

На правах рукописи



Турукина Татьяна Евгеньевна

**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ В ПОТРЕБИТЕЛЬСКОМ СЕКТОРЕ И В
ГОРОДСКИХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ
(НА ПРИМЕРЕ Г. ТОМСКА)**

Специальность 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические
системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2018

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Кабышев Александр Васильевич

Официальные оппоненты: **Русина Анастасия Георгиевна**, доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет», заведующая кафедрой электрических станций.

Рикконен Сергей Владимирович, кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», старший научный сотрудник научно-исследовательского института прикладной математики и механики.

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск

Защита диссертации состоится «11» декабря 2018 года в 16:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.269.10 на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634034, г. Томск, ул. Усова, д. 7, ауд. 217

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634034, г. Томск, ул. Белинского, 53а и на сайте: <http://portal.tpu.ru/council/2800/worklist>

Автореферат разослан «__» октября 2018 года

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.269.10



А.В. Прохоров

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Важнейшим показателем энергетической эффективности передачи и распределения электроэнергии (ЭЭ) является величина потерь ЭЭ в распределительных сетях (РС). В результате развития рыночных отношений в России проблема экономии ЭЭ, где потери ЭЭ выступают неотъемлемой частью, приобрела особую значимость. До утверждения государственная программа Российской Федерации (РФ) «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности на период до 2020 года» потери ЭЭ в РФ в 2-2,5 раза превышали потери ЭЭ в промышленно развитых зарубежных странах, величина которых находится в диапазоне от 4 до 8 % от выработки ЭЭ. При этом в распределительных сетевых организациях величина потерь достигала 20% от отпуска ЭЭ в сеть, а в ряде отдельных регионов — 30-40%. Наблюдаются тенденции изменения значимости факторов, влияющих на саму величину потерь, среди которых особенно актуальными на сегодняшний день является качественное и количественно изменение нагрузки – рост однофазной, управляемой нагрузки.

Сверхнормативные потери электроэнергии в городских РС – это прямые финансовые убытки электросетевых компаний, исходя из этого проблема снижения сверхнормативных потерь ЭЭ и потерь на передачу ЭЭ в целом должна быть не только актуальной, но и стать одной из важных задач, решение которой обеспечит как финансовую стабильность распределительных сетевых компаний (РСК), так и снижение затрат, связанных с передачей ЭЭ, РСК и потребителей. Для последних актуальность выражается в том, что на сегодняшний день политика формирования тарифа на ЭЭ устроена таким образом, что все расходы сетевых компаний, связанные непосредственно с передачей и распределением ЭЭ, всегда учтены в величине тарифа по передаче ЭЭ, которая в свою очередь является слагаемым тарифа на ЭЭ, поставляемому потребителю. Рычагом давления на распределительные компании в сложившейся ситуации выступает только законодательство РФ, которое указом президента РФ от 4 июня 2008г. №889 «О некоторых мерах по повышению энергетической и экологической эффективности российской экономики» утвердило программу, согласно которой эффективность передачи и распределения ЭЭ в РФ должна достичь уровня промышленно развитых стран.

Высокий уровень потерь также является индикатором низкого качества электроэнергии в электрических сетях (ЭС) России, свидетельствующем о существенном превышении допустимых значений показателей качества электроэнергии (ПКЭ) по ГОСТ 32144-2013. Низкое качество ЭЭ может быть определено как вероятность возникновения любого события, связанного непосредственно с сетью электропитания, которое приводит к экономическим потерям. В данном случае расходы сетевых компаний, ставшие последствием низкого качества электроэнергии, не имеют отношения к тарифу на ЭЭ и являются прямыми затратами РСК. В случае, когда низкое качество ЭЭ является причиной высоких потерь на передачу и распределение ЭЭ, расходы, вызванные этими потерями, ложатся на плечи как РСК, так и потребителей, поэтому проблема качества не должна рассматриваться обособленно и относиться к проблемам

только сетевых компаний, качество ЭЭ зависит не только от действий РСК, но и от влияния потребителей на существующую сеть.

РС г.Томска проектировались и строились с учетом перспективы роста нагрузки предприятий, однако на фоне высокого уровня стоимости аренды земли в городе, произошло перемещение промышленных зоны в пригород, либо на окраины города. Все это привело к уменьшению потребления ЭЭ (по величине мощности), снижению загрузки оборудования РС и ПС города и как результат большой величине постоянных потерь ЭЭ. Большая величина потерь также характеризуется тем, что имеющаяся нагрузка существующей РС г. Томска несимметрична, нелинейна и изменяется по стохастическому закону, форма напряжения и тока искажены широким спектром гармоник (рис. 1).

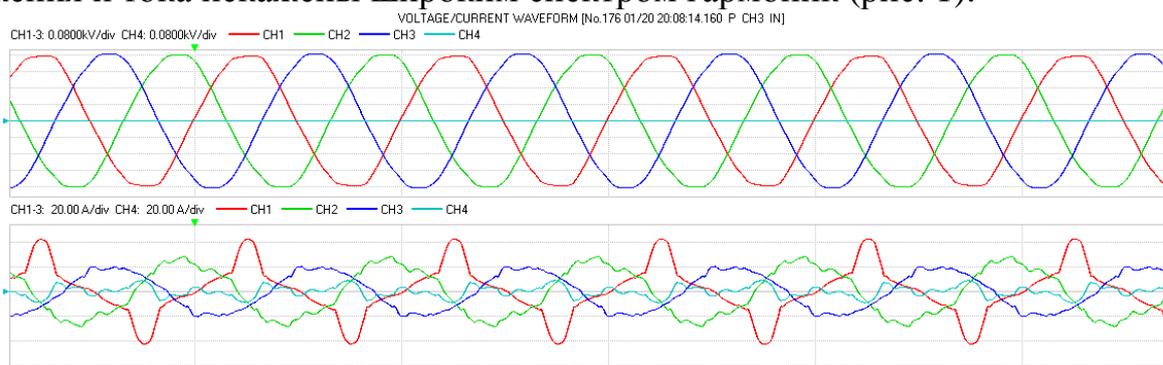


Рисунок 1 – Напряжение и ток нагрузки в каждой фазе

Среди типовых мероприятий по снижению потерь ЭЭ в ЭС можно выделить: технические; мероприятия по совершенствованию систем расчетного и технического (контрольного) учета ЭЭ и организационные мероприятия. Основной эффект в снижении величины технических потерь ЭЭ может быть получен за счет технических мероприятий, которые включают в себя: реконструкцию, перевооружение, повышение пропускной способности, а также надежности работы ЭС, сбалансированности режимов; т.е. за счет внедрения капиталоёмких мероприятий. К приоритетным мероприятиям, направленным на снижение технических потерь ЭЭ в городских РС относятся организационные мероприятия, среди которых оптимизация схем и режимов ЭС, ввод в работу устройств, позволяющих в автоматическом режиме регулировать напряжение под нагрузкой, использование имеющихся средств регулирования напряжения с целью повышения качества ЭЭ и снижения ее потерь, выравнивание несимметричных нагрузок, фаз и т.п. Следует отметить, что подобного рода мероприятия требуют малых капиталовложений и окупаются в довольно короткие сроки, что отвечает требованиям сетевых компаний и позволят решить задачу обеспечения финансовой стабильности сетевых организаций.

Степень разработанности темы исследования. Различным аспектам проблемы оптимизации режимов работы городских РС посвящено большое количество работ отечественных и зарубежных ученых: Ю.С. Железко, В.Э. Воротницкий, Ф.Д. Косоухов, А.В. Дед, М.И. Фурсанов, Т.Е. Тюдина и Д.Е. Дулепов, Ю.В. Мясоедов и Н.В. Савина, Г.Е. Поспелов, П.В. Терентьев, М.С. Левин, И.В. Наумов, Е.А. Каминский, В.А. Скороходов, О.Б. Кисель, В.Я. Майер, А.И. Вольдек, S. Perera и V.J. Gosbell, R.F. Woll, Dr. J. Driesen и Dr. T. Van

Craenenbroeck, A.A. Ansari и D.M. Deshpande, G.K. Singh, A.K. Singh и R. Mitra, A. von Jouanne, A.C. Williamson и E.B. Urquhart, D. Reimert, Jeng-Tyan Cherng и Tsai-Hsiang Chen, M.E. Baran и F.F. Wu, E.S. Ibrahim, Dong-Li Duan, E. Ralph., Osmo Siirto, Jianhui Wang, M. Abdelaziz, H. Dezan, M. Guerrero, Francisco G. Montoya и др. Описанные в данных работах подходы помогут усовершенствовать режимы работы сети, улучшить пропускную способность линий и значения показателей качества электрической энергии, снизить потери мощности и привести к увеличению надежности энергоснабжения.

Однако применительно к городским сетям 0,4 кВ имеются лишь узкие исследования, посвященные повышению энергоэффективности передачи и распределения ЭЭ. Помимо прочего на сегодняшний день существенно изменились условия эксплуатации оборудования: нагрузка нелинейна и несимметрична, что противоречит условиям проектирования существующей сети электрооборудования. Следовательно, существует ряд нерешенных вопросов, связанных с повышением энергетической эффективности в условиях изменяющейся нагрузки и условий эксплуатации.

Цель работы – разработка рекомендаций по применению организационных и технических мероприятий для распределительной электрической сети г. Томска, эксплуатируемой в условиях нелинейной, несимметричной, изменяющейся по стохастическому закону нагрузки. Критериальной оценкой эффективности подобных мероприятий в данном исследовании выступает окупаемость последних на фоне снижения уровня потерь ЭЭ.

Для достижения обозначенной цели к решению поставлены следующие **задачи**:

– определение параметров исследуемого участка сети, исходя из реальных данных, полученных согласно показаниям приборов учета, установленных в точка приема в сеть/отпуска из сети, а также согласно замерам на трансформаторах, установленных на данном участке с дальнейшим программным моделированием этого участка;

– исследование влияния уровня несимметрии токов и напряжений на величину потерь ЭЭ и оценка экономической эффективности мероприятий, направленных на симметрирование нагрузки;

– определение оптимальных мест размыкания высоковольтной линии напряжением 10 кВ с двусторонним питанием и рациональной загрузки электрооборудования (ЭО);

– анализ влияния коэффициента нелинейных искажений на величину коэффициента мощности в условиях эксплуатации РС и оценка эффективности установки фильтрокомпенсирующих устройств (ФКУ).

Научная новизна работы:

1. Разработан алгоритм автоматического переключения однофазной нагрузки с целью ее симметрирования;

2. В условиях подключения «современного» потребителя, нагрузка которого нелинейна и несимметрична, произведена оценка значимости решения оптимизационных сетевых задач при изменении условий эксплуатации ЭО конкретного участка городской РС;

3. Предложена оценка влияния мощности искажений на коэффициент мощности для исследуемого участка сети, эксплуатируемого в условиях качественно измененной нагрузки.

Теоретическая значимость работы заключается в оценке эффективности организационных и технических мероприятий, направленных на снижение величины потерь ЭЭ и оптимизацию режимов работы участка электрической сети г.Томска, эксплуатируемого в условиях нелинейной, несимметричной и изменяющейся по стохастическому закону нагрузки, на основе современных программных комплексов.

Практическая значимость работы:

1. Снижение технических потерь в городских РС, возникающих при несимметрии токов и напряжений за счет установки трансформаторов со схемой соединения обмоток Y/Z_0 или применения специальных СУ на 12,59% от величины потерь, возникающих в сети с трансформаторами, схема соединения обмоток которых Y/Y_0 ;

2. Повышение эффективности передачи и распределения ЭЭ при изменении условий эксплуатации оборудования участка городской ЭС и определение оптимальных мест размыкания РС позволяет снизить потери ЭЭ на 19% от величины потерь, возникающих на исследуемом участке сети в режиме максимальных нагрузок после регулирования напряжения имеющимися средствами. Также отсутствуют шины с отклонением напряжения, превышающим регламентированные ГОСТом 10%;

3. Установка фильтров позволяет уменьшить нагрузочные потери в КЛ, генерируемые гармоническими искажениями по току и по напряжению со стороны питающих шин и нагрузки на 19,5% от величины потерь, возникающих на исследуемом участке сети до установки ФКУ.

Практическая ценность подтверждается актом об использовании результатов научно-исследовательской работы на предприятии ООО «Горсети» г. Томск.

Методы исследования. При выполнении диссертационной работы применялись метод узловых потенциалов, метод Ньютона-Рафсона, метод градиентного спуска, генетические алгоритмы, эконометрические методы. Для обработки исходных и полученных в ходе исследования данных использовались такие программные продукты как *MS Excel*, *Mathcad 14.0*, *Matlab 2013a*, *Statistica 6.0*, *TRACE MODE*.

Основные положения, выносимые на защиту:

1) Алгоритм для устройства симметрирования нагрузки, посредством автоматического переключения однофазных нагрузок, с внедренным в него прогнозным аппаратом;

2) Анализ эффективности применения алгоритмов по определению оптимальной точки размыкания сложно замкнутой РС по критерию загрузки ЭО и минимуму потерь в условиях нелинейной, несимметричной и изменяющейся по стохастическому закону нагрузки, а также в условиях простоя функционирующего ЭО;

3) Анализ значимости применения фильтрокомпенсирующих устройств

в условиях прогрессирующей нелинейности нагрузки РС.

Степень достоверности и апробация результатов исследования.

Моделирование исследуемого участка сети произведено на основании реальных данных, полученных в результате снятия показаний с приборов учета, установленных на границах балансовой принадлежности и эксплуатационной ответственности между сетевыми организациями и сетевой организацией и гарантирующим поставщиком, в результате замеров на трансформаторах, установленных на данном участке (рис. 2). Сечения и длины питающих и распределительных линий, мощности и тип трансформаторов соответствуют реальной эксплуатируемой сети и являются компонентами построенной математической модели. Достоверность полученных в ходе исследования результатов подтверждается использованием классических законов теоретической электротехники, электрических машин, математического анализа, эконометрики, а также корректным использованием методов оптимизации. Адекватность результатов определяется большим объемом экспериментальных данных и строгими аналитическими выводами. Экономическая оценка эффективности применения мероприятий соответствует действующим ценам на розничном рынке ЭЭ и мощности, а также ценам на оптовом рынке, установленные в результате торгов, на определенные месяцы. Достоверность компьютерного моделирования обеспечивается использованием апробированного и широко применяемого в научной и инженерной практике программного обеспечения.

Основные положения диссертационной работы были доложены на международных и всероссийских научно-технических конференциях и семинарах: Всероссийская научная конференция молодых ученых "Наука. Технологии. Инновации" (г.Новосибирск: НГТУ, 2016г.); 11th International Forum on Strategic Technology (IFOST - 2016) (г.Новосибирск: НГТУ, 2016г.); IV Международный молодежный форум «Интеллектуальные энергосистемы» (г.Томск: ТПУ, 2016г.); Всероссийская молодежная конференция «Современные аспекты энергоэффективности и энергосбережения» (г.Казань: КНИТУ, 2013г.).

Личный вклад автора заключается в анализе существующего уровня потерь и перспективе его снижения, в постановке задач и разработке мероприятий по оптимизации режимов работы городских распределительных сетей, обработке и обобщении данных, полученных в ходе реализации алгоритмов и проведения расчетов, обобщении установленных закономерностей, формулировании выводов диссертационной работы, написании статей и докладов. В каждой статье или работе, опубликованной в соавторстве, личный вклад составляет не менее 60%.

Публикации. По результатам выполненных исследований, связанных с темой диссертационной работы, опубликовано 8 научных работ, в том числе 4 статьи в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК РФ, одна из которых входит в перечень реферативной базы SCOPUS, 1 статья в зарубежном научном издании, 3 публикации в материалах всероссийских и международных конференциях.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из списка сокращений и терминов, введения, четырех глав, списка литературы из 105 наименования и 9 приложений. Общий объем работы составляет 229 страниц, из них 165 страниц основного текста, включая 40 таблиц, 94 рисунка.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлено обоснование актуальности темы диссертационной работы, изложены цель и задачи работы, ее научная новизна, теоретическая и практическая значимость, приведены основные положения, выносимые на защиту, а также информация о методах проведения исследования и достоверности полученных результатов, апробации, публикации, структура и объем работы.

В первой главе приведены обоснованные причины возникновения проблемы потерь мощности и энергии в распределительных городских сетях. Произведен анализ участка ЭС города Томска, схема которого приведена на Рисунке 2. Исследуемый участок сети включает в себя 16 трансформаторных подстанций (ТП), в которых мощности установленных трансформаторов варьируется от 160 до 1000 кВА. Основная часть ТП обеспечивает электроснабжение коммунально-бытовых потребителей.

Помимо коммунально-бытовых потребителей также осуществляется питание торгового центра (ТП 784, 786, 788), насосной станции (ТП 351) и промышленного объекта (ТП 145).

Во второй главе рассматривается характерная для участка распределительной сети, несимметрия нагрузки. Для сетевого участка смоделирован несимметричный режим с целью проведения оценки эффективности применения следующих способов уменьшения несимметрии:

1. Установка трансформаторов, схема соединения обмоток которых «звезда-зигзаг с нулем» (Y/Z_0).

Для моделирования участка городской сети может быть использован программный комплекс *MATLAB*, позволяющий произвести соответствующие расчеты. На исследуемой подстанции установлены два трансформатора типа ТМ-630 на напряжение 10/0,4 кВ. От подстанции осуществляется питание двух девятиэтажных жилых домов (рис. 3), среднемесячная нагрузка которых составляет 385,66 кВА. Топология и данные участка городской сети соответствуют реальным условиям эксплуатации. Основная часть потерь приходится на кабельные линии и трансформаторы, поэтому потери ЭЭ оцениваются только в этих элементах сети.

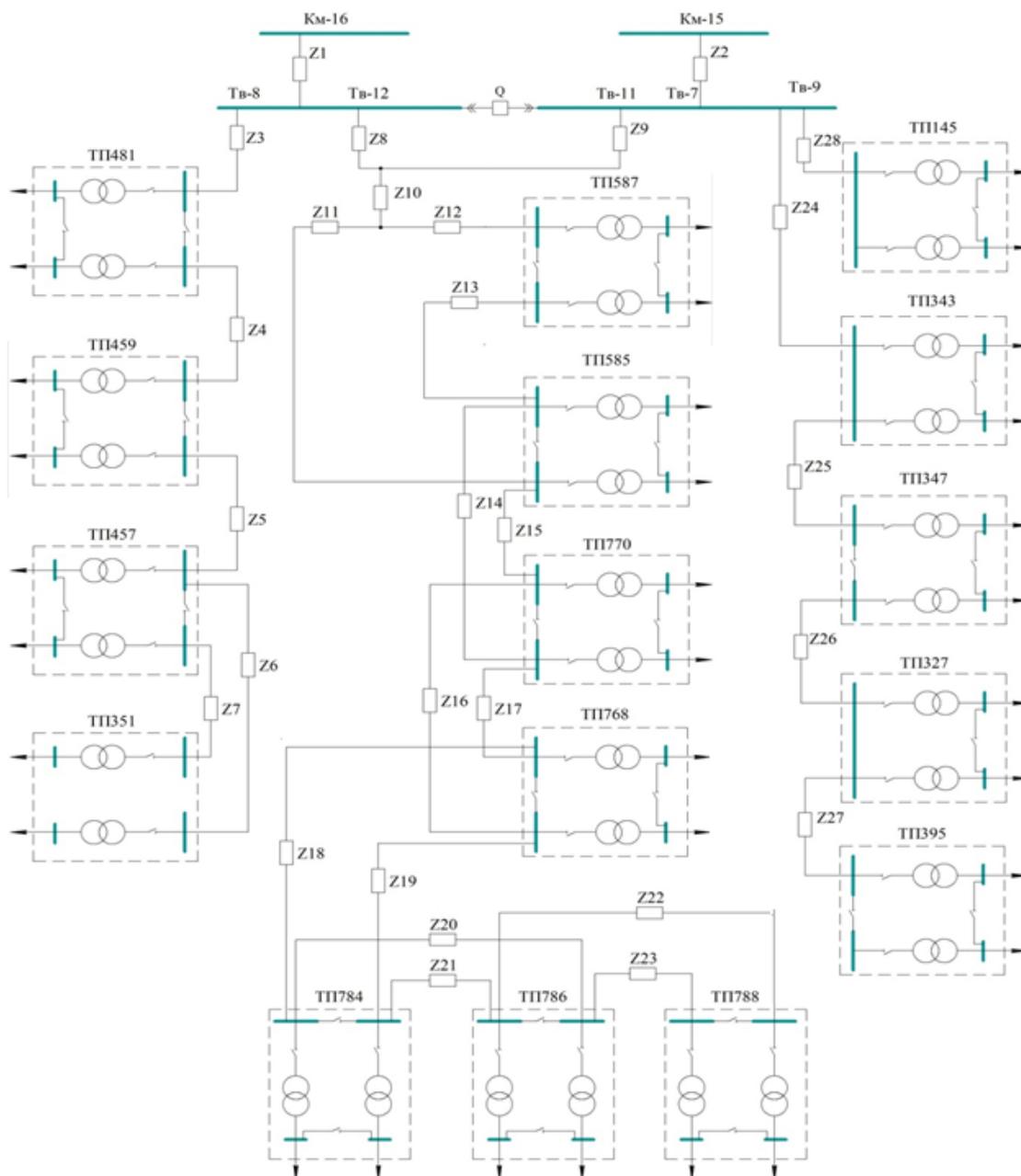


Рисунок 2 – Принципиальная схема исследуемого участка сети

При установке трансформатора со схемой соединения Y/Z_0 наблюдается уменьшение коэффициента несимметрии нулевой последовательности. Так в случае с трансформатором, схема соединения обмоток которого Y/Y_0 значение данного коэффициента составляет 3,59%, что превышает регламентируемое ГОСТом 32144-2013 нормально допустимое значение отклонения равное 2%. А для трансформатора со схемой соединения Y/Z_0 это значение составляет 0,06%. Суммарные потери активной и реактивной энергии также уменьшились (рис. 4), что свидетельствует о наличии связи между значениями ПКЭ и уровнем потерь. Стоит отметить, что подобную замену трансформатора с целью снижения потерь ЭЭ следует рассматривать для каждого случая отдельно, поскольку сопротивление нулевой последовательности трансформаторов со схемой соединения обмоток Y/Z_0 очень мало, соответственно ток нулевой

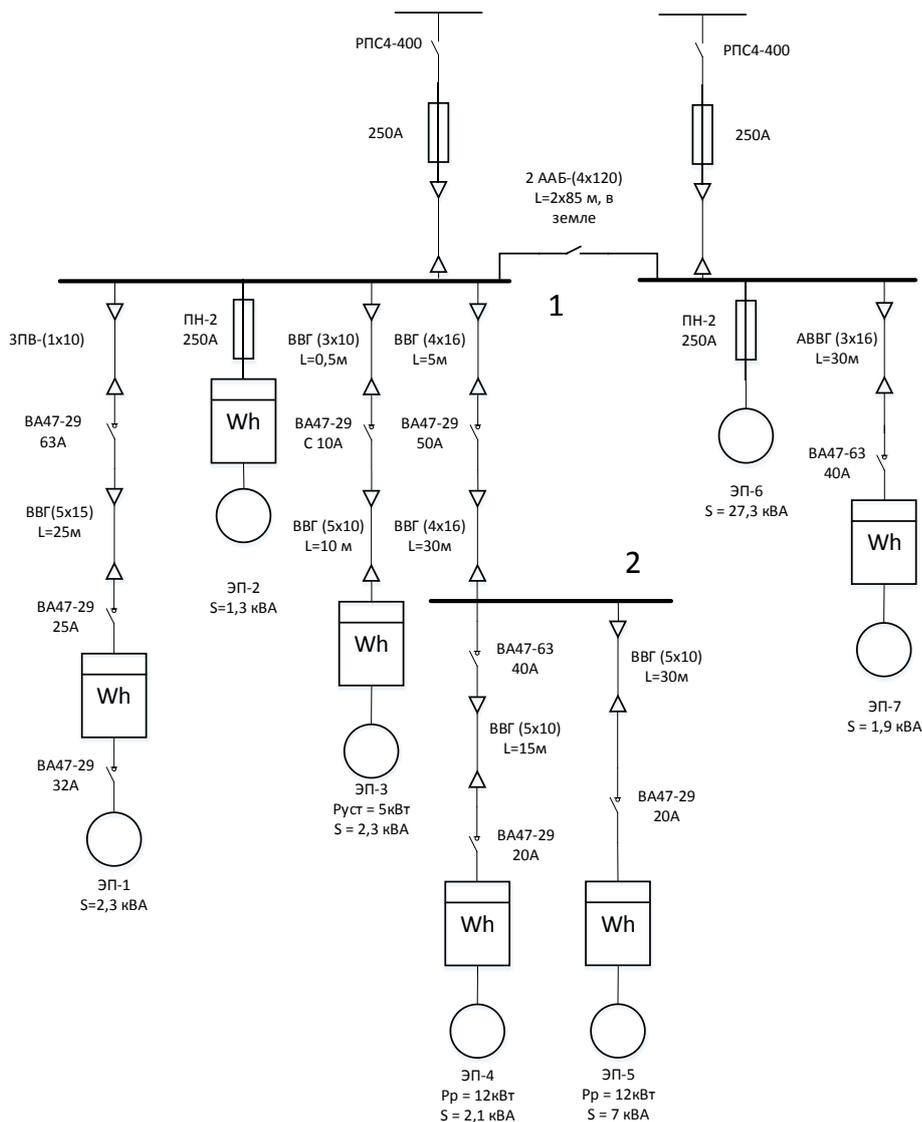


Рисунок 3 – Исследуемая подстанция

последовательности возрастает, что в свою очередь приводит к увеличению потерь ЭЭ в КЛ-0,4 кВ. Для данного участка сети мероприятие по замене трансформатора является эффективным, поскольку уменьшение потерь в трансформаторе во много раз превышает увеличение потерь в КЛ, о чем свидетельствует величина суммарных потерь ЭЭ (рис.4).

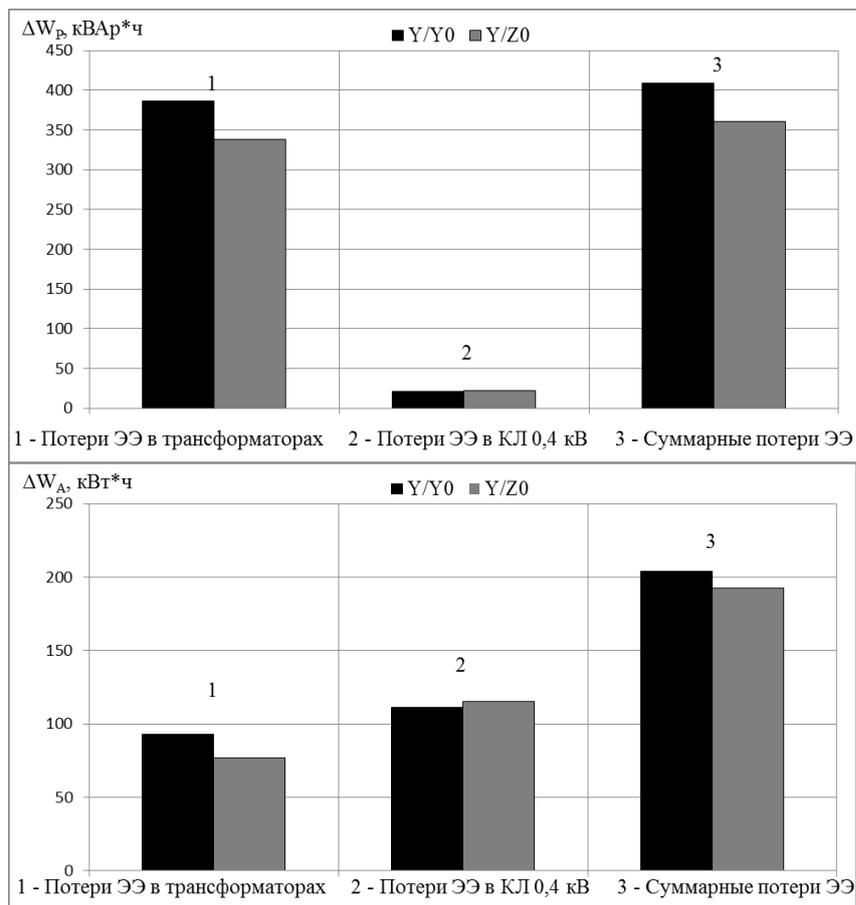


Рисунок 4 – Диаграммы уменьшения потерь активной и реактивной ЭЭ за сутки

2. Установка трансформаторов с симметрирующим устройством (СУ).

Аналогично предыдущему способу в программном комплексе была смоделирована исследуемая подстанция с последующей заменой трансформаторов на трансформаторы со встроенным СУ, в результате чего в Таблице 1 представлены итоговые сравнительные результаты расчетов.

Замена трансформаторов позволяет снизить коэффициент несимметрии напряжения по нулевой последовательности (с 3,59% до 0,04%), повысив тем самым, качество ЭЭ. Эффект в части снижения величины потерь активной и реактивной энергии в трансформаторе со встроенным симметрирующим устройством аналогичен результатам, полученным после установки трансформаторов со схемой соединения Y/Z_0 . Несмотря на увеличение потерь в кабельных линиях 0,4 кВ, обусловленное малой величиной сопротивления нулевой последовательности и общей недогруженностью сети, для данного участка сети мероприятие по замене трансформатора является также эффективным, поскольку это увеличение потерь не превышает 5%, тогда как суммарные потери ЭЭ уменьшаются (активной снизились на 7,49%, реактивной – на 10,13%).

Таблица 1 – Потери ЭЭ за сутки при установке различных типов трансформатора

	Y/Y_0		Трансформатор с СУ	
	ΔW_A , кВт·ч	ΔW_P , кВАр·ч	ΔW_A , кВт·ч	ΔW_P , кВАр·ч
Потери, возникающие ЭЭ в трансформаторах	74,211	309,740	59,710	272,586
Потери ЭЭ, возникающие в КЛ-0,4 кВ	89,050	17,355	91,322	18,770
Суммарные потери ЭЭ	163,261	327,095	151,032	291,356

3. Разработка алгоритма программы симметрирования нагрузки посредством переключения однофазной нагрузки.

Для ТП 459 был разработан алгоритм программы симметрирования однофазной нагрузки. На рисунке 5 представлен алгоритм работы и структурная схема устройства переключения. Посредством запрограммированного микроконтроллера осуществляется необходимый анализ данных, по результатам которого на вентильные ключи подается управляющий сигнал, в результате чего нагрузка переключается на наименее загруженную фазу. Для разработки и тестирования алгоритма была использована SCADA система TRACE MODE. Данный алгоритм был построен на языке программирования функциональных блоков (FBD), в результате чего получен программно-аппаратный комплекс, выполняющий функцию согласующего устройства (СУ). Внедрение в алгоритм прогнозного аппарата позволяет определить длительность и значимость уровня несимметрии. В качестве прогнозного аппарата используется метод *autoregressive moving-average model (ARMA(p, q))*/Generalized autoregressive conditional heteroscedasticity (GARCh(p, q)).

В ходе расчетов были получены результаты, которые представлены в таблице 2.

Таблица 2. Потери ЭЭ за сутки при установке СУ

	Без СУ		СУ	
	ΔW_A , кВт·ч	ΔW_P , кВАр·ч	ΔW_A , кВт·ч	ΔW_P , кВАр·ч
Потери ЭЭ в трансформаторах	92,764	386,967	82,561	353,464
Потери ЭЭ кабельных линиях 0,4 кВ	111,313	21,694	105,931	20,998
Суммарные потери ЭЭ	204,076	408,661	188,492	374,461

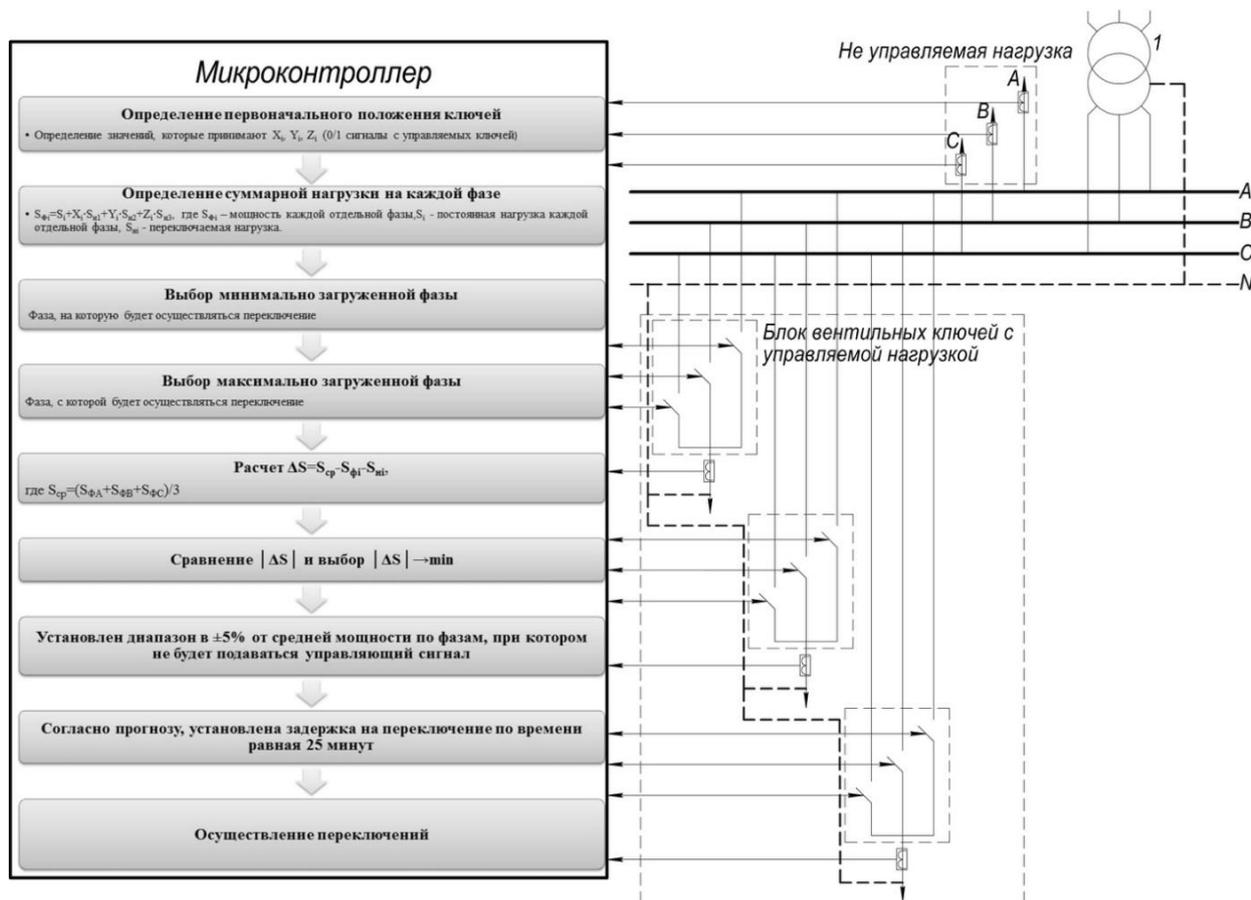


Рисунок 5 – Алгоритм работы и структурная схема устройства автоматического переключения однофазных нагрузок

При установке СУ потери как активной, так и реактивной энергии в трансформаторе уменьшились на 12% и 9% соответственно, в кабельных линиях – на 5% и 3% соответственно.

Качество ЭЭ при использовании данного СУ улучшилось. Наблюдается уменьшение коэффициента несимметрии нулевой последовательности.

В третьей главе для выявления участков сети, характеризующихся высоким уровнем потерь, низкой загрузкой оборудования, пониженным напряжением осуществлен расчет установившегося режима (режим максимальных нагрузок (PMН)), который соответствует зимнему максимуму нагрузок, с последующим регулированием напряжения с помощью имеющихся средств регулирования (табл. 3).

Таблица 3. PMН после регулирования напряжения

P , МВт	Q , МВАр	S , МВА	ΔP , МВт	ΔQ , МВАр	ΔS , МВА	ΔP , %
3,388	1,75	3,81	0,39	0,2	0,44	11,57

В таблице представлена величина активных потерь в данном режиме (в Томске для сетевой компании, в обслуживании и эксплуатации которой находится исследуемый участок сети, величина потерь по всем сетям, находящимся в ее ведении утверждена на уровне 8,38%). Отклонения напряжения на 7-ми

шинах превышают предельно-допустимые 10%. Моделирование суток зимнего максимума позволило определить среднюю загрузку оборудования, которая не превышает 25%.

Поскольку изменение сезона влечет за собой изменение потребляемой мощности, параметры режима могут значительно отличаться друг от друга в разных режимах. Для оценки состояния системы, при потребляемом минимуме мощности (летний минимум) произведено моделирование режима минимальных нагрузок для данного участка городской РС. Для этого исходные значения нагрузки потребителей задавались равными 70% от их максимальных значений, согласно первоначальным данным. В таблице 4 представлена информация о величине потребляемой из сети мощности, а также о суммарных ее потерях для режима с отрегулированным напряжением, посредством местных средств регулирования.

Таблица 4. Режим минимальных нагрузок после регулирования напряжения

P , МВт	Q , МВар	S , МВА	ΔP , МВт	ΔQ , МВар	ΔS , МВА	ΔP , %
2,418	1,249	2,721	0,201	0,1	0,225	8,313

В таблице представлена величина активных потерь в данном режиме. Отклонения напряжения на 2-х шинах превышают предельно-допустимые 10%. Регулированием напряжения при помощи переключения ответвлений без возбуждений (ПВВ) удалось добиться уменьшения количества шин, характеризующихся заниженным напряжением, до 2 (до регулирования количество шин – 7), однако при этом произошло увеличение потребления из сети, а также увеличение величины потерь.

Поскольку характерной особенностью рассматриваемого участка сети является низкая степень загрузки ЭО, то с целью уменьшения величины потерь мощности, увеличения степени загрузки и КПД трансформаторов рассмотрен вариант отключения части ЭО. В качестве критерия оптимальности в данном случае выступает оптимальная нагрузка трансформатора, когда $\Delta P_{XX} = \Delta P_{K3}$. Для определения значения мощности нагрузки, при которой работа одного трансформатора будет экономически целесообразнее параллельной работе (а также раздельной) двух трансформаторов, произведены следующие расчеты:

$$\Delta P_{нагр} = \Delta P_{K3} \cdot \frac{S^2}{S_{ном}^2} \quad (1)$$

Потери мощности при работе одного трансформатора:

$$\Delta P_{TP} = \Delta P_{xx} + \Delta P_{K3} \cdot \frac{S^2}{S_{ном}^2} \quad (2)$$

Потери мощности при параллельной работе трансформаторов:

$$\Delta P_{TP} = \Delta P_{xx} \cdot n + \frac{1}{n} \cdot \Delta P_{K3} \cdot \frac{S^2}{S_{ном}^2} \quad (3)$$

Ожидаемое значение мощности нагрузки:

$$S \geq S_{\text{ном}} \cdot \sqrt{\frac{n \cdot \Delta P_{\text{xx}}}{\Delta P_{\text{КЗ}}}} \quad (4)$$

Определение целесообразности отключения части ЭО производилось посредством компьютерного моделирования с учетом оптимальной загрузки трансформаторов. Результат моделирования представлен на рисунке 6, где зеленые кружки выделяют ТП, в которых произошли изменения от первоначальных параметров.

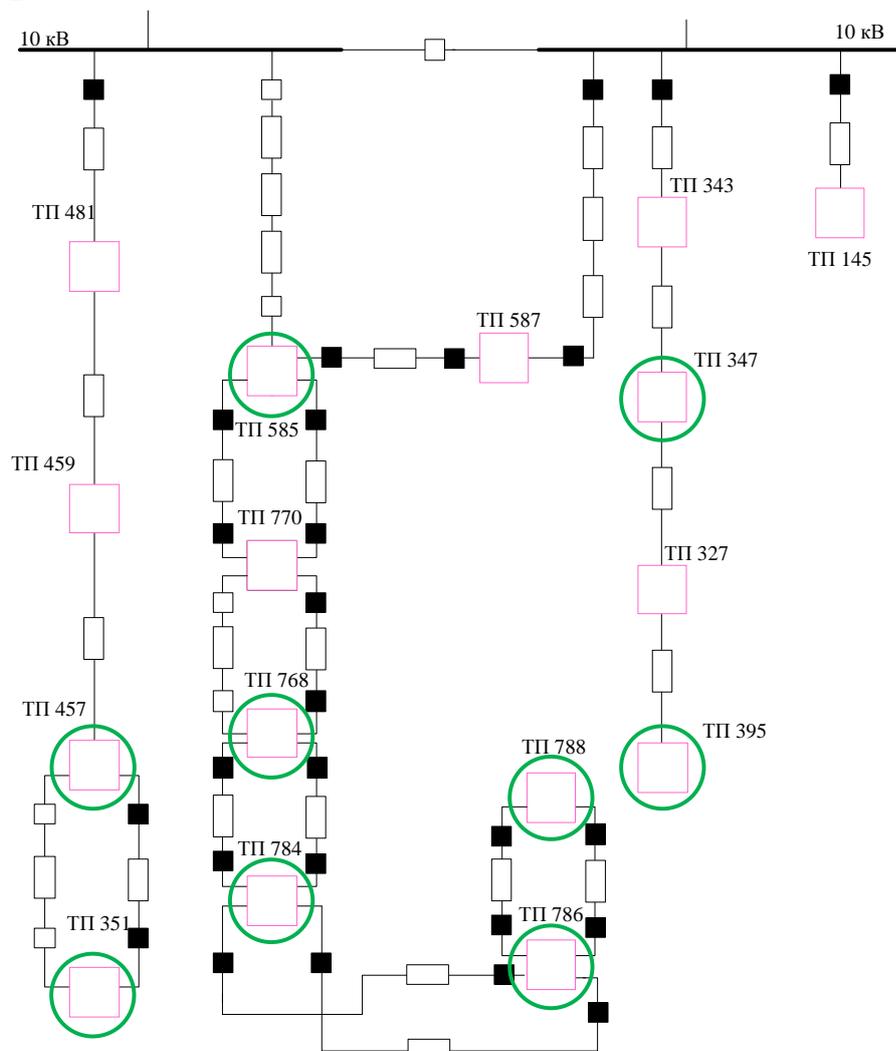


Рисунок 6 – Принципиальная схема участка сети с отключенным оборудованием

Отключение части оборудования приводит к значительному увеличению загрузки оборудования, что в свою очередь приводит к снижению потерь ХХ из-за отключенных трансформаторов и к значительному увеличению нагрузочных потерь в оставшихся в работе трансформаторах и КЛ (табл. 5). Увеличение последних обусловлено протеканием по КЛ большей по величине тока, что приводит к увеличению падения напряжения на рассматриваемом участке сети, а снижение напряжения приводит к еще большему увеличению передаваемого тока, поскольку мощность ЭП, присоединенных к сети практически не меняется, тем самым увеличивая нагрузочные потери. Кроме того, из-за уменьшения

числа параллельно работающих трансформаторов снижается общая надежность системы. Однако данный режим не характеризуется простым функционирующего оборудования, большее количество оставшихся в работе трансформаторов имеет оптимальную степень загрузки, а, следовательно, и максимальный или близки по значению к нему КПД. Рассматривая данный режим работы с этой точки зрения, то в условиях минимальной нагрузки он может оказаться эффективным, но снижения уровня потерь мощности данным способом для рассматриваемого участка сети получить не удастся.

Таблица 5. Режим участка сети с отключенным оборудованием

P , МВт	Q , МВАр	S , МВА	ΔP , МВт	ΔQ , МВАр	ΔS , МВА	$\Delta P^$, %	$\Delta Q^$, %	$\Delta S^$, %
3,34	1,71	3,75	0,49	0,24	0,55	14,76	14,22	14,67

Для исследуемого участка сети эффективной в части снижения уровня потерь оказалась оптимизация мест размыкания ЭС 6(10) кВ. Задача оптимизации решается с помощью программного комплекса на основе генетических алгоритмов. Оптимальным считается режим, который обеспечивает минимум суммарных потерь мощности:

$$F = \sum \Delta P_{ij} \rightarrow \min, \quad (5)$$

К равномерной загрузке всего работающего ЭО приводит полностью замкнутое состояние системы. Равномерная загрузка в свою очередь обеспечивает снижение нагрузочных потерь в функционирующих трансформаторах и КЛ. В результате оптимизации потери снизились по отношению к первоначальному состоянию на 19,6% (табл. 6). Протекание по КЛ тока меньшей величины привело к снижению падения напряжения на рассматриваемом участке сети, что в свою очередь привело к повышению потребляемого тока нагрузкой. Снижение падения напряжения прежде всего обусловлено изменением конфигурации сети, т.к. потребление активной мощности в данном случае увеличивается сильнее, чем реактивной. В комплексе все это привело к тому, что в данном режиме отсутствуют шины с отклонениями напряжения, превышающими регламентированные 10%, что свидетельствует о должном качестве ЭЭ по данному показателю.

Таблица 6. Режим максимальных нагрузок после оптимизации

Режим	P , МВт	Q , МВАр	S , МВА	$\cos\varphi/tg\varphi$	ΔP , МВт	$\Delta P^$, %
Максимальных нагрузок (отрегулированный)	3,388	1,748	3,812	0,89/0,52	0,392	11,57
Оптимальный (минимум потерь)	3,438	1,767	3,866	0,89/0,51	0,315	9,16
$ \Delta $	0,050	0,019	0,054	0,93/0,38	0,077	2,41

В четвертой главе рассмотрено снижение уровня потерь за счет уменьшения интенсивности и спектра гармоник в РС 0,4 кВ.

Зависимости напряжения удовлетворяют предъявляемым требованиям, в отличие от зависимости токов, в которых наличие нелинейной нагрузки оказывает существенное влияние на синусоидальную форму сигнала, искажая ее вплоть до треугольника (рис. 1). Для оценки качества потребляемой электроэнергии при отличии формы тока от идеальной синусоиды необходимо учитывать гармонический состав потребляемого тока. Для этого вводится понятие коэффициента мощности, который определяется по следующим формулам:

$$PF = \frac{P}{S} \text{ или } PF \approx \frac{\cos \varphi_1}{\sqrt{1+THD_I^2}}, \quad (6)$$

где THD_I – коэффициент нелинейных искажений (КНИ) по току;

На практике PF часто путают с термином косинус φ , который определяется следующим образом:

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{S_1} \quad (7)$$

где P_1 – активная мощность основной частоты;

S_1 – полная мощность основной частоты.

Таким образом, $\cos \varphi$ относится только к основной частоте, и при наличии гармоник отличается от PF .

КНИ по току и по напряжению определяются согласно следующим формулам:

$$THD_I = \sqrt{\left(\frac{I_{rms}}{I_1}\right)^2 - 1} \text{ и } THD_U = \sqrt{\left(\frac{U_{rms}}{U_1}\right)^2 - 1} \quad (8)$$

где THD_U – КНИ по напряжению.

Среди показателей гармонических искажений выделяют такое понятие как мощность искажений:

$$D = \sqrt{S_1^2(1+THD_U^2)(1+THD_I^2) - P^2 - Q^2}, \quad (9)$$

где $P = \sum_{h=1}^{\infty} U_h \cdot I_h \cdot \cos \varphi_h$ – активная мощность сигнала, в составе которого имеются гармоники, которая представляет собой сумму активных мощностей, порождаемых напряжениями и токами одного и того же порядка.

$Q = U_1 \cdot I_1 \cdot \sin \varphi_1$ – реактивная мощность (РМ), которая определяется только для основной частоты.

КНИ по току для исследуемого участка сети достигает значений 30-50%, однако данный показатель, как и мощность искажений на сегодняшний день не имеют отражения ни в одном из утвержденных нормативных документов, поскольку считается что все потребители – это потребители напряжения, а зависимости напряжения как отмечено выше и показано на рисунке 1 соответствуют нормам.

Мощность искажений носит колебательный характер и не выполняет никакой полезной работы, а наоборот ухудшает состояние системы, ограничивая работу оборудования. Энергия искажений циркулирует между фазами и

между вторичной обмоткой трансформатора и потребителем, нанося вред обоим: со стороны трансформатора происходит дополнительное подмагничивание магнитопровода, что приводит к росту постоянных потерь и отсутствию возможности работы трансформатора в номинальном режиме, со стороны потребителя – потребляемая мощность становится недоиспользованной. Отсутствие норм и стандартов данного показателя приводит к тому, что на сегодняшний день в экономических расчетах данный показатель не участвует, что в свою очередь приводит к недоучету количества потерь мощности, вызванного существованием мощности искажений.

Наиболее критичным случаем для исследуемого участка сети, когда наблюдаются максимальные искажения, является расположение источников гармонических напряжений на шинах питающей сети и на нагрузке (табл. 7).

Таблица 7. Анализ мощности искажений в системе

	U, кВ	I, А	P, кВт	Q, кВАр	S ₁ , кВА	THDU, %	THDI, %	D, кВА	D, %
Bus Km - Bus Tb1.1	10,09	67,3	672,27	-0,77	672,27	13,38	13,73	129,47	19,25
Bus Km - Bus Tb1.2	10,09	164,1	1639,2	-5,17	1639,2	13,38	11,02	285,17	17,39
Bus 481.1 - Bus 481.3	0,36	292,2	88,29	-56,09	104,60	11,1	20,37	24,38	23,31
Bus 481.2 - Bus 481.4	0,37	200,2	63,36	-39,14	74,47	11,81	20,34	17,61	23,64
Bus 585.1 - Bus 585.3	0,36	250,4	76,44	-47,77	90,14	11,38	20,73	21,42	23,76

На шинах 0,4 кВ со стороны потребителей для устранения остаточных гармоник установлены активные фильтры. На рисунке 7-10 представлено действие трехфазного фильтра нагруженного на мост Ларионова, для реализации использовались средства имитации программы *Matlab 2013a*.

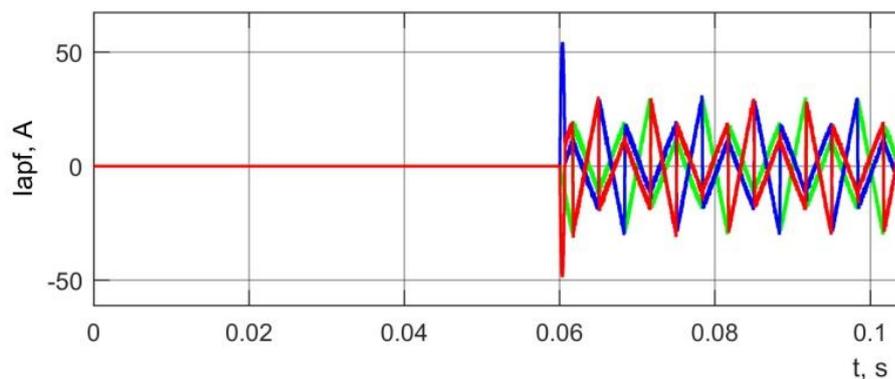


Рисунок 7 – Ток активного фильтра в каждой фазе

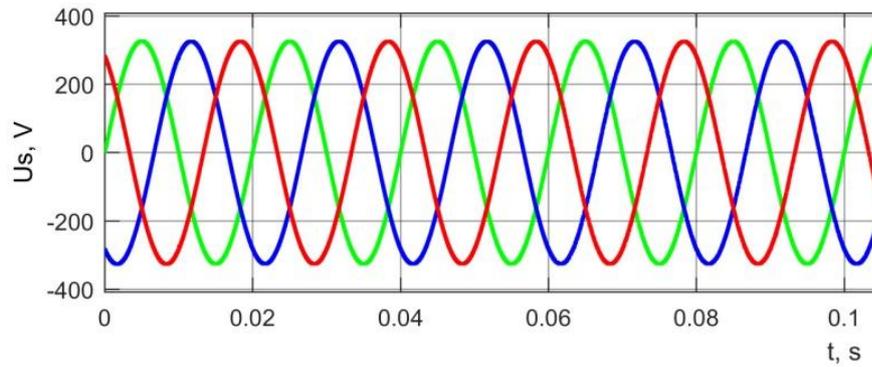


Рисунок 8 – Напряжение системы в каждой фазе

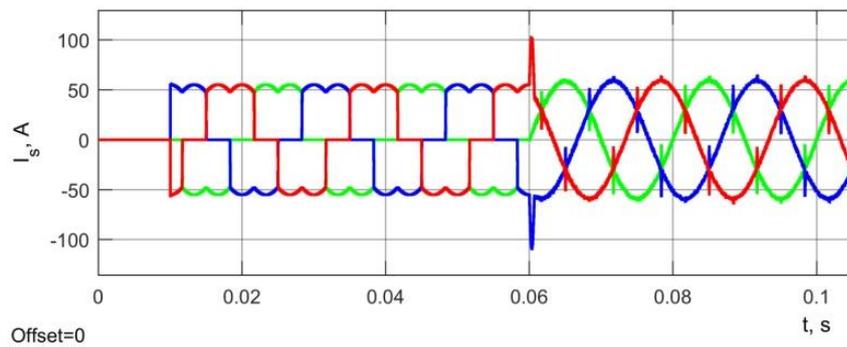


Рисунок 9 – Ток системы в каждой фазе

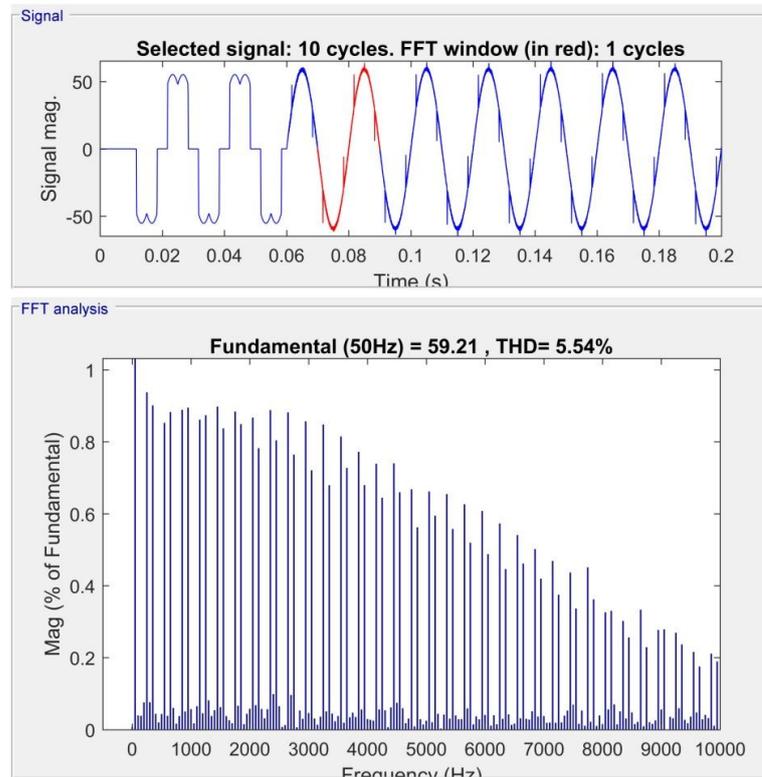


Рисунок 10 – Спектральный состав тока после фильтрации

На питающих шинах рассчитан и установлен пассивный фильтр для подавления гармоник, который в свою очередь решит проблемы с потерями мощности в сети, увеличит пропускную способность сети, а также снизит фон гармонических искажений на стороне 0,4 кВ. На рисунке 11 показаны форма вол-

ны и гармонический спектр выбранного источника напряжений, максимально приближенный к реальным значениям.

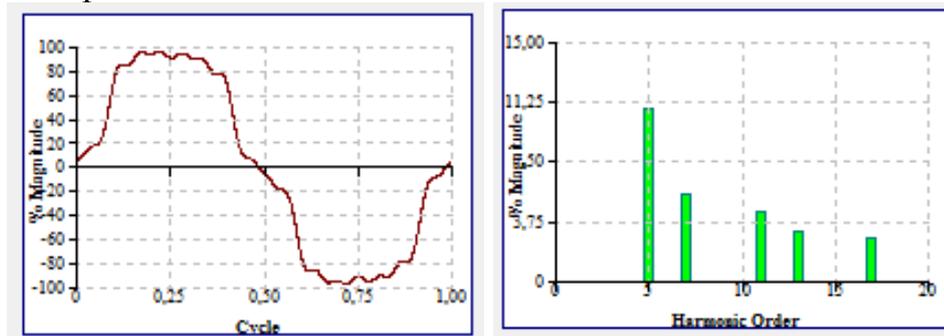


Рисунок 11 – Форма волны и гармонический спектр источника ВГ

В таблице 8 сведены данные по анализу мощности без учета гармонических источников в системе, когда $S=S_L$.

Таблица 8 – Мощность в системе без учета гармоник

	U, кВ	I, А	P, кВА	Q, кВАр	S ₁ , кВА
Bus Km - Bus Tb1.1	10	66,085	654,242	-0,145	654,241
Bus Km - Bus Tb1.2	10	145,76	1443,025	-0,321	1443,024
Bus 481.1 - Bus 481.3	0,353	290,33	87,718	-52,985	102,478
Bus 481.2 - Bus 481.4	0,367	196,48	62,395	-36,133	72,102
Bus 585.1 - Bus 585.3	0,355	252,84	78,017	-44,367	89,751

Совместная установка ПФ (на стороне 10 кВ) и АФ (на стороне 0,4 кВ) позволяет симметризовать напряжение сети и уменьшить до нуля ток нейтрали, а также подавить токовые гармоники, повысив тем самым коэффициент мощности. Это повышает пропускную способность сети и как результат снижает нагрузочные потери мощности в КЛ на 19,5% (табл. 9).

Таблица 9. Анализ нагрузочных потерь в КЛ

	ДО установки ФКУ		ПОСЛЕ установки ФКУ		ΔP, %
	I, А	ΔP, кВт	I, А	ΔP, кВт	
Bus Km - Bus Tb1.1	67,3	33,103	66,085	31,919	3,70
Bus Km - Bus Tb1.2	164,1	89,232	145,76	70,402	26,75
Bus 481.1 - Bus 481.3	292,2	0,170	290,33	0,168	1,29
Bus 481.2 - Bus 481.4	200,2	0,118	196,48	0,114	3,82
Bus 585.1 - Bus 585.3	250,4	0,144	252,84	0,147	-1,92
Σ	-	122,767	-	102,750	19,5

Несмотря на то, что потери, возникающие в результате наличия гармонических искажений по току и напряжению не выделены в отдельную группу, они являются составной величиной сверхнормативных потерь, возникающих в городских РС, от величины которых зависит финансовая стабильность сетевых организаций. Стоит отметить, что в современных утвержденных нормативах и стандартах уже сейчас введено понятие интергармоник, что можно

считать предпосылкой для учета влияния мощности искажения как на работу сети в целом, так и на величину потерь в частности.

Основные выводы:

Проведенные исследования позволили получить следующие результаты:

1. Плановая замена трансформаторов со схемой соединения Y/Y_0 , сопротивление нулевой последовательности которых характеризуется большой величиной, на трансформаторы с малым сопротивлением (трансформаторы, схема соединения которых Y/Z_0) и применение СУ, встроенного непосредственно в трансформатор, схема соединения обмоток которого Y/Y_0 , позволяет снизить потери ЭЭ для исследуемого участка на 12,59%, а коэффициент нулевой последовательности напряжений – до значения 0,04%, что не превышает регламентируемое ГОСТом нормально допустимое значение отклонения и в целом близко к нулю, что характерно для симметричного режима.

2. Разработан алгоритм для устройства автоматического переключения однофазных нагрузок. Эффективность использования данного устройства подтверждена результатами моделирования его работы на примере исследуемой ТП и распределительной сети 0,4 кВ. Использование устройства позволяет не только снизить потери ЭЭ (активной снизились на 7,63%; реактивной – на 8,37%), но и повысить качество электроснабжения потребителей: средний коэффициент несимметрии по нулевой последовательности снизился с 3,59% до 2,13%, а коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности – с 0,61% до 0,36%.

3. Определение оптимальных мест размыкания параллельно с отключением/включением оборудования позволяет снизить потери до величины 9,16%, что по отношению к первоначальному состоянию ниже на 19%, и приводит к отсутствию шин с отклонением напряжения, превышающим регламентированные ГОСТом 10%. Таким образом, уровень напряжения в сети нормализован, потери мощности снижены, кроме этого, режим не характеризуется простым установленным оборудованием.

4. Анализ мощности искажений в системе показал, что наиболее критическим случаем для системы является наличие нелинейных источников, генерирующих гармоники, как на питающих шинах, так и на нагрузке. Установка фильтров позволяет уменьшить количество нагрузочных потерь мощности в КЛ на 19,5%

Основные публикации по теме диссертационной работы отражены в следующих публикациях:

Статьи, опубликованные в изданиях, входящих в перечень реферативной базы SCOPUS:

1. Turukina, Tatyana Evgenievna. Assessment of the Charging Policy in Energy Efficiency of the Enterprise [Electronic resource] / E. A. Shutov, T. E. Turukina, T. S. Anisimov // IOP Conference Series: Materials Science and Engi-

neering. — 2017. — Vol. 189 : Modern Technologies for Non-Destructive Testing. — [012026, 6 p.]. — Title screen. — Свободный доступ из сети Интернет. Режим доступа: <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/189/1/012026>
<http://earchive.tpu.ru/handle/11683/38499>

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК РФ:

1. Турукина Т.Е. Алгоритм регулирования уровня несимметрии в распределительных сетях / Т.Е. Турукина, Е.А. Шутов, И.И. Елфимов, В.К. Сибирцев // Промышленные АСУ и контроллеры. — 2016. — № 10. — С. 23-30.

2. Турукина Т.Е. Прогнозирование потребления электрической энергии на объектах/ Д.Е.Бабинович, Е.А.Шутов, Т.Е. Турукина // Энергетик. — 2016. — № 1. — С. 7-10.

3. Турукина Т.Е. Оптимизация режима работы насосной установки / Д.Е.Бабинович, Е.А.Шутов, Т.Е. Турукина // Энергосбережение и водоподготовка. — 2014. — №6(92). — С. 59-62.

Публикации в других изданиях:

1. Турукина Т.Е. Алгоритм регулирования уровня несимметрии для участка городской распределительной сети города Томска / Т.Е. Турукина // Материалы IV Международного молодежного форума «Интеллектуальные энергосистемы». — Томск: НИ ТПУ, 2016. — Том № 2. — С. 269-272.

2. Турукина Т.Е. Алгоритм регулирования уровня несимметрии для участка городской распределительной сети города Томска / Т.Е. Турукина, А.В. Кабышев // Всероссийская научная конференция молодых ученых "Наука. Технологии. Инновации". — Новосибирск: НГТУ, 2016. — Том № 1. — С. 74-76.

3. Turukina T.E. Level-to-level relationship of a station control / D.E. Babinovich, E.A. Shutov, T.E. Turukina // 11th International Forum on Strategic Technology (IFOST - 2016). — Novosibirsk: NSTU, 2016. — Vol. 1. — P. 150-154.

4. Турукина Т.Е. Роль прогнозирования в энергоэффективности предприятий / Т.Е. Турукина, Д.Е. Бабинович, Е.А. Шутов // Всероссийская молодежная конференция «Современные аспекты энергоэффективности и энергосбережения». — Казань: КНИТУ, 2013. — С. 120-122.