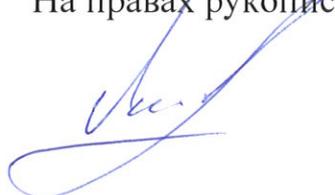


Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б.Н. Ельцина»

На правах рукописи



Люханов Егор Анатольевич

**Совершенствование методов определения статических характеристик
нагрузки и оценка их влияния на экономические показатели
электросетевых компаний**

2.4.3. Электроэнергетика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Екатеринбург – 2024

Работа выполнена на кафедре «Автоматизированные электрические системы» Уральского энергетического института Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,
Паздерин Андрей Владимирович

Официальные оппоненты: **Сулов Константин Витальевич**,
доктор технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, профессор
Института гидроэнергетики и возобновляемых источников энергии;

Фишов Александр Георгиевич,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет», профессор кафедры
«Автоматизированные электроэнергетические системы»;

Ведерников Александр Сергеевич,
кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», заведующий
кафедрой «Электрические станции».

Защита состоится 11 декабря 2024 г. в 15:00 ч на заседании диссертационного совета УрФУ 2.4.10.26 по адресу: 620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», <https://dissovet2.urfu.ru/mod/data/view.php?id=12&rid=6496>.

Автореферат разослан « » ноября 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Самойленко Владислав Олегович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В текущей рыночной парадигме функционирования объектов электросетевого комплекса уровень потерь электроэнергии (ЭЭ) является ключевым показателем, определяющим экономическую эффективность электросетевых организаций (ЭСО). ЭСО заинтересованы в снижении уровня потерь, так как оплачивают фактические потери в своих сетях. Оптимальное управление уровнями напряжения и реактивной мощностью в электрических сетях является основным способом снижения технических потерь электроэнергии. Полезный отпуск электроэнергии потребителям является не менее важным показателем для ЭСО, так как на его основе определяется финансовая выручка от услуг по передаче ЭЭ и оплата данных услуг по тарифу на передачу.

Эффект влияния уровней напряжения на потери и полезный отпуск ЭЭ определяется типом и составом нагрузки и зависит от статических характеристик нагрузки (СХН) по напряжению и частоте. Различные типы нагрузки по-разному реагируют на изменение напряжения. В одном случае эффект практически не проявляется, в другом – потребление мощности и потери существенно изменяются при небольших изменениях уровня питающего напряжения.

Учитывая практику эксплуатации электрических сетей, следует отметить недооценку значимости СХН при расчете потерь мощности при регулировании напряжений. Влияние СХН на величину полезного отпуска и объем услуг по передаче ЭЭ обычно не учитывается. Расчеты потерь и выбор мероприятий по их снижению проводятся на основе расчета установившихся режимов электрической сети, когда нагрузка узлов потребления задается постоянными значениями активной и реактивной мощности, не зависящими от напряжения. Проведенные исследования показали, что неучет фактических СХН в подобных расчетах может приводить к существенной погрешности при оценке параметров режима. Вместо снижения потерь при внедрении мероприятия, например установки батареи статических конденсаторов (БСК), может происходить их увеличение.

Основной проблемой использования СХН при расчете технических потерь и полезного отпуска является отсутствие достоверных сведений о статических характеристиках нагрузки по напряжению, а также отсутствие методических материалов по их определению. Данное обстоятельство связано с методической сложностью отделения колебаний мощности нагрузки, вызванных изменением питающего напряжения, от колебаний мощности по инициативе потребителя, связанных с изменением состава нагрузки и/или режима ее работы.

Совершенствование методов идентификации СХН по напряжению для точного представления характера и величины изменения потребления и потерь мощности при изменении питающего напряжения в распределительных сетях является актуальной задачей.

Задача получения СХН на основе обработки данных об изменениях режимных параметров без проведения организационно и финансово затратных активных экспериментов по регулированию напряжений также актуальна. Развитие современных средств измерений и «умного» учета электроэнергии создает предпосылки для создания программных приложений, обрабатывающих архивы телеизмерений и измерений электроэнергии для получения СХН в рамках пассивных экспериментов.

Проведенные в 2024 году активные эксперименты по регулированию напряжений в сетях 0,4-10 кВ ПАО «Россети Урал» и последующее определение на их базе СХН позволили определить регулирующий эффект нагрузки (РЭН) для нескольких трансформаторных подстанций 10/0,4 кВ. Так при увеличении напряжения на 1 % РЭН по активной мощности находился в диапазоне 1,6 – 2,3, то есть на столько процентов увеличивалось потребление активной мощности. Для реактивной мощности РЭН находился в диапазоне 2,1 – 5,9. При таких СХН увеличение напряжения на головном участке питающей сети на 1 % приводит к увеличению технических потерь активной мощности более чем на 2,1 %.

Настоящая работа посвящена совершенствованию методов идентификации статических характеристик нагрузки и исследованию их влияния на величину потребления и потерь мощности в распределительных сетях. В работе описана методика определения коэффициентов СХН по измерениям, полученным в ходе активного и/или пассивного экспериментов, произведена оценка влияния СХН на полезный отпуск и потери мощности в электрической сети. Представлена упрощенная экономическая модель функционирования ЭСО. Показано, что основной экономический эффект для ЭСО от регулирования напряжения достигается за счёт его влияния на полезный отпуск электроэнергии и выручку от услуг по передаче.

Степень научной разработанности темы исследования. Разработка подходов и методов математического моделирования нагрузки и её параметров, в частности определение коэффициентов статической характеристики нагрузки, непрерывно развивается уже несколько десятилетий. Моделирование нагрузки широко применяется в задачах расчёта электрического режима и оценки устойчивости электроэнергетических систем. Изучению моделей электрических нагрузок посвящена деятельность отдельных исследовательских групп, сформированных в рамках Международного совета по большим электрическим системам высокого напряжения (CIGRE) и Института инженеров электротехники и электроники (IEEE). Моделирование электрических режимов энергосистем, влияние регулирования напряжения на параметры электрического режима, в том числе на уровень потерь мощности, исследованы в работах научных коллективов и школ по всему миру. Широко исследованы и продолжают изучаться вопросы расчёта и анализа потерь электроэнергии, пути их снижения в электрических сетях различного назначения.

Целью диссертационного исследования является совершенствование методов оценки СХН, теоретическое обоснование и экспериментальная оценка влияния СХН на величину полезного отпуска и потерь мощности (энергии) при регулировании напряжения в энергосистеме.

Задачи исследования:

- Анализ актуального состояния вопроса влияния СХН на параметры электрического режима.
- Совершенствование методов оценки коэффициентов модели СХН в рамках активных и пассивных экспериментов.
- Исследование подходов и методов экстраполяции результатов моделирования СХН на расширенный диапазон напряжений.
- Анализ влияния различных СХН на полезный отпуск и потери мощности в сети.
- Обоснование значимости учёта СХН при расчёте потерь мощности и управлении уровнями напряжения в сети.
- Оценка экономического эффекта при регулировании напряжения в распределительных электрических сетях при различных СХН.

Объектом исследования являются энергообъекты электросетевого комплекса распределительных электрических сетей, характеристики их электрических режимов работы с различной нагрузкой.

Предметом исследования являются модели нагрузки, представленные в виде СХН, и их влияние на величину полезного отпуска, технических потерь и экономические показатели электросетевых организаций.

Научная новизна работы:

- Разработан метод идентификации коэффициентов СХН на основе использования приращений напряжений и соответствующих им приращений мощностей, который может применяться для обработки данных активных и пассивных экспериментов.
- Предложен и апробирован способ экстраполяции коэффициентов СХН на расширенные диапазоны напряжений, выходящие за экспериментальные пределы.
- Показана значимость влияния СХН на полезный отпуск и технические потери при регулировании напряжения. Выполнена оценка экономической эффективности регулирования напряжения при различных СХН.
- Показано, что основной экономический эффект от регулирования напряжения для сетевых компаний связан с выручкой от услуг по передаче электроэнергии. Изменение стоимости потерь при регулировании напряжения оказывается в разы ниже увеличения выручки от услуг по передаче электроэнергии.

Теоретическая и практическая значимость заключается в экспериментальном исследовании и теоретическом обосновании характера и численной оценке влияния СХН на потери мощности (электроэнергии) и полезный отпуск электроэнергии.

Методология и методы исследования. Для решения поставленных задач использовались методы теоретических основ электротехники, математической статистики и численного анализа, математического моделирования. Для вычислительных экспериментов применялся программный комплекс *RastrWin3*, программные средства, разработанные автором.

Основные положения диссертационного исследования, выносимые на защиту:

1. Метод оценки коэффициентов СХН, основанный на решении избыточной системы уравнений по приращениям напряжений и мощностей.
2. Метод расширения диапазона напряжений для применения СХН за счет экстраполяции при модификации исходных данных.
3. Определение зависимости технических потерь мощности и полезного отпуска в сети от величины регулирующего эффекта нагрузки. Влияние СХН на тенденции изменения указанных параметров при регулировании напряжения в электрической сети.
4. Оценка экономического эффекта для сетевой организации при регулировании напряжения для различных типов СХН.

Личный вклад автора состоит в разработке и программной реализации методов идентификации СХН и экспериментальной оценке их влияния на показатели полезного отпуска и потерь мощности и электроэнергии. Автор принимал участие в работе по определению СХН при проведении активных (натурных испытаний) и пассивных экспериментов, в том числе в трех НИР по заданиям АО «СО ЕЭС» в 2019 – 2023 гг. на энергообъектах 110-220 кВ в операционной зоне ОДУ Урала, и одной НИР по заданию ПАО «Россети Урал» в 2023 году на энергообъектах 0,4-110 кВ. По экспериментальным данным сформированы различные вычислительные модели и проведены исследования по учёту влияния СХН на параметры электрического режима. Автор участвовал в подготовке Стандарта Организации - СТО по регулированию напряжения в распределительных сетях ПАО «Россети Урал».

Достоверность результатов подтверждается результатами вычислительных экспериментов на тестовых схемах распределительных электрических сетей ПАО «Россети Урал».

Апробация результатов работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на научных семинарах кафедры «Автоматизированные электрические системы» УралЭНИН УрФУ, Екатеринбург, в период с 2020 по 2024 год; были опубликованы в научных журналах *Energies* и *Przeglad Elektrotechniczny*, обсуждались в рамках конференции 2020 IEEE 61th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON), 2020, Riga, Latvia.

Публикации. По результатам работы опубликовано 5 научных статей в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ, в том числе 4 статьи в изданиях, индексируемых в международных реферативных базах цитирования Scopus и WoS.

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, 4 глав, заключения, библиографического списка из 112 наименований и 1 приложения. Содержит 138 страниц, 57 рисунков и 23 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследования, сформулированы цели и основные задачи исследования, приведены научная новизна и практическая значимость работы, перечислены положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен обзор основных подходов и методов идентификации СХН, приведено описание моделей СХН. Сформирован обзор стадий и этапов идентификации коэффициентов СХН.

Существует широкое разнообразие подходов и методов снижения потерь электроэнергии и повышения эффективности функционирования ЭСО. Из ряда технических мероприятий можно выделить достаточно низкзатратный подход – регулирование напряжения в электрической сети. Нагрузки с различными СХН по-разному реагируют на изменение питающего напряжения. Учёт СХН позволяет точнее оценить влияние изменения напряжения на величину полезного отпуска и потерь мощности, корректно определить необходимый объём управляющих воздействий и реализовать мероприятия по повышению эффективности функционирования ЭСО при использовании существующего и перспективного потенциала средств регулирования напряжения в сети.

В качестве СХН используются линейные, экспоненциальные и ZIP - модели (в форме полинома второго порядка). Последние являются наиболее популярными и определяются следующим образом:

$$P(U) = P_{\text{ном}} \left(a_0 + a_1 \cdot \frac{U}{U_{\text{ном}}} + a_2 \cdot \left(\frac{U}{U_{\text{ном}}} \right)^2 \right); \quad (1)$$

$$Q(U) = Q_{\text{ном}} \left(b_0 + b_1 \cdot \frac{U}{U_{\text{ном}}} + b_2 \cdot \left(\frac{U}{U_{\text{ном}}} \right)^2 \right), \quad (2)$$

где $P_{\text{ном}}$, $Q_{\text{ном}}$ – мощности, соответствующие номинальному напряжению $U_{\text{ном}}$.

Сумма всех трех коэффициентов равна единице $a_0 + a_1 + a_2 = 1$, $b_0 + b_1 + b_2 = 1$. Это означает, что при номинальном напряжении $U_{\text{ном}}$ мощности равны $P_{\text{ном}}$ и $Q_{\text{ном}}$.

Важной характеристикой модели СХН является регулирующий эффект нагрузки по активной K_P^U и реактивной K_Q^U мощностям. РЭН это величина, характеризующая на сколько процентов изменится мощность потребления, если питающее напряжение изменить на 1 %.

Для ZIP - модели значение РЭН, соответствующее номинальному напряжению, определяется как:

$$K_P^U = a_1 + 2a_2 \cdot U/U_{\text{ном}} = a_1 + 2a_2; \quad (3)$$

$$K_Q^U = b_1 + 2b_2 \cdot U/U_{\text{ном}} = b_1 + 2b_2. \quad (4)$$

РЭН также может быть применен для оценочных расчетов мощности при изменении питающего напряжения в пределах $\pm 5\%$ от номинального по следующим соотношениям:

$$P(U) \approx P_{\text{ном}} \cdot \left(1 + K_P^U \cdot \frac{U - U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}}\right); \quad (5)$$

$$Q(U) \approx Q_{\text{ном}} \cdot \left(1 + K_Q^U \cdot \frac{U - U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}}\right). \quad (6)$$

В некоторых подходах, связанных с изучением нагрузок и выбором оптимальных параметров регулирования, РЭН является самостоятельным объектом исследования и используется для определения параметров электрического режима и реакции нагрузки при регулировании напряжения в распределительных электрических сетях.

Для определения коэффициентов СХН либо применяется подход, основанный на компонентном анализе нагрузки, либо исследуются данные измерений. В общем виде алгоритм анализа включает сбор данных, их предобработку, оценку коэффициентов модели и постобработку результатов. Важнейшим этапом является оценка коэффициентов модели, где применяются различные техники и математические методы. При оценке также могут быть учтены события, происходящие в энергосистеме при проведении экспериментов.

В данном исследовании представлен метод определения коэффициентов СХН на основе приращений напряжения и мощности, который позволяет отделить изменение нагрузки по причине изменения питающего напряжения от изменения нагрузки по инициативе самого потребителя. При этом наиболее значимо выявление факта, что значительные изменения напряжений произошли одновременно в нескольких соседних узлах сети. Фиксация приращений дает возможность автоматизировать процесс математической оценки коэффициентов СХН, что позволяет определять и корректировать СХН в темпе поступления измерительной информации.

Во второй главе представлен метод получения коэффициентов СХН по данным измерений на основе приращений напряжений и мощностей для интервалов времени. Приводится математическое обоснование, описывается процедура расчёта и верификации коэффициентов модели нагрузки по результатам интервальной оценки РЭН на основе данных измерений мощности и напряжений для активных и пассивных экспериментов. Собраны сведения о значениях коэффициентов СХН единичных электроприемников и комплексных узлов нагрузки в распределительной электрической сети.

Для комплексных узлов нагрузки затруднительно определить состав единичных электроприемников, поэтому целесообразно применение данных измерений пассивных и активных экспериментов с последующим определением коэффициентов СХН.

В данном контексте наиболее важно отделить колебания мощности нагрузки, обусловленные изменением именно питающего напряжения (инициатива сети), от изменений мощностей по инициативе потребителя. Для этого рассматриваются приращения мощностей и напряжений на коротких интервалах времени порядка 0,5 - 5 секунд. Если одномоментные приращения напряжений в нескольких узлах сети имеют один знак и примерно одинаковую величину, то такие приращения для пассивного эксперимента признаются возникающими по инициативе сети. В ходе активных экспериментов такие приращения обеспечивались за счет переключения отпаяк РПН силового трансформатора. Для пассивных экспериментов важно выделить значимые флуктуации напряжений в нескольких соседних узлах, которые превосходят измерительную погрешность. После получения избыточного набора приращений мощностей и напряжений производится получение коэффициентов СХН.

На начальном этапе производится отбор нескольких исследуемых интервалов оценки из данных измерений. На рисунке 1 представлен график изменения напряжения при проведении активного эксперимента в энергосистеме. Интервалы для исследования соответствуют областям значительного изменения уровней напряжения, вызванного, например, изменением отпаяк РПН трансформатора. Форма кластеров группировки данных в общем случае является произвольной и, как правило, требует последующего применения процедур фильтрации и обработки данных.

На исследуемом интервале, в каждой области группировки данных, определяется точка, соответствующая некоторым усредненным значениям мощности и напряжения для данного состояния. Важным условием выбора точек в области группировки данных является близость во времени. Для снижения влияния случайных колебаний нагрузки выполняется фильтрация (сглаживание, усреднение и т.п.) по мощности и напряжению для исследуемой группы данных.

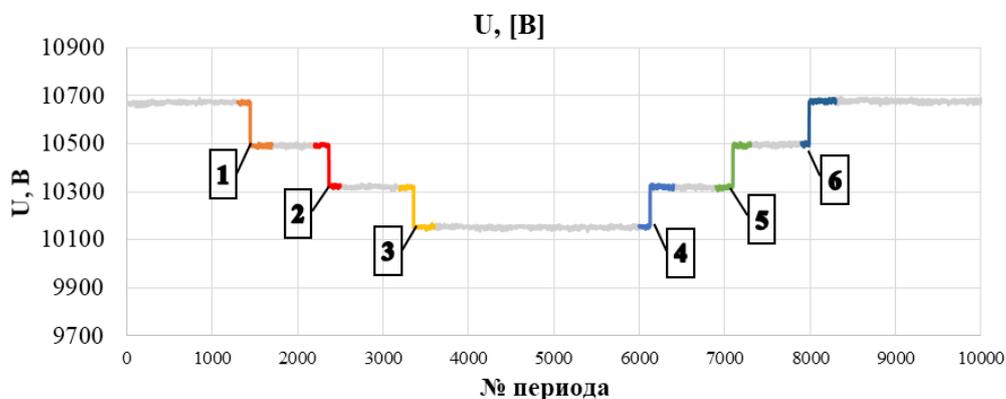


Рисунок 1 – Выбор интервалов оценки коэффициентов СХН

На рисунке 2 представлен пример определения расчётных точек и приращений по активной мощности.

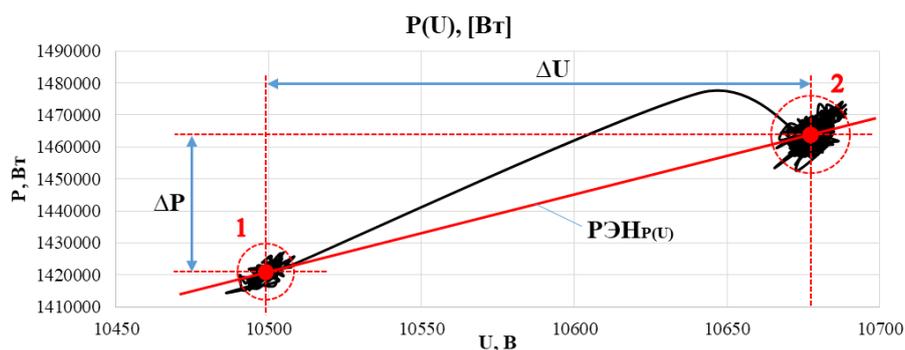


Рисунок 2 – Приращения мощности и напряжения на интервале оценки

Методической особенностью использования данных пассивного эксперимента является оптимальный выбор точек в области группировки путём подбора интервала усреднения и дистанции между этими точками таким образом, чтобы учесть именно реакцию нагрузки на колебания напряжения, исключая или минимизируя влияние естественного дрейфа нагрузки или изменения её состава.

Данные пассивного эксперимента содержат нерегулярные колебания нагрузки и, в отличие от активного, слабовыраженную зависимость мощности от напряжения. На рисунке 3 показан график зависимости активной мощности от напряжения для одного из интервалов с приблизительной оценкой РЭН. Выбор опорных точек по таким измерениям сопровождается фильтрацией входных данных и подбором участков усреднения параметров при сохранении близкого временного промежутка между точками.

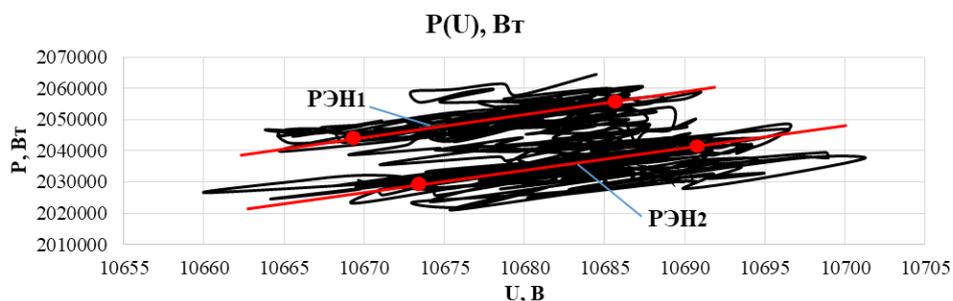


Рисунок 3 – Пример интервала оценки коэффициентов СХН по данным пассивного эксперимента

Полученные приращения описываются прямой, построенной по двум точкам. Определение РЭН соответствует отношению приращения мощности к приращению напряжения и может быть представлено выражением:

$$\text{РЭН}_{P_i} = \frac{\Delta P^{o.e.}}{\Delta U^{o.e.}} \quad (7)$$

Таким образом, на основе уравнения прямой, выражение для РЭН можно представить в виде:

$$a_1 + 2 \cdot a_2 \cdot U'_{o.e} = \frac{\Delta P^{o.e.}}{\Delta U^{o.e.}}, \quad (8)$$

где a_1, a_2 – искомые коэффициенты исследуемой ZIP – модели; $U'_{o.e}$ – значение напряжения на интервале, для которого определяется приращение.

Для перехода в относительные единицы определяются некоторые нормирующие мощность и напряжение. В качестве нормирующей мощности может быть принято значение средней мощности по полному составу данных измерений, а в качестве нормирующего напряжения – номинальное значение.

Избыточная система уравнений $Ax = B$

$$X = \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix}, A = \begin{pmatrix} 1 & 2 \cdot U_1 \\ 1 & 2 \cdot U_2 \\ \dots & \dots \\ 1 & 2 \cdot U_n \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} \Delta P_1^{o.e.} / \Delta U_1^{o.e.} \\ \Delta P_2^{o.e.} / \Delta U_2^{o.e.} \\ \dots \\ \Delta P_n^{o.e.} / \Delta U_n^{o.e.} \end{pmatrix} \quad (9)$$

формируется после процедуры отбора РЭН по заданным критериям.

Система уравнений (9) решается путем приведения ее к нормальному виду на основе минимизации суммы квадратов невязок:

$$X = (A^T \cdot A)^{-1} \cdot A^T \cdot B. \quad (10)$$

Значения напряжений для каждого уравнения системы, определенные в относительных единицах, могут быть выражены как отношение усредненного напряжения между выбранными точками каждого интервала к нормирующему (номинальному) напряжению по следующему соотношению:

$$U_{i\text{cp}}^{o.e.} = \frac{U_{i1} + U_{i2}}{2 \cdot U_{\text{норм}}} \quad (11)$$

Поскольку расчёт производится в относительных единицах, из уравнения суммы коэффициентов ZIP – модели определяется оставшийся неизвестный коэффициент:

$$a_0 = 1 - a_1 - a_2. \quad (12)$$

Коэффициенты линейной модели определяются из следующих соотношений:

$$a_1^{\text{лин}} = \frac{\sum_{i=1}^n \text{РЭН}_{P_i}}{n}; a_0^{\text{лин}} = 1 - a_1^{\text{лин}}. \quad (13)$$

Таким образом, угол наклона линейной модели определяется средним значением РЭН по группе исследуемых интервалов и ограничивается диапазоном напряжений эксперимента. При этом линейная модель достаточно хорошо аппроксимирует искомую зависимость мощности от напряжения для оценочных расчётов.

Коэффициенты a_0, a_1 и a_2 являются искомыми коэффициентами модели СХН. На рисунке 4 в координатах мощность-напряжение визуальное соотношение расчётные модели СХН и данные измерений в относительных единицах.

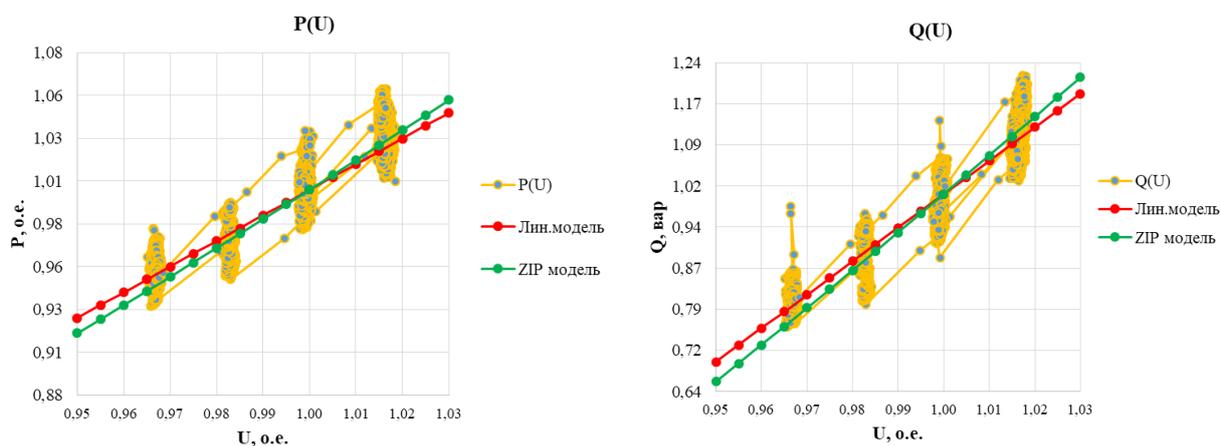


Рисунок 4 – СХН активной и реактивной мощности по данным активного эксперимента

На рисунке 5 представлены графики СХН, полученных по данным активного и пассивного экспериментов.

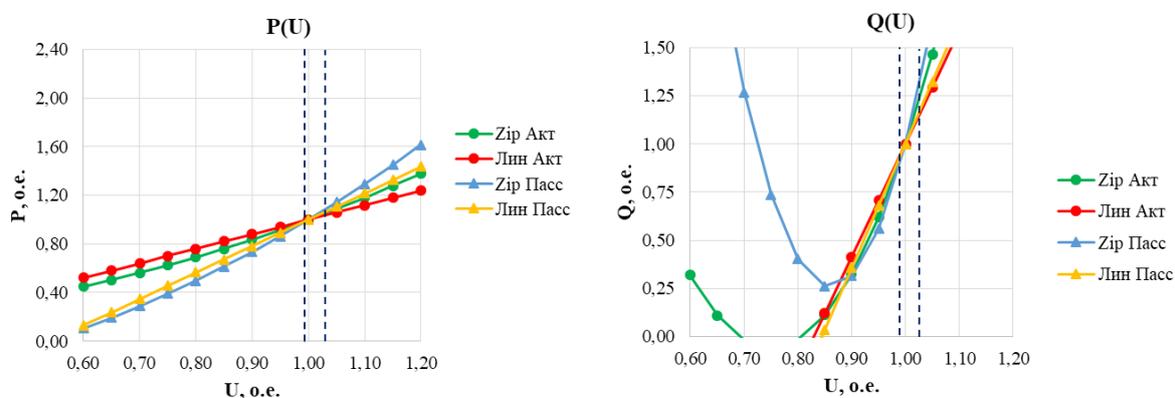


Рисунок 5 – СХН по активной и реактивной мощности для активного и пассивного экспериментов

После получения коэффициентов полинома осуществляется проверка состоятельности полученной модели с применением нулевой гипотезы, основанная на стандартном статистическом методе анализа соотношения дисперсий по критерию Фишера или иных статистических критериев.

Выполнение активных и пассивных экспериментов ограничено некоторым узким диапазоном напряжений, соответствующим техническим и технологическим ограничениям, внутри которых расположен доверительный интервал модели. Если у активных экспериментов диапазон напряжений находится на уровне $\pm 5-8\%$, то для пассивных экспериментов это $\pm 1-3\%$. В условиях эксплуатации, особенно в распределительных сетях, наблюдается выход напряжения за допустимые пределы $\pm 10\%$. Для экстраполяции модели на значения напряжения за пределами уровней активного и пассивного экспериментов, в которых она была получена, может быть применен метод ввода дополнительной нулевой точки. Эксперименты показали, что введение дополнительной точки, соответствующей нулевым приращениям мощности при нулевом напряжении, позволяет расширить рабочий диапазон напряжений и точность СХН.

Сопоставление графиков СХН, полученных с дополнительной нулевой точкой, с графиками СХН единичных электроприемников свидетельствует об их большей схожести. Это расширяет диапазон напряжений для применения СХН, так как без применения дополнительной точки СХН обеспечивают хорошую точность только в пределах напряжений, в рамках которых проводились измерительные эксперименты.

На рисунке 6 представлены графики моделей СХН с учетом (справа) и без учёта (слева) нулевой точки при оценке модели.

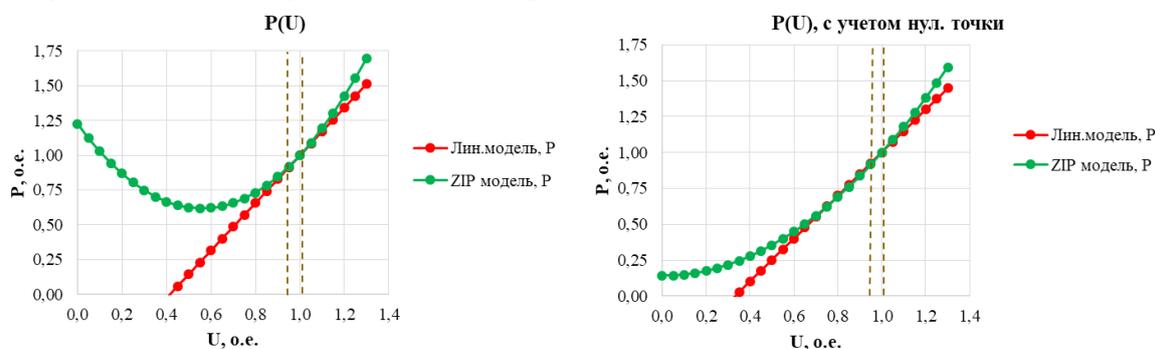


Рисунок 6 – СХН по активной мощности с и без учёта нулевой точки

В таблице 1 приведены численные значения коэффициентов моделей СХН, полученных с применением метода нулевой точки и без его использования.

Таблица 1 – СХН и РЭН по активной мощности, полученные с применением метода нулевой точки и без его использования

Модель СХН	$P = f(U)$							
	Без нулевой точки				С нулевой точкой			
	a_0	a_1	a_2	$RЭН$ K_p^U	a_0	a_1	a_2	$RЭН$ K_p^U
ZIP	1,227	-2,185	1,958	1,731	0,142	-0,004	0,862	1,720
Линейная	-0,710	1,710	-	1,710	-0,497	1,497	-	1,50

Применение метода нулевой точки приводит к значительному снижению величины коэффициента a_1 модели, поскольку модель приобретает меньшую крутизну в области низких напряжений и определяется в основном значением коэффициента при квадратичной степени напряжения.

На рисунке 7 приведены значения РЭН моделей для всего диапазона напряжений в относительных единицах для моделей СХН, полученных с применением метода нулевой точки и без его использования. Как видно, вне диапазона эксперимента значение РЭН моделей может значительно отличаться. При этом отрицательные значения РЭН соответствуют режиму генерации мощности, что противоречит действительности для данного участка сети. Таким образом, модели без учёта нулевой точки могут быть применены исключительно в диапазоне напряжений эксперимента.

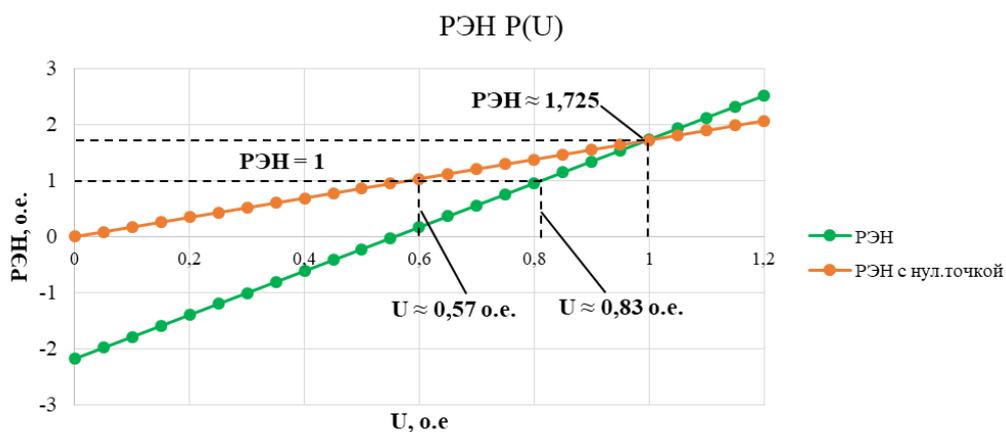


Рисунок 7 – РЭН по активной мощности моделей СХН с и без учёта нулевой точки

Анализ СХН показывает, что для подавляющего большинства единичных электроприемников введение дополнительной нулевой точки соответствует режимному состоянию объекта и может быть использовано для уточнения модели СХН.

Описанный метод идентификации коэффициентов СХН может быть использован не только с данными активного, но и по результатам измерений пассивного эксперимента.

В третьей главе представлено исследование влияния СХН на технические потери при регулировании напряжения в сети. Показана связь регулирующего эффекта нагрузки с полезным отпуском и потерями мощности. Описаны результаты вычислительных и натурных экспериментов с различными типами СХН. Выполнен анализ влияния различных СХН на нагрузочные и условно-постоянные потери мощности в распределительной электрической сети.

Влияние СХН на нагрузочные потери целесообразно оценить на простейшем примере, когда расчетная схема включает одну линию электропередачи с нагрузкой на конце:

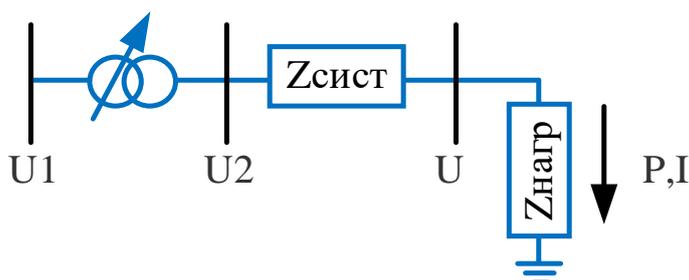


Рисунок 8 – Схема простейшей сети для оценки РЭН

С учётом физического смысла коэффициентов ZIP - модели, изменение напряжения U_2 будет приводить к изменению нагрузочных потерь в сети, которые будут существенно зависеть от соотношения коэффициентов ZIP - модели. В таблице 2 представлены результаты анализа режимных параметров при увеличении питающего напряжения на 1 %. Для нагрузки типа «константная мощность» ($a_0 = 1$) увеличение напряжения приводит

к снижению нагрузочных потерь. Для СХН типа «константный импеданс» ($a_2 = 1$) увеличение напряжения увеличивает нагрузочные потери.

В работе показано, что если значение регулирующего эффекта нагрузки превышает 1,0, но ещё меньше 2,0, то нагрузочные потери с ростом напряжения увеличиваются в абсолютном выражении и уменьшаются в относительном выражении (%). Когда РЭН выше 2,0 – относительные потери с ростом напряжения увеличиваются. Если РЭН меньше 1,0, то нагрузочные потери при росте напряжения уменьшаются как в абсолютном, так и относительном выражении.

Таблица 2 – Изменение активной мощности нагрузки и потерь мощности в сети для простейших моделей при увеличении питающего напряжения на 1 %

Эффект при увеличении напряжения на 1 %			
Модель нагрузки	Константная мощность ($P = const$) $a_1 = a_2 = 0, a_0 = 1$	Константный ток ($I = const$) $a_0 = a_2 = 0, a_1 = 1$	Константный импеданс ($Z = const$) $a_0 = a_1 = 0, a_2 = 1$
РЭН	$K_P^U = 0$	$K_P^U = 1$	$K_P^U = 2$
Изм. нагрузки P	0 %	+1 %	+2 %
Изм. абс. потерь ΔP , кВт	-2 %	0 %	+2 %
Изм. отн. потерь $\Delta P/P$, %	-2 %	-1 %	0 %

На рисунке 9 представлены зависимости изменения мощности нагрузки (P), тока (I), абсолютных (ΔP) и относительных ($\Delta P/P$) потерь в сети при увеличении напряжения на 1 % для различных значений РЭН.

Для оценки влияния вида СХН на полезный отпуск, суммарные нагрузочные потери и условно-постоянные потери в исследуемой распределительной сети ЭСО был проведен ряд активных экспериментов по регулированию напряжения для получения коэффициентов СХН. На рисунке 10 представлена топология исследуемой сети, а в таблице 3 – расчётные значения коэффициентов моделей СХН, полученные по описанной методике на основе измерений, выполненных в ходе активных экспериментов.

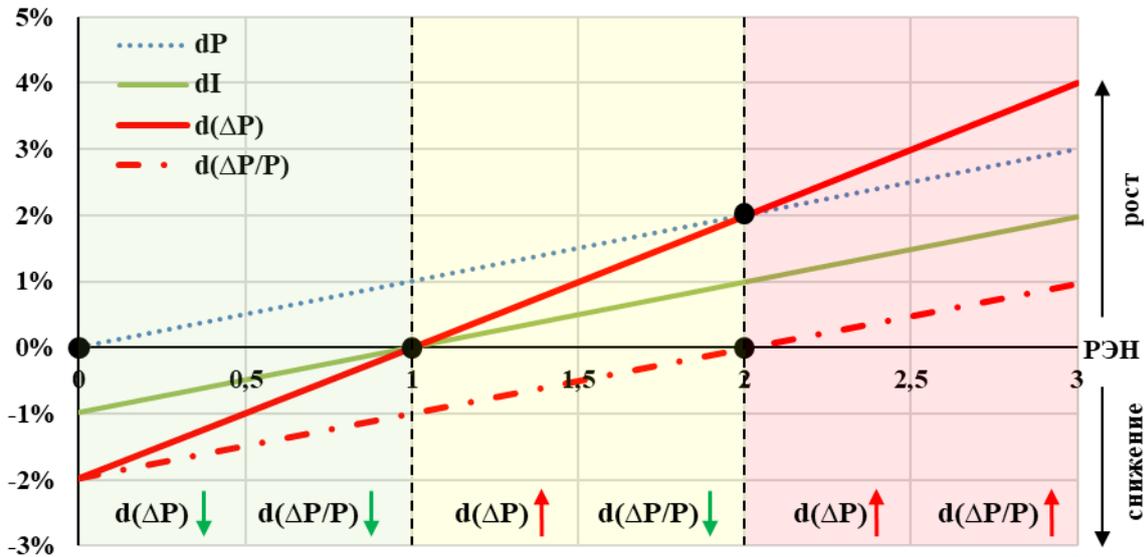


Рисунок 9 – Изменение параметров режима при увеличении питающего напряжения на 1 % для различных значений РЭН

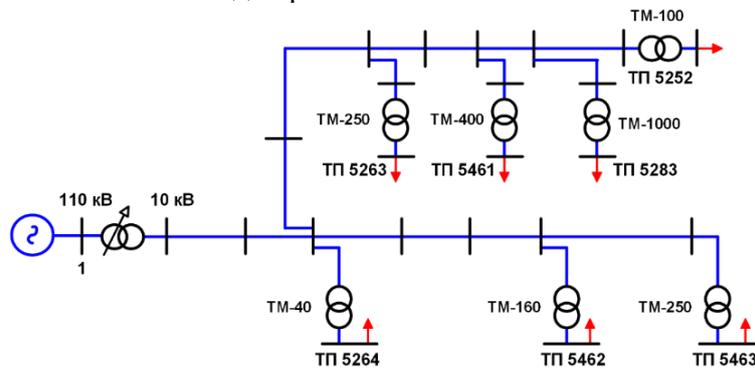


Рисунок 10 – Схема исследуемой сети для активных и вычислительных экспериментов

В рамках активных экспериментов в действующей распределительной сети 10 кВ регулировалось напряжение путём переключения регулировочных ответвлений РПН силового трансформатора 110/10 кВ. Регулирование устройством РПН позволило получить широкий диапазон напряжения на шинах нагрузки от $0,9$ до $1,1 \cdot U_{ном}$ при сохранении технических ограничений. При этом на подстанциях 10/0,4 кВ осуществлялись измерения основных параметров электрического режима – напряжения, активной и реактивной мощностей. На основе данных измерений по предложенной методике были рассчитаны СХН узлов нагрузки, представленные в таблице 3.

Таблица 3 – СХН трансформаторных подстанций

Потребитель	$a0 (P)$	$a1 (I)$	$a2 (Z)$	$\frac{PЭН}{K_P^U}$	$b0 (Q)$	$b1 (I)$	$b2 (Z)$	$\frac{PЭН}{K_Q^U}$
ТП 5264	-0,2137	0,407	0,807	2,021	1	-2,46	2,46	2,460
ТП 5462	0,478	-0,970	1,493	2,015	3,36	-6,723	4,359	1,996
ТП 5463	-1,135	2,17	-0,035	2,100	-1,13	2,17	-0,035	2,100
ТП 5263	0,478	-0,970	1,493	2,015	3,36	-6,723	4,359	2,460
ТП 5461	0,478	-0,970	1,493	2,015	3,36	-6,723	4,359	2,460
ТП 5252	0,246	-0,093	0,847	1,601	0,24	-0,093	0,847	1,601
ТП 5283	0,478	-0,970	1,493	2,015	3,36	-6,723	4,359	2,460

Помимо активных экспериментов для рассматриваемой сети проводились вычислительные эксперименты с использованием ПК *RastrWin3*. В ходе вычислительного эксперимента напряжение питающего-балансирующего узла под номером 1 изменялось в диапазоне $0,8 \div 1,2 U_{ном}$, что с технической точки зрения соответствовало регулированию напряжения на шинах за счет РПН трансформатора 110/10 кВ. Потери холостого хода трансформаторов 10/0,4 кВ моделировались постоянными проводимостями на землю, у которых РЭН как по активной, так и по реактивной мощности равен 2.

В каждом из вычислительных экспериментов СХН нагрузочных узлов задавались различным образом:

Эксперимент 1. СХН заданы по результатам проведенных натуральных экспериментов (таблица 3). Данный эксперимент – условно эталонный.

Эксперимент 2. Мощности нагрузок не зависят от напряжения, что соответствует СХН типа $P = const$ с коэффициентами $a_0 = 1$, $a_1 = 0$, $a_2 = 0$.

Эксперимент 3. СХН всех узлов нагрузки заданы типовой СХН номер 2 из ПК *RastrWin3*. $a_0 = 0,83$, $a_1 = -0,3$, $a_2 = 0,47$, $b_0 = 4,9$, $b_1 = -10,1$, $b_2 = 6,2$. При $U = U_{ном}$, $K_P^U = 2a_2U + a_1 = 1,3$.

Полученные в результате расчетов значения абсолютных $\Delta P_{нагр}$ и относительных $\Delta P/P$ нагрузочных потерь, постоянных потерь $\Delta P_{уп}$, а также поток активной мощности P в ветви, примыкающей к питающему узлу, сведены в таблице 4 и представлены на рисунке 11.

Таблица 4 – Значения суммарной активной мощности и потерь мощности энергорайона при моделировании нагрузки различными СХН

Параметр	№ эксп.	СХН	$U_{баз}$ о.е.				
			0,8	0,9	1	1,1	1,2
P , кВт	1	Эксперимент	708,3	846,0	998,1	1107,3	1222,8
	2	$P = const$	1110,7	1086,6	1072	1062,5	1056,2
	3	Типовая	969,0	1019,1	1083,5	1159,9	1248,5
$\Delta P_{нагр}$, кВт	1	Эксперимент	39,5	44,9	52,1	57,8	64,1
	2	$P = const$	95,8	70,7	54,9	44,1	36,3
	3	Типовая	69,0	59,5	56,1	56,7	59,6
$\Delta P_{уп}$, кВт	1	Эксперимент	3,5	4,2	4,9	5,5	6,0
	2	$P = const$	3,2	4,3	5,5	6,8	8,2
	3	Типовая	3,4	4,4	5,5	6,6	7,9
$\Delta P/P$	1	Эксперимент	6,07 %	5,80 %	5,71 %	5,72 %	5,73 %
	2	$P = const$	8,91 %	6,90 %	5,63 %	4,79 %	4,21 %
	3	Типовая	7,47 %	6,27 %	5,69 %	5,46 %	5,41 %

Для первого эксперимента при натуральных СХН абсолютные нагрузочные потери с ростом напряжения растут, а относительные потери практически не изменяются, что соответствует теоретическим выводам, так как РЭН больше 1,0 и в соответствии с таблицей 3 находится в районе 2 %.

Задание нагрузки константными мощностями с нулевым РЭН приводит к получению нисходящей зависимости для нагрузочных потерь, что также соответствует теории.

При использовании типовых СХН нагрузочные потери уменьшаются пока РЭН меньше 1,0 и увеличиваются после $1,08 \cdot U_{ном}$, когда РЭН равен 1,0.

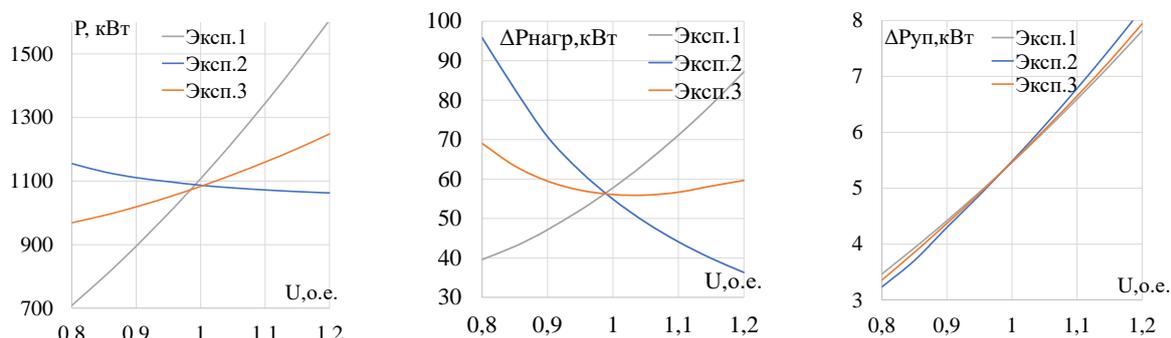


Рисунок 11 – Зависимости а) $P(U)$ б) $\Delta P_{нагр}(U)$ в) $\Delta P_{уп}(U)$

При расчете режимов условно-постоянные потери моделируются шунтами на землю и зависят от квадрата модуля напряжения. При росте напряжения условно-постоянные потери также увеличиваются. Отличия для разных СХН обусловлены электрической удаленностью нагрузочных узлов от центра питания.

В таблице 5 представлены коэффициенты ZIP - моделей для активных потерь и значения производной при номинальном напряжении (по аналогии с РЭН) $K_{\Delta P}^U$. За номинальные приняты значения потерь при номинальном напряжении.

Изменение питающего напряжения на 1% от $U_{ном}$ приводит к увеличению нагрузочных потерь на 2,07% для экспериментальной СХН и снижает нагрузочные потери на 2,62% без СХН. Условно-постоянные потери при увеличении напряжения питающего узла всегда увеличиваются примерно на 2%. Следует отметить, что разница между расчётными потерями при использовании экспериментальной СХН и модели константной мощности при напряжении $U_{ном}$ составила 5,6%. Однако при отклонении напряжения от номинального на $\pm 10\%$ такая разница достигла значения 24,4%.

Таблица 5 – СХН потерь активной мощности

Параметр	№ эксп.	СХН	$a_0 (P)$	$a_1 (I)$	$a_2 (Z)$	$K_{\Delta P}^U$
$\Delta P_{нагр}$	1	Акт. эксперимент	1,354	-2,777	2,423	2,068
	2	$P = const$	8,694	-12,769	5,076	-2,617
	3	Типовая	5,067	-7,781	3,713	-0,355
$\Delta P_{уп}$	1	Акт. эксперимент	-0,174	0,357	0,817	1,991
	2	$P = const$	-0,215	0,151	1,063	2,277
	3	Типовая	-0,271	0,449	0,821	2,092

Представленные в таблице 5 и на рисунке 11 изменения потерь активной мощности определены в абсолютных значениях. Совокупные потери мощности (сумма нагрузочных и условно-постоянных) для всех экспериментов по отношению к потребляемой мощности (относительные потери) снижаются во всех экспериментах на интервале до $U_{ном}$. При дальнейшем росте напряжения для экспериментальной СХН

относительные потери остаются практически неизменными, а для модели типовой СХН и модели константной мощности – снижаются, повторяя тенденцию изменения абсолютных потерь. Данные эффекты представлены на рисунке 12:

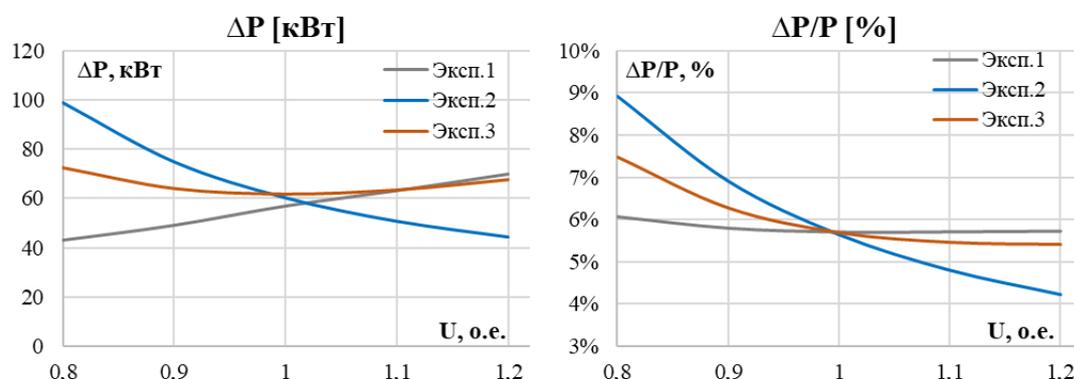


Рисунок 12 – Абсолютные $[\Delta P]$ и относительные $[\Delta P/P]$ потери мощности в исследуемом примере при различных СХН

Относительные потери мощности при регулировании напряжения будут пропорциональны отношению РЭН по активной мощности и по активным потерям. С учётом того, что РЭН по условно-постоянным потерям всегда выше нуля и практически не зависит от типа СХН, тенденцию изменения относительных потерь при регулировании напряжения будет определять именно РЭН по активным потерям мощности.

Применение средств компенсации реактивной мощности (СКРМ) в распределительной сети также оказывает влияние на характер изменения нагрузочных потерь активной мощности. Для анализа влияния работы СКРМ на потери и потоки мощности для участка распределительной электрической сети 10/0,4 кВ были проведены активные эксперименты с целью получения СХН узлов нагрузки и сформирована расчётная модель электрического режима. В качестве СКРМ в сети используется БСК. Результаты расчётов электрических режимов представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Результаты расчёта электрического режима в распределительной сети без учёта и с учётом СХН при использовании СКРМ

Режим	Потери акт. мощности в сети	Макс. ток	Поток активной мощности	Поток реактивной мощности
	$dP_{нагр}$, МВт	I_{max} , А	P , МВт	Q , Мвар
С учётом СХН				
БСК отключен	0,903	241,519	4,708	1,065
БСК включен	1,377	266,333	5,386	-0,412
Изменение без/с БСК	+52,49%	+10,27%	+14,41%	
Без учёта СХН				
БСК отключен	1,350	292,352	5,364	2,125
БСК включен	1,302	262,866	5,318	-0,320
Изменение без/с БСК	-3,56%	-10,09%	-0,87%	

При учёте СХН изменение уровней напряжения в сети путём включения БСК приводит к увеличению суммарных потерь активной мощности на 52 %.

Поток мощности и максимальный расчётный ток на головном участке также увеличиваются на 14,4 % и 10,3 % соответственно. Если СХН в модели не учтена, при включении БСК потери наоборот снижаются на 3,56 %, как и значения потока активной мощности и тока на головном участке сети, которые снижаются на 0,87 % и 10,1 % соответственно.

Таким образом, учёт СХН оказывает значительное влияние не только на оценку величины потерь и потоков активной мощности, но и на тенденции их изменения. Это подчеркивает необходимость учёта СХН при анализе электрических режимов и их оптимизации в распределительных электрических сетях.

СХН и РЭН значительным образом влияют на тенденции изменения нагрузочных потерь при регулировании напряжения. Для экспериментальной СХН увеличение напряжения приводит к росту абсолютных нагрузочных потерь, а без учета СХН – к снижению. Данный факт может иметь решающее значение при определении мероприятий по снижению технических потерь в распределительных электрических сетях.

В четвертой главе описан экономический эффект регулирования напряжения с учетом СХН.

Во многих работах, связанных с оптимизацией режимов работы сети по реактивной мощности и по уровням напряжения, общепризнанной целевой экономической функцией являются активные потери электроэнергии (мощности). Снижение потерь, как правило, достигается за счет компенсации реактивной мощности, что приводит к росту напряжения в сети. СХН в расчетах обычно не учитываются.

В новых условиях функционирования энергетики ЭСО являются самостоятельными хозяйствующими субъектами, стремящимися увеличить свои доходы. Собственная выручка сетевой компании от услуг по передаче электроэнергии определяется объемами полезно отпускаемой потребителям электроэнергии (мощности) и тарифами на передачу, которые дифференцируются по уровням напряжения. В таких условиях, в качестве целевой функции при регулировании напряжения для ЭСО целесообразно принимать доход $D(U)$, определяемый как разность между выручкой $VP(U)$ от услуг по передаче и стоимостью потерь электроэнергии $CP(U)$. Это две наиболее значимые компоненты целевой функции.

Кроме этого существуют затраты на эксплуатацию оборудования, которое осуществляет регулирование напряжения $R(U)$. При нарушении ограничений на допустимые отклонения модуля напряжения от номинального, определяемых ГОСТ 32144-2013 на качество электроэнергии как $\pm 10\%$, на ЭСО могут накладываться штрафные санкции, описываемые компонентой $PEN(U)$. Все описанные составляющие собственного дохода ЭСО зависят от напряжения в сети и режима ее работы. Для учёта приходных и расходных составляющих, не зависящих от напряжения и режимов работы сети, вводится постоянная составляющая K ,

которая не оказывает никакого влияния на расчеты. Итоговое выражение целевой функции будет следующее:

$$D(U) = VP(U) - CP(U) - R(U) - PEN(U) + K \rightarrow \max. \quad (14)$$

Выручка ЭСО $VP(U)$ за время t определяется тарифом на передачу электроэнергии c_i и полезным отпуском:

$$VP(U) = \sum_{i=1}^N c_i \cdot t \cdot P_i(U), \quad (15)$$

где N – число узлов с полезным отпуском энергии в схеме сети. В расчетном примере использован единый (котловой) одноставочный тариф на услуги по передаче электроэнергии Свердловской области в 2024 году для напряжения НН на уровне 4,35526 руб/кВт·ч.

Стоимость оплаты потерь ЭЭ определяется величиной фактических потерь ΔP в сетях ЭСО за время t и тарифом на их покупку $c_{\Delta W}$

$$CP(U) = \Delta P(U) \cdot t \cdot c_{\Delta W} \quad (16)$$

Тариф на покупку потерь определяется усредненной ценой оптового рынка ЭЭ и в 2024 г. прогнозируется для Свердловской области на уровне 3,0 руб/кВт·ч.

Наиболее применяемыми средствами регулирования напряжения являются РПН трансформаторов и СКРМ. Для них стоимость регулирования определяется числом переключений:

$$R(U) = c_{\Delta kt} \sqrt{\sum_{i=1}^{T-1} (k_{i+1} - k_i)^2} + c_{\Delta C} \sum_{i=1}^{T-1} N_{\Delta C i} \quad (17)$$

где T – расчетный период, i – номер временного интервала, для принятого графика, $k_{i+1} - k_i$ – номера отпайк РПН на соседних временных интервалах, $c_{\Delta kt} \approx 5$ руб. – стоимость изменения отпайки РПН с учётом ресурса и стоимости капитального ремонта, $c_{\Delta C}$ – цена изменения состояния СКРМ, $N_{\Delta C i}$ – число коммутаций СКРМ.

Согласно исследованиям, стоимость работы РПН трансформаторов, даже с учётом затрат на его капремонт, оказывается достаточно малой в сравнении с экономическим эффектом от увеличения полезного отпуска, как и стоимость изменения состояния СКРМ в сети при их наличии.

Штрафная функция за нарушение технологических ограничений определяется суммарными затратами на покрытие штрафов и издержек по тарифу $c_{pen i}$ при нарушении ограничений $N_{pen i}$ на исследуемом интервале времени T , которые реализованы юридически ($\alpha_{real} = \{0; 1\}$):

$$PEN(U) = \sum_{i=1}^T N_{pen i} \cdot c_{pen i} \cdot \alpha_{real} \quad (18)$$

Для рассматриваемой электрической сети (рисунок 10) произведены расчеты собственного дохода $D(U)$ ЭСО за один месяц (720 часов) от напряжения питающего узла для трех ранее рассмотренных

вычислительных экспериментов при разных видах СХН в узлах потребления. Цель расчетов заключалась в определении влияния вида СХН на доходы ЭСО. По данным таблицы 4 для экспериментальных СХН рассчитаны зависимости выручки от услуг по передаче $VP(U)$, стоимости потерь $CP(U)$ и собственного дохода $D(U)$, представленные на рисунке 13а). Составляющие $R(U)$ и $PEN(U)$ в расчетах не использовались. На рисунке 13б) представлена зависимость собственного дохода ЭСО от напряжения для случая, когда мощности узлов потребления зафиксированы, с СХН типа $P = const$. При увеличении напряжения увеличение дохода обеспечивается за счет снижения потерь. На рисунке 13в) представлена зависимость дохода от напряжения для типовых СХН из ПК *RastrWin3*.

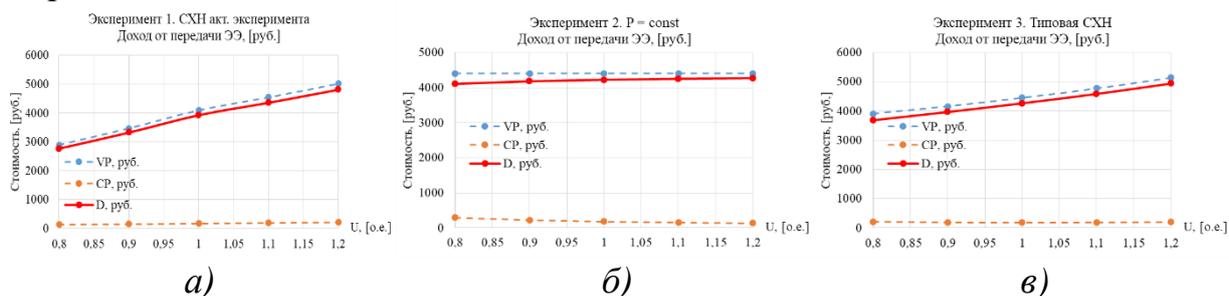


Рисунок 13 – Зависимости собственного дохода $D(U)$ от напряжения в сети при различных типах СХН

Для всех трех типов СХН увеличение напряжения приводит к росту собственного дохода электросетевой организации. Пример показывает, что экономический эффект от регулирования (увеличения) напряжения связан прежде всего с увеличением полезного отпуска и увеличением выручки от услуг на передачу электроэнергии. Он во много раз превосходит эффект от увеличения (или снижения) потерь и их стоимости. Чем больше РЭН, тем более ощутимой становится эта разница. Стоимость эксплуатации средств регулирования напряжения и величина штрафных санкций за нарушения качества напряжения весьма малы по сравнению с двумя основными компонентами целевой функции. Таким образом, увеличение напряжения в распределительной сети оказывает позитивное влияние на экономические показатели ЭСО при любом типе СХН.

В заключении приведены выводы, обобщены основные результаты, представлены перспективные направления исследования, связанные с оценкой влияния регулирования напряжения на энергопотребление энергообъектов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. На основе обзора литературы была выявлена хорошая теоретическая проработка и практическая недооценка значимости влияния СХН по напряжению на полезный отпуск и потери мощности (электроэнергии). Такая ситуация обусловлена прежде всего методической сложностью получения и использования моделей СХН.
2. Разработан и апробирован на реальных данных метод идентификации коэффициентов СХН на основе использования приращений напряжений

и соответствующих им приращений мощностей. Метод может быть адаптирован для получения коэффициентов СХН по данным пассивного эксперимента, где слабо выражен эффект влияния напряжения на уровень мощности.

3. Метод идентификации коэффициентов СХН, описанный в исследовании, предусматривает использование приращений мощности и напряжения, что позволяет отделить колебания мощности нагрузки по инициативе потребителя от колебаний мощности по причине изменения питающего напряжения.
4. Представлен метод экстраполяции модели СХН на уровни напряжения вне диапазонов активного и пассивного экспериментов. Для исходного метода осуществляется включение в расчётную процедуру избыточных сведений о возможном физическом состоянии объекта – нулевых точек.
5. На тестовых и реальных схемах показано, что параметры СХН имеют чрезвычайно важное значение при расчете технических потерь. Погрешность расчета нагрузочных потерь может составлять десятки процентов при неучёте СХН. При техническом обосновании мероприятий по снижению потерь без учета СХН возможно получение ошибочных результатов, когда потери в сети вместо снижения будут увеличиваться.
6. Наибольшее значение при расчете потерь и определении мероприятий по их снижению в распределительных сетях имеют регулирующие эффекты нагрузки. Если регулирующий эффект превышает 1, то абсолютные нагрузочные потери с ростом напряжения увеличиваются, если он меньше 1, то нагрузочные потери уменьшаются. В рамках проведенных активных экспериментов на объектах ПАО «Россети Урал» регулирующий эффект нагрузки на уровне трансформаторных подстанций 10/0,4 кВ находится в пределах 1,2–2,3 по активной и в пределах 1,2–3,5 по реактивной мощности. Расчеты в исследуемой сети с экспериментальными СХН и без них показали различие в технических потерях на уровне 24,4 % при увеличении напряжения питающей подстанции на 10 %. Увеличение питающего напряжения на один процент увеличивает абсолютные нагрузочные потери в среднем на 2,07 % при экспериментальных СХН. Без учета СХН потери снижаются на 2,61 %.
7. Экономический эффект от регулирования напряжения при учете СХН связан прежде всего с увеличением полезного отпуска. Увеличение выручки от услуг по передаче электроэнергии по экономическому эффекту во много раз превосходит изменение стоимости потерь.
8. В качестве перспективных рассматриваются исследования зависимости энергопотребления от напряжения для различных интервалов времени; разработка методов оценки регулирующего эффекта нагрузки по энергии на основе обработки архивов автоматизированных систем учета электроэнергии.

СПИСОК НАУЧНЫХ ТРУДОВ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Статьи, опубликованные в рецензируемых научных изданиях, определенных
ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ:*

1. Банных, П.Ю. Расчет технических потерь электрической энергии в распределительных электрических сетях с учетом статических характеристик нагрузки / П.Ю.Баных, П.И.Бартоломей, Г.Е.Бураков, Р.Т.Валиев, **Е.А.Люханов**, А.В.Паздерин, В.А.Рябушев, С.Н.Шелюг // ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЯ. ПЕРЕДАЧА И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ. № 3(84). Май-июнь. 2024. С. 34-45. 0,66/0,32 п.л.
2. Gulakhmadov, A. Power Flows and Losses Calculation in Radial Networks by Representing the Network Topology in the Hierarchical Structure Form / Gulakhmadov,A., Asanova,S., Asanova,D., **Lyukhanov,E.**, Safaraliev, M., Tavlintsev,A., Semenenko,S., Odinaev I., // Energies. 2022. 15. №3. 765; 0,72/0,22 п.л. (*Scopus, WoS*).
3. Asanova, S.M. Calculation of power losses at given loads and source voltage in radial networks of 35 kV and above by hierarchical-multilevel structured topology representation / Asanova,S.M., Safaraliev,M.K., Askarbek,N., Semenenko,I., Aktaev,E.T., Kovaleva,A.A, **Lyukhanov,E.A.**, Staymova, E.D. // Przegląd Elektrotechniczny. Volume 97. Issue 7. 2021. pp. 13-18. 0,33/0,12 п.л. (*Scopus, WoS*).
4. Asanova, S. Elementwise power losses calculation in complex distribution power networks represented by hierarchical-multilevel topology structure / Asanova,S., Asanov,M., Safaraliev,M., **Lyukhanov,E.**, Tavlintsev,A., Shelyug,S // Przegląd Elektrotechniczny. Volume 97. Issue 11. 2021. pp. 106-110. 0,275/0,11 п.л. (*Scopus, WoS*).
5. Kovaleva A. Evaluation of static characteristic coefficients basing on field test data / Kovaleva,A., Tavlintsev,A., **Lyukhanov, E.**, Gusev,S., Zicmane,I. and Petrichenko,L. // 2020 IEEE 61th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON). Riga, Latvia. 2020. pp. 1-5. 0,33/0,165 п.л. (*Scopus, WoS*).