_2^{(h)}} Z_0^{(h)}, \quad (2.8)$$

$$Z_{013}^{(h)} = \frac{Z_0^{(h)} \cdot n_1^{(h)} \cdot Z_0^{(h)}}{Z_0^{(h)} + n_1^{(h)} \cdot Z_0^{(h)}} = \frac{n_1^{(h)}}{n_1^{(h)} + 1} Z_0^{(h)}, \quad (2.9)$$

$$Z_{023}^{(h)} = \frac{Z_0^{(h)} \cdot n_2^{(h)} \cdot Z_0^{(h)}}{Z_0^{(h)} + n_2^{(h)} \cdot Z_0^{(h)}} = \frac{n_2^{(h)}}{n_2^{(h)} + 1} Z_0^{(h)}. \quad (2.10)$$

Для расчета токов, обозначенных на рисунке 2.4 а, целесообразно рассмотреть упрощенную схему замещения, представленную на рисунке 2.6.

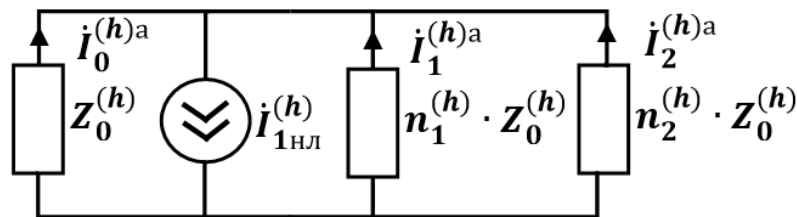


Рисунок 2.6 – Упрощение схемы замещения, представленной на рисунке 2.4 а

Токи упрощенной схемы, отображенной на рисунке 2.6, вызванные источником токов высших гармоник  $i_{1\text{нл}}^{(h)}$ , рассчитываются согласно следующим выражениям: ток  $i_0^{(h)a}$ , протекающий через сопротивление  $Z_0^{(h)}$ , – по формуле (2.11), ток  $i_1^{(h)a}$ , протекающий через сопротивление  $Z_1^{(h)}$ , – по формуле (2.12), ток  $i_2^{(h)a}$ , протекающий через сопротивление  $Z_2^{(h)}$ , – по формуле (2.13).

$$\begin{aligned}
i_0^{(h)a} &= i_{1\text{НЛ}}^{(h)} \cdot \frac{Z_{12\text{Э}}^{(h)}}{Z_{12\text{Э}}^{(h)} + Z_0^{(h)}} = i_{1\text{НЛ}}^{(h)} \cdot \frac{\frac{n_1^{(h)} \cdot n_2^{(h)}}{n_1^{(h)} + n_2^{(h)}} Z_0^{(h)}}{\frac{n_1^{(h)} \cdot n_2^{(h)}}{n_1^{(h)} + n_2^{(h)}} Z_0^{(h)} + Z_0^{(h)}} = \\
&= i_{1\text{НЛ}}^{(h)} \cdot \frac{n_1^{(h)} \cdot n_2^{(h)} \cdot Z_0^{(h)} \cdot (n_1^{(h)} + n_2^{(h)})}{(n_1^{(h)} + n_2^{(h)}) \cdot Z_0^{(h)} \cdot (n_1^{(h)} \cdot n_2^{(h)} + n_1^{(h)} + n_2^{(h)})} = \frac{n_1^{(h)} \cdot n_2^{(h)}}{n_1^{(h)} \cdot n_2^{(h)} + n_1^{(h)} + n_2^{(h)}} \cdot i_{1\text{НЛ}}^{(h)}, \quad (2.11)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
i_1^{(h)a} &= i_{1\text{НЛ}}^{(h)} \cdot \frac{Z_{02\text{Э}}^{(h)}}{Z_{02\text{Э}}^{(h)} + n_1^{(h)} \cdot Z_0^{(h)}} = i_{1\text{НЛ}}^{(h)} \cdot \frac{\frac{n_2^{(h)}}{n_1^{(h)} + n_2^{(h)}} Z_0^{(h)}}{\frac{n_2^{(h)}}{n_1^{(h)} + n_2^{(h)}} Z_0^{(h)} + n_1^{(h)} \cdot Z_0^{(h)}} = \\
&= i_{1\text{НЛ}}^{(h)} \cdot \frac{n_2^{(h)} \cdot Z_0^{(h)} \cdot (1 + n_2^{(h)})}{(1 + n_2^{(h)}) \cdot Z_0^{(h)} \cdot (n_1^{(h)} \cdot n_2^{(h)} + n_1^{(h)} + n_2^{(h)})} = \frac{n_2^{(h)}}{n_1^{(h)} \cdot n_2^{(h)} + n_1^{(h)} + n_2^{(h)}} \cdot i_{1\text{НЛ}}^{(h)}, \quad (2.12)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
i_2^{(h)a} &= i_{1\text{НЛ}}^{(h)} \cdot \frac{Z_{01\text{Э}}^{(h)}}{Z_{01\text{Э}}^{(h)} + n_2^{(h)} \cdot Z_0^{(h)}} = i_{1\text{НЛ}}^{(h)} \cdot \frac{\frac{n_1^{(h)}}{n_1^{(h)} + n_2^{(h)}} Z_0^{(h)}}{\frac{n_1^{(h)}}{n_1^{(h)} + n_2^{(h)}} Z_0^{(h)} + n_2^{(h)} \cdot Z_0^{(h)}} = \\
&= i_{1\text{НЛ}}^{(h)} \cdot \frac{n_1^{(h)} \cdot Z_0^{(h)} \cdot (1 + n_1^{(h)})}{(1 + n_1^{(h)}) \cdot Z_0^{(h)} \cdot (n_1^{(h)} \cdot n_2^{(h)} + n_1^{(h)} + n_2^{(h)})} = \frac{n_1^{(h)}}{n_1^{(h)} \cdot n_2^{(h)} + n_1^{(h)} + n_2^{(h)}} \cdot i_{1\text{НЛ}}^{(h)}. \quad (2.13)
\end{aligned}$$

Сопоставив токи, обозначенные на рисунке 2.4 а, и результаты расчетов токов согласно формулам (2.11) - (2.13), можно записать выражения для токов схемы рисунка 2.4 а, вызванных источником токов высших гармоник  $i_{1\text{НЛ}}^{(h)}$ . Ток  $i_0^{(h)'}$ , протекающий через сопротивление  $Z_0^{(h)}$ , определяется по формуле (2.14), ток  $i_{1\text{Л}}^{(h)'}$ , протекающий через сопротивление  $Z_1^{(h)}$ , – по формуле (2.15), ток  $i_1^{(h)'}$ , потребляемый линейной и нелинейной составляющей первого потребителя, – по формуле (2.16), ток  $i_{2\text{Л}}^{(h)'}$ , протекающий через сопротивление  $Z_2^{(h)}$  – по формуле (2.17), ток  $i_2^{(h)'}$ , потребляемый линейной и нелинейной составляющей второго потребителя, – по формуле (2.18).

$$i_0^{(h)'} = i_0^{(h)a} = \frac{n_1^{(h)} \cdot n_2^{(h)}}{n_1^{(h)} \cdot n_2^{(h)} + n_1^{(h)} + n_2^{(h)}} \cdot i_{1\text{НЛ}}^{(h)}, \quad (2.14)$$

$$i_{1\text{Л}}^{(h)'} = -i_1^{(h)a} = -\frac{n_2^{(h)}}{n_1^{(h)} \cdot n_2^{(h)} + n_1^{(h)} + n_2^{(h)}} \cdot i_{1\text{НЛ}}^{(h)}, \quad (2.15)$$

$$i_1^{(h)'} = i_{1\text{Л}}^{(h)'} + i_{1\text{НЛ}}^{(h)} = -i_1^{(h)a} + i_{1\text{НЛ}}^{(h)} = -\frac{n_2^{(h)}}{n_1^{(h)} \cdot n_2^{(h)} + n_1^{(h)} + n_2^{(h)}} \cdot i_{1\text{НЛ}}^{(h)} + i_{1\text{НЛ}}^{(h)} =$$

$$= \frac{n_1^{(h)} + n_1^{(h)} \cdot n_2^{(h)}}{n_1^{(h)} \cdot n_2^{(h)} + n_1^{(h)} + n_2^{(h)}} \cdot i_{1\text{НЛ}}^{(h)}, \quad (2.16)$$

$$i_{2\text{Л}}^{(h)'} = -i_2^{(h)\text{а}} = -\frac{n_1^{(h)}}{n_1^{(h)} \cdot n_2^{(h)} + n_1^{(h)} + n_2^{(h)}} \cdot i_{1\text{НЛ}}^{(h)}, \quad (2.17)$$

$$i_2^{(h)'} = i_{2\text{Л}}^{(h)'} = -\frac{n_1^{(h)}}{n_1^{(h)} \cdot n_2^{(h)} + n_1^{(h)} + n_2^{(h)}} \cdot i_{1\text{НЛ}}^{(h)}. \quad (2.18)$$

Далее, рассмотрим схему на рисунке 2.4 б, учитывающую влияние источника тока  $i_{2\text{НЛ}}^{(h)}$ . Аналогично, рассмотрим упрощенную схему замещения, представленную на рисунке 2.7.

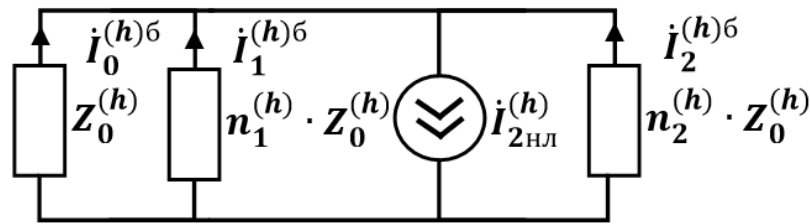


Рисунок 2.7 – Упрощение схемы замещения, представленной на рисунке 2.4 б

Токи упрощенной схемы рисунка 2.7, вызванные источником токов высших гармоник  $i_{2\text{НЛ}}^{(h)}$ , рассчитываются согласно следующим выражениям: ток  $i_0^{(h)б}$ , протекающий через сопротивление  $Z_0^{(h)}$ , – по формуле (2.19), ток  $i_1^{(h)б}$ , протекающий через сопротивление  $Z_1^{(h)}$ , – по формуле (2.20), ток  $i_2^{(h)б}$ , протекающий через сопротивление  $Z_2^{(h)}$ , – по формуле (2.21).

$$i_0^{(h)б} = i_{2\text{НЛ}}^{(h)} \cdot \frac{Z_{12\text{Э}}^{(h)}}{Z_{12\text{Э}}^{(h)} + Z_0^{(h)}} = \frac{n_1^{(h)} \cdot n_2^{(h)}}{n_1^{(h)} \cdot n_2^{(h)} + n_1^{(h)} + n_2^{(h)}} \cdot i_{2\text{НЛ}}^{(h)}, \quad (2.19)$$

$$i_1^{(h)б} = i_{2\text{НЛ}}^{(h)} \cdot \frac{Z_{02\text{Э}}^{(h)}}{Z_{02\text{Э}}^{(h)} + n_1^{(h)} \cdot Z_0^{(h)}} = \frac{n_2^{(h)}}{n_1^{(h)} \cdot n_2^{(h)} + n_1^{(h)} + n_2^{(h)}} \cdot i_{2\text{НЛ}}^{(h)}, \quad (2.20)$$

$$i_2^{(h)б} = i_{2\text{НЛ}}^{(h)} \cdot \frac{Z_{01\text{Э}}^{(h)}}{Z_{01\text{Э}}^{(h)} + n_2^{(h)} \cdot Z_0^{(h)}} = \frac{n_1^{(h)}}{n_1^{(h)} \cdot n_2^{(h)} + n_1^{(h)} + n_2^{(h)}} \cdot i_{2\text{НЛ}}^{(h)}. \quad (2.21)$$

Сопоставив токи, обозначенные на рисунке 2.4(б), и результаты расчетов токов согласно формулам (2.19) - (2.21), можно записать выражения для токов схемы рисунка 2.4(б), вызванных источником токов высших гармоник  $i_{2\text{НЛ}}^{(h)}$ . Ток  $i_0^{(h)''}$ , протекающий через сопротивление  $Z_0^{(h)}$ , определяется по формуле (2.22), ток  $i_{1\text{Л}}^{(h)''}$ , протекающий через сопротивление  $Z_1^{(h)}$ , – по формуле (2.23), ток  $i_1^{(h)''}$ ,

потребляемый линейной и нелинейной составляющей первого потребителя, – по формуле (2.24), ток  $i_{2л}^{(h)''}$ , протекающий через сопротивление  $Z_2^{(h)}$  – по формуле (2.25), ток  $i_2^{(h)''}$ , потребляемый линейной и нелинейной составляющей второго потребителя, – по формуле (2.26).

$$i_0^{(h)''} = i_0^{(h)б} = \frac{n_1^{(h)} \cdot n_2^{(h)}}{n_1^{(h)} \cdot n_2^{(h)} + n_1^{(h)} + n_2^{(h)}} \cdot i_{2нл}^{(h)}, \quad (2.22)$$

$$i_{1л}^{(h)''} = -i_1^{(h)б} = -\frac{n_2^{(h)}}{n_1^{(h)} \cdot n_2^{(h)} + n_1^{(h)} + n_2^{(h)}} \cdot i_{2нл}^{(h)}, \quad (2.23)$$

$$i_1^{(h)''} = i_{1л}^{(h)''} = -\frac{n_2^{(h)}}{n_1^{(h)} \cdot n_2^{(h)} + n_1^{(h)} + n_2^{(h)}} \cdot i_{2нл}^{(h)}, \quad (2.24)$$

$$i_{2л}^{(h)''} = -i_2^{(h)б} = -\frac{n_1^{(h)}}{n_1^{(h)} \cdot n_2^{(h)} + n_1^{(h)} + n_2^{(h)}} \cdot i_{2нл}^{(h)}, \quad (2.25)$$

$$\begin{aligned} i_2^{(h)''} &= i_{2л}^{(h)''} + i_{2нл}^{(h)} = -i_2^{(h)б} + i_{2нл}^{(h)} = -\frac{n_1^{(h)}}{n_1^{(h)} \cdot n_2^{(h)} + n_1^{(h)} + n_2^{(h)}} \cdot i_{2нл}^{(h)} + i_{2нл}^{(h)} = \\ &= \frac{n_2^{(h)} + n_1^{(h)} \cdot n_2^{(h)}}{n_1^{(h)} \cdot n_2^{(h)} + n_1^{(h)} + n_2^{(h)}} \cdot i_{2нл}^{(h)}. \end{aligned} \quad (2.26)$$

Таким образом, токи в системе на рисунке 2.3 б принимают следующие значения (2.27)-(2.29):

$$\begin{aligned} i_0^{(h)} &= i_0^{(h)'} + i_0^{(h)''} = \frac{n_1^{(h)} \cdot n_2^{(h)}}{n_1^{(h)} \cdot n_2^{(h)} + n_1^{(h)} + n_2^{(h)}} \cdot i_{1нл}^{(h)} + \frac{n_1^{(h)} \cdot n_2^{(h)}}{n_1^{(h)} \cdot n_2^{(h)} + n_1^{(h)} + n_2^{(h)}} \cdot i_{2нл}^{(h)} = \\ &= \frac{n_1^{(h)} \cdot n_2^{(h)}}{n_1^{(h)} \cdot n_2^{(h)} + n_1^{(h)} + n_2^{(h)}} \cdot (i_{1нл}^{(h)} + i_{2нл}^{(h)}); \end{aligned} \quad (2.27)$$

$$i_1^{(h)} = i_1^{(h)'} + i_1^{(h)''} = \frac{n_1^{(h)} + n_1^{(h)} \cdot n_2^{(h)}}{n_1^{(h)} \cdot n_2^{(h)} + n_1^{(h)} + n_2^{(h)}} \cdot i_{1нл}^{(h)} - \frac{n_2^{(h)}}{n_1^{(h)} \cdot n_2^{(h)} + n_1^{(h)} + n_2^{(h)}} \cdot i_{2нл}^{(h)}; \quad (2.28)$$

$$i_2^{(h)} = i_2^{(h)'} + i_2^{(h)''} = -\frac{n_1^{(h)}}{n_1^{(h)} \cdot n_2^{(h)} + n_1^{(h)} + n_2^{(h)}} \cdot i_{1нл}^{(h)} + \frac{n_2^{(h)} + n_1^{(h)} \cdot n_2^{(h)}}{n_1^{(h)} \cdot n_2^{(h)} + n_1^{(h)} + n_2^{(h)}} \cdot i_{2нл}^{(h)}. \quad (2.29)$$

Видно, что токи потребителей  $i_1^{(h)}$ ,  $i_2^{(h)}$  состоят как из тока высших гармоник, генерируемых на самом предприятии, так и из тока высших гармоник другого предприятия. Обозначим коэффициент пропорциональности  $C$  (2.30), показывающий соотношение между токами высших гармоник, генерируемыми потребителями  $i_{1нл}^{(h)}$ ,  $i_{2нл}^{(h)}$  и током СЭС  $i_0^{(h)}$ :

$$C = \frac{n_1^{(h)} \cdot n_2^{(h)}}{n_1^{(h)} + n_2^{(h)} + n_1^{(h)} \cdot n_2^{(h)}}. \quad (2.30)$$

Токи высших гармоник от других предприятий протекают в линиях потребителей пропорционально коэффициентам  $A$  (2.31) и  $B$  (2.32), которые непосредственно зависят от параметров потребителей относительно комплексного сопротивления СЭС:

$$A = \frac{n_1^{(h)}}{n_1^{(h)} + n_2^{(h)} + n_1^{(h)} \cdot n_2^{(h)}}; \quad (2.31)$$

$$B = \frac{n_2^{(h)}}{n_1^{(h)} + n_2^{(h)} + n_1^{(h)} \cdot n_2^{(h)}}. \quad (2.32)$$

Тогда, при решении системы, соответствующей схеме, представленной на рисунке 2.3 б методом наложения, токи потребителей  $i_1^{(h)}$ ,  $i_2^{(h)}$  и общий ток  $i_0^{(h)}$  описываются выражениями (2.33)-(2.35):

$$i_1^{(h)} = C \cdot i_{1\text{нл}}^{(h)} + (A \cdot i_{1\text{нл}}^{(h)} - B \cdot i_{2\text{нл}}^{(h)}); \quad (2.33)$$

$$i_2^{(h)} = C \cdot i_{2\text{нл}}^{(h)} + (-A \cdot i_{1\text{нл}}^{(h)} + B \cdot i_{2\text{нл}}^{(h)}); \quad (2.34)$$

$$i_0^{(h)} = C \cdot (i_{1\text{нл}}^{(h)} + i_{2\text{нл}}^{(h)}). \quad (2.35)$$

На основании этих выражений могут быть сделаны следующие выводы. Вклад потребителя, характеризующийся коэффициентом  $K_{D1}^{(h)}$ , напрямую зависит от  $i_1^{(h)}$ . В свою очередь,  $i_1^{(h)}$  зависит и от  $i_{1\text{нл}}^{(h)}$ , и от  $i_{2\text{нл}}^{(h)}$ , а это означает, что второй потребитель влияет на вклад первого. Однако, это влияние может быть оценено коэффициентом  $B$ , который в  $n_1^{(h)}$  раз меньше, чем  $C$ . Очевидно, что в жестких СЭС, где, как правило, на сопротивлении СЭС  $Z_0^{(1)}$  наблюдается потеря напряжения не более 5%, влияние второго потребителя на вклад первого пренебрежимо мало и уменьшается с ростом частоты. Аналогичные рассуждения можно провести относительно влияния первого потребителя на  $K_{D2}^{(h)}$ . Также выводы для систем с тремя и более потребителями могут быть проведены таким же образом.

В результате, для рассматриваемых условий предложенный метод и коэффициент вклада  $j$ -ого потребителя  $K_D^{(h)}$  позволяют оценить вклады потребителей, включающих в себя как линейную, так и нелинейную нагрузку.

### 2.2.2 Сопротивление линии от ТОП до потребителей

Следующий параметр, который может оказывать влияние на результаты расчетов, – это сопротивление линий, соединяющих потребителей с ТОП. Возможно рассмотреть схему замещения, учитывающую эти величины (рисунок 2.8).

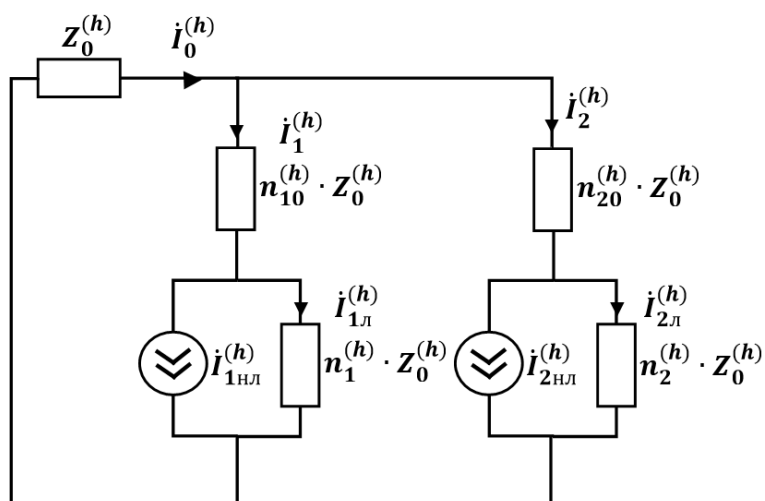


Рисунок 2.8 – Схема замещения для оценки точности расчетов с сопротивлением линии от ТОП до потребителей

Аналогично коэффициентам  $n_1^{(h)}$  и  $n_2^{(h)}$ , были введены коэффициенты  $n_{10}^{(h)}$  (2.36) и  $n_{20}^{(h)}$  (2.37), показывающие соотношения комплексных сопротивлений линий  $Z_{10}^{(h)}$  и  $Z_{20}^{(h)}$  к сопротивлению СЭС  $Z_0^{(h)}$ :

$$n_{10}^{(h)} = \frac{Z_{10}^{(h)}}{Z_0^{(h)}}; \quad (2.36)$$

$$n_{20}^{(h)} = \frac{Z_{20}^{(h)}}{Z_0^{(h)}}. \quad (2.37)$$

Указанные коэффициенты также являются комплексными величинами.

Как и в разделе 2.2.1, возможно рассмотреть схему на рисунке 2.8 как суперпозицию двух схем на рисунке 2.9 а и на рисунке 2.9 б по методу наложения.

Для удобства дальнейших расчетов определим значения эквивалентных сопротивлений, структура которых указана на рисунке 2.10.

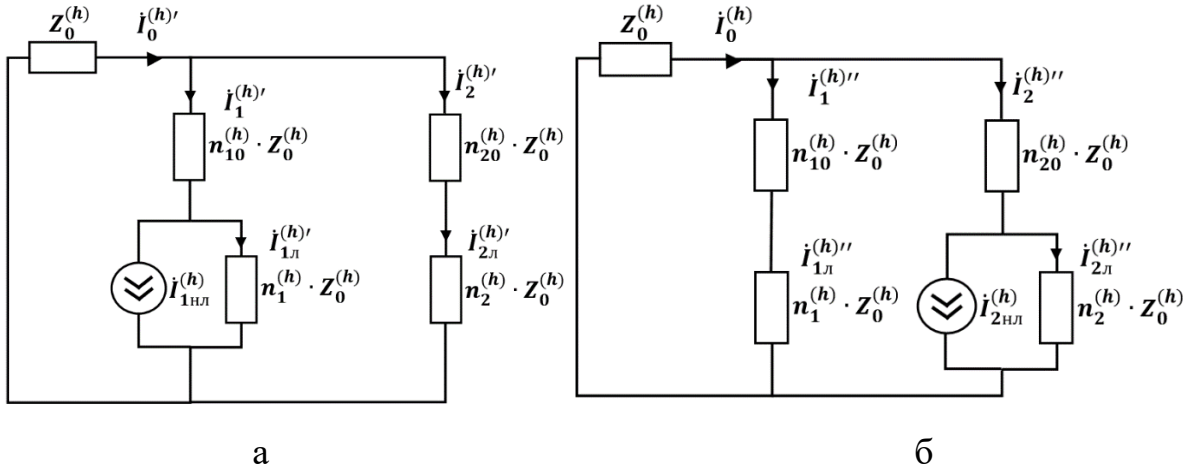


Рисунок 2.9 – Схемы замещения для оценки точности расчетов с сопротивлением от ТОП до потребителей по методу наложения: а – для источника  $i_{1\text{нл}}^{(h)}$ ; б – для источника  $i_{2\text{нл}}^{(h)}$

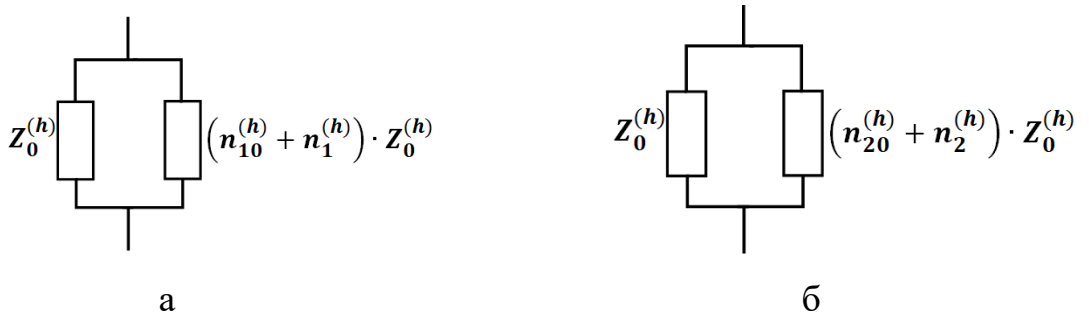


Рисунок 2.10 – Эквивалентное сопротивление: а –  $Z_{01013}^{(h)}$ ; б –  $Z_{02023}^{(h)}$

Величину эквивалентного сопротивления  $Z_{01013}^{(h)}$ , представляющего собой параллельное сопротивление сопротивлений  $Z_0^{(h)}$  и последовательно соединенных  $Z_{10}^{(h)}$  и  $Z_1^{(h)}$ , можно рассчитать по формуле (2.38), величину эквивалентного сопротивления  $Z_{02023}^{(h)}$  – по формуле (2.39).

$$Z_{01013}^{(h)} = \frac{Z_0^{(h)} \cdot (n_{10}^{(h)} + n_1^{(h)}) \cdot Z_0^{(h)}}{Z_0^{(h)} + (n_{10}^{(h)} + n_1^{(h)}) \cdot Z_0^{(h)}} = \frac{n_{10}^{(h)} + n_1^{(h)}}{n_{10}^{(h)} + n_1^{(h)} + 1} Z_0^{(h)}, \quad (2.38)$$

$$Z_{0202Э}^{(h)} = \frac{Z_0^{(h)} \cdot (n_{20}^{(h)} + n_2^{(h)}) \cdot Z_0^{(h)}}{Z_0^{(h)} + (n_{20}^{(h)} + n_2^{(h)}) \cdot Z_0^{(h)}} = \frac{n_{20}^{(h)} + n_2^{(h)}}{n_{20}^{(h)} + n_2^{(h)} + 1} Z_0^{(h)}. \quad (2.39)$$

Для расчета токов, обозначенных на рисунке 2.9 а, рассмотрим упрощенную схему замещения, представленную на рисунке 2.11.

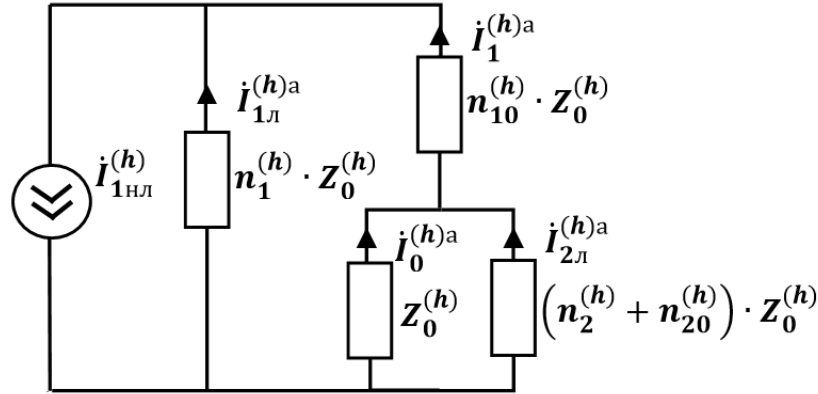


Рисунок 2.11 – Упрощение схемы замещения, представленной на рисунке 2.9 а

Токи упрощенной схемы рисунка 2.11, вызванные источником токов высших гармоник  $i_{1НЛ}^{(h)}$ , рассчитываются согласно следующим выражениям: ток  $i_{1Л}^{(h)а}$ , протекающий через сопротивление  $Z_1^{(h)}$ , – по формуле (2.40); ток  $i_1^{(h)а}$ , протекающий через сопротивление  $Z_{10}^{(h)}$ , – по формуле (2.41); ток  $i_0^{(h)а}$ , протекающий через сопротивление  $Z_0^{(h)}$ , – по формуле (2.42), ток  $i_{2Л}^{(h)а}$ , протекающий через сопротивление  $Z_2^{(h)}$  и  $Z_{20}^{(h)}$ , – по формуле (2.43).

$$\begin{aligned} i_{1Л}^{(h)а} &= i_{1НЛ}^{(h)} \cdot \frac{Z_{10}^{(h)} + Z_{0202Э}^{(h)}}{Z_1^{(h)} + Z_{10}^{(h)} + Z_{0202Э}^{(h)}} = i_{1НЛ}^{(h)} \cdot \frac{n_{10}^{(h)} \cdot Z_0^{(h)} + \frac{n_{20}^{(h)} + n_2^{(h)}}{n_{20}^{(h)} + n_2^{(h)} + 1} Z_0^{(h)}}{n_1^{(h)} \cdot Z_0^{(h)} + n_{10}^{(h)} \cdot Z_0^{(h)} + \frac{n_{20}^{(h)} + n_2^{(h)}}{n_{20}^{(h)} + n_2^{(h)} + 1} Z_0^{(h)}} = \\ &= \frac{n_{10}^{(h)} \cdot (n_{20}^{(h)} + n_2^{(h)} + 1) + n_{20}^{(h)} + n_2^{(h)}}{(n_{10}^{(h)} + n_1^{(h)}) \cdot (n_{20}^{(h)} + n_2^{(h)} + 1) + n_{20}^{(h)} + n_2^{(h)}} \cdot i_{1НЛ}^{(h)}, \end{aligned} \quad (2.40)$$

$$\begin{aligned} i_1^{(h)а} &= i_{1НЛ}^{(h)} \cdot \frac{Z_1^{(h)}}{Z_1^{(h)} + Z_{10}^{(h)} + Z_{0202Э}^{(h)}} = i_{1НЛ}^{(h)} \cdot \frac{n_1^{(h)} \cdot Z_0^{(h)}}{n_1^{(h)} \cdot Z_0^{(h)} + n_{10}^{(h)} \cdot Z_0^{(h)} + \frac{n_{20}^{(h)} + n_2^{(h)}}{n_{20}^{(h)} + n_2^{(h)} + 1} Z_0^{(h)}} = \\ &= \frac{n_1^{(h)} \cdot (n_{20}^{(h)} + n_2^{(h)} + 1)}{(n_{10}^{(h)} + n_1^{(h)}) \cdot (n_{20}^{(h)} + n_2^{(h)} + 1) + n_{20}^{(h)} + n_2^{(h)}} \cdot i_{1НЛ}^{(h)}, \end{aligned} \quad (2.41)$$

$$i_0^{(h)а} = i_1^{(h)а} \cdot \frac{(n_{20}^{(h)} + n_2^{(h)}) Z_0^{(h)}}{(n_{20}^{(h)} + n_2^{(h)}) Z_0^{(h)} + Z_0^{(h)}} = \frac{n_1^{(h)} (n_{20}^{(h)} + n_2^{(h)})}{(n_{10}^{(h)} + n_1^{(h)}) \cdot (n_{20}^{(h)} + n_2^{(h)} + 1) + n_{20}^{(h)} + n_2^{(h)}} \cdot i_{1НЛ}^{(h)}, \quad (2.42)$$



$$i_{2л}^{(h)a} = i_1^{(h)a} \cdot \frac{Z_0^{(h)}}{(n_{20}^{(h)} + n_2^{(h)})Z_0^{(h)} + Z_0^{(h)}} = \frac{n_1^{(h)}}{(n_{10}^{(h)} + n_1^{(h)}) \cdot (n_{20}^{(h)} + n_2^{(h)} + 1) + n_{20}^{(h)} + n_2^{(h)}} \cdot i_{1нл}^{(h)}. \quad (2.43)$$

Сопоставив токи, обозначенные на рисунке 2.9 а, и результаты расчетов токов согласно формулам (2.41) - (2.43), можно записать выражения для токов схемы рисунка 2.9 а, вызванных источником токов высших гармоник  $i_{1нл}^{(h)}$ . Ток  $i_0^{(h)'}$ , протекающий через сопротивление  $Z_0^{(h)}$ , определяется по формуле (2.44), ток  $i_{1л}^{(h)'}$ , протекающий через сопротивление  $Z_1^{(h)}$ , – по формуле (2.45), ток  $i_1^{(h)'}$ , потребляемый линейной и нелинейной составляющей первого потребителя, – по формуле (2.46), ток  $i_{2л}^{(h)'}$ , протекающий через сопротивление  $Z_2^{(h)}$  – по формуле (2.47), ток  $i_2^{(h)'}$ , потребляемый линейной и нелинейной составляющей второго потребителя, – по формуле (2.48).

$$i_0^{(h)'} = i_0^{(h)a} = \frac{n_1^{(h)}(n_{20}^{(h)} + n_2^{(h)})}{(n_{10}^{(h)} + n_1^{(h)}) \cdot (n_{20}^{(h)} + n_2^{(h)} + 1) + n_{20}^{(h)} + n_2^{(h)}} \cdot i_{1нл}^{(h)}, \quad (2.44)$$

$$i_{1л}^{(h)'} = -i_1^{(h)a} = -\frac{n_{10}^{(h)} \cdot (n_{20}^{(h)} + n_2^{(h)} + 1) + n_{20}^{(h)} + n_2^{(h)}}{(n_{10}^{(h)} + n_1^{(h)}) \cdot (n_{20}^{(h)} + n_2^{(h)} + 1) + n_{20}^{(h)} + n_2^{(h)}} \cdot i_{1нл}^{(h)}, \quad (2.45)$$

$$i_1^{(h)'} = i_1^{(h)a} = \frac{n_1^{(h)} \cdot (n_{20}^{(h)} + n_2^{(h)} + 1)}{(n_{10}^{(h)} + n_1^{(h)}) \cdot (n_{20}^{(h)} + n_2^{(h)} + 1) + n_{20}^{(h)} + n_2^{(h)}} \cdot i_{1нл}^{(h)}, \quad (2.46)$$

$$i_{2л}^{(h)'} = -i_2^{(h)a} = -\frac{n_1^{(h)}}{(n_{10}^{(h)} + n_1^{(h)}) \cdot (n_{20}^{(h)} + n_2^{(h)} + 1) + n_{20}^{(h)} + n_2^{(h)}} \cdot i_{1нл}^{(h)}, \quad (2.47)$$

$$i_2^{(h)'} = -i_{2л}^{(h)a} = -\frac{n_1^{(h)}}{(n_{10}^{(h)} + n_1^{(h)}) \cdot (n_{20}^{(h)} + n_2^{(h)} + 1) + n_{20}^{(h)} + n_2^{(h)}} \cdot i_{1нл}^{(h)}. \quad (2.48)$$

Далее, рассмотрим схему на рисунке 2.9 б, учитывающую влияние источника тока  $i_{2нл}^{(h)}$ . Аналогично, рассмотрим упрощенную схему замещения, представленную на рисунке 2.12.

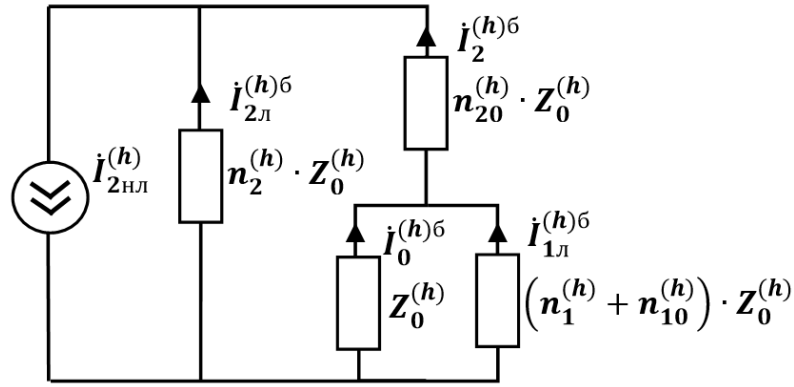


Рисунок 2.12 – Упрощение схемы замещения, представленной на рисунке 2.9 б

Токи упрощенной схемы на рисунке 2.12, вызванные источником токов высших гармоник  $i_{2НЛ}^{(h)}$ , рассчитываются согласно следующим выражениям: ток  $i_{2Л}^{(h)б}$ , протекающий через сопротивление  $Z_2^{(h)}$ , – по формуле (2.49), ток  $i_2^{(h)б}$ , протекающий через сопротивление  $Z_{20}^{(h)}$ , – по формуле (2.50), ток  $i_0^{(h)б}$ , протекающий через сопротивление  $Z_0^{(h)}$ , – по формуле (2.51), ток  $i_{1Л}^{(h)б}$ , протекающий через сопротивления  $Z_1^{(h)}$  и  $Z_{10}^{(h)}$ , – по формуле (2.52).

$$\begin{aligned} i_{2Л}^{(h)б} &= i_{2НЛ}^{(h)} \cdot \frac{Z_{20}^{(h)} + Z_{01013}^{(h)}}{Z_2^{(h)} + Z_{20}^{(h)} + Z_{01013}^{(h)}} = i_{2НЛ}^{(h)} \cdot \frac{n_{20}^{(h)} \cdot Z_0^{(h)} + \frac{n_{10}^{(h)} + n_1^{(h)}}{n_{10}^{(h)} + n_1^{(h)} + 1} Z_0^{(h)}}{n_2^{(h)} \cdot Z_0^{(h)} + n_{20}^{(h)} \cdot Z_0^{(h)} + \frac{n_{10}^{(h)} + n_1^{(h)}}{n_{10}^{(h)} + n_1^{(h)} + 1} Z_0^{(h)}} = \\ &= \frac{n_{20}^{(h)} \cdot (n_{10}^{(h)} + n_1^{(h)} + 1) + n_{10}^{(h)} + n_1^{(h)}}{(n_{20}^{(h)} + n_2^{(h)}) \cdot (n_{10}^{(h)} + n_1^{(h)} + 1) + n_{10}^{(h)} + n_1^{(h)}} \cdot i_{2НЛ}^{(h)}, \end{aligned} \quad (2.49)$$

$$\begin{aligned} i_2^{(h)б} &= i_{2НЛ}^{(h)} \cdot \frac{Z_2^{(h)}}{Z_2^{(h)} + Z_{20}^{(h)} + Z_{01013}^{(h)}} = i_{2НЛ}^{(h)} \cdot \frac{n_2^{(h)} \cdot Z_0^{(h)}}{n_2^{(h)} \cdot Z_0^{(h)} + n_{20}^{(h)} \cdot Z_0^{(h)} + \frac{n_{10}^{(h)} + n_1^{(h)}}{n_{10}^{(h)} + n_1^{(h)} + 1} Z_0^{(h)}} = \\ &= \frac{n_2^{(h)} \cdot (n_{10}^{(h)} + n_1^{(h)} + 1)}{(n_{20}^{(h)} + n_2^{(h)}) \cdot (n_{10}^{(h)} + n_1^{(h)} + 1) + n_{10}^{(h)} + n_1^{(h)}} \cdot i_{2НЛ}^{(h)}, \end{aligned} \quad (2.50)$$

$$i_0^{(h)б} = i_2^{(h)б} \cdot \frac{(n_{10}^{(h)} + n_1^{(h)}) Z_0^{(h)}}{(n_{10}^{(h)} + n_1^{(h)}) Z_0^{(h)} + Z_0^{(h)}} = \frac{n_2^{(h)} (n_{10}^{(h)} + n_1^{(h)})}{(n_{20}^{(h)} + n_2^{(h)}) \cdot (n_{10}^{(h)} + n_1^{(h)} + 1) + n_{10}^{(h)} + n_1^{(h)}} \cdot i_{2НЛ}^{(h)}, \quad (2.51)$$

$$i_{1Л}^{(h)б} = i_2^{(h)б} \cdot \frac{Z_0^{(h)}}{(n_{10}^{(h)} + n_1^{(h)}) Z_0^{(h)} + Z_0^{(h)}} = \frac{n_2^{(h)}}{(n_{20}^{(h)} + n_2^{(h)}) \cdot (n_{10}^{(h)} + n_1^{(h)} + 1) + n_{10}^{(h)} + n_1^{(h)}} \cdot i_{2НЛ}^{(h)}. \quad (2.52)$$

Сопоставив токи, обозначенные на рисунке 2.9 б, и результаты расчетов токов согласно формулам (2.49) - (2.52), можно записать выражения для токов

схемы рисунка 2.9 б, вызванных источником токов высших гармоник  $i_{2\text{НЛ}}^{(h)}$ . Ток  $i_0^{(h)''}$ , протекающий через сопротивление  $Z_0^{(h)}$ , определяется по формуле (2.53), ток  $i_{1\text{Л}}^{(h)''}$ , протекающий через сопротивление  $Z_1^{(h)}$ , – по формуле (2.54), ток  $i_1^{(h)''}$ , потребляемый линейной и нелинейной составляющей первого потребителя, – по формуле (2.55), ток  $i_{2\text{Л}}^{(h)''}$ , протекающий через сопротивление  $Z_2^{(h)}$  – по формуле (2.56), ток  $i_2^{(h)''}$ , потребляемый линейной и нелинейной составляющей второго потребителя, – по формуле (2.57).

$$i_0^{(h)''} = i_0^{(h)\delta} = \frac{n_2^{(h)}(n_{10}^{(h)} + n_1^{(h)})}{(n_{20}^{(h)} + n_2^{(h)}) \cdot (n_{10}^{(h)} + n_1^{(h)} + 1) + n_{10}^{(h)} + n_1^{(h)}} \cdot i_{2\text{НЛ}}^{(h)}, \quad (2.53)$$

$$i_{1\text{Л}}^{(h)'} = -i_{1\text{Л}}^{(h)\delta} = -\frac{n_2^{(h)}}{(n_{20}^{(h)} + n_2^{(h)}) \cdot (n_{10}^{(h)} + n_1^{(h)} + 1) + n_{10}^{(h)} + n_1^{(h)}} \cdot i_{2\text{НЛ}}^{(h)}, \quad (2.54)$$

$$i_1^{(h)''} = -i_1^{(h)\delta} = -\frac{n_2^{(h)}}{(n_{20}^{(h)} + n_2^{(h)}) \cdot (n_{10}^{(h)} + n_1^{(h)} + 1) + n_{10}^{(h)} + n_1^{(h)}} \cdot i_{2\text{НЛ}}^{(h)}, \quad (2.55)$$

$$i_{2\text{Л}}^{(h)''} = -i_{2\text{Л}}^{(h)\delta} = -\frac{n_{20}^{(h)} \cdot (n_{10}^{(h)} + n_1^{(h)} + 1) + n_{10}^{(h)} + n_1^{(h)}}{(n_{20}^{(h)} + n_2^{(h)}) \cdot (n_{10}^{(h)} + n_1^{(h)} + 1) + n_{10}^{(h)} + n_1^{(h)}} \cdot i_{2\text{НЛ}}^{(h)}, \quad (2.56)$$

$$i_2^{(h)''} = i_2^{(h)\delta} = \frac{n_2^{(h)} \cdot (n_{10}^{(h)} + n_1^{(h)} + 1)}{(n_{20}^{(h)} + n_2^{(h)}) \cdot (n_{10}^{(h)} + n_1^{(h)} + 1) + n_{10}^{(h)} + n_1^{(h)}} \cdot i_{2\text{НЛ}}^{(h)}. \quad (2.57)$$

Таким образом, токи, обозначенные на рисунке 2.8, имеют следующий вид (2.58-2.62):

$$\begin{aligned} i_0^{(h)} &= i_0^{(h)'} + i_0^{(h)''} = \\ &= \frac{n_1^{(h)}(n_{20}^{(h)} + n_2^{(h)})}{(n_{10}^{(h)} + n_1^{(h)} + 1) \cdot (n_{20}^{(h)} + n_2^{(h)} + 1) - 1} \cdot i_{1\text{НЛ}}^{(h)} + \frac{n_2^{(h)}(n_{10}^{(h)} + n_1^{(h)})}{(n_{10}^{(h)} + n_1^{(h)} + 1) \cdot (n_{20}^{(h)} + n_2^{(h)} + 1) - 1} \cdot i_{2\text{НЛ}}^{(h)}; \end{aligned} \quad (2.58)$$

$$\begin{aligned} i_1^{(h)} &= i_1^{(h)'} + i_1^{(h)''} = \\ &= \frac{n_1^{(h)}(n_{20}^{(h)} + n_2^{(h)} + 1)}{(n_{10}^{(h)} + n_1^{(h)} + 1) \cdot (n_{20}^{(h)} + n_2^{(h)} + 1) - 1} \cdot i_{1\text{НЛ}}^{(h)} - \frac{n_2^{(h)}}{(n_{10}^{(h)} + n_1^{(h)} + 1) \cdot (n_{20}^{(h)} + n_2^{(h)} + 1) - 1} \cdot i_{2\text{НЛ}}^{(h)}; \end{aligned} \quad (2.59)$$

$$\begin{aligned} i_2^{(h)} &= i_2^{(h)'} + i_2^{(h)''} = \\ &= -\frac{n_1^{(h)}}{(n_{10}^{(h)} + n_1^{(h)} + 1) \cdot (n_{20}^{(h)} + n_2^{(h)} + 1) - 1} \cdot i_{1\text{НЛ}}^{(h)} + \frac{n_2^{(h)}(n_{10}^{(h)} + n_1^{(h)} + 1)}{(n_{10}^{(h)} + n_1^{(h)} + 1) \cdot (n_{20}^{(h)} + n_2^{(h)} + 1) - 1} \cdot i_{2\text{НЛ}}^{(h)}; \end{aligned} \quad (2.60)$$

$$i_{1\text{Л}}^{(h)} = i_{1\text{Л}}^{(h)'} + i_{1\text{Л}}^{(h)''} =$$

$$= -\frac{n_{10}^{(h)}(n_{20}^{(h)}+n_2^{(h)}+1)+n_{20}^{(h)}+n_2^{(h)}}{(n_{10}^{(h)}+n_1^{(h)}+1) \cdot (n_{20}^{(h)}+n_2^{(h)}+1)-1} \cdot i_{1\text{НЛ}}^{(h)} - \frac{n_2^{(h)}}{(n_{10}^{(h)}+n_1^{(h)}+1) \cdot (n_{20}^{(h)}+n_2^{(h)}+1)-1} \cdot i_{2\text{НЛ}}^{(h)}; \quad (2.61)$$

$$i_{2\text{Л}}^{(h)} = i_{2\text{Л}}^{(h)'} + i_{2\text{Л}}^{(h)''} =$$

$$= -\frac{n_1^{(h)}}{(n_{10}^{(h)}+n_1^{(h)}+1) \cdot (n_{20}^{(h)}+n_2^{(h)}+1)-1} \cdot i_{1\text{НЛ}}^{(h)} - \frac{n_{20}^{(h)}(n_{10}^{(h)}+n_1^{(h)}+1)+n_{10}^{(h)}+n_1^{(h)}}{(n_{10}^{(h)}+n_1^{(h)}+1) \cdot (n_{20}^{(h)}+n_2^{(h)}+1)-1} \cdot i_{2\text{НЛ}}^{(h)}. \quad (2.62)$$

По аналогии с разделом 2.2.1 введены коэффициенты  $A, B, C$ , а также  $C_1, C_2$  (2.63)-(2.67):

$$A = \frac{n_1^{(h)}}{(n_{10}^{(h)}+n_1^{(h)}+1) \cdot (n_{20}^{(h)}+n_2^{(h)}+1)-1}; \quad (2.63)$$

$$B = \frac{n_2^{(h)}}{(n_{10}^{(h)}+n_1^{(h)}+1) \cdot (n_{20}^{(h)}+n_2^{(h)}+1)-1}; \quad (2.64)$$

$$C = \frac{n_1^{(h)} \cdot n_2^{(h)}}{(n_{10}^{(h)}+n_1^{(h)}+1) \cdot (n_{20}^{(h)}+n_2^{(h)}+1)-1}; \quad (2.65)$$

$$C_1 = -\frac{n_1^{(h)} \cdot n_{20}^{(h)}}{(n_{10}^{(h)}+n_1^{(h)}+1) \cdot (n_{20}^{(h)}+n_2^{(h)}+1)-1}; \quad (2.66)$$

$$C_2 = -\frac{n_2^{(h)} \cdot n_{10}^{(h)}}{(n_{10}^{(h)}+n_1^{(h)}+1) \cdot (n_{20}^{(h)}+n_2^{(h)}+1)-1}. \quad (2.67)$$

Тогда выражения для токов принимают следующий вид (2.68)-(2.70):

$$i_0^{(h)} = C \cdot (i_{1\text{НЛ}}^{(h)} + i_{2\text{НЛ}}^{(h)}) + C_1 \cdot i_{1\text{НЛ}}^{(h)} + C_2 \cdot i_{2\text{НЛ}}^{(h)}; \quad (2.68)$$

$$i_1^{(h)} = C \cdot i_{1\text{НЛ}}^{(h)} + C_1 \cdot i_{1\text{НЛ}}^{(h)} + (A \cdot i_{1\text{НЛ}}^{(h)} - B \cdot i_{2\text{НЛ}}^{(h)}); \quad (2.69)$$

$$i_2^{(h)} = C \cdot i_{2\text{НЛ}}^{(h)} + C_2 \cdot i_{2\text{НЛ}}^{(h)} + (-A \cdot i_{1\text{НЛ}}^{(h)} + B \cdot i_{2\text{НЛ}}^{(h)}). \quad (2.70)$$

Видно, что в состав токов  $i_1^{(h)}$  и  $i_2^{(h)}$  кроме составляющих при коэффициентах  $A, B$ , входят составляющие при коэффициентах  $C_1, C_2$ . Однако, составляющие токов при коэффициентах  $C_1$  и  $C_2$  присутствуют как в токах  $i_1^{(h)}$  и  $i_2^{(h)}$ , так и в  $i_0^{(h)}$ , поэтому на результаты расчёта коэффициентов вкладов не влияют.

### 2.2.3 Потребители с емкостной нагрузкой

Такой тип нагрузки следует рассматривать отдельно, так как его частотные характеристики отличаются от характеристик активных сопротивлений и индуктивностей. Наиболее распространенные типы емкостных нагрузок – это компенсаторы реактивной мощности и фильтры высших гармоник. На рисунке 2.13 представлены схемы замещения электрических сетей с нелинейной нагрузкой, активно-индуктивной линейной нагрузкой и емкостной нагрузкой.

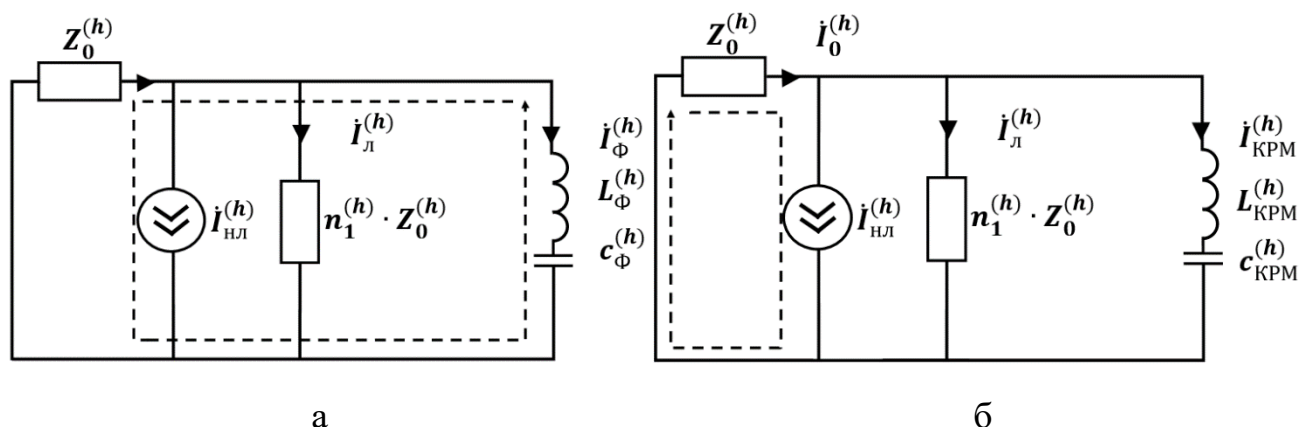


Рисунок 2.13 – Схема замещения системы с емкостной нагрузкой: а – с фильтром высших гармоник; б – с компенсатором реактивной мощности

Фильтр высших гармоник представлен в виде емкости  $c_{\Phi}^{(h)}$  и индуктивности  $L_{\Phi}^{(h)}$ , которые, подключенные последовательно, образуют резонансный контур с нелинейной нагрузкой на гармонике  $h$ . В таком случае, большая часть тока, генерируемого нелинейной нагрузкой, протекает через фильтр, в чем и заключается смысл использования фильтра, как показано на рисунке 2.13 а. Тогда нет необходимости рассчитывать проекции векторов, протекающих по нелинейному потребителю  $i_{нл}^{(h)}$ , по линейному потребителю,  $i_{л}^{(h)}$  и по фильтру высших гармоник  $i_{\Phi}^{(h)}$  на ток СЭС  $i_0^{(h)}$ , потому что значение  $i_0^{(h)}$  стремится к нулю, а значение коэффициента вклада  $K_D^{(h)}$  стремится к бесконечности. В целом, проблема эмиссии гармонических составляющих в данном случае решена для гармоники  $h$ . Что касается других гармоник, комплексное сопротивление фильтра растет в соответствии и возрастанием индуктивности  $L_{\Phi}^{(h)}$ . Таким образом, фильтр

высших гармоник на нерезонансных частотах имеет индуктивный характер и не может быть ошибочно определен как нелинейная нагрузка, что будет подтверждено далее в разделе 3.2.2.

Что касается компенсаторов реактивной мощности (КРМ), большинство современных установок оборудованы индуктивностью  $L_{\text{КРМ}}^{(h)}$ , которая, во-первых, снижает ток включения, а во-вторых, создает резонансный контур на частоте ниже частоты наименьшей гармоники. Так, например, в случае, если 3ья гармоника учитывается, то резонансная частота, или частота расстройки, может быть равна 134 Гц. Это ведет к тому, что по аналогии с фильтрами высших гармоник компенсаторы реактивной мощности имеют индуктивный характер на нерезонансных частотах и также не могут быть ошибочно идентифицированы, как нелинейные потребители. Детальный анализ вкладов компенсатора реактивной мощности с частотой расстройки 134 Гц представлен в разделе 3.2.2.

#### 2.2.4 Дополнительные искажения со стороны СЭС

Кроме искажений, генерируемых потребителями, возможно наличие искажений со стороны СЭС, характеризуемых несинусоидальным напряжением  $\dot{U}_{\text{СЭС}}^{(h)}$ , как показано на рисунке 2.14. В таком случае все нагрузки, подключенные к ТОП пропускают через себя ток высших гармоник, обусловленный искажениями со стороны СЭС.

Указанная на схеме (рисунок 2.14 а) нелинейная нагрузка в наименьшей степени подвержена воздействию несинусоидального напряжения в виду своих физических свойств [8]. По той же причине, нелинейная нагрузка может быть замещена источниками тока  $i_{\text{нл}}^{(h)}$ , которые остаются постоянными вне зависимости от параметров системы. Однако, не все нелинейные нагрузки проявляют такую невосприимчивость к внешним воздействиям, поэтому определение схем замещения нелинейных нагрузок является темой для дополнительных исследований. Касается линейных нагрузок и компенсаторов реактивной

мощности, несинусоидальное напряжение  $\dot{U}_{\text{СЭС}}^{(h)}$  ведет к появлению токов, обозначенных штриховой и штрих-пунктирной линией на рисунке 2.14 а соответственно. Если искажения со стороны СЭС незначительны по сравнению с искажениями, возникающими из-за нелинейной нагрузки, то эти токи значительно меньше, чем ток нелинейной нагрузки  $i_{\text{нл}}^{(h)}$  и не влияют на  $K_D^{(h)}$  всех потребителей. Такой случай рассмотрен в разделе 3.2.4. Если доминантный источник высших гармоник расположен на стороне СЭС, то значения этих токов возрастают значительно и  $K_D^{(h)}$  не является репрезентативным. Однако, в таком случае целью является не распределение ответственности за генерирование высших гармоник между потребителями, а фиксирование искажений со стороны СЭС, чтобы обоснованно перенести обязанность компенсации этих искажений с потребителя на СЭС. Такой случай рассмотрен в разделе 3.2.5.

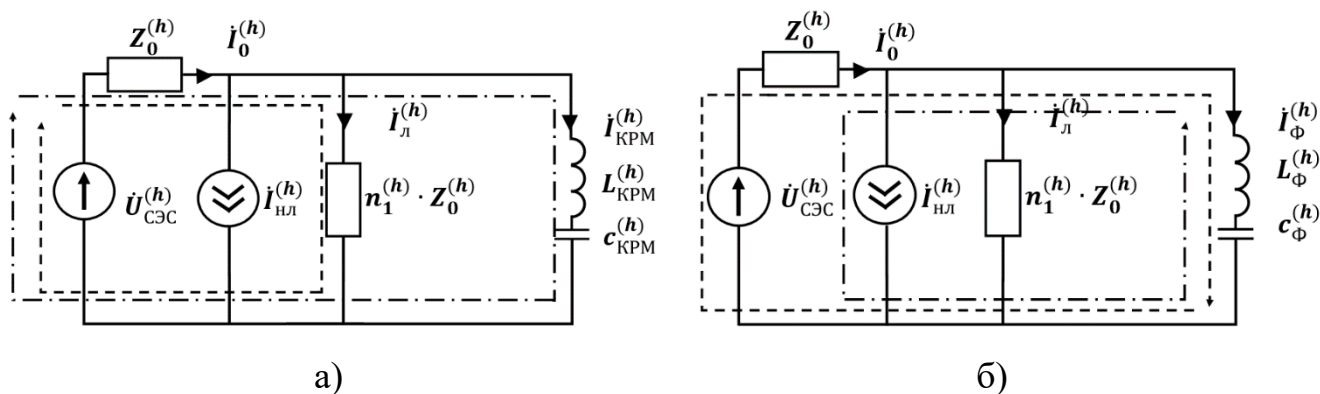


Рисунок 2.14 – Схема замещения системы с искажениями со стороны СЭС: а – с компенсатором реактивной мощности; б – с фильтром высших гармоник

Для оценки искажений со стороны СЭС возможно использовать фильтр высших гармоник, что было предложено в статье [60]. Как показано на рисунке 2.14 б, при подключении фильтра высших гармоник к ТОП, несинусоидальный ток, генерируемый нелинейной нагрузкой, протекает в основном через фильтр (штрихпунктирная линия). В то же время, несинусоидальный ток, обусловленный напряжением  $\dot{U}_{\text{СЭС}}^{(h)}$  также протекает в основном через фильтр (штриховая линия). Это означает, что возможно рассчитать вклады СЭС и потребителей согласно уравнениям (2.71), (2.72):

$$K_{D \text{ СЭС}/\Phi}^{(h)} = \frac{I_0^{(h)} \cdot \cos(\psi_{I_0}^{(h)} - \psi_{I\Phi}^{(h)})}{I_{\Phi}^{(h)}} \cdot 100\%, \quad (2.71)$$

$$K_{D \text{ НЛ}/\Phi}^{(h)} = \frac{-I_{\text{НЛ}}^{(h)} \cdot \cos(\psi_{I_{\text{НЛ}}}^{(h)} - \psi_{I\Phi}^{(h)})}{I_{\Phi}^{(h)}} \cdot 100\%, \quad (2.72)$$

где  $\psi_{I_0}^{(h)}$  – фаза тока  $i_0^{(h)}$ ;

$\psi_{I\Phi}^{(h)}$  – фаза тока  $i_{\Phi}^{(h)}$ ;

$\psi_{I_{\text{НЛ}}}^{(h)}$  – фаза тока  $i_{\text{НЛ}}^{(h)}$ .

Далее, будет использоваться общее обозначение  $K_{D/\Phi}^{(h)}$  – коэффициент вклада относительно фильтра, рассчитываемый согласно выражению (2.73)

$$K_{D/\Phi}^{(h)} = \frac{I^{(h)} \cdot \cos(\psi_I^{(h)} - \psi_{I\Phi}^{(h)})}{I_{\Phi}^{(h)}} \cdot 100\%, \quad (2.73)$$

где  $I^{(h)}$  – либо ток СЭС  $I_0^{(h)}$ , либо ток нагрузки  $-I_{\text{НЛ}}^{(h)}$ ,

$\psi_I^{(h)}$  – либо фаза тока  $i_0^{(h)}$ , либо фаза тока  $i_{\text{НЛ}}^{(h)}$ .

В случае, если доминантный источник зарегистрирован на стороне СЭС, дальнейшие расчеты вкладов потребителей не имеют смысла, так как проблема должна быть решена на стороне СЭС, вне исследуемой части системы электроснабжения потребителя. В случае, если наоборот обнаружен доминантный источник на стороне потребителей, то вклады могут быть рассчитаны согласно выражению (2.74).

$$K_{Dj}^{(h)} = \frac{I_j^{(h)} \cos(\psi_{Ij}^{(h)} - \psi_{I_0}^{(h)})}{I_0^{(h)}} \cdot 100\%, \quad (2.74)$$

где  $I_j^{(h)}$  – ток гармоники  $h$   $j$ -ого потребителя;

$\psi_{Ij}^{(h)}$  – фаза тока  $i_j^{(h)}$ ;

$I_0^{(h)}$  – ток гармоники  $h$  СЭС;

$\psi_{I_0}^{(h)}$  – фаза тока  $i_0^{(h)}$ .

Пример такого случая рассмотрен в разделе 3.2.4.



Проведенные исследования позволили сформировать метод определения вклада потребителей в искажения напряжения и тока в ТОП, алгоритм которого представлен ниже.

### 2.3 АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВКЛАДА В ИСКАЖЕНИЯ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ В ТОЧКЕ ОБЩЕГО ПРИСОЕДИНЕНИЯ

На основании информации, представленной выше, был составлен алгоритм реализации предлагаемого метода, представленный на рисунке 2.15 и опубликованный в работе [85].

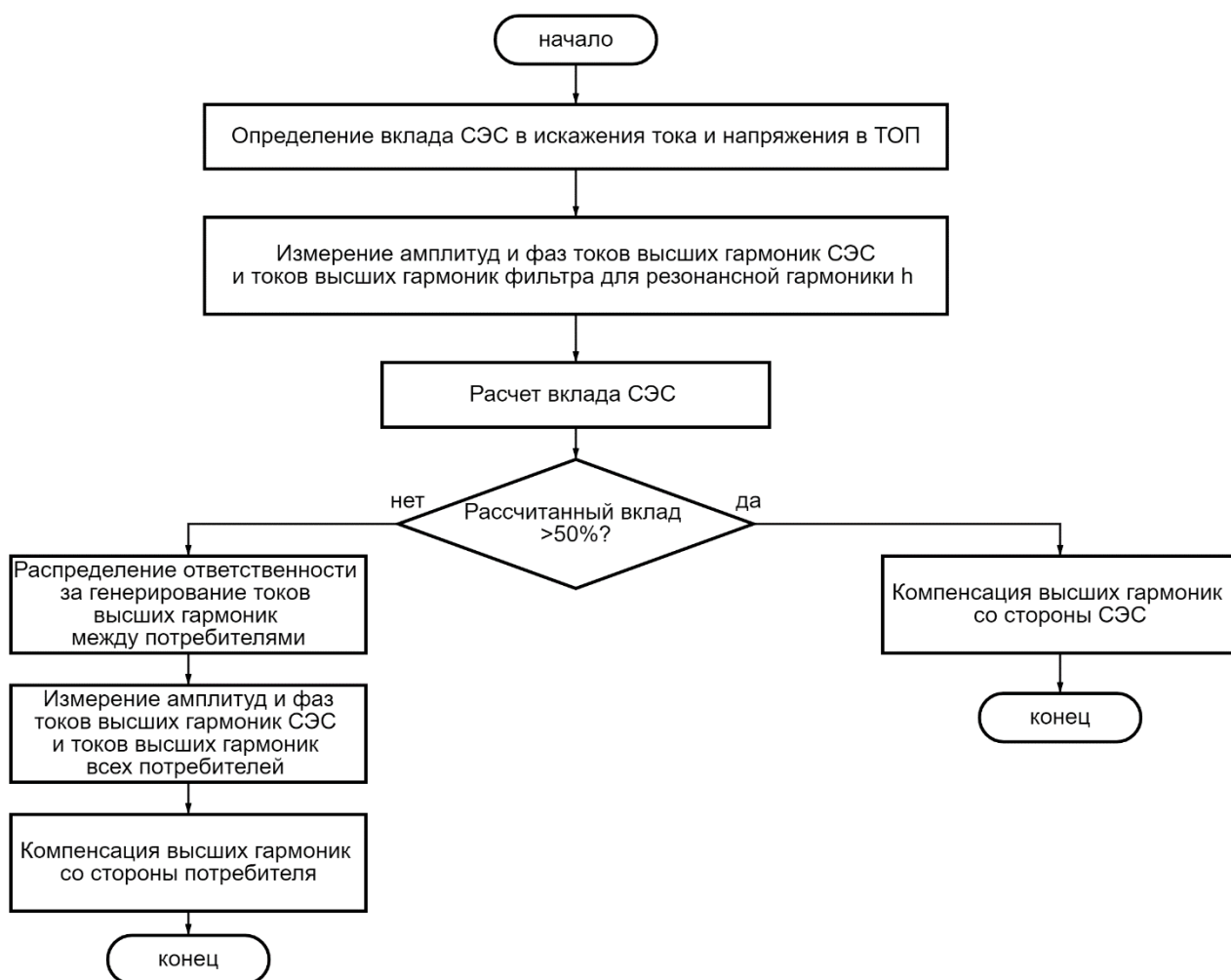


Рисунок 2.15 – Алгоритм метода определения вкладов СЭС и потребителей в искажения напряжения и тока в ТОП

1. Определение вклада СЭС в искажения тока и напряжения в ТОП.

1.1 Для каждой гармоники в отдельности измеряются амплитуды и фазы токов высших гармоник СЭС  $i_0^{(h)}$  и токов высших гармоник фильтра  $i_\Phi^{(h)}$  для резонансной частоты  $h$ . Для этой цели можно использовать ранее установленный фильтр или дополнительный фильтр, который должен быть подключен к ТОП в качестве измерительного прибора. Все необходимые данные возможно получить с помощью стандартного анализатора качества электроэнергии;

1.2 Расчет вклада СЭС проводится согласно выражению (2.71). Если СЭС является доминантным источником (вклад более 50%), тогда меры по компенсации высших гармоник должны производиться в первую очередь со стороны СЭС, так как применение мер со стороны потребителей не приведет к желаемому результату. Если искажения со стороны СЭС низкие, то возможно провести распределение ответственности за генерирование токов высших гармоник между потребителями.

2. Распределение ответственности за генерирование токов высших гармоник между потребителями:

2.1 Для каждой гармоники в отдельности измеряются амплитуды и фазы токов высших гармоник СЭС  $i_0^{(h)}$  и токов высших гармоник всех потребителей  $i_1^{(h)}, i_2^{(h)}, \dots, i_n^{(h)}$ ;

2.2 Проводятся расчеты вкладов потребителей  $K_D^{(h)}$ , используя уравнение (2.74).

На основании полученных значений  $K_{D/\Phi}^{(h)}$  и  $K_D^{(h)}$  могут быть сформулированы рекомендации по компенсации высших гармоник, что особенно важно в случаях, когда исследуемая часть системы электроснабжения потребителя состоит из нескольких уровней напряжения, нескольких шин, к которым возможно подключить фильтр высших гармоник. Также возможно разработать новую методологию для формирования штрафов за эмиссию гармонических составляющих в СЭС.

В главе 3 описываются лабораторные эксперименты, иллюстрирующие частные случаи, упомянутые выше, с целью подтверждения возможности применения метода и его работоспособности для различных видов нагрузок.

## **2.4 СРАВНЕНИЕ РАЗРАБОТАННОГО АЛГОРИТМА И СУЩЕСТВУЮЩИХ СПОСОБОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИСТОЧНИКОВ ИСКАЖЕНИЙ**

Для сравнения предложенного способа и методов, рассмотренных в главе 1 была составлена таблица 2.1. В сравнении с методом активных двухполюсников и всеми методами, основанными на расчете того или иного типа мощности, разработанный метод дает оценку в процентном соотношении.

Метод соотношения напряжения и тока приводит к ошибкам в вычислениях, если нагрузка потребителя имеет индуктивный характер, что не характерно для разработанного метода. Преимуществом по сравнению с методами, описанными в патентах № 2307364, № 2364875 и № 2627195, является то, что предложенный способ не требует расчета параметров СЭС и потребителей. Что касается метода, описанного в патенте № 2236016, то деление потребителей на исключительно источники и исключительно потребители высших гармоник тока на основании разности фаз напряжения и тока приводит к ошибочной оценке вкладов потребителей смешанной структуры, в то время как предложенный способ учитывает влияние такого рода потребителей (описано в разделе 2.2.1 и в разделе 4.3). При расчете вкладов согласно методу, описанному в патенте № 2244313, суммарный ток высших гармоник рассчитывается как алгебраическая сумма измеренных токов, что не дает возможности отделить нелинейную нагрузку от фильтров высших гармоник, в то время как предложенный способ обеспечивает четкое различие в результатах расчетов коэффициентов для такого рода нагрузок (описано в разделе 2.2.3, разделе 3.2.2, разделе 3.2.4, разделе 4.3).

Таким образом, сформулированный алгоритм обладает преимуществами над каждым из рассмотренных методов определения источников искажений.

Таблица 2.1 – Сравнительная таблица методов определения источника искажений

Название метода	Авторы	Определение доминантного источника	Количественная оценка вклада	Параметры СЭС и потребителя не нужны	Непрерывность технологического процесса	Примечания
Метод активных двухполюсников	Geng Y.H.	+	-	-	+	Не учитывает одновременное изменение искажений со стороны СЭС и со стороны потребителей
Метод потока активной мощности	Akagi, H.; Swart, P.H.; Case, M.J.	+	-	+	+	Доказана невозможность использования для определения вкладов потребителей [109–111]
Метод, основанный на реактивной мощности	Xu, W.; Liu, Y.	+	-	-	+	Ошибки, возникающие при определении эквивалентных сопротивлений СЭС и потребителя
Метод неактивной мощности	Barbaro, P.V.; Cataliotti, A.; Cosentino, V.	+/-	-	+	+	Является достоверным только при использовании совместно с методом потока активной мощности
Метод, основанный на мощности искажений	Stevanović, D.; Petković, P.	+	-	+	+	Необходим расчет реактивной мощности, для которой нет эталонного метода расчета, что ведет к ошибкам при вычислении мощности искажений
Метод соотношения напряжения и тока	Fernandez, F.M.; Chandramohan Nair	+	+	+	+	Влияние индуктивности нагрузки на вклад потребителя и СЭС
Метод, основанный на применении ФКУ	Бунтеев Ю.Е.	+	-	+	+	Невозможность точной количественной оценки
Метод, основанный на изменении параметров трансформатора	Бунтеев Ю.Е.	+	-	+	+/-	Невозможность точной количественной оценки

Продолжение таблицы 2.1

Название метода	Авторы	Определение доминантного источника	Количественная оценка вклада	Параметры СЭС и потребителя не нужны	Непрерывность технологического процесса	Примечания
Патент № 2236016	Зельвянский А.Я., Никифорова В.Н.	+	+	+	+	Все субъекты делятся на источники и потребители искажений на основании сдвига фаз между напряжением и током на высших гармониках. Ошибки при оценке потребителей смешанной структуры
Патент № 2244313	Баглейбтер О.И., Висящев А.Н., Луцкий И.И., Тигунцев С.Г.	+	+	+	+	Суммарное значение токов искажений принимается за алгебраическую сумму токов, как следствие – невозможность отделить нелинейную нагрузку от фильтра
Патент № 2307364	Алексеев В.Ю., Зиновьев Г.С., Попов В.И.	+	+	-	+	Необходимо постоянно определять параметры СЭС и потребителей
Патент № 2364875	Баглейбтер О.И., Висящев А.Н., Луцкий И.И., Тигунцев С.Г.	+	+	-	+	Определение в реальном времени волнового сопротивления сети на каждой гармонике
Патент № 2627195	Висящев А.Н., Федосов Д.С.	+	+	-	+	Необходимость расчета параметров схемы замещения, таких как проводимость каждого потребителя
Разработанный алгоритм определения вклада потребителей и СЭС в искажения тока и напряжения в ТОП	Шклярский Я.Э., Добуш Ю.В.	+	+	+	+	Не апробирован на широком спектре линейных и нелинейных нагрузок

## 2.5 ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2

1. Для оценки вклада системы электроснабжения в искажения тока и напряжения в точке общего присоединения потребителей необходимо подсоединить фильтр высших гармоник к точке общего присоединения и рассчитать коэффициент  $K_{D\text{ СЭС/Ф}}^{(h)}$ , определяемый как соотношение проекции вектора тока в точке общего присоединения на вектор тока фильтра высших гармоник на резонансной частоте к модулю вектора тока фильтра высших гармоник на резонансной частоте. Это дает возможность отделить вклад СЭС от вклада потребителя в искажение напряжения и тока в ТОП.

2. При отсутствии внешних искажений со стороны системы электроснабжения или при их незначительном значении вклады отдельных потребителей в составе электротехнического комплекса предприятия необходимо определять при помощи коэффициента  $K_D^{(h)}$ , рассчитываемого как соотношение проекции вектора тока высшей гармоники потребителя на вектор тока высшей гармоники в точке общего присоединения потребителей к модулю вектора тока высшей гармоники в точке общего присоединения. Это позволяет распределить ответственность за генерацию токов высших гармоник между потребителями, подключенными к одной ТОП.

3. Определено влияние рассматриваемых в работе факторов, влияющие на результаты расчета коэффициентов вкладов потребителей согласно предложенному методу:

- влияние потребителей на коэффициенты вкладов друг друга не превышает 5% для жестких СЭС, что было определено на основании введенных коэффициентов пропорциональности  $A, B, C$ ;
- сопротивление линий, соединяющих ТОП и потребителей, не влияет на результаты расчета, что было определено на основании введенных коэффициентов пропорциональности  $C_1, C_2$ ;

- емкостная нагрузка не может быть ошибочно идентифицирована как нелинейная, так как фильтры высших гармоник на нерезонансных частотах имеют индуктивный характер, а большинство компенсаторов реактивной мощности содержат индуктивность  $L_{\text{КРМ}}^{(h)}$ , которая также обеспечивает индуктивный характер нагрузки на нерезонансных частотах;

- внешние искажения могут в значительной мере повлиять на результаты расчетов, что должно быть учтено в алгоритме метода определения вкладов потребителей и СЭС в искажения напряжения и токов в ТОП.

4. На основании математического моделирования СЭС с наличием нелинейной нагрузки был разработан новый метод определения вкладов потребителей в искажения тока и напряжения в ТОП. Суть метода заключается в расчете коэффициентов  $K_{D \text{ СЭС/Ф}}^{(h)}$  и  $K_D^{(h)}$ . Обоснована возможность оценки вклада источников искажений в общие искажения напряжения в ТОП по векторам токов высших гармоник потребителей.

5. Сформулирован алгоритм реализации метода, согласно которому вначале оценивается влияние внешних искажений на качество электроэнергии в ТОП при помощи расчета коэффициентов вкладов  $K_{D \text{ СЭС/Ф}}^{(h)}$  относительно тока фильтра высших гармоник на каждой гармонике отдельно. При доминантном источнике со стороны СЭС меры по компенсации высших гармоник должны проводиться со стороны СЭС. При доминантном источнике со стороны потребителей необходимо рассчитать вклады каждого из них относительно тока СЭС на каждой гармонике отдельно при помощи коэффициента  $K_D^{(h)}$ .

6. В результате применения алгоритма достоверно можно определить вклад СЭС в искажения напряжения и тока в ТОП на основании коэффициента  $K_{D \text{ СЭС/Ф}}^{(h)}$ , а также распределить ответственность за генерацию токов высших гармоник между потребителями, подключенными к ТОП на основании коэффициентов вкладов  $K_D^{(h)}$ . На основе полученных значений возможно выбрать меры по уменьшению искажений напряжения и тока в ТОП.

### ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВКЛАДОВ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ И СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ В ИСКАЖЕНИЕ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ В ТОЧКЕ ОБЩЕГО ПРИСОЕДИНЕНИЯ

#### 3.1 СТРУКТУРА ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА

Для апробации предложенного метода определения коэффициентов вкладов потребителей в ухудшение качества тока и напряжения в ТОП  $K_D$  и  $K_{D/\Phi}$  был реализован экспериментальный стенд, структурная схема которого показана на рисунке 3.1.

Стенд содержит:

- трехфазный источник напряжения  $\dot{U}_0$  (линейное напряжение 380 В);
- три катушки  $L_S$  переменной индуктивности от 0.3 до 12 мГн, моделирующие индуктивное сопротивление СЭС;
- три резистора  $R_S=2,2$  Ом, моделирующие резистивное сопротивление СЭС;
- линейную нагрузку в виде асинхронного двигателя типа АИР 90L6 ( $M$ ) номинальной мощностью 1.5 кВт, загруженного двигателем постоянного тока Р32М номинальной мощностью 1.1 кВт, работающем в режиме генератора;
- тиристорный выпрямитель ( $TB$ ) ТВН-3-L-230-125, с номинальным входным напряжением 380 В, выходным напряжением до 230 В и током 125 А.  $TB$  нагружен активным сопротивлением мощностью 6 кВт в виде воздушных тепло-электронагревателей ( $TЭH_1$ );
- трехфазный тиристорный регулятор мощности ( $TRM$ ) TRM-3M-30, с номинальным входным напряжением 380 В и максимальным током нагрузки 30 А. Аналогично  $TB$ ,  $TRM$  загружен  $TЭH_2$ , но меньшей мощностью 1.5 кВт;
- фильтр 5<sup>ой</sup> гармоники ( $\Phi$ );



- компенсатор реактивной мощности (КРМ) с частотой расстройки 134 Гц, с четырьмя ступенями регулирования по 0,5 квар и одной ступенью регулирования 1 квар.

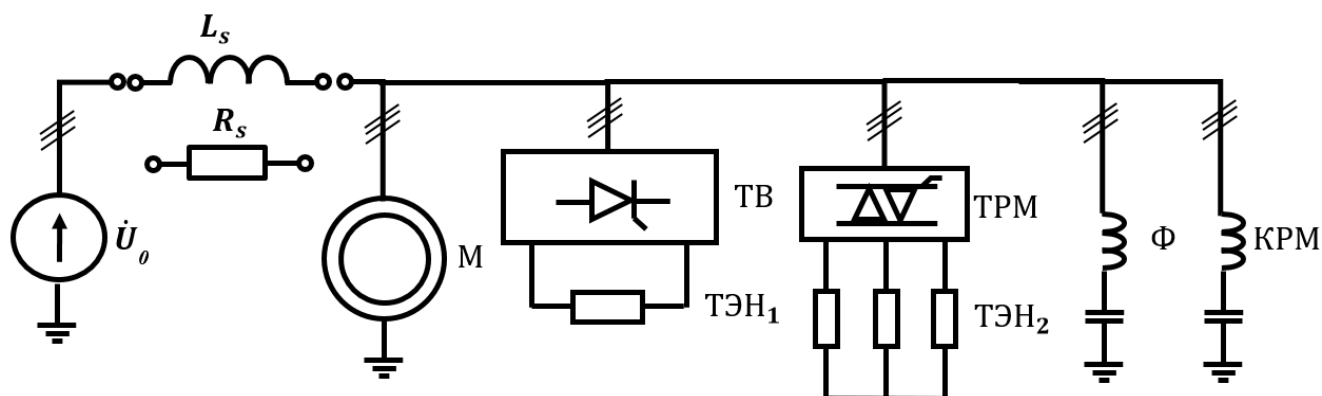


Рисунок 3.1 – Общая структурная схема лабораторного стенда

Измерения токов и напряжений проводились при помощи поверенного анализатора качества электроэнергии Fluke 125В, позволяющего определять амплитуды и фазы измеряемых напряжений и токов с 1<sup>ой</sup> по 40<sup>ую</sup> гармонику.

### 3.2 ПЕРЕЧЕНЬ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Все проведенные эксперименты были разделены на пять блоков:

- Блок 1. Эксперименты, проведенные без искажений со стороны СЭС и без емкостных нагрузок;
- Блок 2. Эксперименты, проведенные без искажений со стороны СЭС и с емкостными нагрузками;
- Блок 3. Эксперименты, проведенные при наличии искажений со стороны СЭС и без емкостных нагрузок;
- Блок 4. Эксперименты, проведенные при наличии искажений со стороны СЭС и с емкостными нагрузками.
- Блок 5. Эксперимент, проведенный с искажениями только со стороны СЭС.

Детальное описание экспериментов каждого блока представлено ниже.

Результаты, полученные в представленных разделах, будут объединены в выводах главы 3.

### 3.2.1 Эксперименты без искажений со стороны системы электроснабжения и без емкостных нагрузок

Для проведения экспериментов блока 1 лабораторный стенд был подключен согласно схеме, представленной на рисунке 3.2. В представленном случае, задачей экспериментов было изучение влияния на расчет коэффициента вклада потребителя  $K_D$  режима работы линейной и нелинейной нагрузки, при условии, что к ТОП подключены только одна линейная и одна нелинейная нагрузка, а внешние искажения отсутствуют или минимальны.

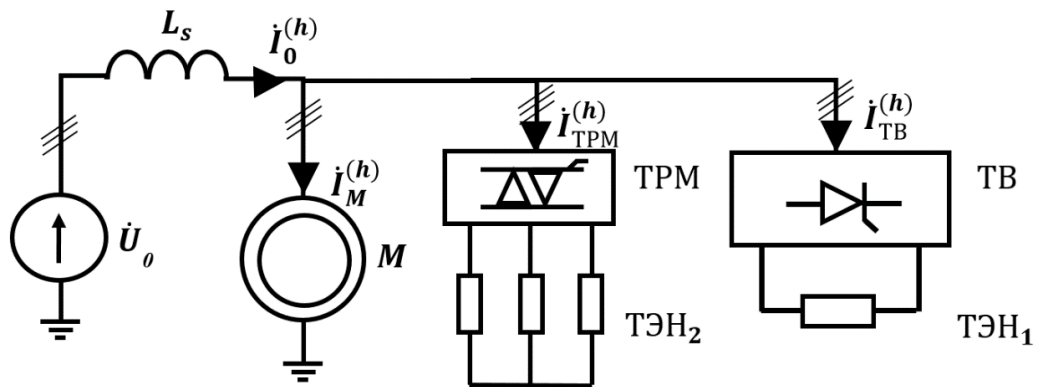


Рисунок 3.2 – Структурная схема лабораторного стенда для экспериментов блока 1

Параметры оборудования для каждого из проведенных экспериментов указаны в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Параметры оборудования для экспериментов блока 1

	$L_S$ , мГн	$U_d$ , %	$U_c$ , %	$P_M$ , кВт
Эксперимент 1	0.1	15÷55	-	1.04
Эксперимент 2	0.1	40	-	0÷1.04
Эксперимент 3	0.1	-	10÷50	1.04
Эксперимент 4	0.1	-	40	0÷1.04

При проведении эксперимента 1 напряжение стороны постоянного тока  $TV$   $U_d$  регулировалось в процентном соотношении от максимального. В то же время,

выходное напряжение  $TPM U_c$  изменялось в рамках эксперимента 3 также в процентном соотношении от максимального. Эксперименты 2 и 4 проводились при изменении нагрузки  $M$  в диапазоне от режима холостого хода до потребляемой активной мощности 1,04 кВт. В каждом эксперименте измерялись высшие гармоники токов СЭС  $i_0^{(h)}$ , ТВ  $i_{ТВ}^{(h)}$ , TPM  $i_{TPM}^{(h)}$  и  $M i_M^{(h)}$ , рассчитывались значения вкладов ТВ  $K_{D_{ТВ}}^{(h)}$  или TPM  $K_{D_{TPM}}^{(h)}$  и вклад  $M K_{D_M}^{(h)}$  согласно предложенному в главе 2 методу.

Формы кривых токов, измеренных в рамках экспериментов 1 и 2 представлены на рисунке 3.3 а. Результаты расчетов для 5ой гармоники показаны на рисунке 3.3 б,в для эксперимента 1 и 2 соответственно. Аналогичные данные для экспериментов 3 и 4 отображены на рисунке 3.4.

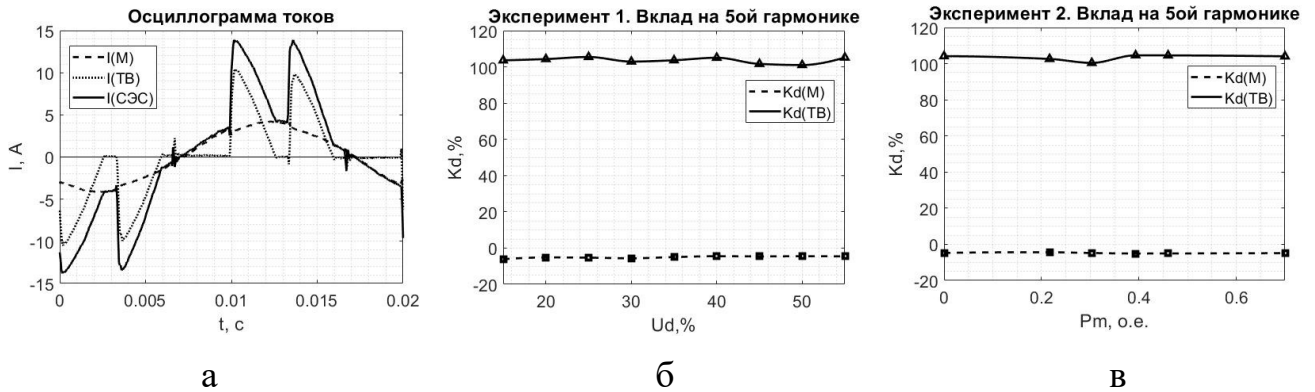


Рисунок 3.3 – Результаты экспериментов 1 и 2 для 5ой гармоники: а – осциллограмма токов; б – результаты расчетов для эксперимента 1; в – результаты расчетов для эксперимента 2

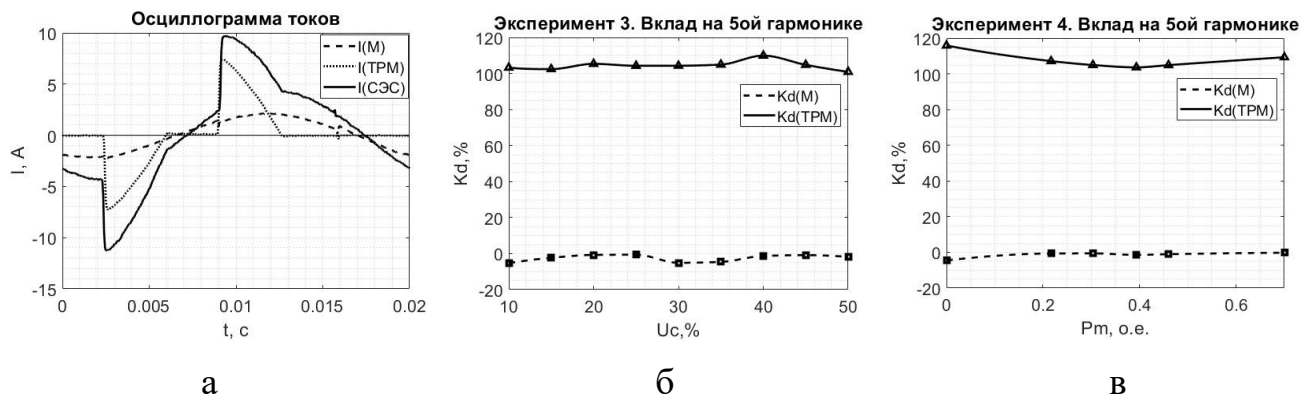


Рисунок 3.4 – Результаты экспериментов 3 и 4 для 5ой гармоники: а – осциллограмма токов; б – результаты расчетов для эксперимента 3; в – результаты расчетов для эксперимента 4

Рассчитанные согласно предложенному методу вклады линейной нагрузки  $M$  в искажения тока и напряжения в ТОП имеют отрицательные значения для всех высших гармоник. Это свидетельствует о том, что несинусоидальный ток, протекающий через  $M$ , в малой степени (4,5-5,5%) компенсирует несинусоидальный ток, обусловленный присутствием  $TB$  и  $TPM$  в системе, а сам линейный потребитель не является источником искажений. Коэффициент вклада  $K_D^{(h)}$  равен стабильному значению более 100% для источников высших гармоник  $TB$  и  $TPM$ . Таким образом, видно, что рассчитанные значения  $K_{D\ TB}^{(h)}$ ,  $K_{D\ TPM}^{(h)}$  и  $K_{D\ M}^{(h)}$  равны при различных режимах работы линейной и нелинейной нагрузки.

Резюме: при подключении к ТОП одной линейной и одной нелинейной нагрузки при отсутствии внешних искажений со стороны СЭС и вне зависимости от режима работы коэффициент вклада линейной нагрузки  $K_D^{(h)}$ , такой как  $M$ , имеет отрицательное значение порядка -4,5% – -5,5%, а коэффициент вклада  $K_D^{(h)}$  нелинейной нагрузки, такой как  $TB$  и  $TPM$ , принимает значения порядка 104,5% – 105,5%.

### **3.2.2 Эксперименты без искажений со стороны системы электроснабжения и с емкостными нагрузками**

Эксперименты блока 2 отличаются от экспериментов блока 1 наличием емкостной нагрузки, что показано на рисунке 3.5. Соответственно, целью проведения этого блока экспериментов является определение коэффициентов вкладов потребителей, содержащих емкостную нагрузку, а также сравнение этих значений с величинами вкладов нелинейных нагрузок и линейных нагрузок резистивно-индуктивного характера.

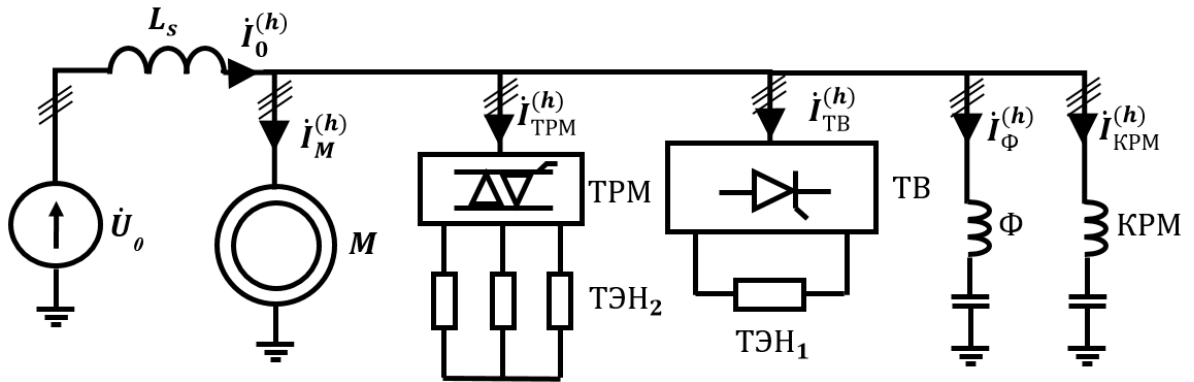


Рисунок 3.5 – Схема подключения лабораторного стенда для экспериментов блока 2

Параметры оборудования для каждого из проведенных экспериментов указаны в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Параметры оборудования для экспериментов блока 2

	$L_s$ , мГн	$U_d$ , %	$U_c$ , %	$P_M$ , кВт	$\Phi$	Мощность КРМ, квар
Эксперимент 1	0.1	15÷55	-	1.04	+	-
Эксперимент 2	0.1	-	10÷50	1.04	+	-
Эксперимент 3	0.1	15÷55	-	-	-	2
Эксперимент 4	0.1	40	-	-	-	0-3

В каждом из экспериментов измерялись токи высших гармоник токов СЭС  $i_0^{(h)}$ , ТВ  $i_{ТВ}^{(h)}$  или ТРМ  $i_{ТРМ}^{(h)}$ ,  $\Phi$   $i_{\Phi}^{(h)}$  или КРМ  $i_{КРМ}^{(h)}$ , и М  $i_M^{(h)}$ , рассчитывались значения коэффициентов вкладов ТВ  $K_{D_{ТВ}}^{(h)}$  или ТРМ  $K_{D_{ТРМ}}^{(h)}$ ,  $\Phi$   $K_{D_{\Phi}}^{(h)}$ , или КРМ  $K_{D_{КРМ}}^{(h)}$  и вклад М  $K_{D_M}^{(h)}$  относительно тока  $i_0^{(h)}$ . Кроме того, вклады ТВ  $K_{D_{ТВ/\Phi}}^{(h)}$  или ТРМ  $K_{D_{ТРМ/\Phi}}^{(h)}$ , вклад СЭС  $K_{D_{0/\Phi}}^{(h)}$  и вклад М  $K_{D_{M/\Phi}}^{(h)}$  относительно  $i_{\Phi}^{(h)}$  были рассчитаны для экспериментов 1 и 2.

Осциллограммы токов в эксперименте 1 представлены на рисунке 3.6(а). Результаты расчетов  $K_D^{(h)}$  для 5ой гармоники относительно тока СЭС  $i_0^{(h)}$  показаны на Рисунке 3.6 б, а результаты расчетов  $K_{D/\Phi}^{(h)}$  относительно тока фильтра  $i_{\Phi}^{(h)}$  – на Рисунке 3.6 в.

Расчетные значения  $K_D^{(h)}$  и  $K_{D/\Phi}^{(h)}$  для эксперимента 1 при нерезонансной частоте фильтра показаны на рисунке 3.7.

Осциллограммы токов эксперимента 2 представлены на рисунке 3.8(а). Результаты расчетов  $K_D^{(h)}$  для 5ой гармоники относительно тока СЭС  $i_0^{(h)}$  показаны на рисунке 3.8 б, а результаты расчетов  $K_{D/\Phi}^{(h)}$  относительно тока фильтра  $i_\Phi^{(h)}$  – на рисунке 3.8 в.

Для экспериментов 3 и 4 формы токов отображены на рисунке 3.9 а, а вклады потребителей относительно тока СЭС – на рисунке 14 б,в.

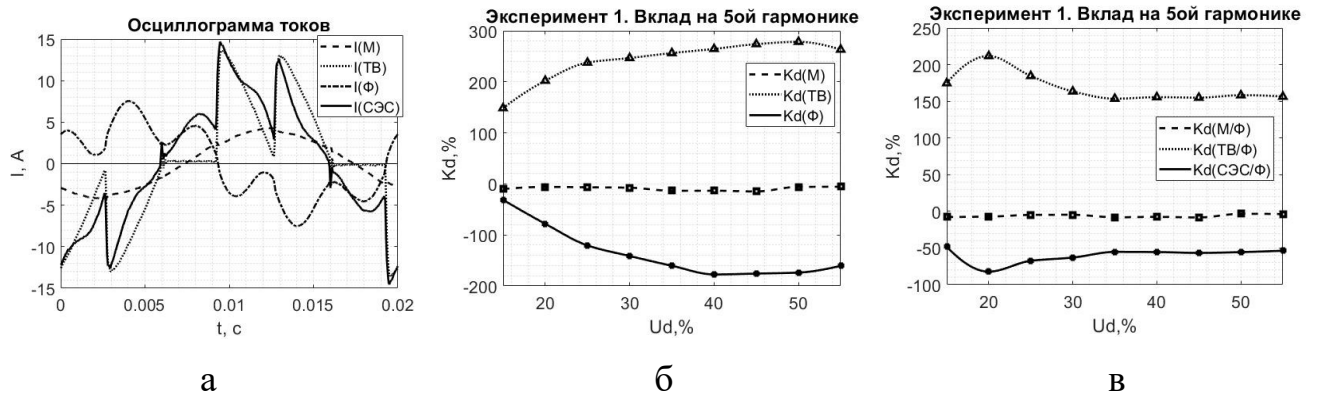


Рисунок 3.6 – Результаты эксперимента 1 для 5ой гармоники: а – осциллограмма токов; б –  $K_D^{(h)}$  относительно тока СЭС; в –  $K_{D/\Phi}^{(h)}$  относительно тока фильтра

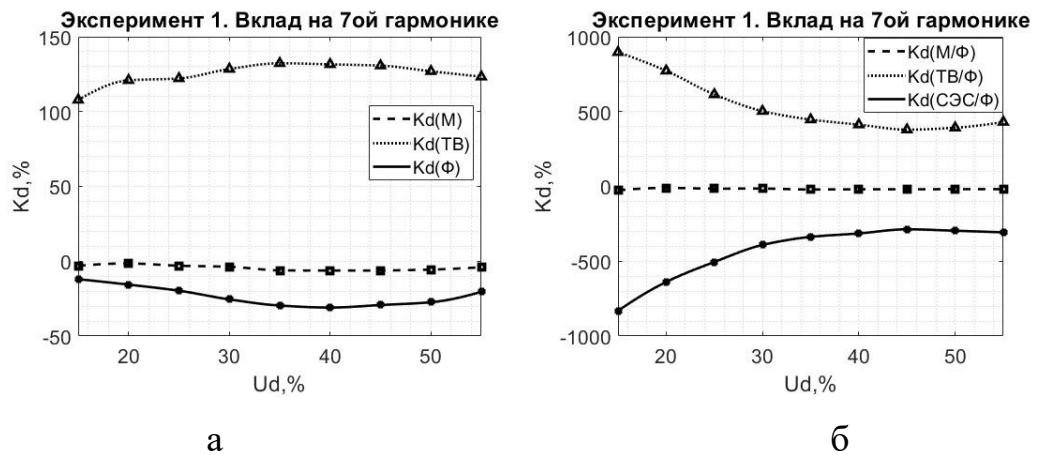


Рисунок 3.7 – Результаты эксперимента 1 для 7ой гармоники: а –  $K_D^{(h)}$  относительно тока СЭС; б –  $K_{D/\Phi}^{(h)}$  относительно тока фильтра

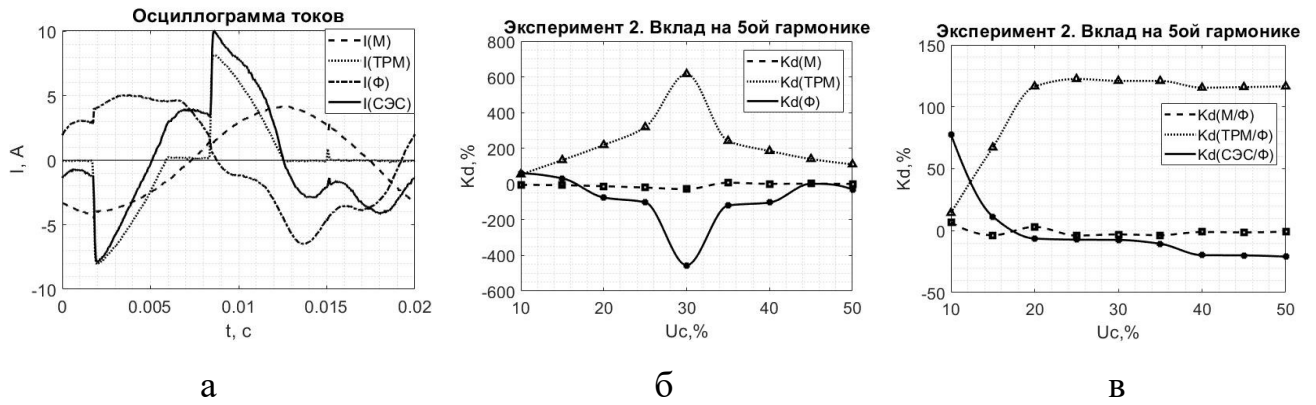


Рисунок 3.8 – Результаты эксперимента 2 для 5ой гармоники: а – осциллограмма токов; б –  $K_D^{(h)}$  относительно тока СЭС; с –  $K_D^{(h)}$  относительно тока фильтра

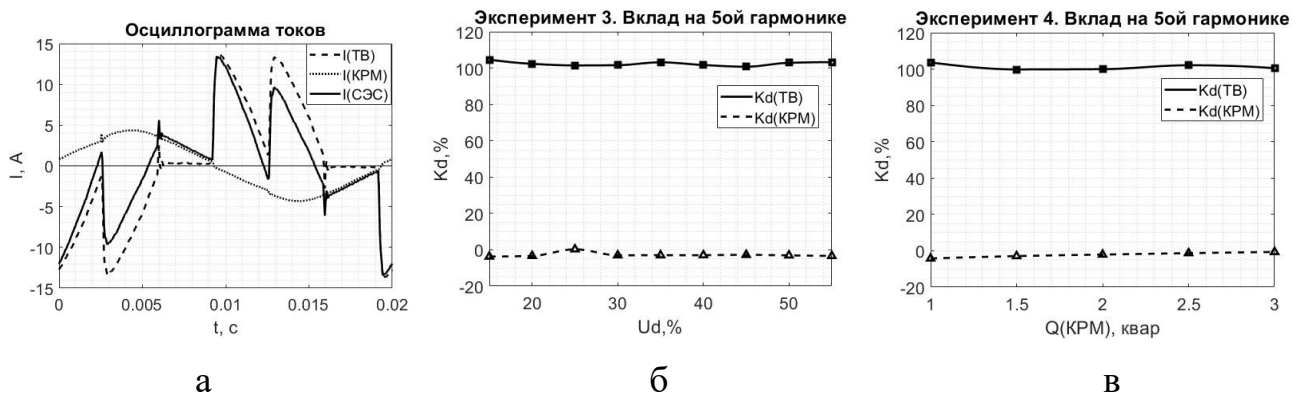


Рисунок 3.9 – Результаты экспериментов 3 и 4 для 5ой гармоники: а – осциллограмма токов; б –  $K_D^{(h)}$  для эксперимента 3; в –  $K_D^{(h)}$  для эксперимента 4

На рисунке 3.6 б видно, что коэффициент вклада  $TB$  составляет порядка 265%, коэффициент вклада  $M$  – около -5%, коэффициент вклада  $\Phi$  – порядка -160%, при значениях  $U_d$  более 35%. Когда значение  $U_d$  ниже, суммарный вклад системы не дает 100% в виду того, что малый процент эмиссии гармонических составляющих нелинейным потребителем не дает проводить точные расчеты на основании измеренных величин малой амплитуды. Этот факт особенно заметен при не одновременном измерении токов потребителей, а при последовательном измерении с соблюдением постоянства режимов работы каждого потребителя. На основании полученных результатов можно сделать вывод о том, что  $\Phi$  характеризуется отрицательным значением вклада. Это означает, что  $\Phi$  компенсирует ток высших гармоник, генерируемый потребителями, чей вклад имеет положительное значение. Кроме того, вклад  $M$  имеет малое отрицательное значение (-4,5% – -5,5%), также, как и в блоке 1, что указывает на отсутствие

эмиссии гармонических составляющих линейным потребителем и, вместе с тем, малую способность таких потребителей компенсировать токи высших гармоник. Что касается вкладов относительно тока  $\dot{I}_\Phi^{(h)}$ , на рисунке 3.6 в показано, что  $TB$  является доминантным источником искажений так как  $K_{D_{TB}}^{(h)}=160\%$ , в то время как ток, протекающий по СЭС, характеризуется вкладом около  $-55\%$ . Такие значения показывают отсутствие или крайне малые искажения со стороны СЭС.

Что касается нерезонансной частоты, на рисунке 3.7 а показано, что коэффициент вклада  $M$  остается таким же, как и для 5ой гармоники на рисунке 3.6 б, но коэффициент вклада  $\Phi$  принимает значение около  $-27\%$ , что ближе к результату линейной нагрузки. Чем выше частота, тем ближе значения коэффициентов вкладов  $M$  и  $\Phi$ . Также (рисунок 3.7 б) очевидно, что нелинейный потребитель является источником искажений, что является аналогией результатам, показанным на рисунке 3.6 в. Однако только результаты для резонансной частоты могут быть применены для получения результатов касемо вклада СЭС в искажения в ТОП, так как только при резонансной частоте ток высшей гармоники как потребителя, так и СЭС протекает в основном через фильтр, что показано на рисунке 2.14 б.

Аналогично рисунку 3.6, рисунок 3.8 б показывает, что  $TPM$  является доминантным источником тока 5<sup>ой</sup> гармоники. Однако, можно заметить, что как амплитуда коэффициента вклада  $TPM$ , так и вклада  $\Phi$  имеет максимум при  $U_d=30\%$ . Это возможно объяснить тем, что амплитуда тока 5ой гармоники  $TPM$  достигает максимума при  $U_d=30\%$ , в таком случае, амплитуда тока 5ой гармоники  $\Phi$  достигает максимума при том же значении. В результате, ток СЭС уменьшается, что ведет к росту вклада относительно  $\dot{I}_0^{(5)}$ , так как знаменатель уравнения (2.74) стремится к нулю. Как и рисунок 3.6 в, рисунок 3.8 в указывает на коэффициенты вкладов СЭС и потребителей в искажения в ТОП, и указывает на то, что со стороны СЭС отсутствуют существенные искажения.

Анализируя эксперименты 3 и 4, при проведении которых был подключен  $KPM$ , можно сделать вывод о том, что вклад  $KPM$  составляет около  $-5\%$  для широкого диапазона параметров линейной нагрузки и широкого диапазона



емкости  $KPM$ . Это означает, что этот тип нагрузки показывает результат схожий с  $M$ , другими словами, может быть охарактеризован, как линейная нагрузка и не может быть ошибочно принят за источник высших гармоник, как и фильтр высших гармоник.

Резюме:

1. при подключении к ТОО одной линейной нагрузки, одной нелинейной нагрузки и фильтра высших гармоник при отсутствии внешних искажений со стороны СЭС:

1) вне зависимости от режима работы нагрузок на резонансной частоте фильтра (5ая гармоника) коэффициент вклада линейной нагрузки  $K_D^{(h)}$ , такой как  $M$ , имеет отрицательное значение порядка  $-4,5\% - -5,5\%$ , коэффициент вклада  $K_D^{(h)}$  нелинейной нагрузки, такой как  $TB$ , принимает значения порядка  $265\%$ , а коэффициент вклада  $\Phi$  составляет  $-160\%$ ;

2) на нерезонансной частоте (7ая гармоника) коэффициент вклада линейной нагрузки  $K_D^{(h)}$  остается прежним ( $-4,5\% - -5,5\%$ ), коэффициент вклада  $K_D^{(h)}$  нелинейной нагрузки, такой как  $TB$ , снижается до  $135\%$ , а коэффициент вклада  $\Phi$  возрастает до  $-30\%$ , приближаясь по величине к коэффициенту вклада линейной активно-индуктивной нагрузки;

3) на резонансной частоте фильтра коэффициент вклада линейной нагрузки  $K_{D\ M/\Phi}^{(h)} = -5\%$  показывает, что линейная нагрузка не является источником искажений, коэффициент вклада нелинейной нагрузки, такой как  $TB$ ,  $K_{D\ TB/\Phi}^{(h)} = 160\%$  показывает, что потребитель является доминантным источником искажений, а отрицательный вклад СЭС  $K_{D\ СЭС/\Phi}^{(h)} = -55\%$  указывает на то, что токи, протекающие в линиях СЭС вызваны искажениями со стороны потребителя;

4) в зависимости от режима работы нагрузок на резонансной частоте фильтра коэффициент вклада нелинейной нагрузки, такой как  $TPM$ , может характеризоваться коэффициентом  $K_{D\ TPM/\Phi}^{(h)}$ , изменяющимся в широком

диапазоне, как и  $K_D^{(h)}$  СЭС/Ф, что требует дополнительного изучения. Однако, полученные значения однозначно указывают на источник искажений;

2. при подключении к Топ одной нелинейной нагрузки и компенсатора реактивной мощности при отсутствии внешних искажений со стороны СЭС и вне зависимости от режима работы нагрузок коэффициент вклада компенсатора реактивной мощности  $K_D^{(h)}$  имеет отрицательное значение порядка -5%, близкое к коэффициенту линейной нагрузки, коэффициент вклада нелинейной нагрузки  $K_D^{(h)}=105\%$ .

### 3.2.3 Эксперименты при наличии искажений со стороны системы электроснабжения и без емкостных нагрузок

Эксперименты блока 3 проводились при дополнительных искажениях со стороны СЭС, которые были смоделированы при помощи ТРМ и резисторов  $R_s$ , как показано на рисунке 3.10. В рамках этого блока экспериментов изучалось влияние внешних искажений сети на результаты расчета вкладов нелинейных потребителей и линейных потребителей активно-индуктивного характера.

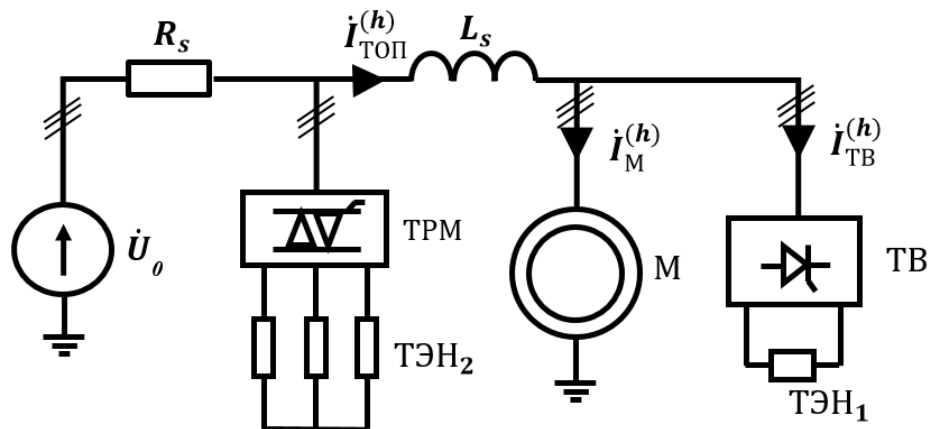


Рисунок 3.10 – Структурная схема лабораторного стенда для экспериментов блока 3

Параметры оборудования для каждого из проведенных экспериментов указаны в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Параметры оборудования для экспериментов блока 3

	$R_S$ , Ом	$U_c$ , %	$L_S$ , мГн	$U_d$ , %	$P_M$ , кВт
Эксперимент 1	2.2	40	0.1	15÷50	1.04
Эксперимент 2	2.2	40	0.1	40	0÷1.04
Эксперимент 3	2.2	10÷50	0.1	40	1.04

Эксперименты 1 и 2 схожи с экспериментами 1 и 2 блока 1, но отличаются дополнительными искажениями со стороны СЭС. Эксперимент 3 проводился с целью оценки влияния внешних искажений на результаты расчета  $K_D^{(h)}$  при постоянных параметрах  $M$  и  $TB$ .

При проведении каждого эксперимента измерялись токи высших гармоник в Топ  $i_{\text{Топ}}^{(h)}$ , ток  $TB$   $i_{\text{TB}}^{(h)}$  и ток  $M$   $i_M^{(h)}$ , рассчитывались коэффициенты вкладов  $K_{D\text{TB}}^{(h)}$ ,  $K_{DM}^{(h)}$ .

Формы токов, измеренных в ходе экспериментов 1-3 показаны на рисунке 3.11. Расчеты вкладов  $K_D^{(h)}$  для 5ой гармоники относительно тока СЭС представлены на рисунке 3.12(а-в) для экспериментов 1-3 соответственно.

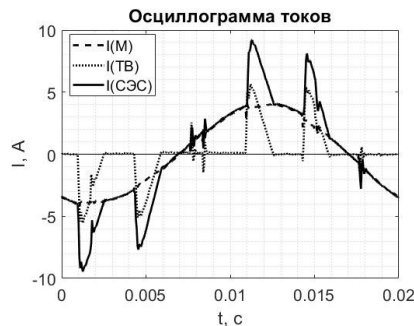


Рисунок 3.11 – Осциллограмма токов экспериментов блока 3

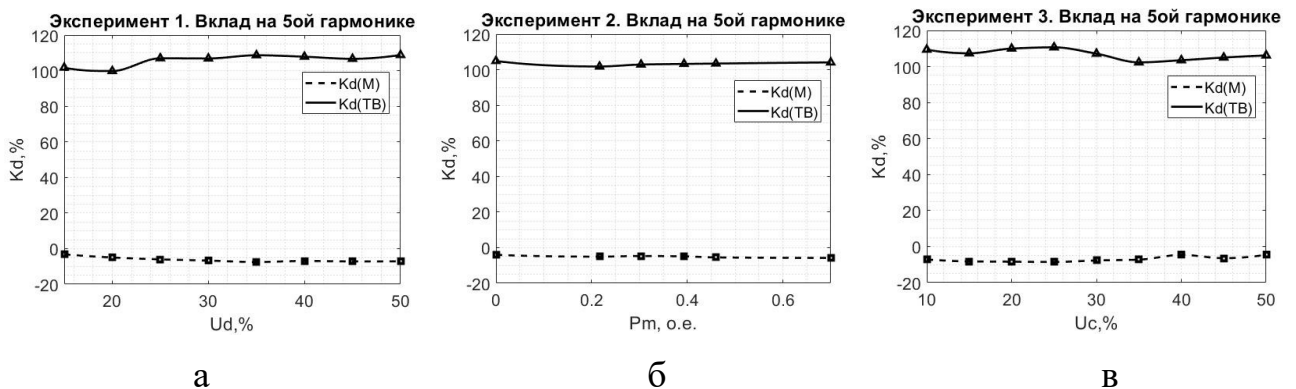


Рисунок 3.12 – Результаты расчетов  $K_D^{(h)}$  для 5ой гармоники: а – эксперимент 1; б – эксперимент 2; в – эксперимент 3

По сравнению с блоком 1, вклад  $TB$  возрос с 104% до 107% и вклад  $M$  снизился с -4% до -7%, что незначительно влияет на выводы о том, какой из потребителей является нелинейной нагрузкой, а какой - линейной. Что касается эксперимента 3,  $TPM$  как источник искажений со стороны СЭС незначительно влияет на результаты расчетов, и изменение значений  $K_D^{(h)}$  для  $M$  находится в интервале -7% – -4,5%, а изменение значений  $K_D^{(h)}$  для  $TB$  находится в интервале 104,5% – 107% соответственно. Получение таких результатов говорит о том, что внешние искажения, смоделированные  $TPM$  и сопротивлением СЭС  $R_S$  недостаточно велики для того, чтобы существенно повлиять на результаты расчетов. Оценить величину внешних искажений по сравнению с искажениями, вызванными нелинейной нагрузкой потребителя, возможно при помощи расчета  $K_{D/\Phi}^{(h)}$ , что представлено в следующем разделе.

Резюме: при подключении к ТОП одной линейной нагрузки и одной нелинейной нагрузки при наличии внешних искажений со стороны СЭС и вне зависимости от режима работы нагрузок коэффициент вклада линейной нагрузки  $K_D^{(h)}$ , такой как  $M$ , снижается до значений -7%, коэффициент вклада  $K_D^{(h)}$  нелинейной нагрузки, такой как  $TB$ , возрастает до 107%.

### **3.2.4 Эксперименты при наличии искажений со стороны системы электроснабжения и с емкостными нагрузками**

Эксперименты блока 4 проводились при наличии искажений со стороны СЭС и при наличии емкостных нагрузок, как показано на рисунке 3.13. Результаты экспериментов анализировались с точки зрения возможности определения внешних искажений путем расчета вклада СЭС и потребителей относительно тока фильтра, а также изучалось влияние внешних искажений на результаты расчета вклада нелинейных и линейных потребителей любого характера нагрузки.

Параметры оборудования для каждого из проведенных экспериментов указаны в таблице 3.4.

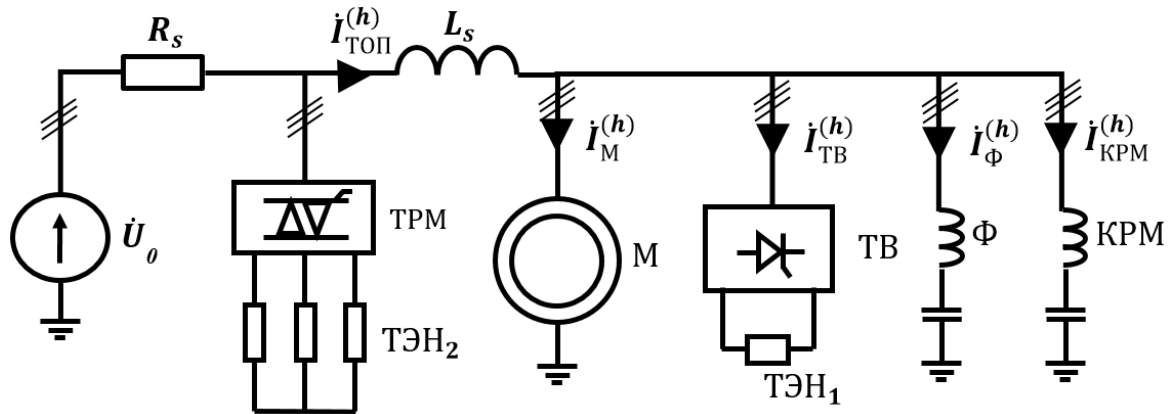


Рисунок 3.13 – Структурная схема лабораторного стенда для экспериментов блока 4

Таблица 3.4 – Параметры оборудования для экспериментов блока 4

	$R_s$ , Ом	$U_c$ , %	$L_s$ , мГн	$U_d$ , %	$P_M$ , кВт	$\Phi$	Мощность KPM, квар
Эксперимент 1	2.2	40	0.1	15÷55	1.04	+	-
Эксперимент 2	2.2	40	0.1	15÷50	1.04	-	2
Эксперимент 3	2.2	40	0.1	20	1.04	-	0-3
Эксперимент 4	2.2	10÷50	0.1	20	1.04	-	2

В ходе каждого эксперимента измерялись токи высших гармоник в ТОП  $i_{\text{ТОП}}^{(h)}$ , ток ТВ  $i_{\text{ТВ}}^{(h)}$ , ток  $\Phi$   $i_{\Phi}^{(h)}$  или ток KPM  $i_{\text{KPM}}^{(h)}$ , и ток М  $i_M^{(h)}$ , рассчитывались вклады  $K_{D \text{ ТВ}}^{(h)}$ ,  $K_{D \Phi}^{(h)}/K_{D \text{ KPM}}^{(h)}$ ,  $K_{D \text{ М}}^{(h)}$  относительно тока  $i_{\text{ТОП}}^{(h)}$ . В дополнение, были определены вклады  $K_{D \text{ ТВ}/\Phi}^{(h)}$ ,  $K_{D \text{ СЭС}/\Phi}^{(h)}$ ,  $K_{D \text{ М}/\Phi}^{(h)}$  относительно тока фильтра  $i_{\Phi}^{(h)}$  для эксперимента 1. Результаты измерений и расчетов для эксперимента 1, при котором к ТОП был подключен  $\Phi$ , представлены на рисунке 3.14, а именно, на рисунке 3.14(а) показаны формы измеренных токов, на рисунке 3.14 б – результаты расчета вкладов  $K_D^{(h)}$  относительно тока  $i_{\text{ТОП}}^{(h)}$ , на рисунке 3.14 в – результаты расчета вкладов  $K_{D/\Phi}^{(h)}$  относительно тока  $i_{\Phi}^{(h)}$ .

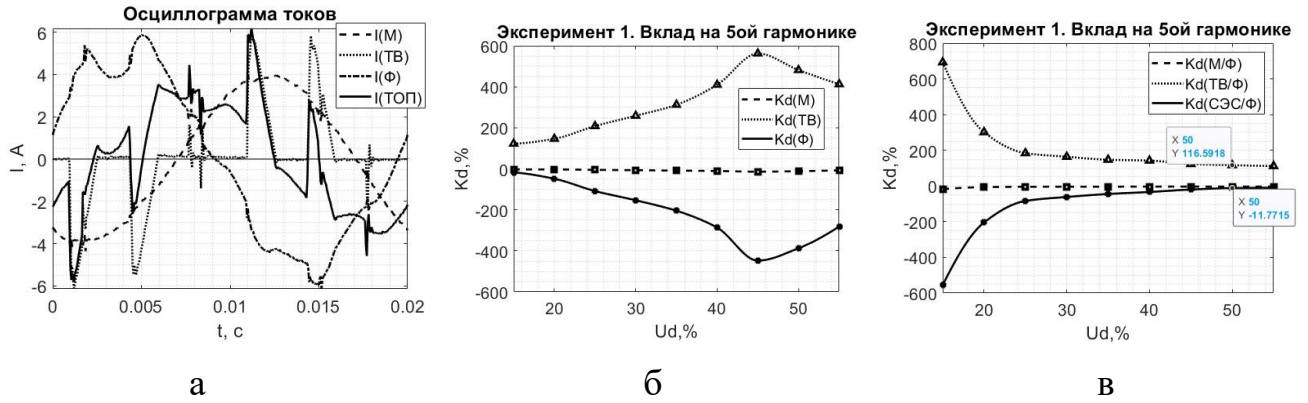


Рисунок 3.14 – Результаты эксперимента 1 для 5ой гармоники: а – осциллограмма токов; б –  $K_D^{(h)}$  относительно тока  $i_{ТОП}^{(h)}$ ; в –  $K_D^{(h)}$  относительно тока  $i_{\Phi}^{(h)}$

Аналогично эксперименту 1 блока 2, по рисунку 3.14 б  $TB$  может быть идентифицирован как источник искажений, ток протекающий через  $\Phi$  компенсирует токи высших гармоник  $TB$ , а  $M$  в меньшей степени подвержен искажениям тока и напряжения. На рисунке 3.14 в видно, что вклад  $K_{D\ TB/\Phi}^{(h)} = 116\%$  при  $U_d > 30\%$  снизился по сравнению с таким же экспериментом без внешних искажений, в котором  $K_{D\ TB/\Phi}^{(h)} = 160\%$  (блок 2, эксперимент 1, рисунок 3.6 в). В то же время, коэффициент вклада СЭС  $K_{D\ СЭС/\Phi}^{(h)} = -11\%$ , что выше результата в сравниваемом эксперименте на 44%. Это величины достаточно для того, чтобы увеличить вклад СЭС, но не для того, чтобы изменить знак коэффициента вклада. Таким образом, требуются дополнительные эксперименты, при которых вклад со стороны СЭС будет доминантным, что описано в следующем подразделе.

Для экспериментов 2-4, при которых к ТОП подключен  $KPM$ , осциллограммы измеренных токов представлены на рисунке 3.15 а, коэффициенты вкладов  $K_{D/\Phi}^{(h)}$  – на рисунке 3.15 б-г.

Можно отметить, что значения вкладов  $KPM$  и  $M$  близки друг к другу (разница не превышает 3%) и четко показывают, что данные нагрузки являются линейными. Ни изменения в генерировании токов высших гармоник потребителем, ни параметры  $KPM$  не влияют на результаты расчетов. Только изменение искажений со стороны СЭС приводит к незначительному снижению

коэффициента вкладов  $K_D^{(h)}$  со 114,5% до 107,3% и возрастанию коэффициентов вкладов  $K_D^{(h)}$  с -7,8% до -4,3% и  $K_D^{(h)}$  с -5,3% до -1,1%.

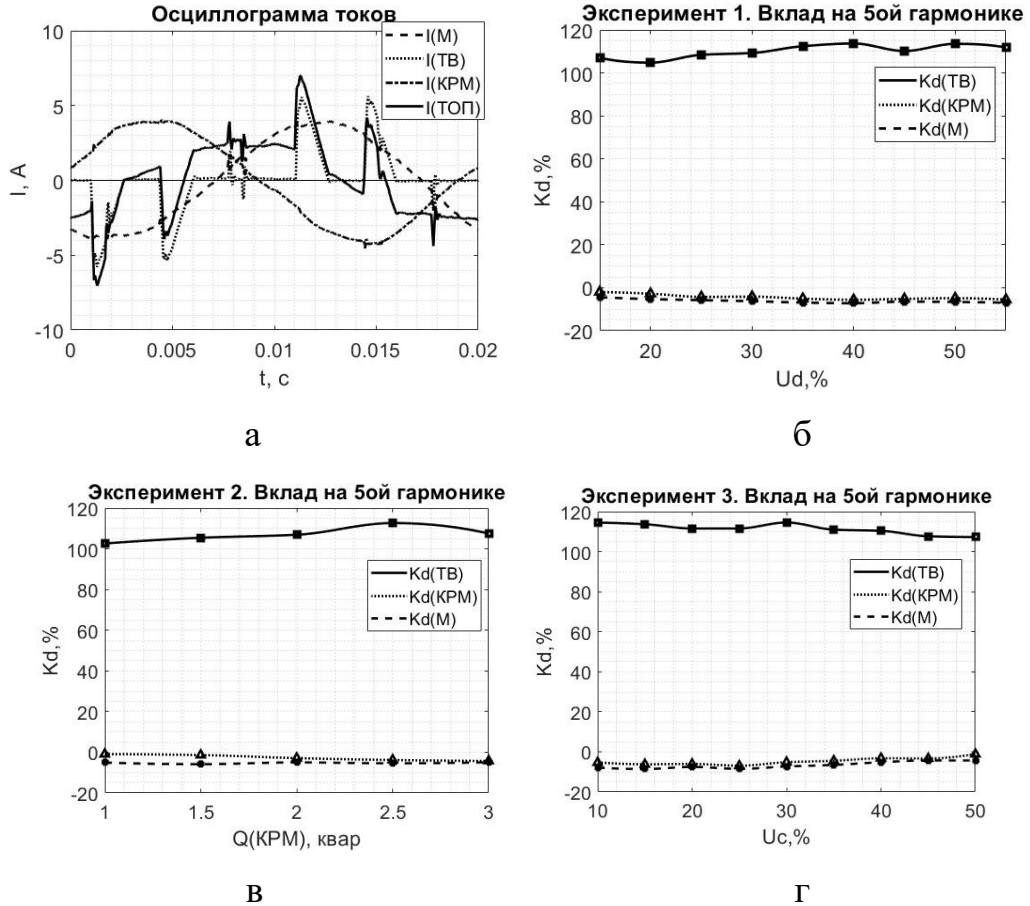


Рисунок 3.15 – Результаты экспериментов 2-4 для 5ой гармоники: а – осциллограмма токов; б –  $K_D^{(h)}$  для эксперимента 2; в –  $K_D^{(h)}$  для эксперимента 3; г –  $K_D^{(h)}$  для эксперимента 4

Резюме:

1. при подключении к ТОП одной линейной нагрузки, одной нелинейной нагрузки и фильтра высших гармоник при наличии внешних искажений со стороны СЭС

- вне зависимости от режима работы нагрузок и искажений со стороны СЭС коэффициент вклада линейной нагрузки, такой как  $M$ , остается постоянным и равен -5%;

- в зависимости от режима работы нагрузок величины коэффициентов вкладов нелинейной нагрузки и фильтра высших гармоник могут принимать различные значения, однако, для нелинейной нагрузки это всегда значение больше 100%, а для фильтра – отрицательное и в несколько раз превышающее по модулю коэффициент вклада линейной нагрузки, что дает возможность идентифицировать тип нагрузки в рассматриваемых условиях;

2. при подключении к ТОП одной линейной нагрузки, одной нелинейной нагрузки и компенсатора реактивной мощности вне зависимости от режима работы нагрузок:

- при наличии постоянных внешних искажений со стороны СЭС коэффициент вклада линейного потребителя  $M$  и компенсатора реактивной мощности составляет величину порядка -5%, а коэффициент вклада нелинейного потребителя – порядка 110%;

- при увеличении внешних искажений со стороны СЭС с  $K_{D\text{ СЭС/Ф}}^{(h)} = -55\%$  до  $K_{D\text{ СЭС/Ф}}^{(h)} = -11\%$  наблюдается незначительное снижение коэффициента вкладов  $K_{D\text{ ТВ}}^{(h)}$  со 114,5% до 107,3% и возрастание коэффициентов вкладов  $K_{D\text{ М}}^{(h)}$  с -7,8% до -4,3% и  $K_{D\text{ КРМ}}^{(h)}$  с -5,3% до -1,1%.

### 3.2.5 Эксперимент с искажениями только со стороны системы электроснабжения

Эксперимент блока 5 проводился при наличии искажений исключительно со стороны СЭС, при этом схема лабораторного стенда приняла вид, описанный на рисунке 3.16. В этом случае принципиальным было определить, действительно ли при доминантном источнике со стороны СЭС проекция тока СЭС на ток фильтра будет положительной, то есть сменит свой знак относительно вкладов СЭС по результатам экспериментов блока 3 и блока 4.

Параметры используемого оборудования представлены в таблице 3.5.



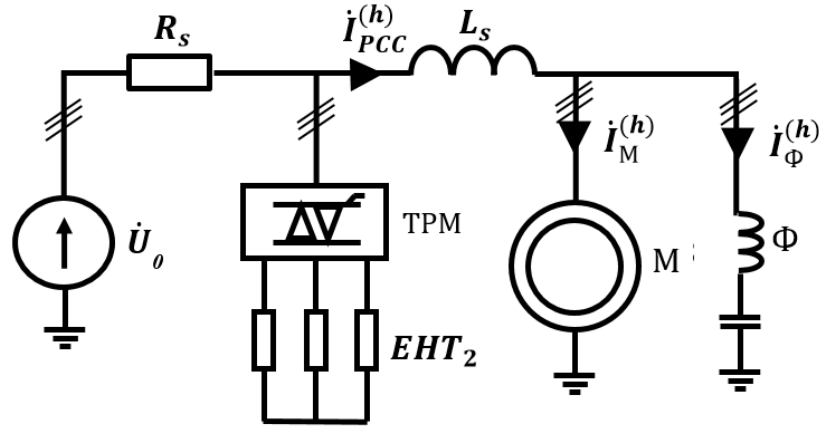


Рисунок 3.16 – Структурная схема лабораторного стенда для блока 5

Таблица 3.5 – Параметры оборудования для экспериментов блока 5

	$R_S$ , Ом	$U_c$ , %	$L_S$ , мГн	$P_M$ , кВт	$\Phi$
Эксперимент 1	2.2	10÷50	0.1	1.04	+

В ходе эксперимента измерялись токи высших гармоник в ТОП  $i_{\text{ТОП}}^{(h)}$ , ток  $\Phi$   $i_{\Phi}^{(h)}$  и ток  $M$   $i_M^{(h)}$ , рассчитывались вклады  $K_{D\Phi}^{(h)}$  и  $K_{DM}^{(h)}$  относительно тока  $i_{\text{ТОП}}^{(h)}$ . И вклады  $K_{D\text{ТОП}/\Phi}^{(h)}$ ,  $K_{DM/\Phi}^{(h)}$  относительно тока фильтра  $i_{\Phi}^{(h)}$ . Осциллограммы измеренных токов представлены на рисунке 3.17(а), результаты расчетов вкладов относительно тока  $\Phi$  на рисунке 3.17(б), относительно тока в ТОП  $i_{\text{ТОП}}^{(h)}$  – на рисунке 3.17(в).

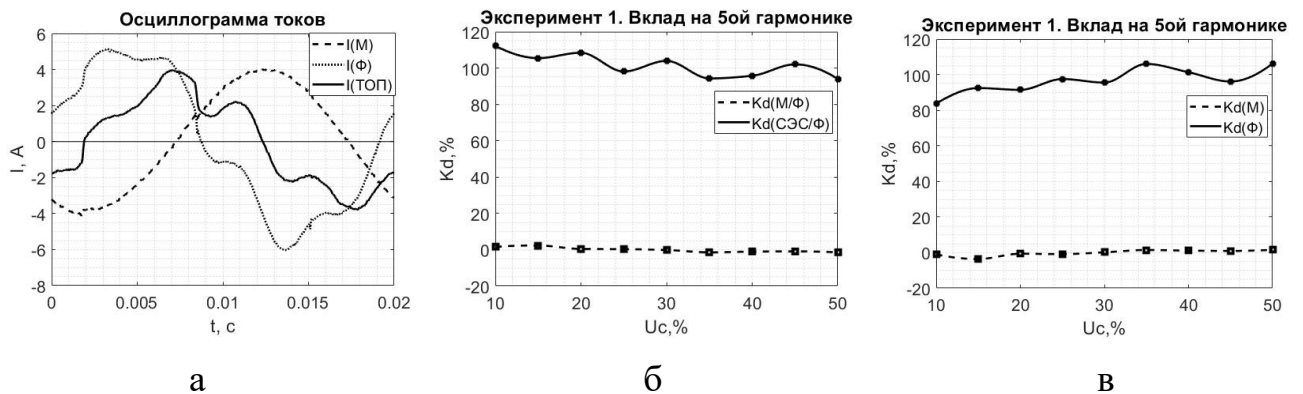


Рисунок 3.17 – Результаты эксперимента 1 для 5ой гармоники: а – осциллограмма токов; б –  $K_D^{(h)}$  относительно тока  $i_{\Phi}^{(h)}$ ; в –  $K_D^{(h)}$  относительно тока  $i_{\text{ТОП}}^{(h)}$

На рисунке 3.17 б видно, что вклад СЭС  $K_{D\text{СЭС}/\Phi}^{(h)}$  принимает значение порядка 100 %, а вклад потребителя  $K_{DM/\Phi}^{(h)}$  около 0 %, что напрямую отображает

то, что со стороны потребителя нет источника искажений. Также, доминантный источник искажений со стороны СЭС существенно влияет на величину вкладов относительно тока  $i_{\text{ТОП}}^{(h)}$ , как показано на рисунке 3.17 в, где вклад линейного потребителя  $\Phi$  определяется величиной порядка 100 %. Это еще раз подчеркивает тот факт, что перед распределением ответственности между потребителями за искажения тока и напряжения в ТОП необходимо проводить оценку влияния СЭС, так как в противном случае возможно получение нерепрезентативных данных и классифицирование линейных емкостных потребителей как источников искажений. Однако, влияния искажений со стороны СЭС на коэффициенты вкладов линейной нагрузки не наблюдается.

### 3.3 ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3

1. На основании проведенных экспериментов были получены зависимости вкладов, характерные для типичных видов нагрузок промышленных предприятий:

- вне зависимости от внешних условий вклад линейной нагрузки, такой как  $M$ , отрицательный и малый по амплитуде по сравнению с другими потребителями, такими как нелинейные потребители в виде  $TB$  и  $TPM$ , а также по сравнению с  $KPM$  и  $\Phi$ ;
- нелинейная нагрузка характеризуется положительным коэффициентом вклада, который может превышать 100% и который напрямую зависит от высших гармоник тока, генерируемых непосредственно потребителем;
- фильтр высших гармоник на резонансной частоте характеризуется отрицательным коэффициентом вклада с амплитудой значительно большей, чем амплитуда коэффициента вклада линейной нагрузки; что показывает корреляцию между коэффициентом  $K_{D\Phi}^{(h)}$  и компенсацией токов высших гармоник фильтром;
- фильтр высших гармоник на нерезонансной частоте, также, как и компенсатор реактивной мощности с частотой расстройки, характеризуется

отрицательными вкладами малых амплитуд; однако, компенсаторы реактивной мощности без частоты расстройки должны быть рассмотрены отдельно.

2. Перед определением вкладов потребителей в искажения тока и напряжения в Топ необходимо оценить вклад внешних источников в ухудшение качества электроэнергии в Топ, так как при искажениях со стороны СЭС, превышающих определенную величину, коэффициенты вкладов потребителей могут принимать значения, никаким образом не коррелирующиеся с их реальными вкладами. Определение этой величины стало одной из задач главы 4. Однако при меньших искажениях со стороны СЭС полученные результаты являются репрезентативными.

# ГЛАВА 4 ИССЛЕДОВАНИЕ ВАРИАНТОВ ВЫЯВЛЕНИЯ ВКЛАДОВ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ И СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ В ИСКАЖЕНИЕ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ В ТОЧКЕ ОБЩЕГО ПРИСОЕДИНЕНИЯ ПУТЕМ ИММИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЯ

## 4.1 СХЕМА СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЯ

Для апробации представленного во 2 главе метода была рассмотрена схема СЭС предприятия с мощностью вводных трансформаторов 630 и 1000 кВА. Расчеты проводились на одной из секций РУ-0,4 кВ, показанной на рисунке 4.1.

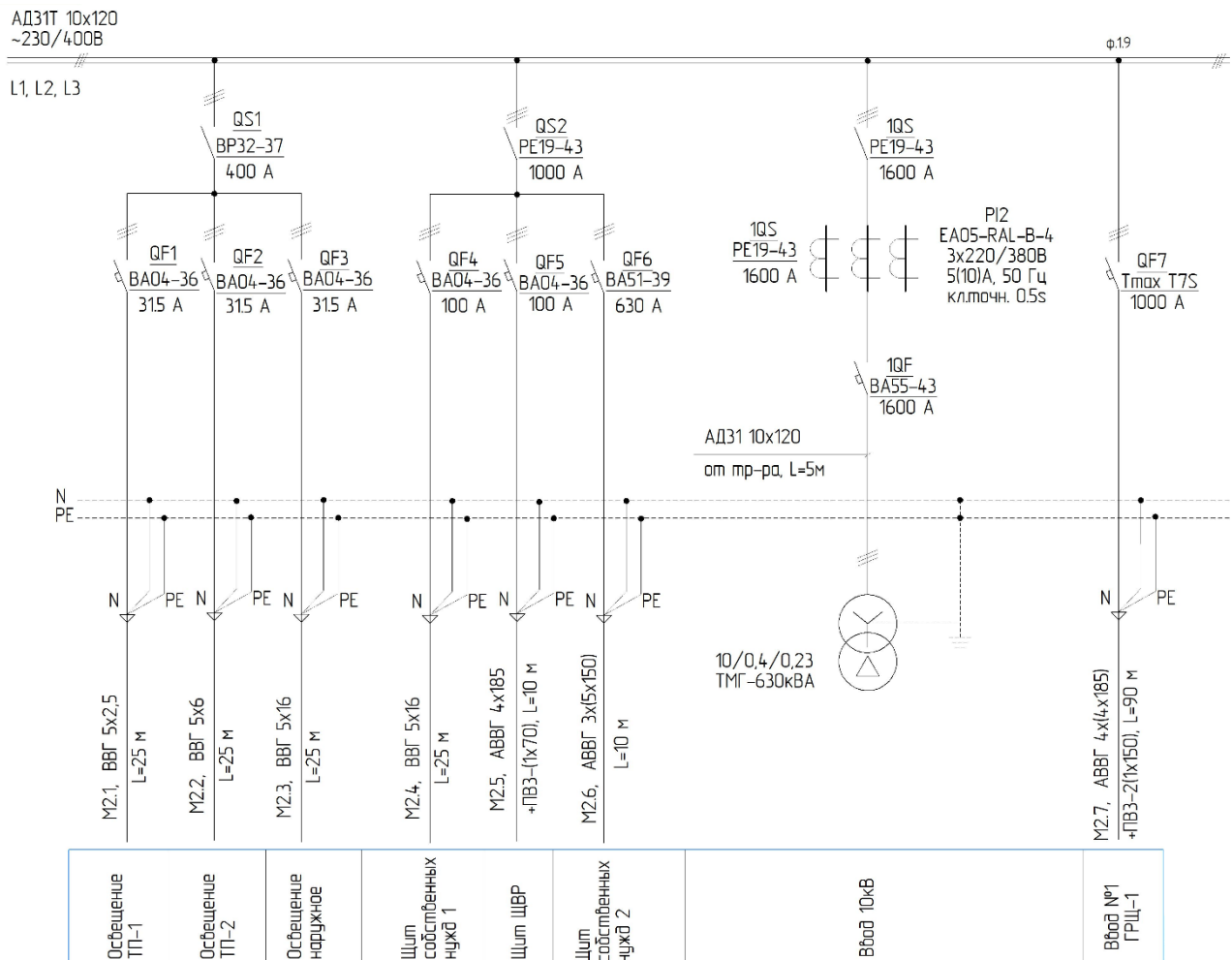


Рисунок 4.1 – Принципиальная схема РУ-0,4 кВ

К секции РУ-0,4 кВ подсоединены 6 потребителей, подключенных через автоматические выключатели QF1-QF6, которые в дальнейшем будут

рассматриваться как источники внешних искажений. Также, от секции РУ-0,4 кВ запитан ввод №1 ГРЩ-1, от которого в свою очередь осуществляется электроснабжение пяти силовых щитов (рисунок 4.2).

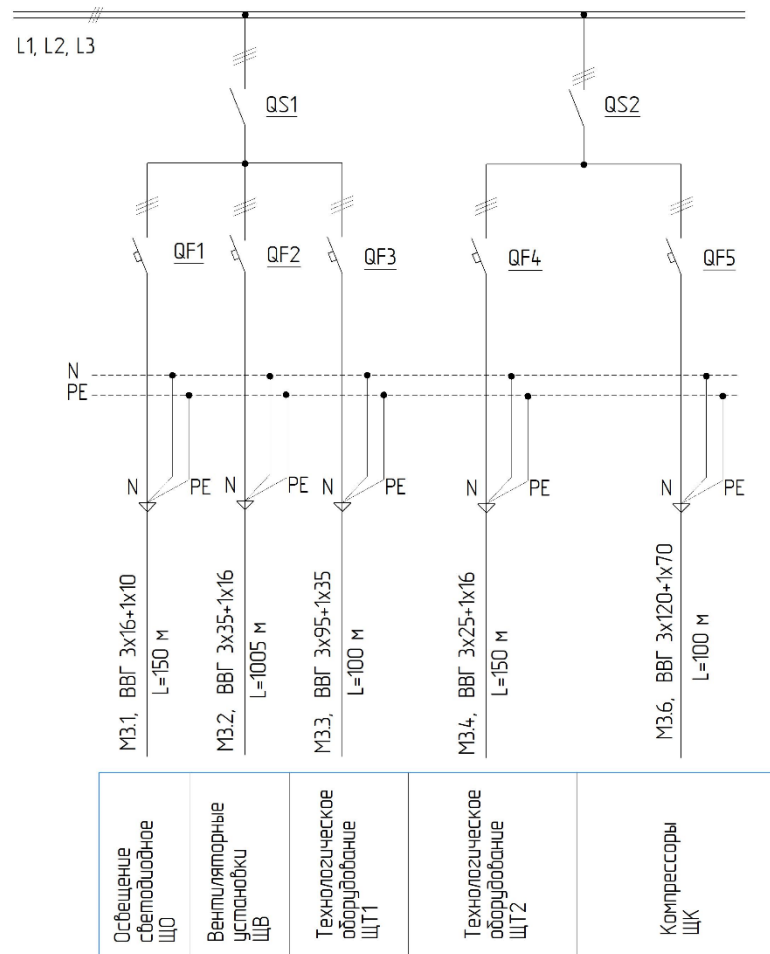


Рисунок 4.2 – Принципиальная схема ГРЩ1

Нагрузка каждого силового щита представляет собой оборудование одного или двух типов. Однотипное оборудование в рамках компьютерного моделирования будет представлено в виде эквивалентных нагрузок, параметры которых указаны в таблице 4.1. Параметры питающих кабелей представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.1 – Параметры нагрузки

Наименование щита	Тип нагрузки	Мощность, кВА
ЩО	Освещение светодиодное	40
ЩВ	Вентиляторные установки с преобразователем частоты	75
ЩТ1	Технологическое оборудование (нелинейная + линейная нагрузка)	90+75
ЩТ2	Технологическое оборудование (линейная нагрузка)	37
ЩК	Компрессоры	110

Таблица 4.2 – Параметры питающих кабелей

Наименование щита	Тип кабеля	Длина, м	Сечение фазного проводника, мм <sup>2</sup>	Длительно-допустимый ток, А
ЩО	ВВГ 3x16+1x10	150	16	84
ЩВ	ВВГ 3x35+1x16	100	35	137
ЩТ1	ВВГ 3x95+1x35	100	95	261
ЩТ2	ВВГ 3x25+1x16	150	25	112
ЩК	ВВГ 3x120+1x70	100	120	302

Для моделирования описанного участка СЭС в программной среде Matlab Simulink необходимо произвести расчет параметров схемы замещения каждого элемента системы.

## 4.2 РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ

### Источник напряжения

Источник напряжения представляется в виде источника с напряжением 400 В, включающего индуктивное сопротивление системы  $X_c$ , рассчитываемое по значению мощности короткого замыкания согласно выражению (4.1).

$$X_c = \frac{U_c^2}{S_{к.з.}}, \quad (4.1)$$

где  $U_c$  – напряжение сети 400 В,  $S_{к.з.}$  – мощность короткого замыкания 80 МВА (сведения от службы главного энергетика).

$$X_c = \frac{400^2}{80 \cdot 10^6} = 0,002 \text{ Ом.}$$

### Вводной трансформатор

Сопротивление двухобмоточного вводного трансформатора рассчитывается исходя из его паспортных данных (таблица 4.3).

Таблица 4.3 – Параметры трансформатора

Тип трансформатора	Потери короткого замыкания $P_K$ , Вт	Напряжение короткого замыкания $U_{к.з.}\%$ , %	Потери холостого хода $P_K$ , Вт
ТМГ 630	7600	5,5	1240

Полное сопротивление трансформатора рассчитывается согласно формуле (4.2), где  $U_H$  – номинальное напряжение 400 В,  $S_{ном}$  – номинальная мощность трансформатора 630 кВА.

$$Z_{тр} = \frac{U_{к.з.}\%}{100} \frac{U_H^2}{S_{ном}}. \quad (4.2)$$

$$Z_{тр} = \frac{5,5}{100} \frac{400^2}{630 \cdot 10^3} = 0,0140 \text{ Ом.}$$

Активное сопротивление рассчитывается по формуле (4.3) на основании потерь короткого замыкания  $P_K$ . Реактивное сопротивление определяется по формуле (4.4).

$$R_{тр} = P_K \frac{U_H^2}{S_{ном}^2}; \quad (4.3)$$

$$R_{тр} = 7600 \frac{400^2}{(630 \cdot 10^3)^2} = 0,0031 \text{ Ом.}$$

$$X_{тр} = \sqrt{Z_{тр}^2 - R_{тр}^2}; \quad (4.4)$$

$$X_{тр} = \sqrt{0,0140^2 - 0,0031^2} = 0,0137 \text{ Ом.}$$

### Моделирование нагрузок

Осветительные приборы, являющиеся нагрузкой ЩО, моделируется согласно схеме, представленной в работе [49], где авторы рассматривают компьютерные модели полупроводниковых осветительных приборов. Из представленных в статье вариантов светодиодных ламп была выбрана модель светодиодов типа В, форма кривых тока которых совпадает с осветительными приборами на производстве и имеет вид, представленный на рисунке 4.3.

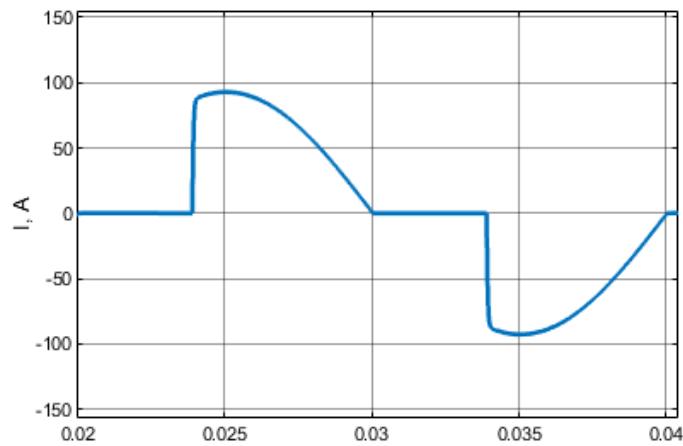


Рисунок 4.3 – Форма кривой тока светильников

Нагрузка ЦВ и ЦК представлена в виде стандартного блока асинхронного двигателя с преобразователем частоты (ПЧ) со скалярным алгоритмом широтно-импульсного моделирования (скалярное ШИМ), потребляемая мощность которого регулируется изменением момента на валу. Нелинейная нагрузка ЦТ1 также моделируется стандартным блоком асинхронного двигателя (АД) с тиристорным регулятором мощности. Регулирование нагрузки, как и в случае со скалярным ШИМ осуществляется за счет изменения вращающего момента. Линейная нагрузка ЦТ1 и ЦТ2 замещена блоком асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором с возможностью регулирования вращающего момента.

#### Моделирование питающих линий

На основании параметров кабелей (таблица 4.2), используемых в рассматриваемой части СЭС, рассчитываются параметры их схемы замещения, а именно, активное и индуктивное сопротивление. Результаты расчетов представлены в таблице 4.4.



Таблица 4.4 – Параметры силовых линий

Тип кабеля	Длина, м	Удельное активное сопротивление, Ом/км	Удельное реактивное сопротивление, Ом/км	Активное сопротивление $R_{л2}$ , Ом	Реактивное сопротивление $L_{л2}$ , Ом
ВВГ 3x16+1x10	150	1,20	0,0675	0,180	0,0101
ВВГ 3x35+1x16	100	0,54	0,0637	0,054	0,0064
ВВГ 3x95+1x35	100	0,20	0,0602	0,020	0,0060
ВВГ 3x25+1x16	150	0,74	0,0662	0,111	0,0099
ВВГ 3x120+1x70	100	0,158	0,0602	0,016	0,0060

### Фильтр высших гармоник

Фильтр высших гармоник моделируется стандартным блоком фильтра, настроенным на одну резонансную частоту, мощностью 25 квар, индуктивностью 0,77 мГн, емкостью 530 мкФ, активным сопротивлением 0,01 Ом. Добротность фильтра  $Q$ , необходимая для задания в параметрах стандартного блока (рисунок 4.4), определяется по формуле (4.5).

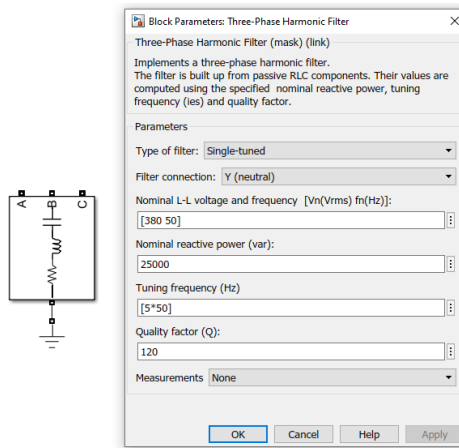


Рисунок 4.4 – Блок замещения фильтра 5ой гармоники и его параметры

$$Q = \frac{h \cdot X_L}{R}, \quad (4.5)$$

где  $h$  – номер гармоники;

$X_L$  – индуктивное сопротивление фильтра на первой гармонике;

$R$  – активное сопротивление фильтра.

$$Q = \frac{5 \cdot 2\pi \cdot 50 \cdot 0,77 \cdot 10^{-3}}{0,01} \approx 120.$$

В результате, параметры всех элементов СЭС определены для представления их в Matlab Simulink и проведения последующих расчетов.

### 4.3 ИММИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЯ

Сформированная система в Matlab Simulink моделировалась при различных параметрах нагрузки потребителя, местах подключения фильтра и внешних искажениях. Все расчеты условно разделены на 3 блока:

- Блок 1. Моделирование СЭС без фильтра и внешних искажений;
- Блок 2. Моделирование СЭС с фильтром и без внешних искажений;
- Блок 3. Моделирование СЭС с внешними искажениями и фильтром.

Детальное описание экспериментов каждого блока представлено ниже.

#### 4.3.1 Моделирование системы электроснабжения предприятия без фильтра и внешних искажений

Однолинейная схема замещения для всех моделирований блока 1 выглядит одинаково, как показано на рисунке 4.5.

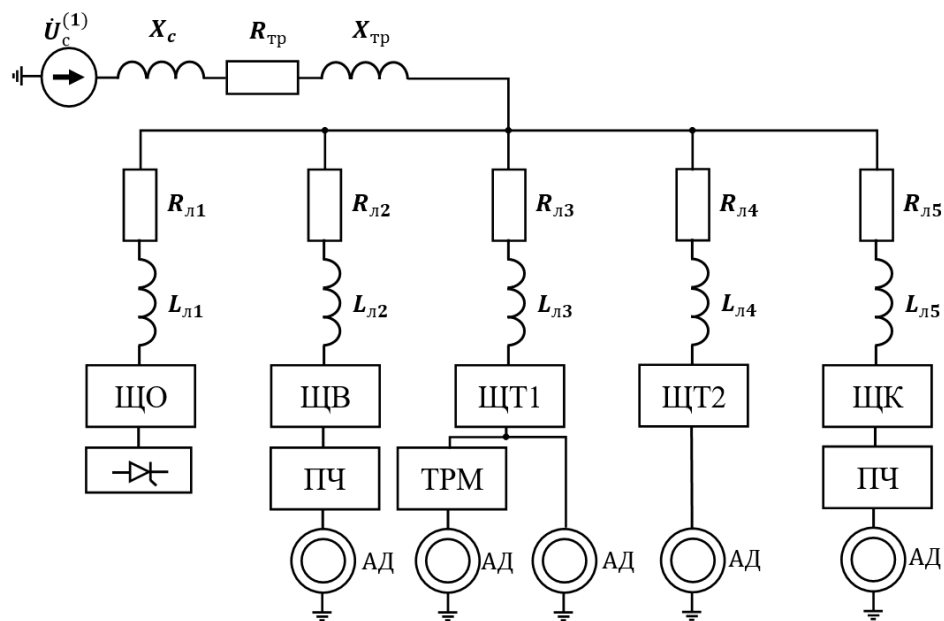


Рисунок 4.5 – Схема замещения СЭС предприятия для экспериментов блока 1

Как видно из схемы, фильтр высших гармоник не подключается в систему, а наличие искажений со стороны СЭС не предусматривается.

В рамках каждого моделирования менялась нагрузка одного из щитов в относительных единицах относительно номинальной мощности каждого щита, указанной в таблице 4.1. Параметры нагрузок для каждого моделирования представлены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Параметры нагрузок моделирований блока 1

№ моделирования	Нагрузка ЩО, о.е.	Нагрузка ЩВ, о.е.	Нагрузка ЩТ1 (нелинейная составляющая), о.е.	Нагрузка ЩТ2, о.е.	Нагрузка ЩК, о.е.
1	1	0,5÷1	1	1	1
2	1	1	0÷1	1	1
3	1	1	1	0÷1	1
4	1	1	1	1	0:0,5:1

Предполагается, что потребляемая мощность освещения не меняется, мощность вентиляторов регулируются в диапазоне  $[0,5; 1]$ , нелинейная нагрузка технологических процессов может меняться в широком диапазоне  $[0; 1]$ , а компрессоры могут быть либо выключены, либо работают в номинальном режиме или в половину мощности от него.

Целью моделирований блока 1 является определение зависимостей коэффициентов вкладов линейных и нелинейных потребителей различных типов от нагрузки каждого типа оборудования.

#### 4.3.1.1 Моделирование 1

Моделирование 1 проводилось при изменении вращающего момента двигателя, подключенного к ЩВ. Результаты моделирования 1 представлены в таблице 4.6.

Анализируя результаты моделирования, можно отметить, что, как и в главе 3, линейная нагрузка ЩТ2 характеризуется отрицательным вкладом малой амплитуды, незначительно меняющейся для различных моделируемых режимов от -5,55% до -5,65%. Вклад потребителя ЩТ1, в состав которого входит как линейная, так и нелинейная нагрузка, характеризуется величиной, близкой к

вкладу линейной нагрузки, так как нелинейный потребитель в его составе генерирует такой ток 5ой гармоники, что проекция этого тока на ток в ТОП мала. В результате, суммарный вклад нелинейной и линейной нагрузки потребителя ближе к вкладу линейной нагрузки, однако, изменение этого коэффициента в зависимости от загрузки ЩВ от -4,54 % до -5,87 % говорит о том, что нелинейная нагрузка в потребителе смешанной структуры ЩТ1 все же присутствует. Аналогичную ситуацию с малым вкладом нелинейной нагрузки можно наблюдать по отношению к результатам расчета ЩО. Также видно, что вклад ЩО уменьшается с 2,72 % до 2,30 % и вклад ЩК уменьшается с 83,51 % до 77,18 % при увеличении нагрузки другого нелинейного потребителя. При увеличении нагрузки ЩВ вклад этого потребителя увеличивался с 23,87 % до 32,01 %. В итоге, рассчитанные коэффициенты полностью отражают вклады потребителей в зависимости от потребляемой мощности и, соответственно, генерируемых ими токов.

Таблица 4.6 – Результаты расчетов моделирования 1

Нагрузка ЩВ, о.е.	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
Пара- метры						
$K_D(\text{ЩО}), \%$	2,72	2,62	2,50	2,43	2,36	2,30
$K_D(\text{ЩВ}), \%$	23,87	25,66	27,28	28,86	30,48	32,01
$K_D(\text{ЩТ1}), \%$	-4,54	-4,85	-5,14	-5,40	-5,62	-5,84
$K_D(\text{ЩТ2}), \%$	-5,55	-5,58	-5,58	-5,61	-5,63	-5,65
$K_D(\text{ЩК}), \%$	83,51	82,15	80,94	79,72	78,41	77,18
$\text{THDu}(\text{ТОП}), \%$	6,33	6,50	6,66	6,82	6,99	7,16
$\text{THDi}(\text{ТОП}), \%$	17,41	17,37	17,28	17,23	17,19	17,14
$I^{(1)}(\text{ТОП}), \text{A}$	566,05	578,31	591,20	603,96	616,92	630,26
$I^{(5)}(\text{ТОП}), \text{A}$	78,87	81,15	83,37	85,64	87,96	90,25
$I^{(1)}(\text{ЩВ}), \text{A}$	49,36	61,43	73,80	86,30	99,04	112,07
$I^{(5)}(\text{ЩВ}), \text{A}$	23,34	25,81	28,14	30,44	32,77	35,02

Резюме: при увеличении нагрузки нелинейного потребителя в виде АД с ПЧ и скалярной ШИМ коэффициент вклада этого потребителя увеличивается. В то же время коэффициенты вкладов других нелинейных потребителей и потребителей смешанной структуры (включающих как линейную, так и нелинейную нагрузку)

уменьшаются. Коэффициент вклада линейной нагрузки не зависит от режима работы остальных потребителей.

#### 4.3.1.2 Моделирование 2

В ходе моделирования 2 изменялась нагрузка ЩТ1. Результаты моделирования 2 представлены в таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Результаты расчетов моделирования 2

Нелинейная нагрузка ЩТ1, о.е.	0	0,25	0,5	0,75	1
Параметры					
$K_D(\text{ЩО}), \%$	0,88	1,28	1,64	1,98	2,30
$K_D(\text{ЩВ}), \%$	37,44	36,13	34,79	33,42	32,01
$K_D(\text{ЩТ1}), \%$	-12,92	-11,66	-10,03	-8,08	-5,84
$K_D(\text{ЩТ2}), \%$	-6,04	-5,93	-5,83	-5,74	-5,65
$K_D(\text{ЩК}), \%$	80,65	80,18	79,43	78,42	77,18
$\text{THDu}(\text{ТОП}), \%$	7,01	7,04	7,08	7,12	7,16
$\text{THDi}(\text{ТОП}), \%$	18,19	17,75	17,45	17,25	17,14
$I^{(1)}(\text{ТОП}), \text{A}$	512,63	542,27	571,73	601,05	630,26
$I^{(5)}(\text{ТОП}), \text{A}$	84,96	86,34	87,64	88,93	90,25
$I^{(1)}(\text{ЩТ1}), \text{A}$	128,23	158,31	188,19	217,95	247,59
$I^{(5)}(\text{ЩТ1}), \text{A}$	11,03	11,44	14,68	19,33	24,54

В отличие от нагрузок ЩВ и ЩК, нелинейная нагрузка, подключенная к ЩТ1, питается от тиристорного регулятора мощности. В ходе моделирования было выявлено, что коэффициент вклада ЩТ1 увеличился с -12,92 % до -5,84 %. Отрицательные значения коэффициентов вкладов потребителя смешанной структуры были проанализированы в предыдущем моделировании. Тот факт, что нелинейная нагрузка ЩТ1 генерирует малую относительно других потребителей 5ую гармоники тока подтверждаются последней строчкой таблицы, где видно, что при отключенной нелинейной нагрузке потребляемый ток составляет величину 11,03 А, вызванную, очевидно, внешними источниками искажений, а при полной загрузке величина этого тока увеличивается лишь до значения 24,54 А. Как и в предыдущем случае, вклад линейной нагрузки ЩТ2 незначительно изменяется, в то время как вклады нелинейных потребителей ЩВ и ЩК снижаются. В этом

случае можно сделать вывод о том, что предложенный коэффициент позволяет количественно оценить вклады нелинейных потребителей, а также потребителей, включающих в себя как линейную, так и переменную нелинейную нагрузку.

Резюме: при увеличении нелинейной нагрузки потребителя смешанного типа коэффициент вклада этого потребителя увеличивается. В то же время коэффициенты вкладов других нелинейных потребителей уменьшаются. Коэффициент вклада линейной нагрузки не зависит от режима работы остальных потребителей.

#### 4.3.1.3 Моделирование 3

В рамках моделирования 3 изменялась нагрузка линейного потребителя ЩТ2. Результаты моделирования 3 представлены в таблице 4.9.

Таблица 4.9 – Результаты расчетов Моделирования 3

Нагрузка ЩТ2, о.е.	0	0,25	0,5	0,75	1
Пара- метры					
$K_D(\text{ЩО}), \%$	2,07	2,13	2,18	2,24	2,30
$K_D(\text{ЩВ}), \%$	32,31	32,24	32,16	32,09	32,01
$K_D(\text{ЩТ1}), \%$	-6,50	-6,34	-6,18	-6,01	-5,84
$K_D(\text{ЩТ2}), \%$	-5,71	-5,70	-5,68	-5,67	-5,65
$K_D(\text{ЩК}), \%$	77,83	77,68	77,52	77,36	77,18
$\text{THDu}(\text{ТОП}), \%$	7,18	7,17	7,16	7,16	7,16
$\text{THDi}(\text{ТОП}), \%$	18,83	18,41	17,99	17,57	17,14
$I^{(1)}(\text{ТОП}), \text{A}$	572,51	585,79	599,79	614,57	630,26
$I^{(5)}(\text{ТОП}), \text{A}$	89,81	89,90	90,01	90,12	90,25
$I^{(1)}(\text{ЩТ2}), \text{A}$	24,31	28,23	38,10	51,00	65,65
$I^{(5)}(\text{ЩТ2}), \text{A}$	5,13	5,13	5,12	5,12	5,10

По результатам расчетов видно, что режим работы линейной нагрузки практически не влияет на вклады всех потребителей, подключенных к ТОП. Можно заметить, что увеличение линейной нагрузки снижает уровень  $\text{THDi}$ , но это практически не влияет на  $\text{THDu}$ . Такой эффект достигается увеличением потребляемого тока первой гармоники в ТОП при постоянстве эмиссии гармонических составляющих со стороны нелинейных потребителей.

Резюме: изменение нагрузки линейного потребителя не влияет на коэффициенты вклада линейных и нелинейных потребителей, подключенных к ТОП.

#### 4.3.1.4 Моделирование 4

Моделирование 4 проводилось при изменении режима работы нагрузки ЩК. Вначале, ЩК был полностью отключен, далее нагружен на 0,5 от номинальной мощности, после чего работал в номинальном режиме. Результаты моделирования 4 представлены в таблице 4.10.

Таблица 4.10 – Результаты расчетов моделирования 4

Нагрузка ЩК, о.е.	0	0,5	1
Пара- метры			
$K_D(\text{ЩО}), \%$	2,81	2,80	2,30
$K_D(\text{ЩВ}), \%$	105,53	41,65	32,01
$K_D(\text{ЩТ1}), \%$	-3,20	-4,20	-5,84
$K_D(\text{ЩТ2}), \%$	-5,14	-5,51	-5,65
$K_D(\text{ЩК}), \%$	0,00	65,25	77,18
$\text{THDu}(\text{ТОП}), \%$	4,25	5,86	7,16
$\text{THDi}(\text{ТОП}), \%$	16,49	17,32	17,14
$I^{(1)}(\text{ТОП}), \text{A}$	468,34	539,92	630,26
$I^{(5)}(\text{ТОП}), \text{A}$	50,05	72,44	90,25
$I^{(1)}(\text{ЩК}), \text{A}$	0,00	71,95	160,52
$I^{(5)}(\text{ЩК}), \text{A}$	0,00	48,48	71,09

При отключенной нагрузке ЩК доминантным источником искажений 5ой гармоники является ЩВ. При подключении компрессоров на полную мощность и на 0,5 от этого значения происходит перераспределение вкладов и доминантным источником становится ЩК. Как и в предыдущих моделированиях, вклад той нагрузки, мощность которой увеличивается, возрастает, в то время как вклады остальных нелинейных нагрузок и нагрузок смешанной структуры уменьшается.

Резюме: при подключении к ТОП нелинейной нагрузки, мощность которой больше мощности любого потребителя в рассматриваемой системе, коэффициенты вкладов меняют свои значения таким образом, что вновь

подключенная нелинейная нагрузка характеризуется наибольшим коэффициентом вклада. Зависимости остальных коэффициентов вкладов от нагрузки идентичны случаю, рассмотренному в моделировании 1.

#### 4.3.1.5 Выводы по итогам моделирований блока 1

В результате, до подключения фильтро-компенсирующих устройств согласно предлагаемому методу можно оценить вклады потребителей относительно искажения тока в ТОП. Видно, что вклад напрямую зависит от амплитуды и фазы тока, генерируемого непосредственно самим потребителем, а также определяется током в ТОП, то есть суммарным влиянием всех потребителей, подключенных к ТОП. Зафиксировано, что при условии увеличения нагрузки нелинейного потребителя или потребителя смешанного характера, наблюдается увеличение коэффициента вклада этого потребителя. При том же условии, коэффициенты вкладов остальных нелинейных потребителей и потребителей смешанной структуры снижаются. Зависимость коэффициентов вкладов линейных нагрузок от режимов работы любых потребителей, подключенных к ТОП, не обнаружена.

Однако, проведение таких расчетов правомерно лишь при незначительных искажениях со стороны СЭС. Случай с доминантным источником искажений со стороны СЭС рассмотрен в блоке 3.

### **4.3.2 Моделирование системы электроснабжения предприятия с фильтром и без внешних искажений**

Однолинейная схема замещения для моделирования блока 2 отображена на рисунке 4.6.

Видно, что моделировалась возможность подключения фильтра 5ой гармоники к различным узлам СЭС, в том числе к шине, а также непосредственно к потребителям после силовых линий.



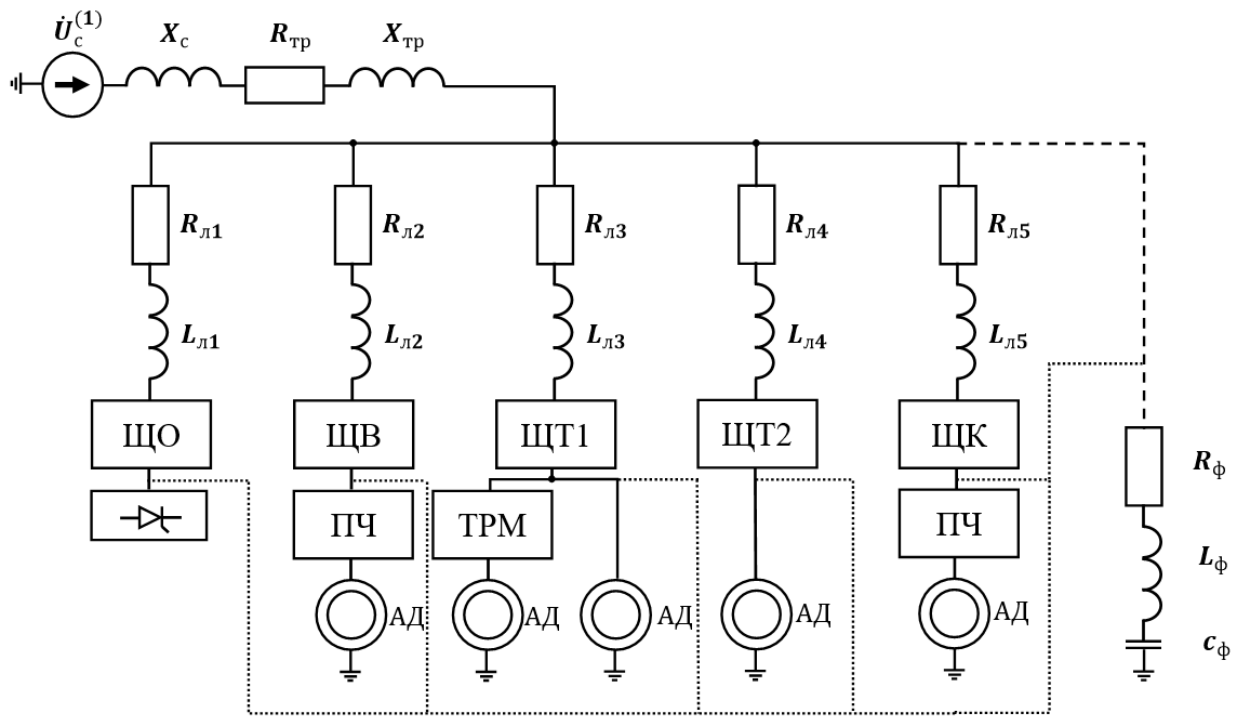


Рисунок 4.6 – Схема замещения СЭС предприятия для экспериментов блока 2

Целью моделирования блока 2 является апробация предложенного метода с точки зрения расчета коэффициента  $K_D^{(h)}$  для фильтра высших гармоник и с точки зрения выбора места подключения фильтра на основании расчета коэффициента  $K_{D \text{ СЭС/Ф}}^{(h)}$ .

#### 4.3.2.1 Моделирование 1

В ходе моделирования 1 фильтр был подключен к шине. Были рассчитаны вклады потребителей относительно тока СЭС  $K_{D/\text{ТОП}}^{(h)}$ , а также вклады потребителей и СЭС относительно фильтра  $K_{D/\text{Ф}}^{(h)}$ . Результаты расчета представлены в таблице 4.11.

В виду того, что после установки фильтра значение тока 5ой гармоники СЭС стремится к нулю, то рассчитанные вклады  $K_{D/\text{ТОП}}$  не являются информативными, так как знаменатель выражения для расчета указанного значения слишком мал. Что же касается вкладов относительно тока фильтра, то можно отметить, что коэффициент вклада СЭС составляет -1,99 %, что полностью отражает исходные данные, в которых не предусматриваются искажения со стороны СЭС. Линейная нагрузка ЩТ2, нелинейная нагрузка ЩО и смешанная

нагрузка ЩТ1 либо не являются источниками токов 5ой гармоники, либо их амплитуда мала. В связи с этим, они характеризуются отрицательными вкладами малой амплитуды, в то время как вклады остальных потребителей отражают распределение ответственности за генерацию токов высших гармоник в той же мере, что и результаты моделирований 1-4 блока 1 при номинальной нагрузке всех потребителей.

Таблица 4.11 – Результаты расчетов моделирования 1

Параметры Нагрузка	$K_{D/ТОП}, \%$	$K_{D/\Phi}, \%$
ЩО	15,67	-5,42
ЩВ	5,84	41,87
ЩТ1	26,50	-12,83
ЩТ2	-5,87	-0,06
ЩК	92,82	79,58
Фильтр	-12,93	---
СЭС	---	-1,99

Резюме: при подключении фильтра к ТОП расчет коэффициентов  $K_{D/ТОП}^{(h)}$  не информативен, в то время как коэффициенты  $K_{D/\Phi}^{(h)}$  достоверно отражают вклад СЭС в искажения напряжения и тока в ТОП, а также вклады потребителей.

#### 4.3.2.2 Моделирование 2.

В ходе моделирования 2 изменялось место подключения фильтра. Рассчитывался коэффициент вклада  $K_{D/СЭС/\Phi}^{(h)}$ , в котором учитывалось влияние предвключенных элементов сети по отношению к месту подключения фильтра (далее – внешняя система относительно фильтра). Результаты расчетов представлены в таблице 4.12.

Таблица 4.12 – Результаты расчетов моделирования 2

Параметры Место подключе- ния фильтра	$K_D$ сэс/ф, %	THDu(ТОП), %	THDi(ТОП), %	$\cos\varphi(1)$	$I^{(1)}$ (ТОП), А	$I^{(6)}$ (ТОП), А	$\frac{I^{(6)}(ТОП)}{I^{(1)}(ТОП)}$ , %
ТОП	-1,99	4,75	12,50	0,82	597,19	42,13	7,06
ЩО	121,62	6,02	15,59	0,80	609,84	76,02	12,47
ЩВ	31,01	5,13	13,42	0,81	601,02	50,94	8,48
ЩТ1	116,96	5,02	13,26	0,81	598,37	49,78	8,32
ЩТ2	101,04	5,70	15,18	0,80	603,69	70,78	11,73
ЩК	11,33	4,93	12,92	0,81	599,29	43,39	7,24

В ходе расчетов были определены коэффициенты вклада внешней относительно фильтра системы для каждого варианта подключения фильтра. При подключении фильтра к ТОП можно наблюдать значение -1,99 %, что говорит о том, что источники искажений расположены со стороны потребителей, а не со стороны СЭС. При подключении фильтра к ЩО вклад внешней относительно фильтра системы составляет 121,62 %. Аналогично, можно отметить, что воздействие внешней относительно фильтра системы на ЩТ1, ЩТ2 составляет более 100 %. Это означает, что потребитель, к которому подсоединен фильтр, либо не является источником искажений, либо его вклад мало относительно внешней системы.

Видно, что наименьший THDu и THDi в ТОП, и коэффициент мощности на первой гармонике  $\cos\varphi(1)$  и минимальный ток 5ой гармоники достигается при подключении фильтра к ТОП. Это означает, что в таком случае будет минимален нагрев проводников СЭС от токов высших гармоник, что увеличит пропускную способность линий с точки зрения тока 1ой гармоники. В этой связи, подключение фильтра к ТОП является предпочтительным, при этом, такой вывод возможно сделать на основании расчета коэффициента вклада  $K_D^{(h)}$  сэс/ф, так как наблюдается прямая зависимость между этим показателем и остальными показателями качества электроэнергии в ТОП. Вторым по эффективности в таком

случае является подключение фильтра к ЩК с  $K_{D\text{СЭС}/\Phi}^{(h)}=11,33\%$ , являющемуся доминантным источником искажений в рассматриваемой системе. Анализ последующих вариантов подключения фильтра нецелесообразен ввиду того, что различные показатели качества по-разному характеризуют эффективность того или иного места подключения.

Резюме: на основании расчета  $K_{D\text{СЭС}/\Phi}^{(h)}$  возможно определить наиболее эффективное место подключения фильтра высших гармоник с точки зрения  $\text{THD}_i$  и  $\text{THD}_u$  в ТОП,  $\cos\varphi(1)$ , а также минимального тока 5ой гармоники.

### 4.3.3 Моделирование системы электроснабжения предприятия с внешними искажениями и фильтром

Однолинейная схема замещения для моделирования блока 3 отображена на рисунке 4.7.

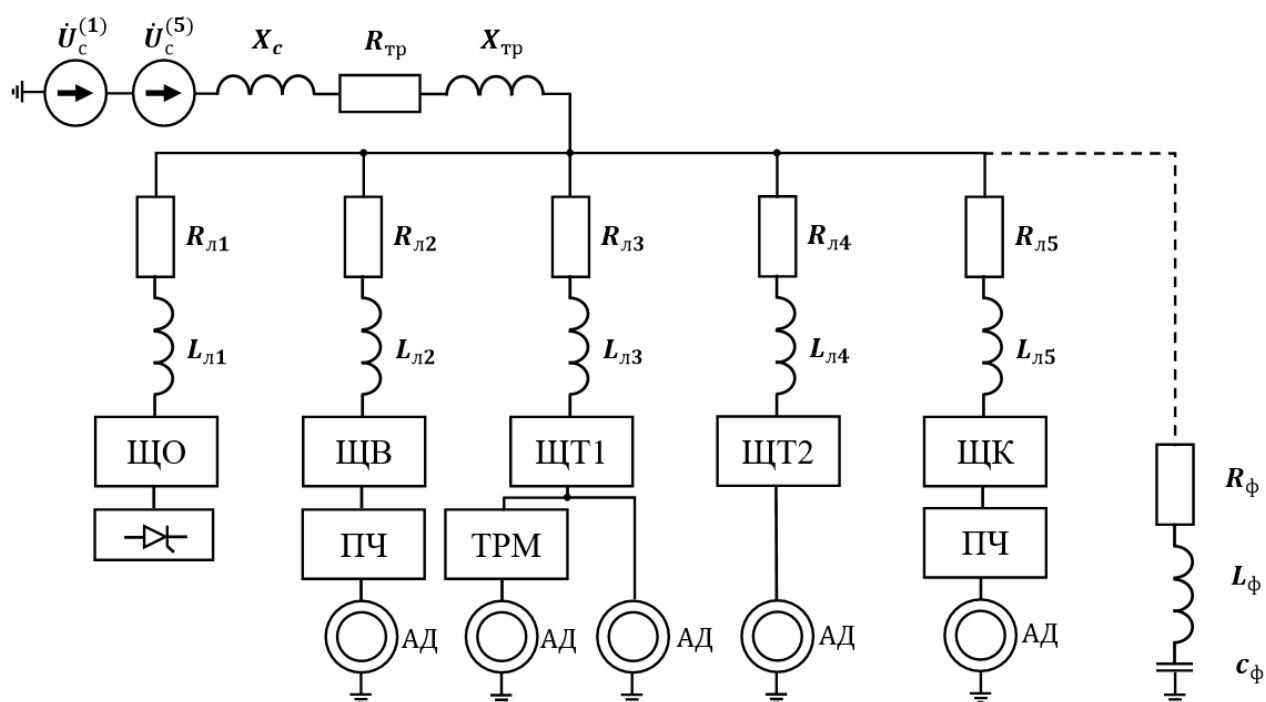


Рисунок 4.7 – Схема замещения СЭС предприятия для экспериментов блока 3

По сравнению с предыдущими моделированиями, в схеме учитывались искажения со стороны СЭС в виде источника напряжения 5ой гармоники  $U_c^{(5)}$

переменной амплитудой от 0% до 10% от амплитуды номинального напряжения  $U_c^{(1)}$ .

Целью моделирований блока 3 стало определение коэффициента вклада в искажения со стороны СЭС  $K_{D/СЭС/Ф}^{(h)}$  при включенном фильтре с последующим определением границ информативности коэффициентов  $K_{D/ТОП}^{(h)}$  при отключенном фильтре. Эта задача была поставлена в выводах к главе 3.

#### 4.3.3.1 Моделирование 1

Моделирование проводилось при подключенном к шине фильтре (схема 1 в таблице 4.13) и без фильтра (схема 2). Амплитуда  $U_c^{(5)}$  составляла 10%.

Таблица 4.13 – Результаты расчетов моделирования 1

Параметры Нагрузка	$K_{D/Ф}$ , %		$K_{D/ТОП}$ , %		THDu(ТОП), %		THDi(ТОП), %		$I^{(1)}$ (ТОП), А		$I^{(5)}$ (ТОП), А		$\frac{I^{(5)}(ТОП)}{I^{(1)}(ТОП)}$ , %	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
ТОП	44,44		6,29	10,55	22,47	21,09	608,94	627,32	104,32	21,68	17,13	3,46		
ЩО	-2,28	-48,54												
ЩВ	18,97	64,28												
ЩТ1	-5,33	-61,28												
ЩТ2	-0,09	26,03												
ЩК	45,41	119,51												

Из результатов расчетов следует, что коэффициенты вкладов потребителей относительно СЭС  $K_{D/ТОП}^{(h)}$  неинформативны при таком уровне искажений, так как, например, вклад ЩТ2 характеризуется коэффициентом  $K_{D/ТОП}=26,03$  %, в то время как при отсутствии искажений со стороны СЭС этот показатель составляет величину -5,65%. Однако, доминантный источник все еще можно идентифицировать. Как и в моделировании блока 2, видно, что при подключении фильтра уменьшается значение THDu(ТОП) с 10,55 % до 6,29 %. Однако, увеличивается значение THDi(ТОП) с 21,09 % до 22,47 %, как и ток ТОП 5ой

гармоники. Это свидетельствует о том, что эффективная компенсация высших гармоник должна проводиться в узлах, находящихся ближе к источнику напряжения. В данном случае, источником напряжения 5ой гармоники эквивалентуруется влияние других потребителей, подключенных в таких узлах, которые не отображены в схеме замещения, но их наличие предполагается выше по системе. Для определения наиболее эффективной точки подключения фильтра возможно воспользоваться методом расчета проекций токов высших гармоник системы на ток фильтра. Если рассчитанный коэффициент вклада  $K_{D\text{ СЭС/Ф}}^{(h)} \approx 0$ , как при подключении фильтра к ТОП в моделировании 2 блока 2, то компенсация высших гармоник эффективна, как с точки зрения  $\text{THDu}(\text{ТОП})$ , так и с точки зрения  $\text{THDi}(\text{ТОП})$  и  $I^{(5)}(\text{ТОП})$ . При увеличении  $K_{D\text{ СЭС/Ф}}^{(h)}$  эффективность компенсации гармоник снижается.

Резюме: при наличии искажений со стороны системы, внешней относительно места подключения фильтра, коэффициент вклада  $K_{D\text{ СЭС/Ф}}^{(h)}$  определяет эффективность компенсации высших гармоник (чем ближе  $K_{D\text{ СЭС/Ф}}^{(h)}$  к 0, тем выше эффективность), а также отражает информацию о том, являются ли коэффициенты  $K_{D/\text{ТОП}}^{(h)}$  репрезентативными при отключении фильтра, что будет рассмотрено ниже.

#### 4.3.3.2 Моделирование 2

Моделирование 2 проводилось при изменении амплитуды напряжения 5ой гармоники  $U_c^{(5)}$  в диапазоне от 0 % до 10 % от номинально значения  $U_c^{(1)}$ . При этом рассчитывались коэффициенты  $K_{D/\text{ТОП}}^{(h)}$  при отключенном фильтре и коэффициенты  $K_{D\text{ СЭС/Ф}}^{(h)}$  для оценки искажений со стороны СЭС при подключенном к ТОП фильтре.

Кроме того, при моделировании необходимо задать фазу  $U_c^{(5)}$  относительно  $U_c^{(1)}$ . Данный вопрос относится к схемам замещения нелинейных нагрузок и несинусоидальных искажений и требует отдельного более детального изучения

[66]. Однако, в рамках проводимых исследований, было принято допущение, заключающееся в проведении расчетов при фазе  $U_c^{(5)}$  относительно  $U_c^{(1)}$  равной  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $270^\circ$  для того, чтобы описать наиболее широкий диапазон возможных фаз.

Результаты расчетов для фазы  $U_c^{(5)}$  относительно  $U_c^{(1)}$  равной  $0^\circ$  представлены на рисунке 4.8, для фазы  $90^\circ$  – на рисунке 4.9, для фазы  $180^\circ$  – на рисунке 4.10 а, для фазы  $270^\circ$  – на рисунке 4.10 б.

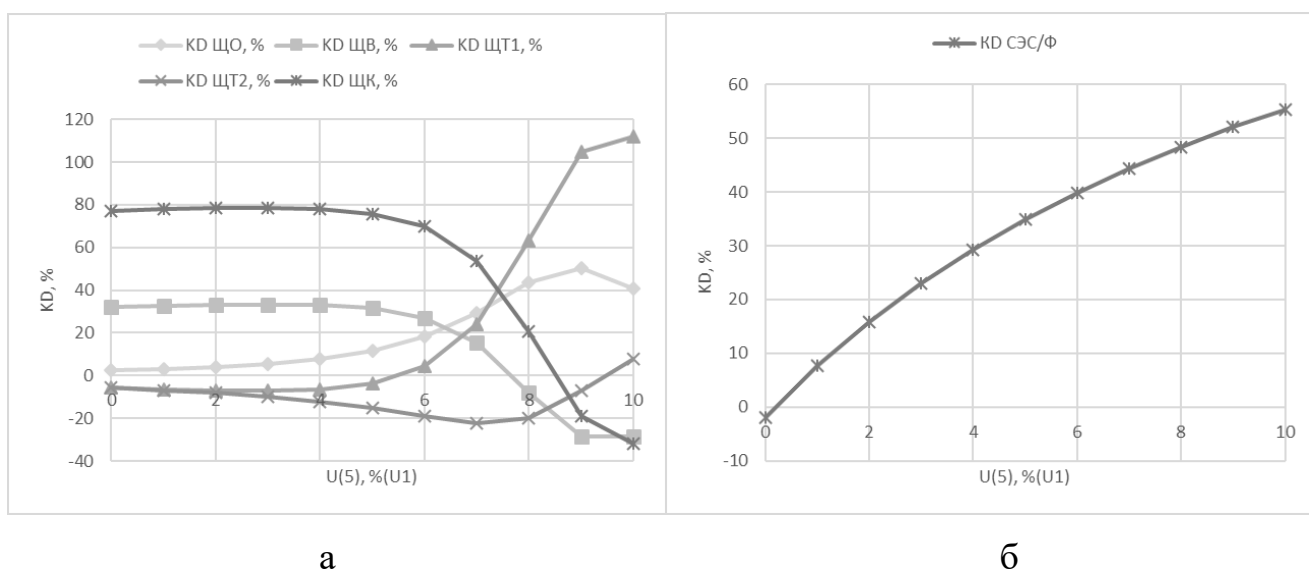


Рисунок 4.8 – Результаты расчетов для фазы  $U_c^{(5)}$  относительно  $U_c^{(1)}$  равной  $0^\circ$ : а – коэффициенты вкладов  $K_{D/ТОП}^{(h)}$ ; б – коэффициент  $K_D^{(h)}$  СЭС/Ф

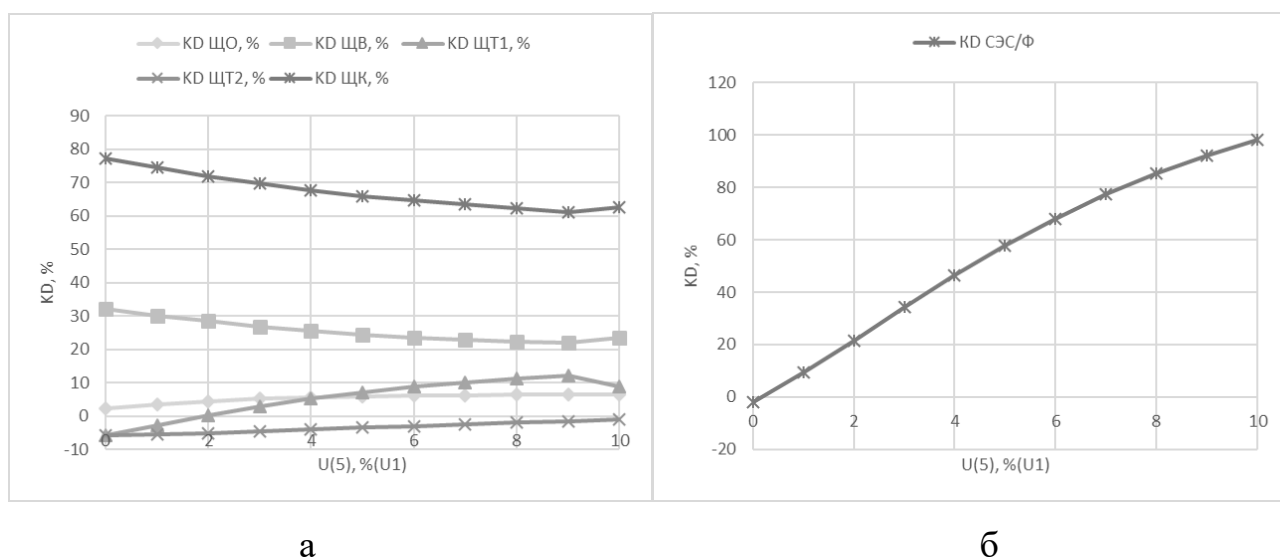


Рисунок 4.9 – Результаты расчетов для фазы  $U_c^{(5)}$  относительно  $U_c^{(1)}$  равной  $90^\circ$ : а – коэффициенты вкладов  $K_{D/ТОП}^{(h)}$ ; б – коэффициент  $K_D^{(h)}$  СЭС/Ф

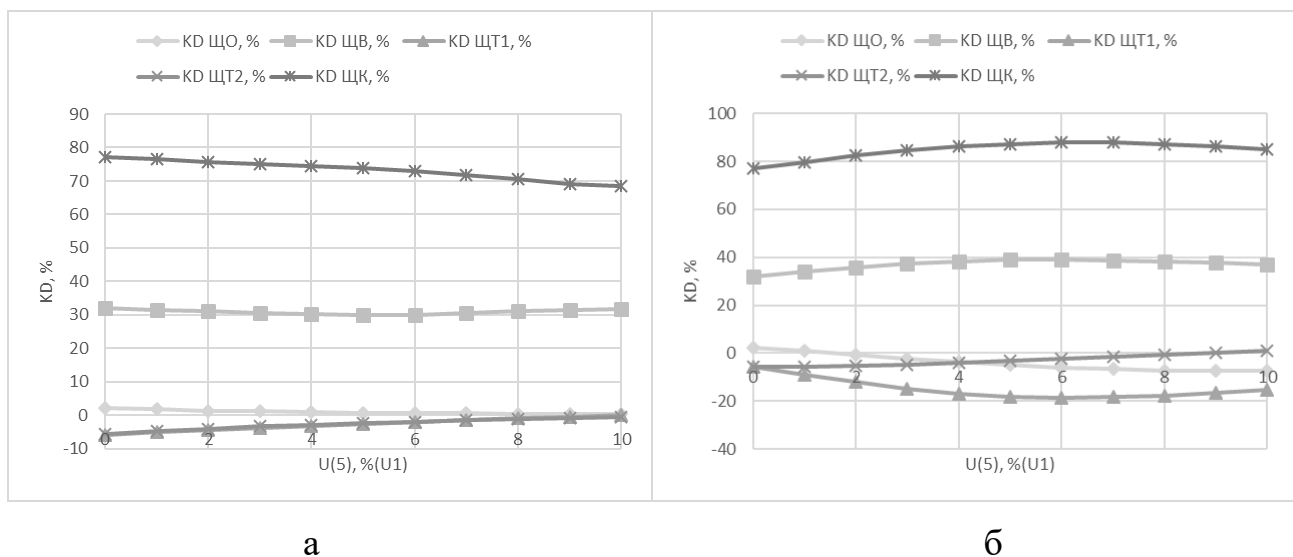


Рисунок 4.10 – Результаты расчетов коэффициентов вкладов  $K_{D/ТОП}^{(h)}$ : а – для фазы  $U_c^{(5)}$  относительно  $U_c^{(1)}$  равной  $180^\circ$ ; б – для фазы  $U_c^{(5)}$  относительно  $U_c^{(1)}$  равной  $270^\circ$

Из рисунка 4.10 видно, что при фазе  $U_c^{(5)}$  относительно  $U_c^{(1)}$  равной  $180^\circ$  и  $270^\circ$  коэффициенты  $K_{D/ТОП}^{(h)}$  репрезентативны при любых искажениях со стороны СЭС, а при пересечении кривых вкладов  $K_{D/ЩО}^{(h)}$  и  $K_{D/ЩТ2}^{(h)}$  на рисунке 4.10(б) их изменение не превышает 5%, что незначительно влияет на результаты анализа полученных значений.

На рисунке 4.8 а видно, что при значении  $U_c^{(5)}$  относительно  $U_c^{(1)}$  равном 7% и более коэффициенты  $K_{D/ТОП}^{(h)}$  не отражают вклады потребителей. По графику на рисунке 4.8 б видно, что 7%  $U_c^{(5)}$  относительно  $U_c^{(1)}$  соответствует значению  $K_{D/СЭС/Ф}^{(5)} = 44,3\%$ . Таким образом, при искажениях со стороны СЭС меньших, чем 44,3%, использование коэффициентов  $K_{D/ТОП}^{(h)}$  правомерно.

Аналогично, для рисунка 4.9 а пограничным значением  $U_c^{(5)}$  относительно  $U_c^{(1)}$  является 4%, что соответствует  $K_{D/СЭС/ТОП}^{(5)} = 46,3\%$  на рисунке 4.9 б.

Резюме: как при искажениях со стороны СЭС, превышающих  $K_{D/СЭС/Ф}^{(5)} = 44,3\%$ , коэффициенты вкладов потребителей  $K_{D/ТОП}^{(h)}$  могут принимать значения, не коррелирующие с их реальными вкладами.



## 4.3.3.3 Моделирование 3

Моделирование 3 проводилось для фаз  $U_c^{(5)}$  относительно  $U_c^{(1)}$  равных  $0^\circ$  и  $90^\circ$ , так как при этих значениях возникли ограничения применимости коэффициентов  $K_{D/ТОП}^{(h)}$ .

Были проведены аналогичны расчеты при отключенном ЩК, который был выбран, как самый мощный нелинейный потребитель.

Результаты расчетов для фазы  $U_c^{(5)}$  относительно  $U_c^{(1)}$  равной  $0^\circ$  представлены на рисунке 4.11, для фазы  $90^\circ$  – на рисунке 4.12.

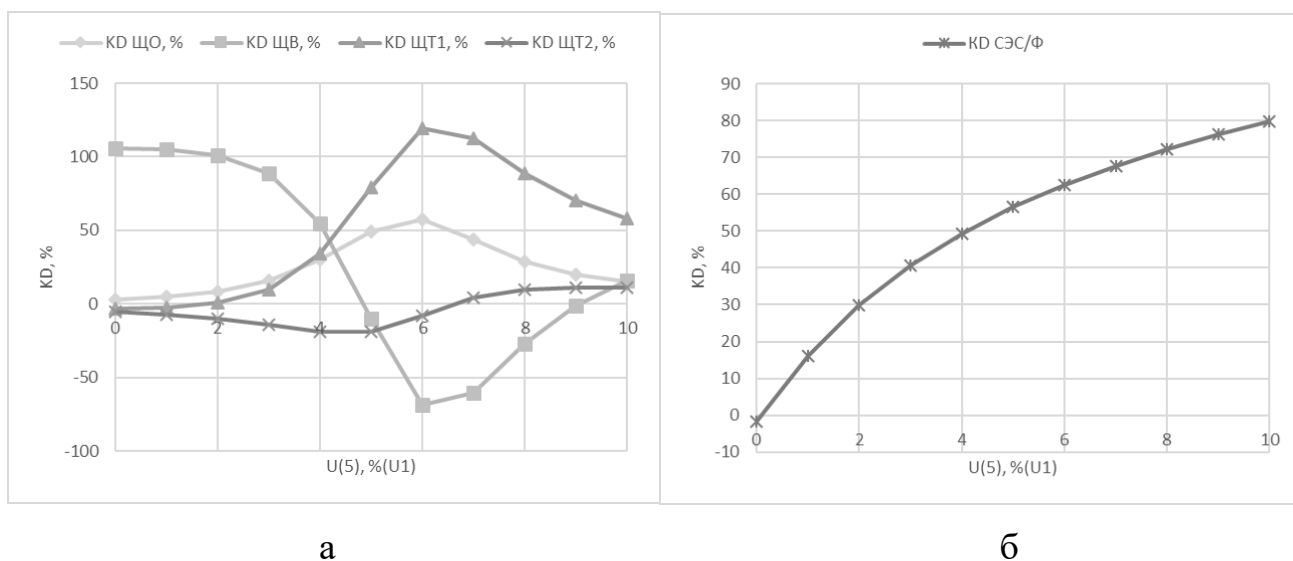


Рисунок 4.11 – Результаты расчетов для фазы  $U_c^{(5)}$  относительно  $U_c^{(1)}$  равной  $0^\circ$ : а – коэффициенты вкладов  $K_{D/ТОП}^{(h)}$ ; б – коэффициент  $K_{D СЭС/Ф}^{(h)}$

На рисунке 4.11(а) видно, что при значении  $U_c^{(5)}$  относительно  $U_c^{(1)}$  равном 4% и более коэффициенты  $K_{D/ТОП}^{(h)}$  не отражают вклады потребителей. По графику на рисунке 4.11(б) видно, что 4%  $U_c^{(5)}$  относительно  $U_c^{(1)}$  соответствует значению  $K_{D СЭС/Ф}^{(5)} = 49,4\%$ . Таким образом, при искажениях со стороны СЭС меньших, чем 49.4%, использование коэффициентов  $K_{D/ТОП}^{(h)}$  правомерно.

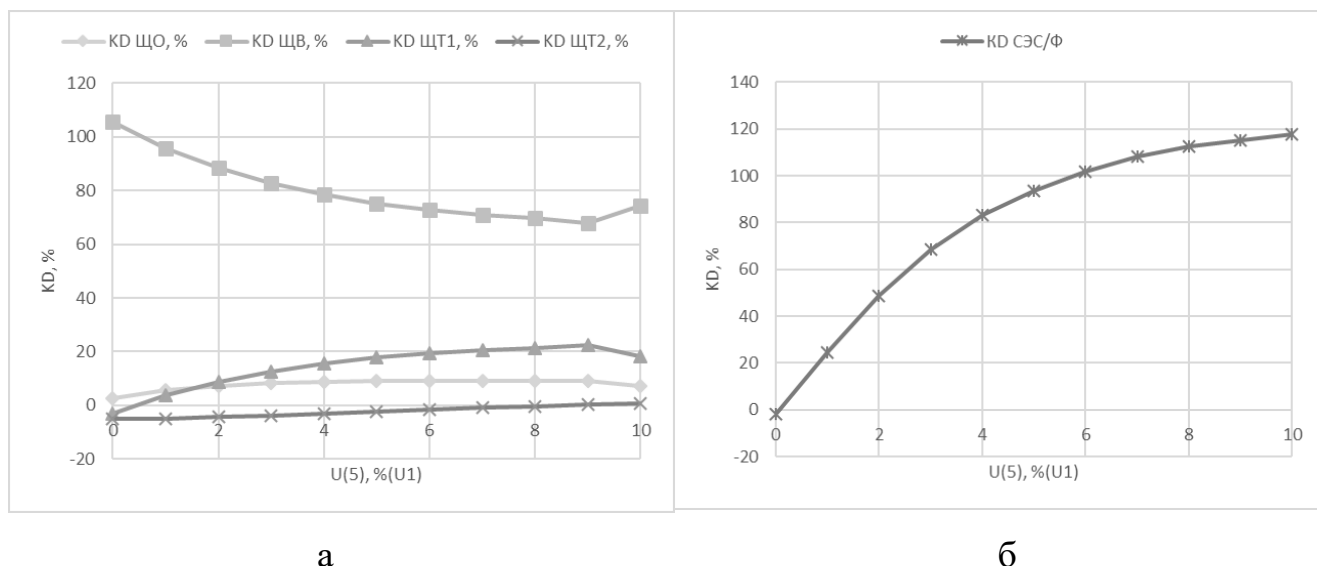


Рисунок 4.12 – Результаты расчетов для фазы  $U_c^{(5)}$  относительно  $U_c^{(1)}$  равной  $90^\circ$ :

а – коэффициенты вкладов  $K_{D/ТОП}^{(h)}$ ; б – коэффициент  $K_{D\text{ СЭС/Ф}}^{(h)}$

Аналогично, для рисунка 4.12(а) пограничным значением  $U_c^{(5)}$  относительно  $U_c^{(1)}$  является 2%, что соответствует  $K_{D\text{ СЭС/Ф}}^{(h)} = 48,6\%$  на рисунке 4.12 б.

Резюме: при искажениях со стороны СЭС, превышающих 48,6%, коэффициенты вкладов потребителей  $K_{D/ТОП}^{(h)}$  могут принимать значения, не коррелирующие с их реальными вкладами.

#### 4.3.3.4 Выводы по итогам моделирований блока 3

При наличии искажений со стороны системы, внешней относительно места подключения фильтра, коэффициент вклада  $K_{D\text{ СЭС/Ф}}^{(h)}$  определяет эффективность компенсации высших гармоник (чем ближе  $K_{D\text{ СЭС/Ф}}^{(h)}$  к 0, тем выше эффективность).

Использование коэффициентов вкладов потребителей  $K_{D/ТОП}^{(h)}$  правомерно при искажениях со стороны СЭС, не превышающих 44,3%.

#### 4.4 ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4

На примере компьютерного моделирование системы электроснабжения, питающейся от ввода №1 ГРЩ-1, были получены результаты:

1) подтверждена прямая зависимость коэффициентов вклада потребителя от потребляемой мощности для нелинейных нагрузок с преобразователями частоты скалярного управления, нелинейных нагрузок с тиристорным регулятором, для светодиодных осветительных приборов и потребителей смешанной структуры;

2) подтверждена обратная зависимость коэффициентов вкладов потребителей от потребляемой мощности других нелинейных нагрузок для нелинейных нагрузок с преобразователями частоты скалярного управления, нелинейных нагрузок с тиристорным регулятором, для светодиодных осветительных приборов и потребителей смешанной структуры;

3) подтверждена независимость коэффициентов вкладов линейных потребителей от режима работы любых потребителей, подключенных к ТОП;

4) при отсутствии искажений со стороны СЭС наиболее эффективным с точки зрения  $\text{THDi}$ ,  $\text{THDu}$ ,  $\cos\varphi(1)$  и действующего значения тока 5ой гармоники в ТОП является подключение фильтра к ТОП;

5) при появлении искажений со стороны СЭС эффективность компенсации искажений тока снижается, что может быть охарактеризовано введенным показателем вклада  $K_{D\text{СЭС}/\Phi}^{(h)}$  для внешней относительно места подключения фильтра системы. Чем ближе  $K_{D\text{СЭС}/\Phi}^{(h)}$  к 0, тем выше эффективность компенсации эффективным с точки зрения  $\text{THDi}$ ,  $\text{THDu}$ ,  $\cos\varphi(1)$  и действующего значения тока 5ой гармоники в ТОП;

6) перед определением коэффициентов вкладов потребителей в искажения тока и напряжения в ТОП  $K_{D/\text{ТОП}}^{(h)}$  необходимо оценить вклад внешних источников в ухудшение качества электроэнергии в ТОП, так как при искажениях со стороны СЭС превышающих  $K_{D\text{СЭС}/\Phi}^{(h)}=44,3\%$ , коэффициенты вкладов

потребителей  $K_{D/ТОП}^{(h)}$  могут принимать значения, не коррелирующиеся с их реальными вкладами;

7) предложенный подход позволяет определить относительный вклад СЭС в несинусоидальность напряжения и тока в ТОП, а также обоснованно определить места подключения фильтр-компенсирующих устройств, позволяющие наиболее эффективно обеспечить заданный уровень показателей качества электроэнергии на промышленном предприятии.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой законченную научно - квалификационную и тока работу, в которой предлагается новое решение актуальной научной задачи – развитие общей теории связанных распределительных систем среднего напряжения, содержащих нелинейную нагрузку.

Выполненные исследования позволяют сделать следующие выводы и рекомендации:

1. На основе анализа методов определения источников искажений выявлено, что их применение не позволяет достоверно рассчитать величину вкладов потребителя и СЭС в процентном соотношении и либо требует дополнительной информации по комплексному сопротивлению как потребителя, так и системы, либо не обеспечивает необходимую точность получаемых результатов.

2. На основании математического моделирования СЭС с наличием нелинейной нагрузки введены коэффициенты вкладов  $K_D^{(h)}$  и  $K_{D/\Phi}^{(h)}$ , характеризующие вклады потребителей и СЭС в искажения тока и напряжения в ТОП. Коэффициент  $K_D^{(h)}$  рассчитывается как проекция вектора тока высшей гармоники потребителя на вектор тока высшей гармоники в ТОП по отношению к модулю вектора тока высшей гармоники в ТОП, показывающий вклад рассматриваемого потребителя в ухудшение качества тока и напряжения в ТОП. Коэффициент  $K_{D/\Phi}^{(h)}$  рассчитывается как проекция вектора тока СЭС или потребителя на вектор тока фильтра высших гармоник на резонансной частоте по отношению к модулю вектора тока фильтра высших гармоник на резонансной частоте, показывающий вклад внешней СЭС или потребителя в ухудшение качества тока и напряжения в ТОП.

3. Сформулирован алгоритм реализации метода, согласно которому вначале оценивается влияние внешних искажений на качество электроэнергии в ТОП при помощи расчета коэффициентов вкладов  $K_{D\text{ СЭС}/\Phi}^{(h)}$  относительно тока фильтра

высших гармоник на каждой гармонике отдельно. При доминантном источнике со стороны СЭС меры по компенсации высших гармоник должны проводиться со стороны СЭС. При доминантном источнике со стороны потребителей необходимо рассчитать вклады каждого из них относительно тока СЭС на каждой гармонике отдельно при помощи коэффициента  $K_D^{(h)}$ .

4. На основании проведенных лабораторных экспериментов были получены зависимости вкладов, характерные для типичных видов нагрузок промышленных предприятий:

4.1. вне зависимости от внешних условий вклад линейной нагрузки, такой как асинхронный двигатель, отрицательный и малый по амплитуде по сравнению с другими потребителями, такими как нелинейные потребители в виде тиристорных выпрямителей и тиристорных регуляторов мощности, а также по сравнению с компенсаторами реактивной мощности и фильтрами высших гармоник;

4.2. нелинейная нагрузка характеризуется положительным коэффициентом вклада, который может превышать 100% и который напрямую зависит от высших гармоник тока, генерируемых непосредственно потребителем;

4.3. фильтр высших гармоник на резонансной частоте характеризуется отрицательным коэффициентом вклада с амплитудой значительно большей, чем амплитуда коэффициента вклада линейной нагрузки; что показывает корреляцию между коэффициентом  $K_{D/\Phi}^{(h)}$  и компенсацией токов высших гармоник фильтром;

4.4. фильтр высших гармоник на нерезонансной частоте, также, как и компенсатор реактивной мощности с частотой расстройки, характеризуется отрицательными вкладами малых амплитуд.

5. На основании компьютерного моделирования СЭС промышленного предприятия:

5.1. выявлено, что перед определением коэффициентов вкладов потребителей в искажения тока и напряжения в Топ  $K_{D/\text{Топ}}^{(h)}$  необходимо оценить вклад внешних источников в ухудшение качества электроэнергии в Топ, так как

при искажениях со стороны СЭС превышающих  $K_{D\text{ СЭС}/\Phi}^{(h)}=44,3\%$ , коэффициенты вкладов потребителей  $K_{D/\text{ТОП}}^{(h)}$  могут принимать значения, не коррелирующиеся с их реальными вкладами;

5.2. подтверждена прямая зависимость коэффициентов вклада потребителя от потребляемой мощности для нелинейных нагрузок с преобразователями частоты скалярного управления, нелинейных нагрузок с тиристорным регулятором, для светодиодных осветительных приборов и потребителей смешанной структуры;

5.3. подтверждена обратная зависимость коэффициентов вкладов потребителей от потребляемой мощности других нелинейных нагрузок для нелинейных нагрузок с преобразователями частоты скалярного управления, нелинейных нагрузок с тиристорным регулятором, для светодиодных осветительных приборов и потребителей смешанной структуры;

5.4. подтверждена независимость коэффициентов вкладов линейных потребителей от режима работы любых потребителей, подключенных к ТОП;

5.5. при отсутствии искажений со стороны СЭС наиболее эффективным с точки зрения  $\text{THDi}$ ,  $\text{THDu}$ ,  $\cos\varphi(1)$  и действующего значения тока 5ой гармоники в ТОП является подключение фильтра к ТОП;

5.6. при появлении искажений со стороны СЭС эффективность компенсации искажений тока снижается, что может быть охарактеризовано введенным показателем вклада  $K_{D\text{ СЭС}/\Phi}^{(h)}$  для внешней относительно места подключения фильтра системы. Чем ближе  $K_{D\text{ СЭС}/\Phi}^{(h)}$  к 0, тем выше эффективность компенсации эффективным с точки зрения  $\text{THDi}$ ,  $\text{THDu}$ ,  $\cos\varphi(1)$  и действующего значения тока 5ой гармоники в ТОП.

6. Предложенный подход позволяет определить относительный вклад СЭС в несинусоидальность напряжения и тока в ТОП, а также обоснованно определить места подключения фильтр-компенсирующих устройств, позволяющие наиболее эффективно обеспечить заданный уровень показателей качества электроэнергии на промышленном предприятии.

7. Результаты проведенных исследований были внедрены в учебный процесс кафедры «Общей электротехники Санкт-Петербургского горного университета, а также в производственную деятельность ООО «Астеро».

8. Исследования по теме диссертации могут в дальнейшем проводиться по следующим направлениям:

8.1. влияние иных, кроме рассмотренных, факторов на результаты расчета введенных коэффициентов вкладов (несимметрия питающего напряжения, несимметрия нагрузки и т.д.);

8.2. экспериментальное подтверждение применимости введенных коэффициентов для более широкого круга линейных нагрузок (активное сопротивление, двигатели постоянного тока и т.д.);

8.3. экспериментальное подтверждение применимости введенных коэффициентов для более широкого круга нелинейных нагрузок (преобразователи частоты различных конфигураций, выпрямители и регуляторы мощности, отличающиеся от рассмотренных в работе, однофазная нелинейная нагрузка и т.д.);

8.4. экспериментальное подтверждение применимости введенных коэффициентов для компенсаторов реактивной мощности без частоты расстройки;

8.5. определение схем замещения нелинейных нагрузок на высших гармониках для дальнейшего корректного математического и компьютерного моделирования связанных систем электроснабжения промышленных предприятий с нелинейными потребителями.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Башкиров, О.В. Определение вклада потребителя в изменение показателей качества электроэнергии / О.В. Башкиров, П.П. Першенков, Е.А. Тюрин // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». – 2009. – № 2. – С. 77-79.
2. Гаврина, О.А. Комплексный анализ показателей качества электроэнергии в системе электроснабжения предприятий цветной металлургии / О.А. Гаврина, Н.В. Горбачев, Г.О. Уртаев // Материалы Международной научно-практической конференции «Перспективы устойчивого развития нефтегазовой отрасли и электроэнергетики в российской федерации и мире». – 2019. – С. 201-206.
3. Гамазин, С.И. Определение фактического вклада потребителя в искажение параметров качества электрической энергии / С.И. Гамазин, В.А. Петрович // Промышленная энергетика. – 2003. – Т. 1. – С. 32-38.
4. ГОСТ 32144-2013. Международный стандарт. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Стандартинформ, 2014. – 15 с.
5. ГОСТ IEC/TR 61000-3-6 - 2020. Электромагнитная совместимость (ЭМС). Часть 3-6. Нормы. Оценка норм электромагнитной эмиссии для подключения установок, создающих помехи, к системам электроснабжения среднего, высокого и сверхвысокого напряжения. – М.: Стандартинформ, 2014. – 15 с.
6. Дмитриев, Б.Ф. Методы и средства обеспечения электромагнитной совместимости в судовых системах электропитания / Б.Ф. Дмитриев, П.А. Воршевский, В.В. Резниченко // Электротехника. – 2017. – Т. 12. – С. 24-29.
7. Добуш, Ю.В. Метод определения вкладов потребителей электроэнергии в искажения напряжения и тока в точке общего присоединения / Ю.В. Добуш, Я.Э. Шклярский // Тезисы докладов XIX Всероссийской

конференции-конкурса студентов и аспирантов «Актуальные проблемы недропользования», Санкт-Петербург. – 2021. – Т. 5. – С. 190-191.

8. Жежеленко, И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий / И.В. Жежеленко. – 2-е изд. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 160 с.

9. Иманаев, Р.А. Исследование спектра высших гармонических составляющих в автономных системах электроснабжения нефтегазового месторождения / Р.А. Иманаев, Т.М. Набиев, Л.А. Рябишина // Международный технико-экономический журнал. – 2018. – Т. 2. – С. 78-84.

10. Карташев, И.И. Определение виновника ухудшения качества электроэнергии при расчётах за электроэнергию / И.И. Карташев, С.Ю. Пономаренко, И.С. Сыромятников // Энергоменеджер. – 2000. – Т. 19. – С. 10.

11. Киселев, Б.Ю. Анализ влияния высших гармоник от нелинейных источников 6 кВ на потери в токоведущих частях на основе Вейвлет-анализа / Б.Ю. Киселев, Д.Д. Казанцев // Динамика систем, механизмов и машин. – 2017. – Т. 5. – № 3. – С. 37-44.

12. Козловская, В.Б. Учет влияния высших гармоник при выборе сечений проводников линий наружного освещения / В.Б. Козловская, В.Н. Калечиц // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2017. – Т. 60. – № 6. – С. 544-557.

13. Майер, В.Я. Методика определения долевых вкладов потребителя и энергоснабжающей организации в ухудшении качества электроэнергии / В.Я. Майер // Электричество. – 1994. – Т. 49. – С. 19-24.

14. Малафеев, С.И. К анализу энергетических процессов в питающей сети при работе карьерного экскаватора / С.И. Малафеев, С.С. Малафеев // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2020. – № 3. – С. 126-137.

15. Оценка вклада нелинейной нагрузки в высшие гармоники напряжения сети при наличии в питающем напряжении высших гармоник / В.И. Сысун,

О.В. Олещук, Н.В. Соболев, А.А. Тихомиров // Международный научно-исследовательский журнал. – 2019. – Т. 2. – № 80. – С. 20-23.

16. Оценка определяющего влияния источников высших гармоник на качество электрической энергии в электротехнических комплексах промышленных предприятий: автореферат дис. ... кандидата технических наук: 05.09.03 / Бунтеев Юрий Евгеньевич; – № [Место защиты: Нац. минерально-сырьевой ун-т «Горный»]. – Санкт-Петербург, 2016. – 20 с.

17. Патент № 2236016 С2 МПК G01R 19/00, 23/20, 29/04, 29/16. Способ определения фактического вклада источников искажений в значения показателей качества электроэнергии в точке общего присоединения : №2001102723/09 : заявл. 31.01.2001 : опубл. 10.09.2004 / Зельвянский А.Я., Никифорова В.Н.; заявитель Научный центр ЛИНВИТ. – 8 с. : ил.

18. Патент № 2244313 С2 МПК G01R 21/00. Способ определения потребителя, искажающего показатели качества электрической энергии в узле энергоснабжающей организации, и его вклада в искажение : №2000117164/28 : заявл. 27.06.2000 : опубл. 10.01.2005 / Баглейбтер О.И., Висящев А.Н., Луцкий И.И., Тигунцев С.Г. ; заявитель Висящев А.Н., Тигунцев С.Г. – 10 с. : ил.

19. Патент № 2307364 С1 МПК G01R 21/00 (2006.01). Способ определения долевых частей нагрузки и энергосистемы в изменение качества напряжения : №2020140768 : заявл. 10.01.2006 : опубл. 27.09.2007 / Алексеев В.Ю., Зиновьев Г.С., Попов В.И. ; заявитель НГТУ. – 12 с. : ил.

20. Патент № 2364875 С1 МПК G01R 19/00 (2006.01). Способ выявления фактического вклада субъектов электрических сетей в искажение качества электрической энергии в точке общего присоединения в электрической сети : №200810322/28 : заявл. 01.02.2008 : опубл. 10.01.2005 / Баглейбтер О.И., Висящев А.Н., Луцкий И.И., Тигунцев С.Г. ; заявитель Висящев А.Н., Тигунцев С.Г. – 10 с. : ил.

21. Патент № 2543075 С2 МПК H01J 3/01. Способ снижения влияния высших гармоник на электрооборудование : №2013113097/07 : заявл. 22.03.2013 :

опубл. 27.02.2015 / Шклярский Я.Э., Скамьин А.Н., Бунтеев Ю.Е.; заявитель Национальный минерально-сырьевой университет «Горный». – 7 с. : ил.

22. Патент № 2573706 С2 МПК G01R 21/00. Способ выявления источника высших гармоник : №2014109521/28 : заявл. 12.03.2014: опубл. 27.01.2015 / Шклярский Я.Э., Бунтеев Ю.Е., Скамьин А.Н. ; заявитель Национальный минерально-сырьевой университет «Горный». – 8 с. : ил.

23. Патент № 2627195 С1 МПК G01R 21/00 (2006.01). Способ оценки влияния потребителя на искажение напряжения в точке общего присоединения : №2016142222 : заявл. 27.10.2016: опубл. 03.08.2017 / Висящев А.Н., Федосов Д.С. ; заявитель ФГБОУ ВО «ИРНИТУ». – 19 с. : ил.

24. Патент № 2752765 С1 МПК G01R 23/20 (2006.01). Способ оценки вклада нелинейных потребителей в искажение напряжения в точке общего присоединения : №2020140768 : заявл. 10.12.2020: опубл. 03.08.2021 / Шклярский Я.Э., Скамьин А.Н., Добуш Ю.В., Шпенст В.А.; заявитель СПГУ. – 19 с. : ил.

25. Повышение энергоэффективности производства за счет применения силовых фильтров высших гармоник / О. В. Нос, А. С. Востриков, А. А. Штанг, Е. Ю. Малявко // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 12. – С. 28-36.

26. **Растворова, Ю.В.** Разработка метода оценки вклада источников высших гармоник в показатели качества электрической энергии / **Ю.В. Растворова**, Ю.А. Мордвинцева, Д.А. Коломацкий // Сборник тезисов Международного семинара «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики IPDME-2019», Секция «Круглый стол молодых ученых», Горный университет. – 2019. – С. 466-471.

27. **Растворова, Ю.В.** Вклад потребителей в показатели качества электроэнергии в связанных системах промышленных предприятий / **Ю.В. Растворова**, Я.Э. Шклярский // Сборник тезисов XVIII Всероссийской конференции-конкурса студентов и аспирантов «Актуальные проблемы недропользования», Санкт-Петербург. – 2020. – С. 339-340.

28. **Растворова, Ю.В.** Разработка метода определения вклада источников искажений в показатели качества электрической энергии / **Ю.В. Растворова, Я.Э. Шклярский** // Сборник тезисов XVII Всероссийской конференции-конкурса студентов и аспирантов «Актуальные проблемы недропользования», Санкт-Петербург. – 2019. – С. 252.

29. Расчет тока конденсаторных батарей с учетом источников высших гармоник / Г.М. Михеев, М.Н. Атаманов, О.В. Афанасьева, Н.М. Дрей // Вестник Чувашского университета. – 2017. – Т. 1. – С. 145-155.

30. Расчет токов высших гармоник для автономной системы электроснабжения нефтегазового месторождения / Р.А. Иманаев, Л.А. Рябишина, Т.М. Набиев, К.С. Марьин // Электротехника: сетевой электронный журнал. – 2018. – Т. 5. – № 1. – С. 28-33.

31. Рогозин, И.В. Исследование источников высших гармоник на предприятии ООО «Комбинат КМА руда» / И.В. Рогозин, Д.А. Прасол // Сборник статей по материалам XIII международной научно-практической конференции «Инновации в науке и практике». – 2018. – Т. 2. – С. 59-64.

32. Саенко, Ю.Л. Анализ методов определения фактических вкладов в понижение качества электрической энергии по несимметрии и несинусоидальности напряжений / Ю.Л. Саенко, Д.Н. Калюдный // Электрификация транспорта. – 2015. – Т. 9. – С. 123-133.

33. Скамьин, А.Н. Влияние напряжения на параметры электропотребления при наличии высших гармоник / А.Н. Скамьин, В.С. Добуш, **Ю.В. Растворова** // Вопросы электротехнологии. – 2020. – Т. 1. – № 26. – С. 61-69.

34. Скамьин, А.Н. Алгоритм регулирования электропотребления при наличии высших гармоник / А.Н. Скамьин, **Ю.В. Растворова** // Сборник тезисов VII Международной научно-практической конференции «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2020», Санкт-Петербург. – 2020. – С. 603-606.

35. Скамьин, А.Н. Способы выявления источников высших гармоник в связанных системах электроснабжения промышленных предприятий / А.Н. Скамьин, **Ю.В. Растворова** // «Энергетика и энергосбережение: теория и практика». Сборник материалов IV Всероссийской научно-практической конференции, КузГТУ. – 2018. – С. 262-1-262-3.
36. Смирнов, С.С. Метод определения фактических вкладов сети и потребителя в коэффициенты высших гармоник напряжения узла / С. С. Смирнов // Электричество. – 2005. – Т. 10. – С. 54-62.
37. Смирнов, С.С. Метод оценки вклада мощной искажающей нагрузки в коэффициенты высших гармоник напряжения / С.С. Смирнов // Электричество. – 2008. – Т. 8. – С. 28-35.
38. Смирнов, С.С. Вклад потребителя в уровни напряжения высших гармоник в узлах электрической сети / С.С. Смирнов, Л.И. Коверникова // Электричество. – 1996. – Т. 1/96. – С. 58-64.
39. 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 Влади мир Николаевич; Московский энергетический институт. – Москва, 2004. – 134 с.
40. Шклярский, Я.Э. Оценка вклада потребителей в ухудшение показателей качества электроэнергии / Я.Э. Шклярский, **Ю.В. Растворова**, И.С. Петров // Вопросы электротехнологии. – 2019. – Т. 1. – № 22. – С. 56-63.
41. A novel approach based on nonactive power for the identification of disturbing loads in power systems / P.V. Barbaro, A. Cataliotti, V. Cosentino, S. Nuccio. – DOI 10.1109/TPWRD.2007.899624 // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2007. – Vol. 22. – № 3. – P. 1782-1789.
42. A novel harmonic impedance compensator based on POHMR-type RC under grid voltage distortion / Z. Lv, L. Sun, J. Duan [et al.]. – DOI 10.1016/j.ijepes.2020.106352 // International Journal of Electrical Power and Energy Systems. – 2021. – Vol. 124. – P. 106352.

43. A Power Hardware-in-the-Loop Based Method for FAPR Compliance Testing of the Wind Turbine Converters Control / Z. Ahmad, J.R. Torres, N.V. Kumar [et al.]. – DOI 10.3390/en13195203 // *Energies*. – 2020. – Vol. 13. – P. 5203.
44. A selective harmonic compensation and power control approach exploiting distributed electronic converters in microgrids / A.M. dos Santos Alonso, D.I. Brandao, T. Caldognetto [et al.]. – DOI 10.1016/j.ijepes.2019.105452 // *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*. – 2020. – Vol. 115. – P. 105452.
45. Active power filter (APF) for mitigation of power quality issues in grid integration of wind and photovoltaic energy conversion system / W.U. Tareen, S. Mekhilef, M. Seyedmahmoudian, B. Horan. – DOI 10.1016/j.rser.2016.11.091 // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2017. – Vol. 70. – P. 635-655.
46. Active resonance damping and harmonics compensation in distributed generation based islanded microgrids / A. Saim, A. Houari, M. Ait-Ahmed [et al.]. – DOI 10.1016/j.epsr.2020.106900 // *Electric Power Systems Research*. – 2021. – Vol. 191. – P. 106900.
47. Akagi, H. A New Method of Harmonic Power Detection Based on the Instantaneous Active Power in Three-Phase Circuits / H. Akagi, T. Tanaka. – DOI 10.1109/61.473386 // *IEEE Transactions on Power Delivery*. – 1995. – Vol. 10. – № 4. – P. 1737-1742.
48. An effective compensation control strategy for power quality enhancement of unified power quality conditioner / T. Jin, Y. Chen, J. Guo [et al.]. – DOI 10.1016/j.egyr.2020.07.027 // *Energy Reports*. – 2020. – Vol. 6. – P. 2167-2179.
49. Analysis of approaches for modeling the low frequency emission of LED lamps / A.J. Collin, S.Z. Djokic, J. Drapela [et al.]. – DOI 10.3390/en13071571 // *Energies*. – 2020. – Vol. 13. – № 7. – P. 1-33.
50. Anu, G. Identification of Harmonic Injection and Distortion Power at Customer Location / G. Anu, F.M. Fernandez. – DOI 10.1109/ICHQP46026.2020.9177869 // *Proceedings of International Conference on Harmonics and Quality of Power, ICHQP*. – 2020. – № 4. – P. 1-5.

51. Bardanov, A.I. Application of power theory for electricity metering in presence of distortion / A.I. Bardanov, T.V. Pudkova. – DOI 10.1088/1757-899X/643/1/012011 // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 643. – № 1.

52. Bardanov, A.I. Modeling the process of redistributing power consumption using energy storage system with various configurations to align the electrical loads schedule / A.I. Bardanov, O.S. Vasilkov, T.V. Pudkova. – DOI 10.1088/1742-6596/1753/1/012013 // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 1753. – № 1.

53. Basic, D. Input current interharmonics of variable-speed drives due to motor current imbalance / D. Basic. – DOI 10.1109/TPWRD.2010.2044811 // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2010. – Vol. 25. – № 4. – P. 2797-2806.

54. Beloquilarumbe, L. Introduction to the Analysis of Harmonics and Resonances in Large Offshore Wind Power Plants / L. Beloquilarumbe, Z. Qin, P. Bauer. – DOI 10.1109/TPWRD.2010.2044811 // Proceedings - 2018 IEEE 18th International Conference on Power Electronics and Motion Control, PEMC 2018. – 2018. – P. 393-400.

55. Benaissa, A. Power quality improvement using fuzzy logic controller for five-level shunt active power filter under distorted voltage conditions / A. Benaissa, B. Rabhi, A. Moussi. – DOI 10.1007/s11708-013-0284-4 // Frontiers in Energy. – 2014. – Vol. 8. – № 2. – P. 212-220.

56. Couplings in Phase Domain Impedance Modeling of Grid-Connected Converters / M.K. Bakhshizadeh, X. Wang, F. Blaabjerg [et al.]. – DOI 10.1109/TPEL.2016.2542244 // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2016. – Vol. 31. – № 10. – P. 6792-6796.

57. Cristaldi, L. Harmonic Power Flow Analysis for the Measurement of the Electric Power Quality / L. Cristaldi, A. Ferrero. – DOI 10.1109/19.387308 // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 1995. – Vol. 44. – № 3. – P. 683-685.



58. Czarnecki, L.S. Current and power equations at bidirectional flow of harmonic active power in circuits with rotating machines / L.S. Czarnecki. – DOI 10.1002/etep.4450030108 // European Transactions on Electrical Power. – 1993. – Vol. 3. – № 1. – P. 45-52.

59. Davis, E.J. Harmonic pollution metering: theoretical considerations / E.J. Davis, A.E. Emanuel, D.J. Pileggi. – DOI 10.1109/61.847223 // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2000. – Vol. 15. – № 1. – P. 19-23.

60. Distortion load identification based on the application of compensating devices / Y. Shklyarskiy, A. Skamyin, I. Vladimirov, F. Gazizov. – DOI 10.3390/en13061430 // Energies. – 2020. – Vol. 13. – P. 1430.

61. **Dobush, I.V.** Method for evaluation of the electric power consumers' contributions to the voltage and current distortion at the point of common coupling / **I.V. Dobush**, Y.E. Shklyarskiy // Scientific conference abstracts of XVII International forum-contest of students and young researchers "Topical issues of rational use of natural resources", St Petersburg. – 2021. – Vol. 2. – P. 149-150.

62. Durocher, D.B. Mining industry process upgrades to reduce energy intensity while improving end product quality / D.B. Durocher, R. Putnam. – DOI 10.1109/IAS.2013.6682573 // Conference Record - IAS Annual Meeting (IEEE Industry Applications Society). – 2013. – P. 6682573.

63. Effect of harmonic distortion on electric energy meters of different metrological principles / I. Diahovchenko, V. Volokhin, V. Kurochkina [et al.]. – DOI 10.1007/s11708-018-0571-1 // Frontiers in Energy. – 2019. – Vol. 13. – № 2. – P. 377-385.

64. Efficiency analysis of wide band-gap semiconductors for two-level and three-level power converters / D. Lumbreras, J. Zaragoza, J. Mon [et al.]. – DOI 10.1109/IECON.2019.8926766 // IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference). – 2019. – P. 5126-5133.

65. Elmathana, M.T. Economical design of multiple-arm passive harmonic filters for an industrial firm - Case study / M.T. Elmathana, A.F. Zobaa, S.H.E. Abdel

Aleem. – DOI 10.1109/ICHQP.2012.6381242 // Proceedings of International Conference on Harmonics and Quality of Power, ICHQP. – 2012. – P. 438-444.

66. Experimental determination of parameters of nonlinear electrical load / A. Skamyin, Y. Shklyarskiy, V. Dobush, **I. Dobush**. – DOI 10.3390/en14227762 // Energies. – 2021. – Vol. 14. – P. 7762.

67. Fernandez, F.M. Method for separation of customer and utility contributions of harmonics at point of common coupling / F.M. Fernandez, P.S. Chandramohanan Nair. – DOI 10.1049/iet-gtd.2012.0361 // IET Generation, Transmission and Distribution. – 2013. – Vol. 7. – № 4. – P. 374-381.

68. Ferrero, A. A New Approach to the Definition of Power Components / A. Ferrero. – DOI 10.1109/19.87021 // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 1991. – Vol. 40. – № 3. – P. 568-577.

69. Future work on harmonics - some expert opinions Part II - supraharmonics, standards and measurements / J. Meyer, M.H.J. Bollen, H. Amaris [et al.]. – DOI 10.1109/ICHQP.2014.6842871 // Proceedings of International Conference on Harmonics and Quality of Power, ICHQP. – 2014. – P. 909-913.

70. Geng, Y.H. Assessment for harmonic emission level from one particular customer / Y.H. Geng. – University of Liege, 1992.

71. Gong, H. DQ-Frame Impedance Measurement of Three-Phase Converters Using Time-Domain MIMO Parametric Identification / H. Gong, X. Wang, D. Yang. – DOI 10.1109/TPEL.2020.3007852 // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2021. – Vol. 36. – № 2. – P. 2131-2142.

72. Harmonic Modeling and Experimental Validation of the Converters of DFIG-Based Wind Generation System / Y.W. Shen, D. Wang, X.T. Deng [et al.]. – DOI 10.1155/2019/7968914 // Complexity. – 2019. – Vol. 2019. – P. 7968914.

73. Harmonic problems in renewable and sustainable energy systems: A comprehensive review / H. Eroğlu, E. Cuce, P. Mert Cuce [et al.]. – DOI 10.1016/j.seta.2021.101566 // Sustainable Energy Technologies and Assessments. – 2021. – Vol. 48. – P. 101566.

74. Harmonic reduction methods for electrical generation: A review / D. Fallows, S. Nuzzo, A. Costabeber, M. Galea. – DOI 10.1049/iet-gtd.2018.0008 // IET Generation, Transmission and Distribution. – 2018. – Vol. 12. – № 13. – P. 3107-3113.
75. Harmonics consequences on drive systems with induction motor / H.G. Beleiu, V. Maier, S.G. Pavel [et al.]. – DOI 10.3390/app10041528 // Applied Sciences (Switzerland). – 2020. – Vol. 10. – P. 1528.
76. Iakovleva, E.V. Improving the efficiency of the use of photovoltaic stations in the republic of Cuba / E.V. Iakovleva, D.D. Guerra. – DOI 10.1088/1742-6596/1753/1/012056 // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 1753. – P. 012056.
77. IEC 61000-3-6:2020. Electromagnetic compatibility (EMC). Part 6-3: Generic standards. Emission standard for equipment in residential environments. – International Electromechanical Commission, 2020. – 52 p.
78. IEEE Std 519-2014. IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems. – IEEE Standards Association, 2014. – 17 p.
79. Impedance-based interactions in grid-tied three-phase inverters in renewable energy applications / T. Suntio, T Messo, M. Berg [et al.]. – DOI 10.3390/en12030464 // Energies. – 2019. – Vol. 12. – P. 464.
80. Janardhan, K. Performance investigation of stand-alone solar photovoltaic system with single phase micro multilevel inverter / K. Janardhan, A. Mittal, A. Ojha. – DOI 10.1016/j.egy.2020.07.006 // Energy Reports. – 2020. – Vol. 6. – P. 2044-2055.
81. Janik, P. Influence of increasing numbers of RE-inverters on the power quality in the distribution grids: A PQ case study of a representative wind turbine and photovoltaic system / P. Janik, G. Kosobudzki, H. Schwarz. – DOI 10.1007/s11708-017-0469-3 // Frontiers in Energy. – 2017. – Vol. 11. – № 2. – P. 155-167.
82. Kularbphettong, K. HPFs filtering solutions for reduced the harmonic current generated by SMPS and ac drive systems / K. Kularbphettong, C. Boonseng. – DOI 10.1016/j.egy.2019.11.133 // Energy Reports. – 2020. – Vol. 6. – P. 648-658.

83. Malekian, K. A novel approach to analyze the harmonic behavior of customers at the point of common coupling / K. Malekian. – DOI 10.1109/CPE.2015.7231045 // Proceedings - 2015 9th International Conference on Compatibility and Power Electronics, CPE 2015. – 2015. – P. 31-36.

84. Method for assessment of operation of analog filters installed in the measuring lines for electrical quantities of a mining machine's converter power supply system / J. Joostberens, A. Pawlikowski, D. Prostański, K. Nieśpiałowski. – DOI 10.3390/en14092384 // Energies. – 2021. – Vol. 14. – P. 2384.

85. Method for evaluation of the utility's and consumers' contribution to the current and voltage distortions at the PCC / Y. Shklyarskiy, **I. Dobush**, M.J. Carrizosa [et al.]. – DOI 10.3390/en14248416 // Energies. – 2021. – Vol. 14. – P. 8416.

86. Minimization of total harmonic distortions of cascaded H-bridge multilevel inverter by utilizing bio inspired AI algorithm / M. Salman, I.U. Haq, T. Ahmad [et al.]. – DOI 10.1186/s13638-020-01686-5 // Eurasip Journal on Wireless Communications and Networking. – 2020. – № 2020:66. – P. 1-12.

87. Mirzapour, O. Evaluating Grid Harmonics Effect on Induction Motor Using Reduced Thermal Model / O. Mirzapour, S. Karimi-Arpanahi, H. Oraee. – DOI 10.1109/SGC.2018.8777879 // Proceedings - 2018 Smart Grid Conference, SGC 2018. – 2018. – P. 1-5.

88. Power Quality Issues of Distorted and Weak Distribution Networks in Mining Industry: A Review / J. Yaghoobi, A. Abdullah, D. Kumar [et al.]. – DOI 10.1109/ACCESS.2019.2950911 // IEEE Access. – 2019. – Vol. 7. – P. 162500-162518.

89. Providing energy decoupling of electric drive and electric grids for industrial electrical installations / B.Y. Vasilyev, V.A. Shpenst, O.V. Kalashnikov, G.N. Ulyanov. – DOI 10.25515/PMI.2018.1.41 // Journal of Mining Institute. – 2018. – Vol. 229. – P. 41-49.

90. Pudkova, T. Principles of electricity metering in networks with non-linear load / T. Pudkova, A. Bardanov. – DOI 10.1051/e3sconf/201914007003 // E3S Web of Conferences. – 2019. – Vol. 140. – P. 3-6.

91. **Rastvorova, I.** Ultraharmonics sources detection methods in power systems of industrial enterprises / **I. Rastvorova**, Y. Shklyarsky // Proceedings of 59 Konferencja Studenckich Kół Naukowych Pionu Górniczego AGH, Poland. – 2018. – P. 175.

92. **Rastvorova, I.V.** Evaluation of the consumers contribution to the electric power quality indicators in related systems of industrial enterprises / **I.V. Rastvorova**, Y.E. Shklyarskiy // Scientific conference abstracts of XVI international forum-contest of students and young researchers “Topical issues of rational use of natural resources”, St Petersburg. – 2020. – Vol. 2. – P. 237-238.

93. **Rastvorova, I.V.** Method of evaluation of consumers contribution in the electric power quality indicators / **I.V. Rastvorova**, Y.E. Shklyarskiy // XII Russian-German Raw Materials Forum: Abstract book, St. Petersburg. – 2019. – P. 123-124.

94. **Rastvorova, I.V.** Development of the method of determining the distortions sources contributions to the electric power quality indicators / **I.V. Rastvorova**, Y.E. Shklyarskiy, A.Y. Shklyarskiy // Proceedings of XV International Forum-Contest of Students and Young Researchers “Topical Issues of Rational Use of Natural Resources”, St Petersburg. – 2019. – P. 255.

95. Safargholi, F. On the Dominant Harmonic Source Identification-Part II: Application and Interpretation of Methods / F. Safargholi, K. Malekian, W. Schufft. – DOI 10.1109/TPWRD.2017.2751673 // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2018. – Vol. 33. – № 3. – P. 1278-1287.

96. 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. – № 3. – P. 1268-1277.

97. Samet, H. Reactive power definitions and optimal compensation in electric arc furnace steel plant / H. Samet, I. Masoudipour. – DOI 10.1109/TPWRD.2017.2751663 // Journal of Electrical Systems. – 2013. – Vol. 9. – № 3. – P. 329-345.

98. Shklyarskiy, Y.E. Estimation of the consumers contribution in the electric energy quality indicator / Y.E. Shklyarskiy, A.N. Skamyin, **I.V. Rastvorova** //

Scientific Reports on Resource Issues, International University of Resources. – 2019. – Vol. 1. – P. 278-283.

99. Shklyarskiy, Y. Experimental study of harmonic influence on electrical energy metering / Y. Shklyarskiy, Z. Hanzelka, A. Skamyin. – DOI 10.3390/en13215536 // Energies. – 2020. – Vol. 13. – № 21. – P. 1-13.

100. Silva, J.C.L. Modeling and harmonic impact mitigation of grid-connected scig driven by an electromagnetic frequency regulator / J.C.L. da Silva, T. Ramos, M.F. Medeiros Júnior. – DOI 10.3390/en14154524 // Energies. – 2021. – Vol. 14. – № 15. – P. 1-21.

101. Skamyin, A.N. Method for determining the source of power quality deterioration / A.N. Skamyin, V.S. Dobush, **I.V. Rastvorova**. – DOI 10.1109/EIConRus.2019.8656756 // Proceedings of the 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2019. – 2019. – P. 1077-1079.

102. Skamyin, A.N. Energy efficiency improving of reactive power compensation devices / A.N. Skamyin, M.S. Kovalchuk. – DOI 10.1109/EIConRus.2018.8317207 // Proceedings of the 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2018. – 2018. – P. 780-783.

103. Skamyin, A.N. Consumed power regulation algorithm in the presence of high harmonics / A.N. Skamyin, **I.V. Rastvorova**. – DOI 10.1088/1742-6596/1753/1/012042 // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 1753. – P. 012042.

104. Skamyin, A.N. Power components calculation and their application in presence of high harmonics / A.N. Skamyin, O.S. Vasilkov. – DOI 10.1109/PQ.2019.8818243 // 2019 Electric Power Quality and Supply Reliability Conference and 2019 Symposium on Electrical Engineering and Mechatronics, PQ and SEEM 2019. – 2019. – P. 1-4.

105. Stevanović, D. A single-point method based on distortion power for the detection of harmonic sources in a power system / D. Stevanović, P. Petković. –

DOI 10.2478/mms-2014-0001 // Metrology and Measurement Systems. – 2014. – Vol. 21. – № 1. – P. 3-14.

106. Study on Harmonic Impedance Estimation and Harmonic Contribution Evaluation Index / Z. Liu, Y. Xu, H. Jiang, S. Tao. – DOI 10.1109/ACCESS.2020.2982950 // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 59114-59125.

107. Swart, P.H. On techniques for localization of sources producing distortion in electric power networks / P.H. Swart, M.J. Case, J.D. Van Wyk. – DOI 10.1002/etep.4450040611 // European Transactions on Electrical Power. – 1994. – Vol. 4. – № 6. – P. 485-489.

108. Wilsun, Xu. A “critical impedance” based method for identifying harmonic sources / Wilsun Xu, Chun Li, T. Tayjasanant. – DOI 10.1109/pes.2004.1372959 // IEEE Transactions on Power Delivery– 2004. – Vol. 19. – № 2. – P. 917-917.

109. Xu, W. Power direction method cannot be used for harmonic source detection / W. Xu. – DOI 10.1109/pess.2000.867472 // Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference. – 2000. – Vol. 2. – P. 873-876.

110. Xu, W. An investigation on the validity of power-direction method for harmonic source determination / W. Xu, X. Liu, Y. Liu – DOI 10.1109/TPWRD.2002.803842 // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2003. – Vol. 18. – № 1. – P. 214-219.

111. Xu, W. An Investigation on the Validity of Power Direction Method for Harmonic Source Determination / W. Xu, X. Liu, Y. Liu // IEEE Power Engineering Review. – 2002. – Vol. 22. – № 7. – P. 62.

112. Xu, W. A method for determining customer and utility harmonic contributions at the point of common coupling / W. Xu, Y. Liu. – DOI 10.1109/61.853023 // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2000. – Vol. 15. – № 2. – P. 804-811.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

### Акт внедрения результатов диссертационной работы в учебный процесс



УТВЕРЖДАЮ  
 Проректор по образовательной  
 деятельности ФГБОУ ВО «Санкт-  
 Петербургский горный университет»  
 к.т.н., доц. Д.Г. Петраков  
 \_\_\_\_\_ «*ав*» \_\_\_\_\_ 2022 г.

#### АКТ

#### внедрения результатов диссертационной работы в учебный процесс

Результаты диссертационной работы Добуш Ю.В. «Выявление вкладов потребителей в искажения тока и напряжения в электротехнических комплексах промышленных предприятий» внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет».

В частности, разработанный автором способ определения вклада источников искажения напряжения и тока в точке общего присоединения предлагается для изучения на практических и лабораторных занятиях при обучении студентов направления 21.05.04 – «Горное дело» по профилю «Электрификация и автоматизация горного производства» и направления 13.03.02 – «Электроэнергетика и электротехника» по профилю «Электропривод и автоматика».

В ходе практических занятий студенты осваивают методы определения источников искажений, алгоритмы вычисления вкладов нелинейных потребителей в искажения в точке общего присоединения, а также основные различия между ними.

Также, в рамках лабораторных занятий студенты проводят эксперименты на лабораторном стенде, где на основе показаний анализатора качества электрической энергии производят расчет коэффициентов вкладов потребителей и системы электроснабжения в несинусоидальность тока и напряжения в рассматриваемом узле.

Декан энергетического факультета  
 д.т.н., проф.

В.А. Шпенст

Заведующий кафедрой электроэнергетики  
 и электромеханики  
 д.т.н., проф.

В.А. Шпенст

Заведующий кафедрой общей электротехники  
 д.т.н., доц.

Я.Э. Шклярский



**ПРИЛОЖЕНИЕ Б****Справка о результатах внедрения диссертационной работы в производственную  
деятельность**

Общество с ограниченной ответственностью «АСТЕРО»  
 ОГРН 1097847303102 | ИНН 7806419840 | КПП 783601001  
 190000 г. Санкт-Петербург, Набережная реки Мойки, д. 90, лит. А

☎ +7 (800) 555-30-24  
 ✉ mail@asterocom.com  
 🌐 www.asterocom.com

**СПРАВКА**

О внедрении результатов кандидатской диссертационной работы аспиранта  
**Добуш Юлии Владимировны**  
**«Выявление вкладов потребителей в искажения тока и напряжения в  
 электротехнических комплексах промышленных предприятий»**

Настоящим сообщаем, что результаты научных исследований, отраженные в диссертационной работе аспиранта Горного университета Добуш Ю.В., актуальны и представляют практический интерес в производственной деятельности ООО «АСТЕРО».

Разработанный автором метод определения источников искажения напряжения и тока в точке общего присоединения принят к внедрению при определении наиболее эффективного места подключения фильтрокомпенсирующих устройств для повышения качества электроэнергии при наличии нескольких источников высших гармоник в существующих и проектируемых системах электроснабжения предприятий.

Электротехническая лаборатория ООО «АСТЕРО» применяет результаты проведенных научных исследований, в том числе при энергоаудите электротехнических комплексов предприятий с нелинейной нагрузкой.

Исполнительный директор



С.А. Турко

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

Свидетельство о государственной регистрации изобретения

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



**ПАТЕНТ**  
НА ИЗОБРЕТЕНИЕ  
№ 2752765

**СПОСОБ ОЦЕНКИ ВКЛАДА НЕЛИНЕЙНЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ В ИСКАЖЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ В ТОЧКЕ ОБЩЕГО ПРИСОЕДИНЕНИЯ**

Патентообладатель: *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет» (RU)*

Авторы: *Шклярский Ярослав Элиевич (RU), Скамьин Александр Николаевич (RU), Добуш Юлия Владимировна (RU), Шпенст Вадим Анатольевич (RU)*

Заявка № 2020140768  
Приоритет изобретения **10 декабря 2020 г.**  
Дата государственной регистрации в Государственном реестре изобретений Российской Федерации **03 августа 2021 г.**  
Срок действия исключительного права на изобретение истекает **10 декабря 2040 г.**

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности



*Г.П. Ивлиев* Г.П. Ивлиев