

На правах рукописи



Третьякова Елена Семеновна

**АНАЛИЗ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ГЛУБОКОЙ КОМПЕНСАЦИИ
РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ
ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ И ГОРОДОВ**

Специальность 05.14.02 – Электрические станции и
электроэнергетические системы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иркутск – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Манусов Вадим Зиновьевич

Официальные оппоненты: **Савина Наталья Викторовна**,
доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Амурский государственный университет», проректор по учебной работе

Войтов Олег Николаевич,
кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭМ СО РАН), отдел электроэнергетических систем, старший научный сотрудник

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет», г. Иркутск

Защита диссертации состоится «10» апреля 2018 г. в 9 часов на заседании диссертационного совета Д 003.017.01, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: **664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 130, к. 355.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИСЭМ СО РАН по адресу: 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 130, к. 407 и на сайте: <http://isem.irk.ru/dissert/case/DIS-2017-11/>

Отзывы на автореферат в 2-х экземплярах с подписью составителя, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан

2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 003.017.01,
профессор, доктор технических наук



Клер Александр Матвеевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Проблема энергоэффективности в системах электроснабжения (СЭС) промышленных предприятий и городов неотъемлемо связана с вопросом снижения потерь электроэнергии и, следовательно, с уменьшением воздействия топливно-энергетического комплекса на окружающую среду.

Рост производства, который наблюдается в последние годы, и изменение характера нагрузки инфраструктуры городов привели к увеличению числа и мощности электроприемников, работающих с использованием электромагнитного поля. Электроприемники, работа которых основана на использовании переменного электромагнитного поля, являются потребителями как активной мощности (P), так и реактивной мощности (Q). Основными системами и установками для любых производственных процессов служат электродвигатели технологического оборудования, электронагревательные установки, преобразователи, трансформаторы, системы вентиляции и кондиционирования, сварочное оборудование, системы освещения.

Выработка активной мощности осуществляется генераторами электрических станций, ветроустановками, солнечными батареями и другими возобновляемыми источниками. Реактивная мощность, в отличие от активной мощности, может генерироваться компенсирующими устройствами (КУ) – конденсаторными батареями, синхронными компенсаторами, статическими источниками реактивной мощности. При транспортировании реактивной мощности по электрическим сетям возникают дополнительные потери активной мощности, которые покрываются активной энергией генераторов, т. е. дополнительным расходом топлива.

Таким образом, решение задачи снижения потерь немыслимо без исследования вопроса уменьшения потребления реактивной мощности от генераторов станций. Установка источников реактивной мощности у потребителя и глубокая компенсация реактивной мощности – это основной путь к повышению экономичности энергосистемы, т.к. уменьшаются потери активной мощности, стабилизируется уровень напряжения у электроприемников, тем самым увеличивается пропускная способность элементов СЭС. Необходимо со всей серьезностью подойти к анализу электропотребления и выбору методов компенсации реактивной мощности (КРМ). Следует отметить, что из-за разветвленности и сложности схем электроснабжения городских электрических сетей, сетей электроснабжения промышленных предприятий, эффект от КРМ в полной мере не исследован.

Уровень компенсации реактивной мощности в нашей стране регулируется приказом Минэнерго России от 23 июня 2015 г. № 380 «Порядок расчета значений соотношения потребления активной и реактивной мощности для отдельных энергопринимающих устройств (групп энергопринимающих устройств) потребителей электрической энергии» (далее по тексту приказ Минэнерго № 380).

В настоящей работе вводится термин и приведено обоснование «глубокой компенсации» реактивной мощности, под которой понимается новое представ-

ление о снижении рекомендуемого $\text{tg } \varphi$ до значения 0–0,1 вблизи электроприемников.

На современном этапе развития электроэнергетики особенно актуальным становится максимальное снижение затрат, связанных с управлением, оптимизацией и планированием их режимов, которые в свою очередь ведут к снижению потерь. Повышение быстродействия и эффективности применяемых алгоритмов позволяет реализовать вычислительная техника и новые технологии программирования. Поэтому необходимо проведение полноценного комплексного исследования глубокой компенсации реактивной мощности (РМ), анализа ее энергоэффективности, финансовой обоснованности и определения области применения в электрических сетях 10 (6) – 0,4 кВ СЭС промышленных предприятий и городов, что определяет актуальность темы данной диссертационной работы.

Степень разработанности темы исследования. Большую роль в развитие методов оптимизации реактивной мощности, алгоритмов и программных средств сыграли такие ученые, как Ю.С. Железко, В.А. Веников, В.И. Идельчик, Д.А. Арзамасцев, В.Э. Воротницкий, Б.А. Константинов, И.В. Жежеленко. Учеными Л.В. Литвак, А.В. Кабышевым выполнен анализ факторов, влияющих на снижение коэффициента реактивной мощности в СЭС предприятий, а также влияние компенсирующих устройств (КУ) на устойчивость узлов нагрузки. В.Д. Арион, Н.В. Савиной выполнен анализ компенсации реактивной мощности и потерь электрической энергии в условиях неопределенности исходной информации. Несмотря на проведенные исследования, вопросы глубокой компенсации недостаточно изучены. Большинство работ в данной области относятся к расчетам и оптимизации режимов реактивной мощности в высоковольтных сетях градиентными методами и методами генетического алгоритма. Применительно к сетям низкого напряжения имеются лишь узкие исследования, посвященные общей компенсации реактивной мощности.

Цель работы – исследование глубокой оптимальной компенсации реактивной мощности в системах электроснабжения промышленных предприятий и городских электрических сетях методами искусственного интеллекта.

Для достижения указанной цели были поставлены и решены следующие задачи:

- выполнен объективный анализ соотношения потребляемой активной и реактивной мощности электроприемниками промышленных предприятий;
- исследовано повышение энергоэффективности режимов на основе глубокой компенсации за счет изменения нормативных требований;
- предложено решение оптимального размещения и выбора величины источников реактивной мощности на основе алгоритма роя частиц с адаптацией его параметров;
- оптимизированы потери активной мощности за счет глубокой компенсации реактивной мощности, что позволило оптимизировать затраты на кабельную продукцию при проектировании систем электроснабжения;

– дана технико-экономическая оценка предлагаемым техническим решениям по глубокой компенсации реактивной мощности и коррекции нормативов.

Объект исследования – системы электроснабжения промышленных предприятий и городские электрические сети.

Предмет исследования – энергоэффективность работы СЭС промышленных предприятий и городских электрических сетей в режиме глубокой компенсации реактивной мощности.

Методы исследования – оптимизационные алгоритмы на основе методов искусственного интеллекта.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Проведен всесторонний анализ принципов и условий энергоэффективности компенсации реактивной мощности в сетях электроснабжения промышленных предприятий и городов и доказана необходимость существенной корректировки рекомендованных нормативных значений с переходом к принципу глубокой компенсации, отличающемуся значением коэффициента реактивной мощности $\tan \varphi$ близкому к значениям 0 – 0,1.

2. Решена двухкритериальная оптимизационная задача компенсации реактивной мощности с учетом снижения материальных и финансовых затрат на кабельную продукцию.

3. Впервые для решения оптимального размещения компенсирующих устройств и выбора их мощности применен алгоритм роя частиц с адаптацией его параметров, позволяющий определить глобальный минимум целевой функции.

4. Выполнено актуальное технико-экономическое обоснование глубокой компенсации реактивной мощности и дан сравнительный анализ с учетом чистого дисконтированного дохода, индекса прибыли, дисконтированного срока окупаемости и внутренней нормы доходности.

Практическая значимость и результаты внедрения.

1. Проведенные расчеты для промышленных предприятий Госкорпорации «Росатом» показали, что компенсация реактивной мощности от значения $\tan \varphi = 0,35$ до значения $\tan \varphi$ 0,1 – 0,15 позволяет снизить потери активной мощности в сети на 39 % для предприятия, где средняя протяженность питающих кабельных линий 150 – 300 м, и на 8 % для предприятия, где она составляет 50 – 150 м. Таким образом, снижается технологический расход электроэнергии, связанный с ее передачей.

2. Показано, что, при глубокой компенсации, возможна экономия алюминия на 7,4 % и меди почти на 4 %, а это приводит к улучшению технико-экономических показателей СЭС предприятий.

Результаты работы внедрены на двух предприятиях Госкорпорации «РОСАТОМ», о чем имеются акты внедрения.

3. Установлена зависимость между мощностью электроприемника и длиной питающей кабельной линии для оценки необходимости степени компенсации реактивной мощности.

4. Выполненные исследования и разработанные алгоритмы могут быть использованы на промышленных предприятиях и в городских электрических

сетях, для поиска оптимального сочетания компенсирующих установок РМ и регулирования потокораспределения, выбора оптимальной схемы электрической сети.

Положения, выносимые на защиту

– глубокая компенсация реактивной мощности на предприятиях, выполненная многокритериальной оптимизацией с учетом снижения материальных затрат на кабельную продукцию, позволяет снизить технологический расход электроэнергии и улучшить технико-экономические показатели системы электроснабжения;

– разработанные алгоритмы могут быть использованы в электрических сетях промышленных предприятий и сетях электроснабжения городов, проектных и исследовательских организациях для решения задач анализа режимов электроснабжения, поиска оптимального сочетания компенсирующих установок реактивной мощности и регулирования потоков мощности, выбора оптимальной схемы электрической сети;

– комбинированный алгоритм выбора мощности источников реактивной мощности, состоящий из алгоритма роя частиц с адаптацией его параметров, и расчета установившегося режима электрической сети с помощью программы RastrWin при заданных ограничениях позволяет выполнить оптимальный выбор источников реактивной мощности;

– выполненное актуальное технико-экономическое обоснование глубокой компенсации реактивной мощности и сравнительный анализ с учетом чистого дисконтированного дохода, индекса прибыли, дисконтированного срока окупаемости и внутренней нормы доходности позволяет утверждать, что компенсацию реактивной мощности в сетях напряжением 10 (6) и 0,4 кВ следует выполнять до значения коэффициента реактивной мощности ($\text{tg } \varphi$) от 0 до 0,1.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности 05.14.02

– «Электрические станции и электроэнергетические системы».

Диссертационная работа соответствует:

– П. 8 «Разработка методов статической и динамической оптимизации для решения задач в электроэнергетике»;

– П. 12 «Разработка методов контроля и анализа качества электроэнергии и мер по его обеспечению»;

– П. 13 «Разработка методов использования ЭВМ для решения задач в электроэнергетике».

Достоверность результатов научных исследований, выполненных в работе, подтверждается тем, что они основаны на теоретических законах электротехники, теории электрических систем, электрических машин и других дисциплин, которые хорошо апробированы и подтверждены практикой, а также на корректном использовании методов оптимизации, основанных на эволюционных алгоритмах с применением роевого интеллекта. Основные решения по глубокой компенсации реактивной мощности экспериментально подтверждены на предприятиях Госкорпорации «РОСАТОМ».

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на Всероссийских и Международных научных конференциях: «Технические науки: теория и практика» (Чита, 2012), «Электроэнергия: от получения и распределения до эффективного использования» (Томск, 2012), «Современная техника и технологии: проблемы, состояние и перспективы» (Рубцовск, 2012), «Отечественная наука в эпоху изменений: постулаты прошлого и теории нового времени» (Екатеринбург, 2014), «Электротехника. Электротехнология. Энергетика» (Новосибирск, 2015), Международной конференции по разработке программного обеспечения, мультимедиа и технике связи (SMCE2015) (Гонконг, 2015), «Энергетика глазами молодежи – 2015» (Иваново, 2015).

Публикации. Основные научные результаты диссертационной работы опубликованы в 15 печатных работах, в том числе 5 работ в изданиях, включенных в перечень ВАК, две работы зарегистрированы в наукометрической базе SCOPUS.

Личный вклад автора в работах не менее 60 %.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, пяти разделов, заключения, списка сокращений, списка литературы, включающего 142 библиографических ссылки, десяти приложений, общим объемом 195 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дано описание проблемы компенсации реактивной мощности и ее оптимизации, характеристика области исследования и обоснована актуальность темы; сформулированы цель, основные задачи и научная новизна работы; приведены основные положения, выносимые на защиту, теоретическая и практическая значимость полученных результатов; обоснована степень их достоверности.

В первом разделе приведены нормативные документы, определяющие эффективное использование электроэнергии и регламентирующие степень компенсации реактивной мощности. Государственная программа «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности на период до 2020 года», принятая Правительством Российской Федерации в 2010, направлена на снижение потерь в электрических сетях к 2020 году до 8 -9 %, но по данным Министерства энергетики данная программа выполняется с отставанием в 2-2,5 раза.

Ситуация по компенсации реактивной мощности в Российской Федерации в сетях высокого напряжения имеет положительную динамику к улучшению. Развиваются технологии управляемых линий электропередачи переменного тока (FACTS), быстродействия статических устройств регулирования напряжения и реактивной мощности в воздушных ЛЭП 10 – 750 кВ, но они неприемлемы для низковольтных сетей, которые составляют порядка 50 % всех сетей страны.

Дана оценка проведенным энергоаудитам в стране, основной задачей которых, в частности, являлось и решение вопросов снижения потерь электроэнергии.

За последнее десятилетие большинство работ, исследующих проблемы реактивной мощности, посвящены теоретическим методам расчетов потерь и

регулирования напряжения, либо методам определения оптимального размещения средств компенсации. Принятая в 1989 году, «Инструкция по системному расчету компенсации реактивной мощности в электрических сетях», не учитывает изменений финансово-экономических отношений покупателей и продавцов электроэнергии, а также того обстоятельства, что электрические сети напряжением ниже 1 кВ на больших промышленных предприятиях являются частью распределительной сети этих предприятий. Следовательно, потери электроэнергии в собственных сетях таких производственных объектов оплачиваются по полному тарифу покупки электроэнергии. В настоящее время возникла новая проблематика, связанная с выбором и нормированием коэффициента реактивной мощности, иначе говоря, глубины ее компенсации. Автором предлагается в дальнейшем использовать следующие термины: коэффициенты реактивной мощности, установленные нормативным документом, называть **«нормальными коэффициентами»**, а компенсацию реактивной мощности, при которой значение коэффициентов ниже нормативных, называть **«глубокой компенсацией»**.

Показана необходимость решения оптимизационной задачи для определения степени компенсации реактивной мощности, т.к. уменьшая потери активной мощности при транспортировании электроэнергии необходимо увеличить затраты на компенсирующие устройства. Другая сторона аспекта, при компенсации реактивной мощности и размещении КУ максимально близко к потребителю, появляется возможность уменьшить сечение протяженных кабельных линий за счет уменьшения потерь напряжения.

Отмена поощрительных и штрафных надбавок потребления реактивной мощности, которая не имеет отдельного стоимостного выражения для электропотребителей, ведет к бесконтрольному ее потреблению, стоимостной коэффициент которой включен в тариф нагрузочных потерь, что в свою очередь упрощает систему оплаты, но не стимулирует промышленные предприятия к снижению потребления реактивной мощности.

Во втором разделе раскрывается суть оптимизационных задач, глобальных и локальных решений. Решать задачи оптимизации можно точно или приближенно. При малой размерности задач не возникает проблем получения гарантированно оптимального решения. К методам точного решения относятся: метод полного перебора, метод направленного перебора, классический метод поиска экстремума, основанный на аппарате дифференциального исчисления, методы динамического программирования. Методы поиска оптимума в зависимости от стратегии делят на: одномерные поиски, численные методы, статистические методы. Для учета различного вида ограничений используют методы линейного программирования, нелинейного программирования. С увеличением размерности задачи экспоненциально растет количество операций. В этом случае применяют эволюционные методы решения, т.е. методы, где аналогично природным процессам и законам эволюции происходит поиск оптимума. Эволюционные методы решения оптимизационных задач в последнее время получили широкое применение при решении разного вида инженерных задач. Для каждого класса оптимизационных задач обычно выдвигаются следующие кри-

терии: эффективность, быстродействие, сходимость, влияние начальных условий задачи и параметров алгоритма.

Методом Лагранжа и методом генетического алгоритма (ГА) решена задача КРМ в схеме электроснабжения одного из предприятий Госкорпорации «РОСАТОМ», для оптимального распределения потоков реактивной мощности в энергосистеме, что позволяет минимизировать суммарные потери электрической энергии в сети. При этом приняты следующие допущения: электроснабжение осуществляется от шин бесконечной мощности, генерация реактивной мощности не связана с какими-либо затратами. Математическая формулировка задачи:

$$F = \Delta W_{\Sigma}(Q_K) \rightarrow \min, \quad (1)$$

при ограничениях

$$\begin{aligned} Q_{K_{\min}} \leq Q_K \leq Q_{K_{\max}}, \\ 0 \leq \operatorname{tg} \varphi \leq 0,15, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\Delta W_{\Sigma}(Q_K)$ – суммарные потери электрической энергии в сети от передачи реактивной мощности;

Q_K – мощность установленных компенсирующих устройств.

Решение показало, что по методу Лагранжа необходимо устанавливать 1594 кВАр в пяти узлах системы электроснабжения, а с помощью ГА та же цель достигается установкой 1330 кВАр. Экономия составляет 264 кВАр, т.е. 16,6 %. Применение эволюционных алгоритмов для решения задач компенсации реактивной мощности позволяет применять реальные эксплуатационные данные, поэтому решения имеют более точные значения, что позволяет экономить финансовые затраты. Сравнительный анализ ГА и метода Лагранжа в условиях ограничений в форме равенств показал преимущество ГА за счет следующего: не требуется записи точного аналитического выражения целевой функции и непрерывности ее переменных; нет необходимости вычислять производные для определения неопределенных множителей Лагранжа; алгоритм работает быстрее за счет меньшей трудоемкости вычислительной процедуры. ГА позволяет решать задачу оптимизации в случае динамических изменений ее условий.

Раздел три посвящен исследованию влияния глубины компенсации реактивной мощности на энергоэффективность промышленных предприятий и в городской электрической сети, в частности, на снижение потерь электроэнергии с учетом минимизации затрат на КУ.

Важнейшим звеном в системах электроснабжения промышленных предприятий являются линии электропередачи напряжением до 10 кВ. Большая разветвленность и протяженность сетей низкого напряжения характеризуется довольно высокими потерями электроэнергии, что значительно снижает показатели энергоэффективности сетей электроснабжения и предприятия в целом.

Повысить показатели энергоэффективности на предприятиях и в городских электрических сетях возможно путем уменьшения потерь при передаче и распределении электроэнергии в распределительных сетях за счет компенсации реактивной мощности у потребителей

$$\Delta P = \frac{P^2 + (Q - Q_{\text{кy}})^2}{U^2} \cdot R. \quad (3)$$

Одновременно это позволит улучшить один из показателей качества электрической энергии – предельно допустимое значение отклонения напряжения от номинального в узлах сети электроснабжения

$$\Delta U = \frac{PR + (Q - Q_{\text{кy}})X}{U}. \quad (4)$$

Исследование проводилось на двух промышленных предприятиях Госкорпорации «РОСАТОМ» (предприятие № 1 и предприятие № 2) в сетях напряжением 0,4 кВ и в городской электрической сети напряжением 10 кВ.

На предприятиях рассмотрено электроснабжение потребителей, обеспечивающих климатические и температурные условия (подкачивающие компрессоры, система охлаждения оборудования, система вентиляции) основных технологических устройств (потребители собственного расхода – ПСР), где для привода механизмов используются асинхронные электродвигатели. Географическое расположение этих систем зависит напрямую от расположения основного технологического оборудования, поэтому оптимизировать конфигурацию системы электроснабжения не представляется возможным. Данное обстоятельство приводит к высокой протяженности кабельных линий электропередачи внутри цехов предприятий и составляет от 50 м до 400 м.

Схема электроснабжения ПСР предприятия № 1 приведена на рис. 1. Электроснабжение ПСР осуществляется от подстанции, которая состоит из двух секций (щитов собственных нужд – ЩСН), объединенных между собой двумя секционными рубильниками и секционным автоматом. Для распределения электроэнергии по потребителям применены шкафы распределительные (ШР), которые запитаны от сборных шин секции подстанции по радиальной схеме. Большая часть ШР географически расположена максимально близко к потребителю, но в значительном отдалении от шин секций подстанции.

Значение коэффициента реактивной мощности рекомендовано приказом Минэнерго № 380 и определяется величиной равной 0,35. Научно-техническая литература не приводит объяснения оптимальности этого значения. Естественное значение $\text{tg } \varphi$ в сетях до 1000 В от 0,5 до 0,7. Возможно, для сетей низкого напряжения $\text{tg } \varphi = 0,35$ и является оптимальным значением, поэтому при решении оптимизационной задачи верхнее значение коэффициента реактивной мощности ограничивалось значением равным 0,6. Электрические сети низкого напряжения характеризуются большим количеством коммутационных переключений, которые в свою очередь могут сопровождаться как провалами, так и всплесками напряжения, поэтому значение $\text{tg } \varphi$ равное нулю может привести к неустойчивой работе асинхронных двигателей, поэтому он был ограничен снизу значением 0,1.

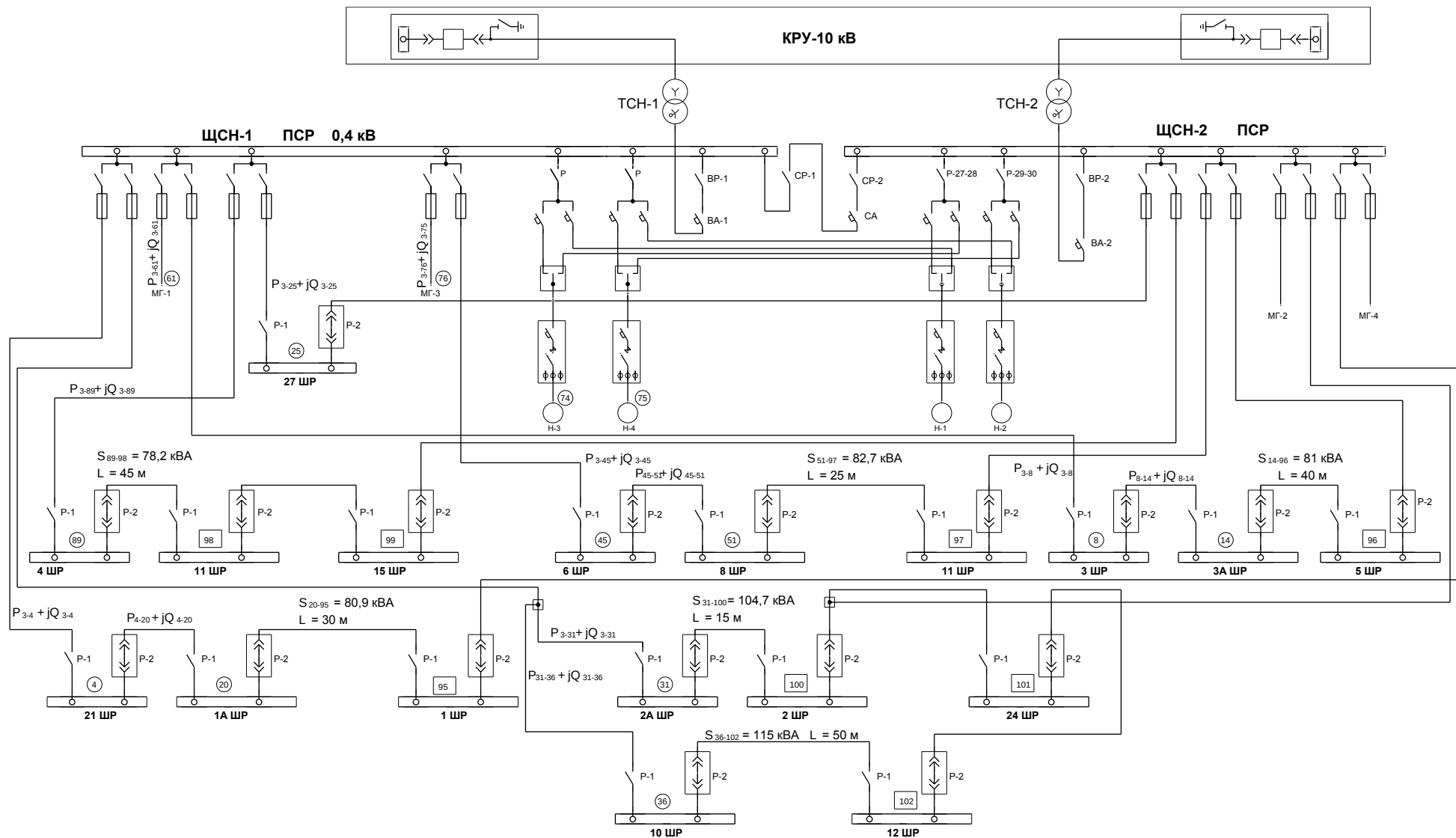


Рисунок 1. – Схема подстанции собственного расхода предприятия № 1

В результате была сформулирована оптимизационная задача:

$$Z = c_p \tau \Delta P(Q) + 0,12 c_Q \sum_{i=1}^n Q_i \rightarrow \min \quad (5)$$

при следующих ограничениях

$$\begin{aligned} 0 < Q_i < Q_{\max i}, i = 1, \dots, n \\ Q_K = \{Q_1, Q_2, Q_3, \dots, Q_n\} \\ 0,1 \leq \operatorname{tg} \varphi \leq 0,6 \end{aligned} \quad , \quad (6)$$

где c_p – тариф на электроэнергию за 1 кВт·ч, руб./кВт·ч;

τ – время максимальных потерь для электрической сети, ч;

$\Delta P(Q)$ – потери активной мощности, кВт;

n – количество узлов, в которых можно установить КУ;

Q_i – реактивная мощность конденсаторной установки в i -том узле;

$Q_{\max i}$ – максимально допустимый уровень реактивной мощности КУ в i -м узле, который ограничивается потребляемой реактивной мощностью узла;

Q_K – вектор мощностей КУ;

c_Q – удельная цена устанавливаемых КУ, руб./кВАр.

Такое описание задачи является универсальным по отношению к структуре сети. Можно сказать, что задача (5) представляет интерфейс между «моделью системы электроснабжения» и используемым «методом оптимизации». Взаимодействие по такому интерфейсу простое:

1) «метод оптимизации» формирует некий вариант решения задачи (вектор Q_K);

2) «модель задачи» выполняет расчет электрической сети, определяет критерий и проверяет ограничения, и передает результаты в «метод оптимизации»;

3) получив оценку текущего варианта решения задачи, «метод оптимизации» формирует новый вариант решения, используя полученные данные (которые часто называют опытом для методов искусственного интеллекта), после чего повторяется переход к пункту 2, пока не будет выполнено условие остановки.

Расчет электрической схемы выполнялся по способу расчета потокораспределения. В качестве «метода оптимизации» применен алгоритм роя частиц с адаптацией.

Алгоритм роя частиц можно представить как набор

$$\{S, M, A, P, I, O\},$$

где S – множество агентов (частиц),

M – средство косвенного обмена информацией между частицами;

A – правила перемещения агентов;

P – параметры алгоритма;

I и O – вход и выход роя для взаимодействия с внешней средой.

На j -й итерации i -я частица характеризуется состоянием

$$s_{ij} = \{X_{ij}, V_{ij}, X_{ij}^{\text{best}}\}, \quad (7)$$

где $X_{ij} = \{x_{ij}^1, x_{ij}^2, \dots, x_{ij}^l\}$ – вектор варьируемых параметров (положение частицы);

$V_{ij} = \{v_{ij}^1, v_{ij}^2, \dots, v_{ij}^l\}$ – вектор скоростей частицы;

$X_{ij}^{best} = \{b_{ij}^1, b_{ij}^2, \dots, b_{ij}^l\}$ – наилучше по значению фитнес-функции положение частицы среди всех положений, которые она занимала в процессе работы алгоритма от 1-й до j-й итераций;

l – количество варьируемых параметров.

Вектор $M = X_j^{best}$ – наилучшее значение вектора варьируемых параметров, которое было получено среди всех частиц от 1-й до j-й итерации алгоритма.

Алгоритм А описывает механизмы функционирования роя частиц и состоит из нескольких этапов.

1. Генерация начальных положений и скоростей ($j=1$):

$$X_{i1} = \text{rand}(G(X)), i = 1, \dots, |S|, \quad (8)$$

где $\text{rand}(G(X))$ – вектор равномерно распределенных случайных величин, отвечающих ограничениям на область поиска D ;

$$V_{i1} = \text{rand}(V_{\min}, V_{\max}), i = 1, \dots, |S|, \quad (9)$$

где $\text{rand}(V_{\min}, V_{\max})$ – вектор равномерно распределенных случайных величин в диапазоне $(V_{\min}, V_{\max})$.

$$X_{i1}^{best} = X_{ij}, i = 1, \dots, |S|. \quad (10)$$

Произвольно выбирается наилучшая позиция (при вычислении фитнес-функций будет определена действительно наилучшая позиция):

$$X_1^{best} = X_{11}. \quad (11)$$

2. Вычисление фитнес-функций и определение наилучшего положения.

$$\begin{aligned} X_{ij}^{best} &= X_{ij}, \varphi(X_{ij}^{best}) < \varphi(X_{ij}), i = 1, \dots, |S|, \\ X_j^{best} &= X_{ij}, \varphi(X_j^{best}) < \varphi(X_{ij}), i = 1, \dots, |S|. \end{aligned} \quad (12)$$

Вычисление $\varphi(X) = f(X)$ происходит во внешней среде с помощью обмена данными по обратной связи ($I_{o.c.}, O_{o.c.}$).

3. Перемещения частиц с учетом ограничений на положения и скорости (векторов $V_{\max}, D_{\min}, D_{\max}$):

$$V_{ij+1} = V_{ij}\omega + \alpha_1(X_{ij}^{best} - X_{ij})r_1 + \alpha_2(M - X_{ij})r_2, i = 1, \dots, |S|; \quad (13)$$

$$v_{ij+1}^k = \begin{cases} v_{ij+1}^k, v_{ij+1}^k \leq v_{\max}^k \\ v_{\max}^k, v_{ij+1}^k \geq v_{\max}^k \end{cases}, i = 1, \dots, |S|, k = 1, \dots, l; \quad (14)$$

$$x_{ij+1}^k = \begin{cases} x_{ij+1}^k + v_{ij+1}^k, d_{\min}^k \leq x_{ij+1}^k + v_{ij+1}^k \leq d_{\max}^k; \\ d_{\min}^k, x_{ij+1}^k + v_{ij+1}^k \leq d_{\min}^k; \\ d_{\max}^k, x_{ij+1}^k + v_{ij+1}^k \geq d_{\max}^k; \\ i = 1, \dots, |S|, k = 1, \dots, l; \end{cases} \quad (15)$$

где r_1 и r_2 – вектора случайных чисел, равномерно распределенные в интервале $[0,1)$. Расчет по пункту 2.

4. Если на j-ой итерации выполнено условие остановки, то значение

$$X_{\text{final}}^{best} = X_j^{best} \quad (16)$$

подается на выход O как решение задачи. Иначе происходит переход к этапу 3.

$P = \{\alpha_1, \alpha_2, \omega, V_{\max}\}$ – параметры алгоритма, которые используются в формуле и влияют на перемещения частиц в пространстве поиска. Параметры α_1 и α_2 определяют, соответственно, степень учета индивидуального и группо-

вого опыта агентов. Параметр ω характеризует инерционные свойства частиц. Вектор $V_{\max}$ ограничивает скорости частиц. В классическом алгоритме роя частиц принимают, что $V_{\max} = (D_{\max} - D_{\min})$, это означает, что частица за один шаг может пересечь все пространство поиска. Однако можно предположить, что из-за высоких скоростей частицы могут пропускать более эффективные экстремумы и попадать в менее эффективные. Поэтому используется дополнительный параметр β , ограничивающий скорость частиц, следующим образом:

$$V_{\max} = \beta(D_{\max} - D_{\min}). \quad (17)$$

В этом случае можно записать $P = \{\alpha_1, \alpha_2, \omega, \beta\}$.

Как видно из приведенных этапов взаимодействия, способ расчета показателей $Z_{\Delta P}$, Z_{Q_K} может быть любым, поскольку он не зависит от используемого алгоритма оптимизации. Точно так же и алгоритм оптимизации не зависит от расчетов показателей системы. Такой подход позволяет легко применять различные методы оптимизации, так как изменения в электрической схеме не приведут к необходимости менять что-либо в реализации оптимизационного метода. Иными словами, обеспечивается отсутствие тесных зависимостей между задачей оптимизации и методом ее решения, повышается гибкость подхода.

Модель для алгоритма оптимизации является черным ящиком с определенным интерфейсом. Данная модель получает на вход вектор-столбец Q_K и возвращает критерии $Z_{\Delta P}$, Z_{Q_K} , значение $\lg \varphi$, Z . Необходимо установить соответствие между позицией частицы X и вектором, задающим размещение компенсирующих устройств в сети Q_K . Простейший способ – положить $x_i = Q_i$, но максимально допустимое значение мощности КУ в каждом из узлов заранее неизвестно, поэтому невозможно заранее определить границы пространства поиска решений $d_{\min 1}, d_{\max 1}, \dots, d_{\min m}, d_{\max m}$, что приводит к зависимости реализации метода оптимизации от условий задачи.

При разработке описываемого подхода было решено избегать тесных зависимостей задачи оптимизации и метода оптимизации, чтобы обеспечить гибкость и универсальность подхода. Поэтому была использована следующая техника: вектор X использован не как вектор мощностей КУ, а как вектор коэффициентов, так что мощность каждой КУ определялась как произведение элемента вектора X на определенную в ходе расчетов максимально допустимую мощность КУ в соответствующем узле:

$$Q_i = x_i \cdot Q_{i \max}. \quad (18)$$

Если x_i близко к нулю, то полагается, что КУ в i -м узле не будет установлена. В результате в описании алгоритма роя частиц можно устранить зависимость границ $d_{\min 1}, d_{\max 1}, \dots, d_{\min m}, d_{\max m}$ от особенностей оптимизируемой схемы ($d_{\min i} = 0$ and $d_{\max i} = 1, i = 1, \dots, m$). Так как размерность пространства поиска решений равна количеству узлов, рассматриваемых в качестве потенциальных мест установки КУ, то n равняется m .

Таким образом, позиция каждой частицы алгоритма роя частиц определяет некоторый вариант размещений КУ и их мощностей. Для каждой позиции модель вычисляет критерии Z и значение $\lg \varphi$. Ограничения на $\lg \varphi$ не учиты-

ваются в векторах $D_{\min}$ и $D_{\max}$, но если для данного варианта размещения КУ $\operatorname{tg} \varphi$ не подходит под ограничения, то, используется метод штрафных функций.

При этом описание алгоритма роя частиц не содержит зависимостей от модели задачи (5), и модель (5) не зависит от реализации алгоритма. Таким образом, учет особенностей задачи выполняется непосредственно в процессе работы алгоритма роя частиц, благодаря его интеллектуальной способности исследовать пространство поиска решения.

Для решения задач оптимизации алгоритмом роя частиц требуется настройка параметров. Для чего был выбран ГА.

Параметры алгоритма роя частиц $\{\alpha_1, \alpha_2, \omega, \beta\}$ используются как гены ГА, а качество полученного на этом наборе параметров решения задачи (6) принимается за значение функции приспособленности. Работу, полученного адаптивного алгоритма, можно представить следующим образом:

1. Генерация начальной популяции как набора векторов $\{\alpha_1, \alpha_2, \omega, \beta\}$. В данной работе $0 < \alpha_1 < 2$; $0 < \alpha_2 < 2$; $0 < \omega < 1$; $0,1 < \beta < 1$.

2. Решение задачи (6) алгоритмом роя частиц с использованием каждого из набора параметров. Если получено решение (вариант размещения КУ) лучше предыдущих, то оно сохраняется в памяти.

3. Выбор векторов параметров с учетом их приспособленностей и скрещивание для получения новой популяции векторов. В данной задаче использовался односточный кроссинговер.

4. Случайные изменения в значениях параметров. Вероятность изменения одного вектора составляла 15 %.

5. Если условие завершения выполнено, то завершение работы, иначе переход к пункту 2.

Лучшее решение, сохраненное в пункте 2, будет искомым решением задачи оптимизации. В качестве условия завершения использовалось достижение определенного количества итераций ГА. В расчетах использовалось 40 хромосом и 100 итераций ГА. Адаптация позволила получить эффективный набор параметров

$$\{\alpha_1 = 1,41826; \alpha_2 = 1,70733; \omega = 0,671682; \beta = 0,729057\}.$$

Затем эти же параметры были использованы в обычном алгоритме роя частиц для решения задачи (5).

Для схемы рис. 1 расчет показал, что при максимальной двигательной нагрузке на шинах подстанции электроснабжения ПСР (узел 3) $\operatorname{tg} \varphi = 0,54$; $\Delta P(Q) = 55,19$ кВт; ежегодные затраты на оплату потерь $Z = 1,10$ млн. руб. Данная подстанция состоит из двух секций, а на предприятии четыре подстанции с аналогичными потребителями и приблизительно с одинаковой нагрузкой. Таким образом, предприятие затрачивает на оплату потерь активной мощности в кабельных линиях около 9 млн. рублей в год.

Исследования проводились для различных сочетаний значений c_p и c_q . С точки зрения окупаемости наихудший вариант – низкий тариф на электроэнергию и высокая удельная стоимость КУ. В работе – это $c_p = 2,34$ руб./кВт·ч, $c_q = 1840$ руб./кВАр. Результаты показали, что при решении задачи КРМ, опти-

мально выполнять глубокую компенсацию до значения коэффициента реактивной мощности $\operatorname{tg} \varphi = 0,10$.

Для сравнения результатов глубокой компенсации и нормальной компенсации реактивной мощности, для схемы рис. 1 был выполнен расчет оптимизационной задачи (5) при ограничениях значения коэффициента реактивной мощности до 0,35. Результаты приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты решения оптимизационной задачи (5) для различной глубины компенсации

Глубина компенсации	Сравнительные параметры			
	ΔP , кВт	Затраты на оплату потерь, млн. руб.	Q_K , кВАр	Затраты на КУ, тыс. руб.
Без компенсации	55,19	1,10	-	-
$\operatorname{tg} \varphi = 0,35$	43,51	0,87	185,15	340,67
$\operatorname{tg} \varphi = 0,10$	33,50	0,67	413,96	761,64

Компенсируя реактивную мощность до значения $\operatorname{tg} \varphi = 0,35$, снижаются потери активной мощности на 21 %, а выполняя глубокую компенсацию до значения $\operatorname{tg} \varphi = 0,10$, потери уменьшаются на 39 %, но при этом необходимо увеличить мощность компенсирующих устройств в 2 раза. Известно, что для установки компенсирующих устройств необходимы дополнительные площади. Затраты на монтажные работы будут практически одинаковы, что для установки компенсирующих устройств мощностью 185 кВАр, что для компенсирующих устройств мощностью 415 кВАр, тогда становится очевидным, что, решая вопрос компенсации реактивной мощности с помощью конденсаторных батарей, следует выполнять глубокую компенсацию реактивной мощности, финансово-экономическое обоснование этого показано в разделе 5.

Схема электроснабжения потребителей подстанции предприятия № 2 отличается от первого меньшим количеством асинхронных двигателей, а протяженность кабельных линий вдвое меньше. Значение коэффициента реактивной мощности на первой секции равно $\operatorname{tg} \varphi = 0,57$, на второй – $\operatorname{tg} \varphi = 0,62$.

Сравнительный анализ полученных результатов показал, что при компенсации реактивной мощности до значения $\operatorname{tg} \varphi = 0,35$, снижаются потери электрической энергии на 14,78 %, а при компенсации до значения $\operatorname{tg} \varphi = 0,10$ – на 22,27 %. Глубокая компенсация реактивной мощности позволяет уменьшить потери на 7,42 %.

Для решения оптимизационной задачи и анализа глубокой компенсации был выбран фрагмент электрической сети г. Сургут, приведенной на рис. 2. Электрическая сеть состоит из 36 узлов и 48 ветвей. Все расчеты выполнялись на уровне напряжения 10 кВ.

Приказом Минэнерго № 380 максимальное значение $\operatorname{tg} \varphi$ для сетей 10 кВ ограничивается величиной 0,4. Значение данной величины не имеет обоснования, поэтому при исследовании верхнее значение коэффициента реактивной мощности ограничивалось величиной равной 0,6. Для городских электрических сетей среди потребителей электроэнергии доля мощных трехфазных асинхронных двигателей мала по сравнению с промышленными предприятиями,

поэтому нижнее ограничение $\operatorname{tg} \varphi$ установлено равным нулю. Таким образом, необходимо решить оптимизационную задачу (5), в которой ограничения по коэффициенту реактивной мощности

$$0 \leq \operatorname{tg} \varphi \leq 0,6. \quad (19)$$

Решение оптимизационной задачи (5) показало, что практически во всех узлах схемы оптимально выполнять компенсацию до значения $\operatorname{tg} \varphi = 0$, при этом суммарные потери активной мощности при этом составят $\Delta P = 0,872$ МВт, необходимая величина компенсируемой мощности $Q = 9,21$ МВАр. Таким образом, потери активной мощности уменьшаются на 18 %.

Глубокая компенсация до значения коэффициента реактивной мощности от 0 до 0,1 позволяет на промышленных предприятиях и в городских электрических сетях достичь наибольшего энергосбережения, что способствует эффективно решать проблему экономического роста производства.

В четвертом разделе исследовалась глубокая компенсация реактивной мощности в сети электроснабжения промышленного предприятия для снижения потерь электроэнергии с учетом минимизации затрат на кабельную продукцию. Анализ сечений кабельных линий схемы электроснабжения ПСР на предприятии № 1 (рис. 1) показал, что они завышены на одну или две ступени от их значений по длительно допустимому току для обеспечения нормируемой величины потерь напряжения. Рассматривалась схема одной секции подстанции (ЩСН-1), приведенная на рис. 1, при условии, что по кабельным линиям питания первой секции осуществляется электроснабжение потребителей и второй секции (аварийный или ремонтный режимы). На рис. 1 номера узлов, заключенные в окружность, это электроприемники, электроснабжение которых в нормальном режиме осуществляется от первой секции. Номера узлов, заключенные в прямоугольник – это электроприемники, электроснабжение которых в нормальном режиме осуществляется от второй секции подстанции.

Математическая модель задачи оптимизации

$$Z = c_p \tau \Delta P(Q) + c_v F \cdot L_{\text{л}} \cdot 10^3 + 0,12 c_Q \sum_{i=1}^n Q_i \rightarrow \min \quad (20)$$

при ограничениях (6),

где c_v – удельная цена кабельной продукции, руб/мм³;

F – сечение токоведущей части линии, мм²;

$L_{\text{л}}$ – длина линии, м.

Удельная цена погонного метра кабельной продукции, является дискретной величиной, которая зависит от сечения жилы кабеля. В работе удельная цена за один погонный метр кабельной линии заменена удельной ценой за объем c_v .

Для решения использовалась многоэтапная процедура:

– первый этап – расчет токов, напряжений и потерь в сети для рассматриваемого варианта расстановки источников реактивной мощности Q_k ;

– второй этап – определение допустимых сечений по длительно допустимому току протекания в проводнике и расчет затрат на кабельную продукцию $Z_{\text{к}\Sigma}$;

– третий этап – проверка выбранных сечений кабельных линий на допустимую потерю напряжения;

– четвертый этап – пересчет затрат на потери активной мощности $Z_{\Delta P}$ с учетом новых сечений.

Задача решена для различных вариантов значений c_p и c_Q . Во всех экспериментах, решая задачу (20), оптимальным значением получается коэффициент реактивной мощности, равный $\text{tg } \varphi = 0,10$. В таблице 2 приведены результаты решения задачи (20) для наихудшего варианта с точки зрения окупаемости – это высокая удельная цена конденсаторной установки и низкий тариф на электроэнергию. В нашем случае $c_Q = 1840$ руб./кВАр, $c_p = 2,34$ руб./кВт·ч.

Таблица 2 – Результаты оптимизации значения $\text{tg } \varphi$

Глубина компенсации	Критерий задачи (4.7), (млн. руб.)	Потери активной мощности ΔP , кВт	Суммарные затраты на кабельные линии, млн. руб.	Суммарная мощность КУ, кВАр	$\text{tg } \varphi$
Без компенсации	5,17	55,19	4,07	0	0,54
$\text{tg } \varphi = 0,35$	4,61	44,63	3,38	185	0,35
$0,1 \leq \text{tg } \varphi \leq 0,6$	3,97	33,98	2,88	414	0,10

Таким образом, глубокая компенсация реактивной мощности позволяет уменьшить передаваемую мощность, тем самым избежать потерь напряжения и не прибегать к процедуре увеличения сечения питающих кабелей.

Финансовые затраты на кабельную продукцию при компенсации до значения $\text{tg } \varphi = 0,35$ уменьшаются на 17 % (в денежном исчислении на 690 тыс. руб.), а при компенсации до значения $\text{tg } \varphi = 0,10$ – на 29 % (в денежном исчислении – на 1,19 млн. руб.). Глубокая компенсация позволяет дополнительно экономить 500 тыс. руб. на кабельную продукцию для одной секции подстанции по сравнению с нормальной компенсацией. При компенсации до значения $\text{tg } \varphi = 0,35$ масса меди уменьшается на 33,6 %, масса алюминия на 13,8 %, а при компенсации до значения $\text{tg } \varphi = 0,1$ – меди на 37,4 %, алюминия на 21,2 %. Применяя кабели меньшего сечения за счет глубокой компенсации реактивной мощности только для одной секции подстанции в атмосферу не будет выбрасываться 26,5 тыс. кг CO_2 .

Выполнены исследования влияния длины кабеля на срок окупаемости и глубину компенсации. Очевидно, что срок окупаемости зависит от тарифа на электроэнергию (c_p) и от удельной стоимости реактивной мощности компенсирующего устройства (c_Q). Для сравнения результатов проведены исследования зависимостей функций:

$$g = f(L), t = f(L), \quad (21)$$

где g – срок окупаемости, годы;

L – длина кабельной линии, м;

t – значение $\text{tg } \varphi$.

Изменение функций (21) зависит от исходного значения коэффициента реактивной мощности. В работе показано, что чем выше начальное значение коэффициента реактивной мощности, тем меньше длина питающей линии, при которой выгодно выполнять глубокую компенсацию.

Оптимальные решения, полученные с использованием алгоритма роя частиц для электропотребителя с коэффициентом реактивной мощности $\text{tg } \varphi = 0,46$, сведены в таблицу 3, при $c_p = 2,34$ руб./кВт·ч.

Таблица 3 – Минимальная длина кабельных линий, при которых целесообразна глубокая компенсация

c_Q , руб/кВАр	L_H , м	$\text{tg } \varphi$ при L_H	Срок окупае- мости при L_H , год	L_T , м	$\text{tg } \varphi$ при L_T	Срок окупаемости при L_T , год
Для кабельной линии с алюминиевыми жилами (al)						
400	40	0,25	4,8	70	0,10	2,5
550	45	0,30	4,8	105	0,10	2,5
1840	35	0,39	4,7	300	0,15	2,2
Для кабельной линии с медными жилами (cu)						
400	55	0,25	4,7	120	0,10	2,4
550	60	0,29	4,7	135	0,10	2,4
1840	50	0,39	4,5	300	0,21	2,6

В таблице 3 L_H – начальная длина, при которой находится оптимальное решение компенсации реактивной мощности, а L_T – длина, при которой находится оптимальное решение глубокой компенсации до значения коэффициента реактивной мощности от 0,15 до 0,10. Жилы питающего кабеля могут быть алюминиевыми или медными, поэтому расчеты выполнены для двух типов кабелей.

На рис. 3 приведены графики изменения срока окупаемости КУ от длины кабельной линии, по средствам которой производится электроснабжение потребителя с $\text{tg } \varphi = 0,46$ при $c_Q = 550$ руб/кВАр

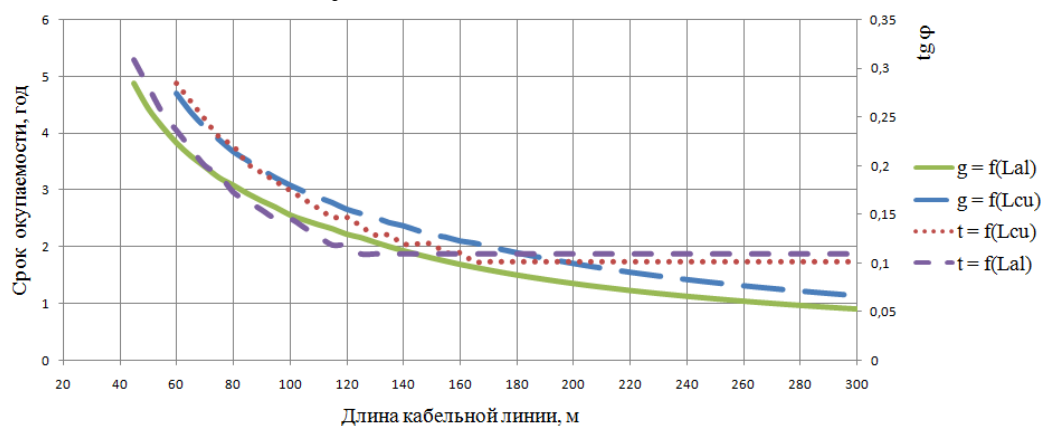


Рисунок 3. – Зависимости срока окупаемости от длины линии для различной глубины компенсации

Исследования показали, что при длине линии 50 м и более, для эффективного использования электрической энергии, следует проводить компенсацию реактивной мощности. При длине питающей линии 100 м и более, в зависимости от стоимости КУ, следует проводить глубокую компенсацию реактивной мощности до значений от $\text{tg } \varphi = 0,15$ до $\text{tg } \varphi = 0,10$.

В пятом разделе представлены результаты технико-экономического обоснования глубокой компенсации реактивной мощности с учетом показателей, которые учитывают фактор времени: чистого дисконтированного дохода,

индекса прибыли, дисконтированного срока окупаемости и внутренней нормы доходности.

Дисконтирование – процесс приведения разновременных денежных потоков (поступлений и выплат) к единому моменту времени. **Чистый дисконтированный доход** рассчитывается по формуле

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+r)^t} - IC, \quad (22)$$

где NPV – чистый дисконтированный доход инвестиционного проекта;

CF_t – денежный поток в период времени t (Cash Flow);

IC – вложенный инвестиционный капитал – это затраты инвестора в первоначальный период времени (Invest Capital);

r – ставка дисконтирования. В работе принята ставка дисконтирования, рассчитанная Госкорпорацией «РОСАТОМ», и составляет 16,7 %.

При сравнении между собой нескольких проектов оценивают инвестиционную привлекательность. При $NPV_1 > NPV_2$ первый проект имеет большую привлекательность.

Индекс прибыли (рентабельности) показывает относительную доходность инвестиционного проекта на единицу вложений

$$PI = \frac{NPV}{IC}. \quad (23)$$

При $PI_1 > PI_2$, первый проект имеет большую рентабельность, поэтому он будет выбран.

Внутренняя норма доходности (IRR) – это та норма дисконта, при которой приведенные эффекты равны приведенным капитальным вложениям.

$$0 = \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+IRR)^t} - IC. \quad (24)$$

Внутренняя норма доходности позволяет сравнить не только проекты, но и инвестиции банковского вклада, т.е. если IRR выше банковского вклада, то проект считается инвестиционно привлекательным.

Срок окупаемости с учетом дисконтирования (DPP) – это период возврата денежных средств с учетом временной стоимости денег (ставки дисконта), который рассчитывается по формуле

$$DPP = \min n, \text{ при котором } \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+r)^t} > IC, \quad (25)$$

где DPP – дисконтированный срок окупаемости инвестиций.

Для схемы, приведенной на рис. 1, и результатов, полученных в разделе 3 для предприятия 1, сделан расчет NPV, PI, IRR, и DPP для $\text{tg } \varphi=0,1$ и $\text{tg } \varphi=0,35$. Полученные результаты приведены в таблице 4.

С точки зрения дисконтированного срока окупаемости, проект компенсации реактивной мощности до значения $\text{tg } \varphi=0,35$ будет более привлекательным, но, с точки зрения чистого дисконтированного дохода, индекса прибыли и

внутренней нормы доходности, компенсировать реактивную мощность до значения $\operatorname{tg} \varphi=0,1$ выгоднее.

Таблица 4 – Сравнительный анализ экономических показателей глубокой компенсации

Показатель инвестиционного проекта	$\operatorname{tg} \varphi=0,35$	$\operatorname{tg} \varphi=0,10$
Чистый дисконтированный доход	450,3 тыс. руб.	900,1 тыс. руб.
Индекс дисконтированной доходности	0,56	0,62
Внутренняя норма доходности	20 %	23 %
Срок окупаемости с учетом дисконтирования	3 года	5 лет

Для городской электрической сети был выполнен расчет только для глубокой компенсации и получены следующие результаты: $NPV=9,4$ млн. руб.; $PI=1,2$; $IRR=36\%$; $DPP=5$ лет. Выводы о привлекательности проекта, в таком случае, делаются, сравнением величин:

$$NPV>0; \quad PI>1. \quad (27)$$

Внутреннюю норму доходности IRR сравнивают с инвестициями банковского вклада. Резюмируя сказанное можно сказать, что в городских электрических сетях проект по глубокой компенсации является привлекательным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования позволили получить следующие результаты:

1. Разработана актуальная научная концепция глубокой компенсации реактивной мощности на промышленных предприятиях, повышающая энергоэффективность и качество функционирования их систем электроснабжения. В ее рамках предложены и обоснованы новые значения коэффициентов реактивной мощности у электроприемников равные 0-0,1.

2. Электрические сети систем электроснабжения предприятий и городов напряжением 10 (6) – 0,4 кВ по своей протяженности составляют около 50 % всех электрических распределительных сетей Российской Федерации. В связи с этим, задача снижения потерь активной и реактивной энергии при ее транспортировании от источников генерации к электроприемникам является чрезвычайно важной и актуальной. В наибольшей степени это касается реактивной мощности, поскольку ее генерация на электростанциях ограничена.

Раскрыты противоречия, возникшие в связи с отменой поощрительных и штрафных надбавок за потребление реактивной мощности, которая теперь не имеет отдельного стоимостного выражения для электропотребителей. Ее стоимостной коэффициент включен в тариф нагрузочных потерь, что в свою очередь упрощает систему оплаты, но не стимулирует промышленные предприятия к снижению потребления реактивной мощности. Показано, что существующая степень компенсации реактивной мощности у электропотребителей по действующим нормативным документам не является достаточно обоснованной и не оптимальна, поэтому требует дополнительного научного исследования и обоснования.

3. Введено новое понятие глубокой компенсации реактивной мощности, как одной из мер, которая ведет к снижению потерь мощности и уменьшению затрат на кабельную продукцию. В работе обоснована глубокая компенсация реактивной мощности у электроприемника до значения $\operatorname{tg} \varphi = 0 - 0,10$, вместо

рекомендованного нормативным документом $\text{tg}\varphi = 0,35 - 0,4$. Доказано, что это позволит достичь лучших энергоэффективности и энергосбережения в системах электроснабжения промышленных предприятий и городов. При этом, за счет такой компенсации можно также перейти к экономически более обоснованным сечениям кабельных линий. Учитывая, что электроэнергия является некоторым эквивалентом топливо-энергетических ресурсов, потери электроэнергии при ее передаче и распределении снижают общую энергоэффективность систем электроснабжения и электросетевого оборудования. Наряду с этим сокращается потребление ископаемого топлива и снижаются выбросы парниковых газов, что способствует улучшению состояния экологической среды.

4. Доказано на конкретных существующих системах электроснабжения промышленных предприятий, что выбранные проектные сечения питающих линий являются увеличенными, так как рассчитаны на протекание дополнительного индуктивного тока. При использовании принципов глубокой компенсации реактивной мощности эти дополнительные финансовые издержки существенно снижаются, что создает условия для обоснованного и корректного снижения расходов на цветные металлы, присутствующие в кабельной продукции.

5. Использованы эволюционные алгоритмы, в частности, генетический алгоритм в задаче оптимального выбора источников реактивной мощности. Это обусловлено тем, что задачи компенсации реактивной мощности в системах электроснабжения отличаются дискретностью параметров компенсирующих устройств и сечений кабельных линий. В связи с этим, применение традиционных градиентных методов затруднено. Исследования показали, что генетический алгоритм не использует структуры данных, специфичных для исследуемой задачи, поэтому делает большое количество вычислений целевой функции для низкоэффективных решений, так как на каждом шаге требует создания новых популяций путем отбора и скрещивания генов предыдущей популяции. Это обстоятельство увеличивает время работы генетического алгоритма, хотя он показал свои преимущества в быстрой работе по сравнению с методом Лагранжа.

6. Предложен модернизированный алгоритм роя частиц для решения оптимизационной задачи выбора источников реактивной мощности, который позволяет искать глобальный минимум на всем множестве возможных значений целевой функции. При этом выбор оптимальных значений параметров алгоритма, которые влияют на перемещения частиц, и их адаптация для условий данной задачи рассчитаны с помощью генетического алгоритма. Исследования выполнены для значений $\text{tg}\varphi$, рекомендованных нормативным документом (в работе названы нормальными), и условий глубокой компенсации $\text{tg}\varphi=0,1$. Метод роя частиц не зависит от начального приближения и позволяет в режиме online корректировать значения реактивной мощности в узлах при диспетчерском управлении большими промышленными предприятиями.

7. В работе выполнено оптимальное размещение источников реактивной мощности в узлах городской электрической сети напряжением 10 кВ города Сургут, что позволило снизить потери активной мощности и улучшить качество электроснабжения городской инфраструктуры. Исследования показали, что энергоэффективность этих мероприятий несколько ниже, чем на промышлен-

ных предприятиях, что объясняется более распределенной нагрузкой. При этом разработан комбинированный метод, объединяющий алгоритм роя частиц и расчет установившегося режима сети электроснабжения города.

8. Выполнена технико-экономическая оценка эффективности мероприятий инвестиционного проекта по глубокой компенсации с учетом дисконтирования разновременных денежных потоков. Расчеты показали, что инвестиционный проект электроснабжения промышленного предприятия при глубокой компенсации реактивной мощности является более привлекательным, так как чистый дисконтированный доход выше на 50 %, индекс дисконтированной доходности выше на 10 %, внутренняя норма доходности выше на 13 %, чем инвестиционный проект по ее компенсации до нормальных значений коэффициента реактивной мощности.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

В изданиях, рекомендованных ВАК

1. Третьякова, Е.С. Глубокая компенсация реактивной мощности в системах электроснабжения производства / В.З.Манусов, Е.С.Третьякова // Энергоресурсосбережение и энергоэффективность. – 2017.- № 4. – С. 33-38.

2. Третьякова, Е.С. Оптимизация размещения источников реактивной мощности с помощью алгоритма роя частиц с генетической адаптацией / В.З.Манусов, П.В.Матренин, Е.С.Третьякова // Промышленная энергетика. – 2016. - № 8. – С. 34-40.

3. Третьякова, Е.С. Повышение энергоэффективности на промышленных предприятиях при выполнении глубокой компенсации реактивной мощности / В.З.Манусов, Е.С.Третьякова // ЭЛЕКТРО. – 2015. - № 5 – С. 2-7.

4. Третьякова, Е.С. Оптимизация реактивной мощности на основе генетического алгоритма / В.З. Манусов, Е.С.Третьякова // Главный энергетик. – 2015. - № 1 – С. 26-29.

5. Третьякова, Е.С. Применение генетических алгоритмов для оптимального размещения источников реактивной мощности на промышленных предприятиях / В.З.Манусов, Е.С.Третьякова // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. - 2012. - № 2 – С. 329-331.

Публикации, входящие в систему SCOPUS:

6. Tretiakova Elena Implementation of Population Algorithms to Minimize Power Losses and Cable Cross-Section in Power Systems / Vadim Manusov, Pavel V. Matrenin, Elena Tretiakova // International Journal of Electrical and Computer Engineering – Vol. 6, № 6. – pp. 2955-2961.

7. Tretyakova, E.S. Optimization Compensating Devices in the Power Systems Using Population Algorithms / E.S Tretyakova, V.Z.Manusov, U. Bumtsend // 2016 11th International Forum on Strategic Technology (IFOST) p. 276-280.

В прочих изданиях

8. Tretyakova, Elena Genetically Adapted Particle Swarm Algorithms for Optimization the Reactive Power Sources Arrangement / Vadim Manusov, Pavel Matrenin, Viktor Sekaev, Elena Tretyakova, // 2015 International Conference on Software, Multimedia and Communication Engineering, September 20-21, 2015, Hong Kong – Vol. 439 – 2015. – pp 218-222. ISBN: 978-1-60595-284-0.

9. Третьякова, Е.С. Оптимизация распределения источников реактивной мощности в системах электроснабжения предприятий с использованием роевых алгоритмов электроснабжения / В.З.Манусов, П.В.Матренин, Е.С.Третьякова // Электроэнергетика глазами молодежи: Труды VI международной молодежной научно-технической конференции, 9 – 13 ноября 2015, Иваново. – В 2 т. Т 1. – Иваново: ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И.Ленина», 2015. – С. 139-142.

10. Tretyakova, E. Population-based Algorithms for Optimization of the Reactive Power Distribution and Selection of the Cable Cross-section in the Power-Supply Systems / V. Manusov, E. Tretyakova, P. Matrenin // Applied Mechanics and Materials – Vol. 792 – 2015. – pp 230-236. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMM.792.230.

11. Третьякова, Е.С. Популяционные алгоритмы для оптимизации распределения реактивной мощности и выбора сечений кабеля в системах электроснабжения / В.З.Манусов, П.В.Матренин, Е.С.Третьякова // Электротехника. Электротехнология. Энергетика. ЭЭЭ-2015: Сборник научных трудов VII международной научной конференции молодых ученых. Часть 3. Секция «Энергетика» (г. Новосибирск, 9-12 июня 2015г.) – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2015 – С. 67-70.

12. Третьякова, Е.С. Компенсация реактивной мощности в сетях 0,4 кВ с использованием генетического алгоритма / Е.С.Третьякова // Отечественная наука в эпоху изменений: постулаты прошлого и теории нового времени: материалы II международной научно-практической конференции. Часть 3 – Научная ассоциация ученых (НАУ) – Ежемесячный научный журнал. – 2014. - № 2 – С. 50-52.

13. Tretyakova, Elena S. The calculation of the optimal placement of reactive power sources in industrial enterprises with the use of genetic algorithms / Vadim Z. Manusov, Elena S. Tretyakova // Young Scientist USA. Applied Science - P. 79-82.

14. Третьякова, Е.С. Использование генетических алгоритмов для оптимизации реактивной мощности на промышленных предприятиях / В.З.Манусов, Е.С.Третьякова // Современная техника и технологии: проблемы, состояние и перспективы: материалы II Всероссийской научно-технической конференции (г. Рубцовск, 23-24 ноября 2012 г.). – Рубцовский индустриальный институт. - Рубцовск, 2012 – С. 232-236.

15. Третьякова, Е.С. Повышение эффективного использования компенсирующих устройств на промышленных предприятиях ядерной отрасли / Е.С.Третьякова // Электроэнергия: от получения и распределения до эффективного использования: материалы V Всероссийской научно-технической конференции / Томский политехнический университет. – Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – С. 164-165.

Отпечатано в ИСЭМ СО РАН
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 130
Тираж 100 экз. Заказ № 18.