

На правах рукописи



Беляевский Роман Владимирович

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ
ТЕРРИТОРИАЛЬНЫХ СЕТЕВЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ ПРИ ОПТИМИЗАЦИИ
ПОТРЕБЛЕНИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

Специальность 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Кемерово – 2015

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева»

Научный руководитель: кандидат технических наук,
старший научный сотрудник
Ефременко Владимир Михайлович

Официальные оппоненты:

Горюнов Владимир Николаевич доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО «Омский государственный
технический университет», заведующий
кафедрой электроснабжения промышлен-
ных предприятий

Герасименко Алексей Алексеевич кандидат технических наук, профессор,
ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный
университет», профессор кафедры элек-
трических станций и электроэнергетичес-
ких систем

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Национальный исследова-
тельский Томский политехнический уни-
верситет» (г. Томск)

Защита состоится 26 ноября 2015 г. в 13:00 на заседании диссертационного со-
вета Д 212.102.01 в федеральном государственном бюджетном образовательном
учреждении высшего профессионального образования «Кузбасский государст-
венный технический университет имени Т.Ф. Горбачева» по адресу: 650000,
г. Кемерово, ул. Весенняя, 28, факс (3842) 36-16-87, e-mail: siyu.eav@kuzstu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государствен-
ного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального
образования «Кузбасский государственный технический университет имени
Т.Ф. Горбачева» и на сайте

<http://science.kuzstu.ru/activities/gos-attestation/soresearchers/>

Автореферат разослан «___» _____ 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Семькина Ирина Юрьевна

Актуальность темы. Энергосбережение и повышение энергоэффективности являются одним из важнейших направлений модернизации экономики России. Они входят в перечень приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации. Актуальность проблем энергосбережения и повышения энергоэффективности в нашей стране обусловлена высокой энергоемкостью валового внутреннего продукта (ВВП), которая в 3,5–5 раз превышает аналогичные показатели развитых стран. Вместе с тем, Указом Президента РФ от 04.06.2008 № 889 и Энергетической стратегией России на период до 2030 года предусмотрено снизить энергоемкость ВВП к 2020 году не менее чем на 40 %. Снижение данного показателя в значительной мере должно быть достигнуто за счет реализации потенциала энергосбережения в электросетевом комплексе.

За последние несколько лет, в результате прошедшей в России реформы электроэнергетики, возникло большое количество территориальных сетевых организаций (ТСО), которые оказывают услуги по передаче электроэнергии потребителям. При этом большинство ТСО отличается низкой энергоэффективностью, что выражается в высоких потерях электроэнергии в электрических сетях, а также в значительном износе сетевого оборудования.

Существенное влияние на потери электроэнергии в распределительных сетях 6–10 кВ (РС) ТСО оказывает протекающая по ним реактивная мощность. В результате в отдельных сетях потери электроэнергии достигают 40 %. Как следствие, имеют место сверхнормативные потери, оплачивать которые необходимо из прибыли ТСО. Поэтому энергосбережение и повышение энергоэффективности в РС ТСО является актуальной задачей, необходимость решения которой обусловлена различными техническими и экономическими причинами.

Степень разработанности. Проблемой снижения потерь электроэнергии в электрических сетях занимались В.Э. Воротницкий, Ю.С. Железко, В.Н. Казанцев, Г.Е. Поспелов, Н.М. Сыч, М.И. Фурсанов и др. В их работах рассматривается структура потерь электроэнергии, описываются методы расчета и нормирования потерь и выбор мероприятий по их снижению.

Вопросам компенсации реактивной мощности (КРМ) также посвящено большое количество отечественных и зарубежных работ. Значительный вклад в решение задачи КРМ внесли Д.А. Арзамасцев, В.А. Веников, С.М. Гительсон, Ю.С. Железко, Г.М. Каялов, И.Н. Ковалев, Б.А. Константинов, В.В. Красник, Г.Е. Поспелов, Н.М. Сыч, В.Т. Федин, Е. Acha, В. Baran, М. Delfanti и др.

Однако несмотря на большой объем проведенных исследований, как в области снижения потерь электроэнергии, так и в части КРМ, следует отметить, что в них отсутствуют детальные исследования структуры технологических потерь в РС ТСО, а задача оптимизации размещения компенсирующих устройств (КУ) решается, в основном, на уровне сетей энергосистемы и промышленных предприятий и не учитывает особенностей, характерных для РС ТСО.

Идея работы состоит в разработке организационных и технических мероприятий по снижению потерь электроэнергии в РС ТСО за счет оптимизации размещения КУ, управления реактивной мощностью и повышения эффективности режимов работы сетевого оборудования.

Цель работы заключается в снижении потерь электроэнергии в РС ТСО и повышении их энергоэффективности при оптимизации потребления реактивной мощности.

Основные задачи исследования:

1. Анализ влияния реактивной мощности на пропускную способность,

потери электроэнергии и потери напряжения в РС ТСО.

2. Исследование процессов потребления реактивной мощности в асинхронных двигателях и силовых трансформаторах.

3. Анализ существующих подходов к размещению КУ в электрических сетях и обоснование наиболее приемлемого метода оптимизации их размещения в РС ТСО.

4. Разработка алгоритма оптимизации размещения КУ в РС ТСО.

5. Построение имитационной модели РС ТСО и оценка с ее помощью эффективности разработанного алгоритма.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Впервые получены зависимости относительного изменения пропускной способности, потерь электроэнергии и потерь напряжения при изменении коэффициента реактивной мощности в РС ТСО.

2. Уточнены диапазоны нагрузок, при которых целесообразно производить замену малозагруженных асинхронных двигателей и силовых трансформаторов, отличающиеся от принятых на практике меньшим критическим значением коэффициента загрузки.

3. Предложен алгоритм оптимизации размещения КУ в РС ТСО, основанный на методе неопределенных множителей Лагранжа, отличающийся от известных алгоритмов предварительной оценкой коэффициентов загрузки силовых трансформаторов с использованием зависимостей $\text{tg}\varphi_T = f(\beta)$.

4. Разработана имитационная модель РС ТСО, отличающаяся от известных моделей возможностью осуществлять управление реактивной мощностью в сети в зависимости от коэффициентов загрузки силовых трансформаторов.

Теоретическая и практическая значимость работы состоит в том, что разработанный алгоритм оптимизации размещения КУ и управления потреблением реактивной мощности обеспечивает снижение потерь электроэнергии в РС ТСО. Имитационная модель РС ТСО позволяет производить выбор мощности и мест установки КУ в проектируемой и существующей электрической сети с целью минимизации потерь электроэнергии, а также осуществлять управление реактивной мощностью в зависимости от коэффициента загрузки силовых трансформаторов.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке программ энергосбережения в электросетевом комплексе.

Методология и методы исследования. Проведенные исследования основывались на общих положениях теории электрических цепей, методах математической статистики, аналитическом методе исследования функциональных зависимостей, теории многоуровневых иерархических систем, методе неопределенных множителей Лагранжа, имитационном моделировании.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. При увеличении коэффициента реактивной мощности относительные значения пропускной способности, потерь электроэнергии и потерь напряжения в РС ТСО изменяются в кубической зависимости.

2. Критические значения коэффициентов загрузки асинхронных двигателей и силовых трансформаторов, при которых происходит резкое увеличение относительной величины потребляемой ими реактивной мощности, зависят от их конструктивного исполнения и материала магнитопровода и имеют более низкие значения по сравнению с принятыми на практике.

3. Предложенный алгоритм оптимизации размещения КУ на основе метода неопределенных множителей Лагранжа позволяет получить оптимальное

распределение реактивных мощностей в РС ТСО с учетом предварительной оценки коэффициентов загрузки силовых трансформаторов с использованием зависимостей $\text{tg}\varphi_{\tau} = f(\beta)$.

4. Разработанная имитационная модель РС ТСО позволяет осуществлять управление реактивной мощностью в сети в зависимости от коэффициентов загрузки силовых трансформаторов.

Степень достоверности научных положений подтверждается применением современных математических методов оптимизации и экспериментальной проверкой теоретических выводов на имитационной модели РС ТСО, построенной на основании фактических данных о нагрузках сети, полученных по показаниям приборов учета.

Личный вклад автора заключается в выполнении основного объема исследований, изложенных в работе, в обработке, анализе, обобщении полученных результатов и формулировке выводов, а также в личном участии в апробации результатов исследования и подготовке основных публикаций по выполненной работе.

Реализация выводов и рекомендаций работы. Результаты работы использованы при выполнении проекта «Создание энергосберегающих систем транспортировки, распределения и использования электрической энергии», выполненного в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на период 2009-2013 годы» при поддержке Министерства образования и науки РФ, соглашение №14.В37.21.2073 от 14.11.2012.

Основные научные результаты диссертационной работы внедрены и находят практическое применение в ТСО ООО «Железобетон-сервис». К их числу относятся алгоритм оптимизации размещения КУ и управления реактивной мощностью, рекомендации по проведению организационно-технических мероприятий по компенсации реактивной мощности в электрических сетях.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на Международной молодежной конференции «Энергосберегающие технологии» (Томск, 2011 г.), I–X Международной научной заочной конференции «Актуальные вопросы современной техники и технологии» (Липецк, 2010–2013 гг.), XLI–XLII Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием) с элементами научной школы для молодежи «Федоровские чтения» (Москва, 2011–2012 гг.), XIV Международной научно-практической конференции «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири» (Кемерово, 2012 г.), 6–8-й Международной Конференции по проблемам горной промышленности, строительства и энергетики «Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики» (Тула – Донецк – Минск, 2010–2012 г.), V–IX Международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения» (Казань, 2010–2014 гг.), II–VII Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых «Россия молодая» (Кемерово, 2010–2015 гг.) и др.

Публикации. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 50 печатных работах, из них 12 в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень, рекомендованный ВАК Министерства образования и науки Российской Федерации.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы из 102 наименований. Работа изложена на 132 страницах машинописного текста и содержит 37 рисунков, 7 таблиц и 2 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследований, определены научная новизна и научные положения, а также теоретическая и практическая значимость результатов исследований.

В первой главе выполнен анализ текущего состояния РС ТСО.

В настоящее время в составе электросетевого комплекса РФ действует более 3000 территориальных сетевых организаций, на долю которых приходится около 30 % рынка электросетевых услуг. В эксплуатации ТСО находятся, в основном, распределительные сети напряжением 0,4–6(10) кВ.

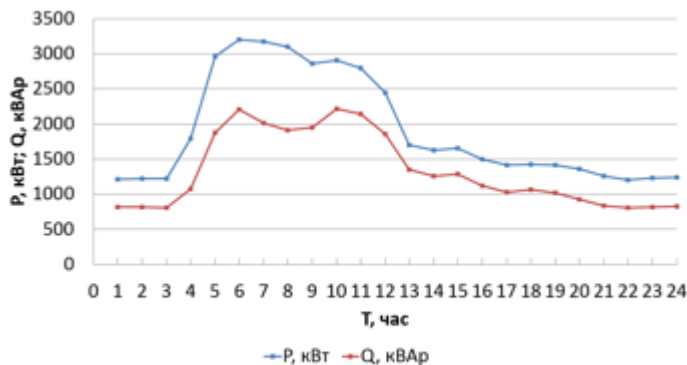


Рисунок 1 – Графики электрических нагрузок РС ТСО (время московское)

На рисунке 1 приведены графики электрических нагрузок сети по активной и реактивной мощности, построенные на основании суточных контрольных замеров электроэнергии, которые были получены в ходе обследования РС ТСО.

Анализ графиков нагрузки показал, что при исследовании РС ТСО следует рассматривать два характерных режима работы сети (дневную и ночную зоны), в

пределах которых нагрузка меняется незначительно.

Существенной проблемой РС ТСО является высокий уровень потерь электроэнергии. В среднем потери электроэнергии при ее передаче по электрическим сетям ТСО составляют 11 % от величины полезного отпуска. Однако в некоторых сетях они достигают величины 15–18 % и даже 30–40 %.

Технологические потери электроэнергии в РС ТСО в значительной степени определяются избыточной реактивной мощностью, передаваемой по сети. Установлено, что в обобщенной структуре технологических потерь на долю потерь, обусловленных передачей реактивной мощности, приходится 47 %. К ним относятся потери холостого хода трансформаторов, а также нагрузочные потери от протекания реактивной мощности по элементам сети.

Эффективным мероприятием по снижению потерь электроэнергии в РС ТСО является компенсация реактивной мощности. В общем случае под КРМ понимается уменьшение реактивной мощности, циркулирующей между источником и потребляющими ее электроприемниками. При этом мероприятия по КРМ могут быть разделены на организационные и технические.

Важным организационным мероприятием по КРМ является повышение загрузки асинхронных двигателей и силовых трансформаторов. Однако исследования диапазонов нагрузки, при которых целесообразно производить замену малозагруженных электродвигателей и трансформаторов, были проведены еще в 1950-е годы, и во многом не учитывают современных условий эксплуатации. Поэтому для повышения эффективности организационных мероприятий по КРМ необходимо уточнение оптимальных диапазонов нагрузки для данных видов электрооборудования.

Технические мероприятия по КРМ заключаются в установке КУ в соответствующих узлах электрической сети. Обследование РС ТСО показало, что данные сети характеризуются низкой оснащённостью и неэффективным использованием установленной мощности КУ, поэтому выбор мощности и мест установки КУ является актуальной научно-технической задачей.

Вторая глава посвящена исследованию процесса потребления реактивной мощности в РС ТСО.

При использовании величины Π в качестве общего обозначения параметров электрической сети (пропускной способности, потерь электроэнергии и потерь напряжения), а величины Π_0 в качестве обозначения их значений, соответствующих $\text{tg}\varphi = 0$, доля Π , обусловленная передачей по РС ТСО реактивной мощности определяется по формуле:

$$d = 1 - \frac{\Pi_0}{\Pi}. \quad (1)$$

Для указанных параметров сети соотношение (1) имеет вид:

$$d_I = 1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \text{tg}^2\varphi}}; \quad d_{\Delta P} = 1 - \frac{1}{1 + \text{tg}^2\varphi}; \quad d_{\Delta U} = 1 - \frac{1}{1 + k \text{tg}\varphi}, \quad (2)$$

где $\text{tg}\varphi = Q/P$ – коэффициент реактивной мощности; $k = X/R$ – расчетный коэффициент; P – активная нагрузка сети, кВт; Q – реактивная нагрузка сети, кВАр; R и X – активное и индуктивное сопротивления сети, Ом.

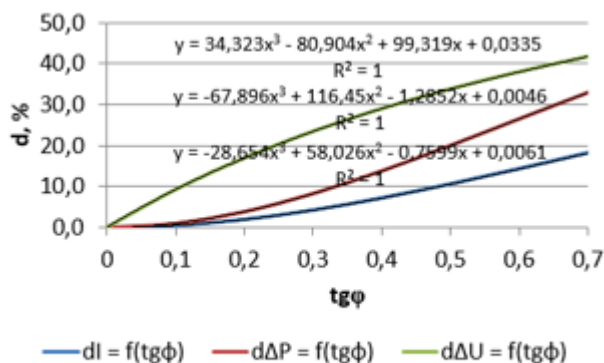


Рисунок 2 – Графики зависимости $d = f(\text{tg}\varphi)$

На рисунке 2 приведены графики зависимости $d = f(\text{tg}\varphi)$ для РС ТСО. Из них следует, что при увеличении $\text{tg}\varphi$ относительные значения пропускной способности, потерь электроэнергии и потерь напряжения в РС ТСО увеличиваются в кубической зависимости.

Для оценки влияния нагрузки электродвигателей и трансформаторов на потребление реактивной мощности была исследована зависимость их ко-

эффициента реактивной мощности от коэффициента загрузки.

Коэффициент реактивной мощности асинхронных двигателей равен:

$$\text{tg}\varphi_{\text{АД}} = \frac{\frac{I_0}{I_{\text{НОМ}}} \sqrt{1 + \text{tg}^2\varphi_{\text{НОМ}}} + \left(\text{tg}\varphi_{\text{НОМ}} - \frac{I_0}{I_{\text{НОМ}}} \sqrt{1 + \text{tg}^2\varphi_{\text{НОМ}}} \right) k_3^2}{\eta_{\text{НОМ}} k_3}, \quad (3)$$

где I_0 – ток холостого хода двигателя, А; $I_{\text{НОМ}}$ – номинальный ток двигателя, А; $\text{tg}\varphi_{\text{НОМ}}$ – номинальный коэффициент реактивной мощности двигателя; $\eta_{\text{НОМ}}$ – номинальный КПД двигателя; $k_3 = P/P_{\text{НОМ}}$ – коэффициент загрузки двигателя по активной мощности; P – нагрузка двигателя, кВт; $P_{\text{НОМ}}$ – номинальная мощность двигателя, кВт.

По результатам расчетов были построены графики зависимости $\text{tg}\varphi_{\text{АД}} = f(k_3)$ для асинхронных двигателей серии АИР (рисунок 3).

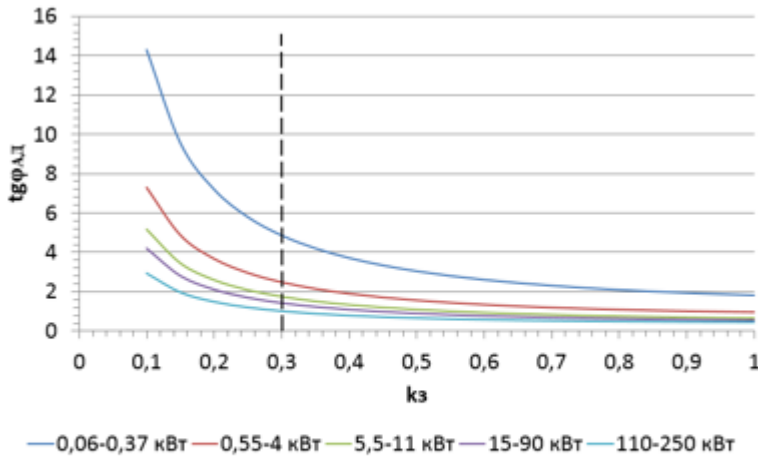


Рисунок 3 – Графики зависимости $\text{tg}\varphi_{\text{ад}} = f(k_z)$ для асинхронных двигателей серии АИР

для электродвигателей является критическим с точки зрения резкого увеличения относительной величины потребляемой реактивной мощности. Данное значение коэффициента загрузки ниже принятого на практике для асинхронных двигателей $k_{z,\text{кр}} = 0,45$, что объясняется совершенствованием конструкции и материала магнитопроводов электродвигателей.

Коэффициент реактивной мощности силовых трансформаторов равен:

$$\text{tg}\varphi_{\text{т}} = \frac{\frac{I_0}{100} + \frac{u_{\text{к}}}{100} \beta^2}{\sqrt{\beta^2 - \left(\frac{I_0}{100} + \frac{u_{\text{к}}}{100} \beta^2\right)^2}}, \quad (4)$$

где I_0 – ток холостого хода трансформатора, %; $u_{\text{к}}$ – напряжение короткого замыкания трансформатора, %; $\beta = S/S_{\text{ном.т}}$ – коэффициент загрузки трансформатора по полной мощности; S – нагрузка трансформатора, кВА; $S_{\text{ном.т}}$ – номинальная мощность трансформатора, кВА.

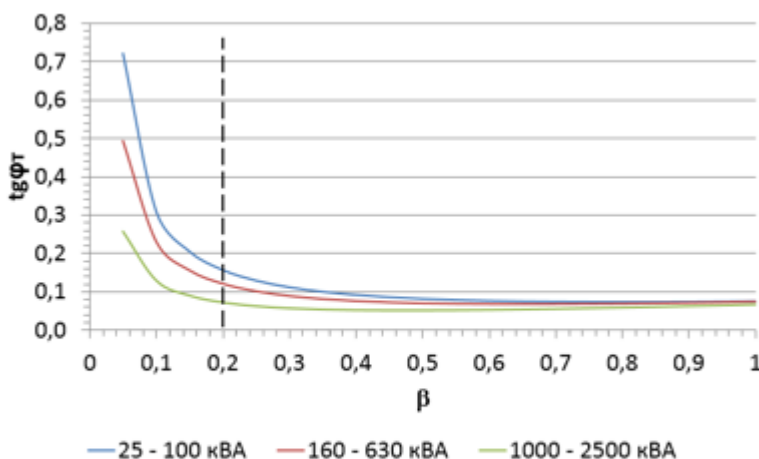


Рисунок 4 – Графики зависимости $\text{tg}\varphi_{\text{т}} = f(\beta)$ для трансформаторов серии ТМ

носительное потребление реактивной мощности существенно возрастают. Следовательно, для трансформаторов значение коэффициента загрузки $\beta_{\text{кр}} = 0,2$ яв-

Анализ графиков показал, что с уменьшением коэффициента загрузки значение $\text{tg}\varphi_{\text{ад}}$, а, следовательно, и относительная величина реактивной мощности, потребляемой электродвигателями, возрастают. Существенное увеличение коэффициента реактивной мощности $\text{tg}\varphi_{\text{ад}}$ наблюдается при снижении их загрузки менее 30 % номинальной мощности. Поэтому значение $k_{z,\text{кр}} = 0,3$

По результатам расчетов были построены графики зависимости $\text{tg}\varphi_{\text{т}} = f(\beta)$ для трансформаторов серии ТМ (рисунок 4). Аналогичные графики были построены для трансформаторов серии ТМГ, ТСЗ и ТСЗГЛ.

Из анализа графиков следует, что при снижении коэффициента загрузки трансформаторов величина $\text{tg}\varphi_{\text{т}}$ увеличивается. При загрузке их менее 20 % номинальной мощности $\text{tg}\varphi_{\text{т}}$ и от-

ляется критическим. Установленное критическое значение отличается от принятого на практике $\beta_{кр} = 0,4$. Это связано с совершенствованием конструктивного исполнения трансформаторов и улучшающегося качества трансформаторной стали, используемой при изготовлении магнитопроводов.

Для оценки влияния свойств электротехнической стали, применяемой в магнитопроводах силовых трансформаторов, на потери холостого хода были получены зависимости потерь холостого хода от номинальной мощности $\Delta P_x = f(S_{ном.т.})$. Анализ показал, что величина потерь холостого хода в силовых трансформаторах значительно меняется в зависимости от структурного состояния и вида проката трансформаторной стали. В результате установлено, что при производстве силовых трансформаторов средних номинальных мощностей следует применять магнитопроводы из аморфной стали, т.к. потери холостого хода в них в 4–5 раз ниже, чем при использовании холоднокатаной стали.

Также был проведен анализ коэффициента загрузки трансформаторов в РС ТСО г. Кемерово за период 2009–2014 гг. Обследование РС ТСО показало, что значительная часть потребляемой в них реактивной мощности обусловлена малой загрузкой трансформаторов, в результате tgφ и потери электроэнергии в несколько раз превышают нормируемое значение. Следовательно, важной задачей является повышение коэффициента загрузки трансформаторов при проведении организационных мероприятий по КРМ.

Для определения эффективности организационных мероприятий по КРМ был проведен расчет целесообразности замены малозагруженных трансформаторов трансформаторами меньшей номинальной мощности в рассматриваемой РС ТСО. Расчеты показали, что при этом значительно снижается потребление реактивной мощности и потери электроэнергии в РС ТСО и обеспечивается высокий экономический эффект, который составит 614,58 тыс. руб/год при сроке окупаемости менее 2 лет.

Третья глава посвящена разработке алгоритма оптимизации размещения КУ в РС ТСО.

Задача оптимизации размещения КУ представляет собой системную задачу, предусматривающую охват электрических сетей всех уровней напряжения, а также взаимосвязь процессов КРМ с рядом смежных задач. Поэтому анализ современного состояния задачи следует вести с позиции ее предварительного морфологического, функционального и информационного описания.

Процесс оптимизации размещения КУ в электрических сетях можно охарактеризовать с позиции теории многоуровневых систем, представив его в виде совокупности иерархически организованных подсистем, различных по своему функциональному назначению. Многоуровневая иерархическая модель оптимизации размещения КУ в РС ТСО приведена на рисунке 5.

Предложенная модель включает в себя уровень описания проблемы, уровень принятия решений и организационный уровень, объединенные многочисленными поперечными связями, и позволяет структурировать задачу на разных этапах ее реализации.

Задача оптимизации размещения КУ в РС ТСО является по своей сути многокритериальной. Математически в общем виде задача оптимизации размещения КУ в РС ТСО формулируется, исходя из условия минимизации целевой функции приведенных затрат:

$$Z = \sum_{i=1}^I Z_k^{пост}(Q_{ki}) + \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^I Z_k^{пер}(Q_{kin}) + \sum_{n=1}^N Z_{п}(Q_{kjn}, Q_{kin}) = Z_k + Z_{п} \rightarrow \min. \quad (5)$$

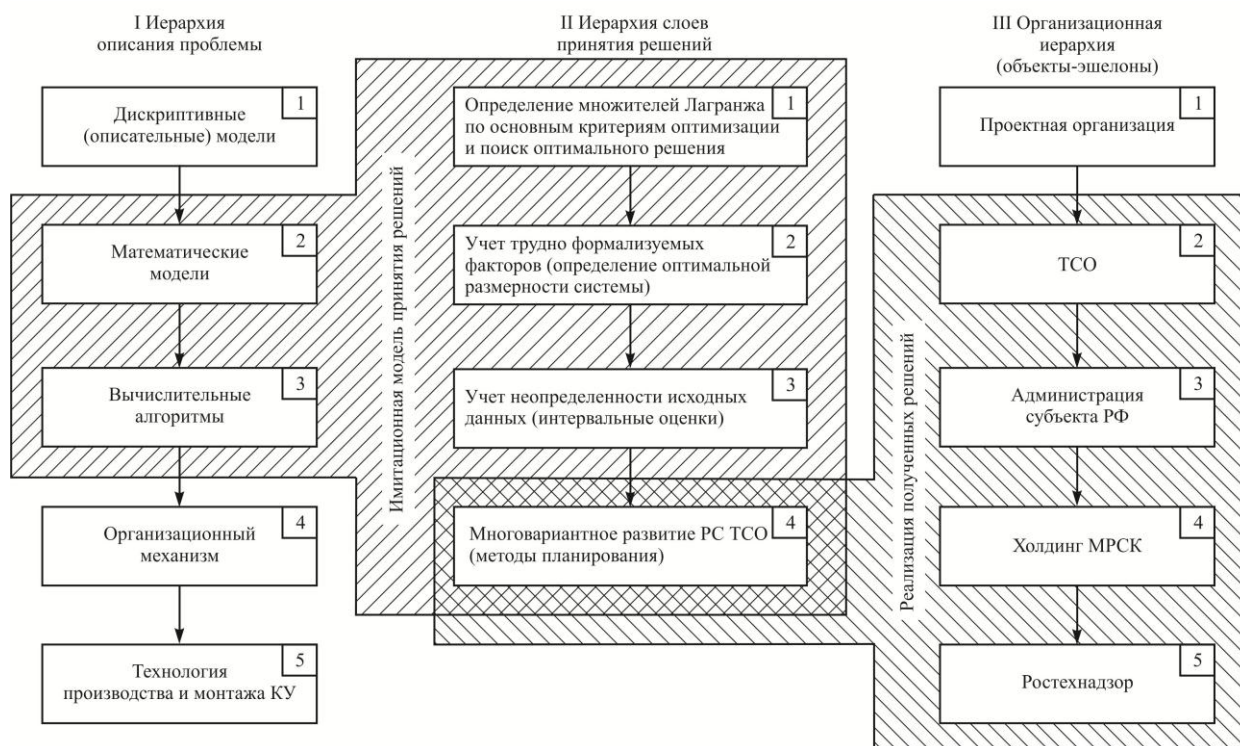


Рисунок 5 – Многоуровневая иерархическая модель оптимизации размещения КУ в РС ТСО

Первое слагаемое в формуле (5) связано с затратами на вновь устанавливаемые КУ, не зависящими от режима работы электрической сети и определяемыми мощностью КУ в каждом i -м узле из I узлов. Во втором слагаемом учтены затраты, связанные с эксплуатацией вновь устанавливаемых КУ мощностью Q_{kin} и зависящие от режима работы электрической сети. Общее число рассматриваемых характерных режимов сети при этом равно N . Затраты, связанные с потерями мощности в РС ТСО учтены в третьем слагаемом. Они зависят от выбранной мощности в данном режиме сети существующих КУ Q_{kjn} и вновь устанавливаемых КУ Q_{kin} . В итоге функцию минимума приведенных затрат можно представить в виде суммы затрат на КУ и затрат на потери мощности в сети.

При решении задачи оптимизации размещения КУ в РС ТСО должны быть введены следующие ограничения:

- по загрузке и установленной мощности КУ

$$Q_{ki \min} \leq Q_{kin} \leq Q_{ki \max}; \quad (6)$$

- по напряжениям в узлах сети

$$U_{mn \min} \leq U_{mn} \leq U_{mn \max}. \quad (7)$$

Для реализации данного подхода необходимо формализовать процесс решения задачи с использованием математических методов оптимизации. Анализ показал, что в наибольшей степени требованиям точности, полноты и удобства реализации для решения задачи оптимизации размещения КУ в РС ТСО отвечает метод неопределенных множителей Лагранжа.

При использовании метода неопределенных множителей Лагранжа постановка задачи оптимизации размещения КУ в РС ТСО рассматривается из условия, что в электрической сети имеется n потребителей, реактивные нагрузки Q_i которых известны. Искомыми переменными являются мощности КУ $Q_{k1}, Q_{k2}, \dots, Q_{kn}$, которые должны быть установлены в узлах сети. Требуется найти

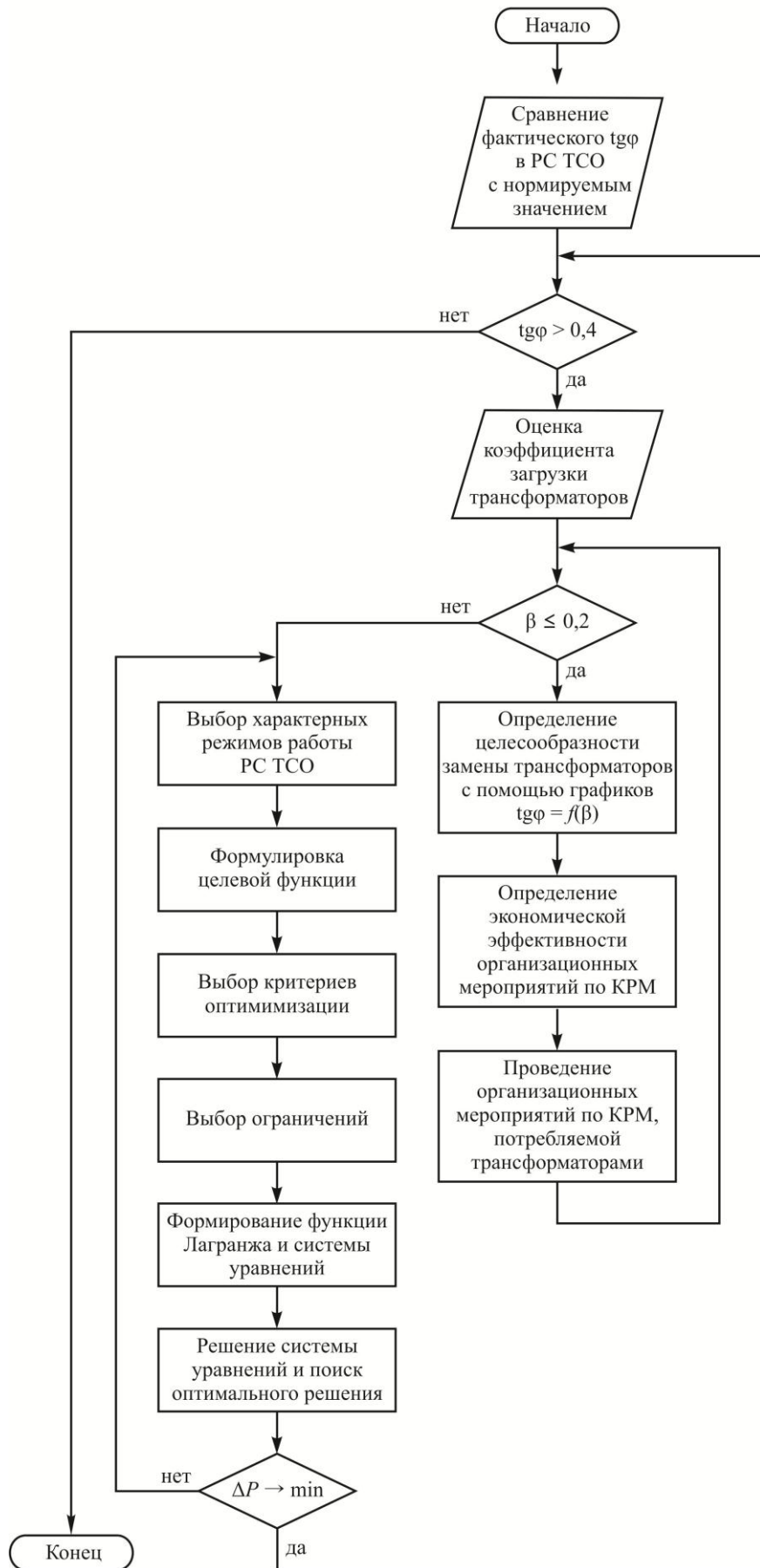


Рисунок 6 – Алгоритм оптимизации размещения КУ в РС ТСО

Далее была произведена оптимизация размещения КУ на стороне 6 кВ и на стороне 0,4 кВ РС ТСО с использованием полученной модели. В результате оптимизации на стороне 6 кВ потери в РС ТСО при среднем коэффициенте загрузки трансформаторов $\beta = 0,15$ снизились на 15,7 %, при $\beta = 0,502$ – на 3,3 %; на стороне 0,4 кВ потери при среднем коэффициенте загрузки трансформаторов $\beta = 0,15$ уменьшились на 16,7 %, при $\beta = 0,502$ – на 4,3 %.

Разработанная имитационная модель РС ТСО показала достаточно высокую эффективность оптимизации размещения КУ, обеспечив оптимальное распределение реактивной мощности и значительное снижение потерь электроэнергии в электрической сети. Кроме того, с помощью данной модели можно осуществлять управление реактивной мощностью в сети в зависимости от коэффициентов загрузки силовых трансформаторов, что позволяет получить наиболее оптимальный режим работы РС ТСО.

Расчеты показали, что в результате оптимизации размещения КУ в РС ТСО на стороне 6 кВ экономический эффект составит 833,6 тыс. руб, на стороне 0,4 кВ – 1032,0 тыс. руб. при сроке окупаемости менее одного года, что говорит о высокой эффективности предложенного алгоритма.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе содержится решение актуальной задачи снижения потерь электроэнергии в РС ТСО и повышения их энергоэффективности при оптимизации потребления реактивной мощности, что имеет важное научно-практическое значение для электросетевого комплекса.

Основные результаты выполненного исследования заключаются в следующем:

1. Установлено, что в общей структуре технологических потерь электроэнергии в РС ТСО доля потерь, обусловленных передачей реактивной мощности по элементам сети, составляет 47 %.

2. Выявлено, что при увеличении коэффициента реактивной мощности относительные значения пропускной способности, потерь электроэнергии и потерь напряжения в РС ТСО изменяются в кубической зависимости. Так, при среднем значении $\operatorname{tg}\varphi = 0,6$ пропускная способность РС ТСО снижается на 14 %, потери электроэнергии увеличиваются на 26 %, а потери напряжения – на 38 %.

3. Установлено, что критические значения коэффициентов загрузки асинхронных двигателей и силовых трансформаторов, при которых происходит резкое увеличение относительной величины потребляемой ими реактивной мощности, зависят от их конструктивного исполнения и материала магнитопровода и имеют более низкие значения по сравнению с принятыми на практике. Так, для электродвигателей критическое значение составило $k_{з.кр} = 0,3$ вместо установленного $k_{з.кр} = 0,45$, для трансформаторов – $\beta_{кр} = 0,2$ вместо $\beta_{кр} = 0,4$.

4. Представлена многоуровневая иерархическая модель процесса оптимизации размещения КУ в РС ТСО, включающая в себя уровень описания проблемы, уровень принятия решений и организационный уровень, объединенные многочисленными поперечными связями. Применение данной модели позволяет структурировать задачу оптимизации размещения КУ на разных этапах ее реализации.

5. Предложен алгоритм оптимизации размещения КУ на основе метода неопределенных множителей Лагранжа, позволяющий получать оптимальное

распределение реактивных мощностей в РС ТСО с учетом предварительной оценки коэффициентов загрузки силовых трансформаторов с использованием зависимости $\text{tg}\varphi_T = f(\beta)$.

6. Разработана имитационная модель РС ТСО, позволяющая осуществлять управление реактивной мощностью в сети в зависимости от коэффициентов загрузки силовых трансформаторов.

7. Установлено, что при оптимизации размещения КУ на стороне 6 кВ потери в РС ТСО при среднем коэффициенте загрузки трансформаторов $\beta = 0,15$ снизились на 15,7 %, при $\beta = 0,502$ – на 3,3 %, на стороне 0,4 кВ потери при среднем коэффициенте загрузки трансформаторов $\beta = 0,15$ уменьшились на 16,7 %, при $\beta = 0,502$ – на 4,3 %.

8. Определено, что в результате оптимизации размещения КУ в РС ТСО на стороне 6 кВ экономический эффект составил 833,6 тыс. руб., на стороне 0,4 кВ – 1032,0 тыс. руб. при сроке окупаемости менее одного года.

При этом перспективным направлением дальнейших исследований является развитие механизмов адаптивного управления реактивной мощностью в электрических сетях на базе концепции Smart Grid.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Ефременко, В. М. Анализ влияния нагрузки силовых трансформаторов на потребление реактивной мощности / В. М. Ефременко, Р. В. Беляевский // Вестн. Кузбасского гос. тех. унив., 2009. – № 6. – С. 46–48.

2. Ефременко, В. М. Стоимостные показатели комплектных конденсаторных установок / В. М. Ефременко, Р. В. Беляевский // Вестн. Кузбасского гос. тех. унив., 2010. – № 1. – С. 104–107.

3. Ефременко, В. М. Анализ зависимости коэффициента реактивной мощности от коэффициента загрузки силовых трансформаторов / В. М. Ефременко, Р. В. Беляевский // Вестн. Кузбасского гос. тех. унив., 2010. – № 1. – С. 107–109.

4. Ефременко, В. М. О расчетных стоимостных показателях статических тиристорных компенсаторов / В. М. Ефременко, Р. В. Беляевский // Вестн. Кузбасского гос. тех. унив., 2010. – № 2. – С. 106–109.

5. Беляевский, Р. В. Анализ влияния коэффициента загрузки асинхронных двигателей на потребление реактивной мощности / Р. В. Беляевский // Вестн. Кузбасского гос. тех. унив., 2010. – № 6. – С. 66–69.

6. Ефременко, В. М. Анализ коэффициента загрузки силовых трансформаторов в электрической сети промышленного предприятия / В. М. Ефременко, Р. В. Беляевский // Вестн. Кузбасского гос. тех. унив., 2010. – № 6. – С. 69–71.

7. Ефременко, В. М. О влиянии параметров асинхронных двигателей на потребление реактивной мощности и потери электрической энергии / В. М. Ефременко, Р. В. Беляевский // Вестн. Кузбасского гос. тех. унив., 2011. – № 1. – С. 76–79.

8. Ефременко, В. М. О влиянии перетоков реактивной мощности на параметры систем электроснабжения промышленных предприятий / В. М. Ефременко, Р. В. Беляевский // Вестн. Кузбасского гос. тех. унив., 2011. – № 3. – С. 60–63.

9. Ефременко, В. М. Реактивная мощность в электрических сетях угольных разрезов и ее влияние на формирование технологических потерь электро-

энергии / В. М. Ефременко, Р. В. Беляевский // Сборник статей «Электрификация и энергоэффективность». Отдельный выпуск Горного информационно-аналитического бюллетеня (научно-технического журнала), 2011. – № ОВ4. – С. 303–307.

10. Ефременко, В. М. Выбор оптимальных способов компенсации реактивной мощности в электрических сетях промышленных предприятий / В. М. Ефременко, Р. В. Беляевский, Н.В. Пономарев // Вестн. Кузбасского гос. тех. унив., 2011. – № 5. – С. 81–84.

11. Ефременко, В. М. О совершенствовании механизмов взаимоотношений энергоснабжающих организаций и потребителей в области компенсации реактивной мощности / В. М. Ефременко, Р. В. Беляевский // Вестн. Кузбасского гос. тех. унив., 2012. – № 2. – С. 59–62.

12. Ефременко, В. М. Расчет оптимального размещения компенсирующих устройств методом множителей Лагранжа / В. М. Ефременко, Р. В. Беляевский // Вестн. Кузбасского гос. тех. унив., 2012. – № 6. – С. 138–141.

Прочие публикации по теме исследования

13. Беляевский, Р. В. Влияние коэффициента загрузки силовых трансформаторов на потери электроэнергии / Р. В. Беляевский, О. А. Савинкина // Актуальные вопросы современной техники и технологии : Сборник докладов Международной научной заочной конференции (Липецк, 24 апреля 2010 г.). Т. II / Под ред. А. В. Горбенко, С. В. Довженко. – Липецк: Издательский центр «Де-факто», 2010. – С. 14–17.

14. Беляевский, Р. В. Оптимизация процесса компенсации реактивной мощности в системах электроснабжения промышленных предприятий / Р. В. Беляевский // Материалы докладов V Международной молодежной научной конференции «Тинчуриные чтения» / Под общ. ред. д-ра физ.-мат. наук, проф. Ю.Я. Петрушенко. В 4 т.; Т. 1. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2010. – С. 181–182.

15. Беляевский, Р. В. О влиянии малозагруженных силовых трансформаторов на потребление реактивной мощности / Р. В. Беляевский // Актуальные вопросы современной техники и технологии: Сборник докладов II-й Международной научной заочной конференции (Липецк, 2 октября 2010 г.). / Под ред. А. В. Горбенко, С. В. Довженко. – Липецк: Издательский центр «Де-факто», 2010. – С. 121–123.

16. Беляевский, Р. В. О необходимости увеличения коэффициента загрузки силовых трансформаторов / Р. В. Беляевский // Инновационная энергетика 2010 : Материалы второй научно-практической конференции с международным участием. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2010. – С. 90–93.

17. Беляевский, Р. В. О рационализации работы силовых трансформаторов на промышленных предприятиях / Р. В. Беляевский // Научно-исследовательские проблемы в области энергетики и энергосбережения : сб. тр. – Уфа : УГАТУ, 2010. – С. 102–104.

18. Беляевский, Р. В. О необходимости рационализации эксплуатации малозагруженных асинхронных двигателей / Р. В. Беляевский // Актуальные вопросы современной техники и технологии: Сборник докладов III-й Международной научной заочной конференции (Липецк, 29 января 2011 г.). В 2-х ч. Ч. II / Под ред. А. В. Горбенко, С. В. Довженко. – Липецк: Издательский центр «Гравис», 2011. – С. 14–16.

19. Беляевский, Р. В. О необходимости рационализации эксплуатации трансформаторов в системах электроснабжения промышленных предприятий /

Р.В. Беляевский // Материалы докладов VI Международной молодежной научной конференции «Гинчуриные чтения» / Под общ. ред. д-ра физ.-мат. наук, проф. Ю.Я. Петрушенко. В 4 т.; Т. 1. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2011. – С. 131–132.

20. *Беляевский, Р. В.* Оптимизация режимов компенсации реактивной мощности в системе электроснабжения ОАО «Кокс» / *Р. В. Беляевский, Н. В. Пономарев* // Сборник докладов студентов, аспирантов и профессорско-преподавательского состава университета. По результатам III Всероссийской, 56 научно-практической конференции «РОССИЯ МОЛОДАЯ», 11-15 апреля 2011 г. / Редкол.: В.Ю. Блюменштейн (отв. редактор) [и др.]; ГУ КузГТУ. – Кемерово, 2011. – С. 94–96.

21. Ефременко, В. М. Оптимизация размещения компенсирующих устройств в электрических сетях угольных разрезов / В. М. Ефременко, *Р. В. Беляевский* // Сборник статей участников IV Межрегиональной научно-практической конференции с международным участием «Инновации в угольной отрасли и экономике Кузбасса» (28-29 апреля 2011 г.) : в 2 ч. / Филиал ГУ КузГТУ в г. Белово. – Белово : Изд-во филиала ГУ КузГТУ в г. Белово, 2011. – Ч. 1. – С. 9–12.

22. *Беляевский, Р. В.* Анализ основных причин увеличения потребления реактивной мощности силовыми трансформаторами / *Р. В. Беляевский* // Актуальные вопросы современной техники и технологии: Сборник докладов IV-й Международной научной заочной конференции (Липецк, 23 апреля 2011 г.). / Отв. ред. А.В. Горбенко. – Липецк: Издательский центр «Гравис», 2011. – С. 81–83.

23. *Беляевский, Р. В.* Оптимизация компенсации реактивной мощности в электрических сетях промышленных предприятий / *Р. В. Беляевский, Н. В. Пономарев* // Энергосберегающие технологии: материалы Международной молодежной конференции / Национальный исследовательский Томский политехнический университет. Т. I. – Томск : Изд-во НИ ТПУ, 2011. – С. 120–123.

24. *Беляевский, Р. В.* О необходимости повышения загрузки малозагруженных силовых трансформаторов / *Р. В. Беляевский* // Энергосберегающие технологии: материалы Международной молодежной конференции / Национальный исследовательский Томский политехнический университет. Т. II. – Томск : Изд-во НИ ТПУ, 2011. – С. 237–240.

25. *Беляевский, Р. В.* О необходимости рационализации режимов работы электрооборудования на промышленных предприятиях / *Р. В. Беляевский* // Новые технологии в научных исследованиях, проектировании, управлении, производстве: труды Всерос. конф. – Воронеж : ГОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», 2011. – С. 161–162.

26. *Беляевский, Р. В.* О влиянии нагрузки асинхронных двигателей на потребление реактивной мощности / *Р. В. Беляевский* // Энергетика. Инновационные направления в энергетике. CALS-технологии в энергетике: материалы 4-ой Всероссийской научно-технической Интернет-конференции (1–31 октября 2010 г.). – Пермь : Изд-во Пермского национального исследовательского политехн. ун-та, 2011. С. 85–89.

27. *Беляевский, Р. В.* Основные факторы увеличения потребления реактивной мощности асинхронными двигателями / *Р. В. Беляевский* // Современная техника и технологии: исследования и разработки : Сборник докладов Международной научной заочной конференции (Липецк, 23 июля 2011 г.). / Отв. ред. А.В. Горбенко. – Липецк: Издательский центр «Гравис», 2011. – С. 61–64.

28. *Беляевский, Р. В.* Исследование влияния нагрузки трансформаторов на потери электроэнергии в промышленных электрических сетях / *Р. В. Беляевский* // Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук: материалы Всероссийской молодежной научной конференции с международным участием (7–10 ноября 2011 г.) / под общей ред. В. П. Юстратова; ФГБОУ ВПО «Кемеровский технологический институт пищевой промышленности». – Кемерово : Кузбассвуиздат, 2011. – С. 184–189.

29. *Беляевский, Р. В.* О влиянии конденсаторных установок на статическую устойчивость асинхронных двигателей / *Р. В. Беляевский* // Электротехнические комплексы и системы: межвузовский научный сборник; Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. – Уфа : УГАТУ, 2011. – С. 56–60.

30. Ефременко, В. М. К вопросу об оптимизации размещения компенсирующих устройств в электрических сетях промышленных предприятий / В. М. Ефременко, *Р. В. Беляевский* // Федоровские чтения – 2011. ХLI Всероссийская научно-практическая конференция (с международным участием) с элементами научной школы для молодежи. Москва, 9-11 ноября 2011 г. / Под ред. Б.И. Кудрина, Ю.В. Матюниной. – М. : Издательский дом МЭИ, 2011. – С. 63–65.

31. *Беляевский, Р. В.* Технические ограничения в задачах оптимизации размещения компенсирующих устройств / *Р. В. Беляевский* // Актуальные вопросы современной техники и технологии: Сборник докладов VI-й Международной научной конференции (Липецк, 28 января 2012 г.). / Отв. ред. А.В. Горбенко. – Липецк: Издательский центр «Гравис», 2012. – С. 70–72.

32. *Беляевский, Р. В.* Использование оптимизационных алгоритмов при выборе мощности и мест установки компенсирующих устройств / *Р. В. Беляевский* // Материалы докладов VII Международной молодежной научной конференции «Гинчуриные чтения» / Под общ. ред. Э.Ю. Абдуллазянова. В 4 т.; Т. 1. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2012. – С. 178–179.

33. *Беляевский, Р. В.* Комплексная оптимизация электрических сетей на основе концепции SmartGrid/ *Р. В. Беляевский* // Актуальные вопросы современной техники и технологии: Сборник докладов VII-й Международной научной конференции (Липецк, 21 апреля 2012 г.). / Отв. ред. А.В. Горбенко. – Липецк: Издательский центр «Гравис», 2012. – С. 114–116.

34. *Беляевский, Р. В.* Оптимизация размещения компенсирующих устройств в электрических сетях методом Лагранжа / *Р. В. Беляевский* // Инновации в технологиях и образовании: сборник статей участников V международной научной конференции «Инновации в технологиях и образовании» (18–19 мая 2012 г.): в 3 частях. / Филиал КузГТУ в г. Белово. – Белово: Изд-во филиала КузГТУ в г. Белово, 2012. – Ч. 1. – С. 279–282.

35. *Беляевский, Р. В.* Экономические механизмы управления реактивной мощностью в электрических сетях / *Р. В. Беляевский* // Актуальные вопросы современной техники и технологии: Сборник докладов VIII-й Международной научной конференции (Липецк, 23 июля 2012 г.). / Отв. ред. А.В. Горбенко. – Липецк: Издательский центр «Гравис», 2012. – С. 19–21.

36. *Беляевский, Р. В.* Влияние свойств электротехнической стали на потери холостого хода трансформаторов / *Р. В. Беляевский* // Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири. Сибресурс 2012. Материалы XIV Международной научно-практической конференции, 1–2 ноября 2012 г. / редкол.: В.Ю. Блюменштейн (отв. редактор), В.А. Колмаков (зам. отв. редактора), КузГТУ. – Кемерово, 2012. – С. 14–17.

37. *Беляевский, Р. В.* Структура технологических потерь электроэнергии в электрических сетях сетевых организаций / *Р. В. Беляевский* // Актуальные вопросы современной техники и технологии: Сборник докладов IX-й Международной научной конференции (Липецк, 27 октября 2012 г.). / Отв. ред. А.В. Горбенко. – Липецк: Издательский центр «Гравис», 2012. – С. 86–88.

38. *Беляевский, Р. В.* Повышение эффективности компенсации реактивной мощности путем оптимизации размещения компенсирующих устройств / *Р. В. Беляевский* // Инновационный конвент «Кузбасс: образование, наука, инновации». Т. 2. – Кемерово: ПОЛИГРАФ, 2012. – С. 21–24.

39. *Беляевский, Р. В.* Оптимизация потерь электроэнергии в трансформаторах на промышленном предприятии / *Р. В. Беляевский* // Федоровские чтения – 2012. XLII Всероссийская научно-практическая конференция (с международным участием) с элементами научной школы для молодежи. Москва, 7-9 ноября 2012 г. / Под ред. Б.И. Кудрина, Ю.В. Матюниной. – М.: Издательский дом МЭИ, 2012. – С. 57–59.

40. *Беляевский, Р. В.* Решение задачи выбора компенсирующих устройств с использованием непрямых методов оптимизации / *Р. В. Беляевский* // Сборник докладов X-й Юбилейной Международной научной конференции «Актуальные вопросы современной техники и технологии» (г.Липецк, 26 января 2013 г.). / Отв. ред. А.В. Горбенко. – Липецк: Издательский центр «Гравис», 2012. – С. 54–56.

41. *Беляевский, Р. В.* Исследование потерь холостого хода в трансформаторах сетевых организаций / *Р. В. Беляевский* // Материалы докладов VIII Международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения» / Под общ. ред. ректора КГЭУ Э.Ю. Абдуллазянова. В 4 т.; Т. 1. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2013. – С. 143–144.

42. Наумкин, Р. Б. Создание модели распределительной электрической сети 6-10 кВ/ Р. Б. Наумкин, И. Б. Наумкин, В. М. Ефременко, *Р. В. Беляевский* // Сборник материалов V Всероссийской, 58 научно-практической конференции молодых ученых «РОССИЯ МОЛОДАЯ», 16-19 апреля 2013 г. В 2 т. Т. 1 / Редкол.: В.Ю. Блюменштейн (отв. редактор) [и др.]; КузГТУ. – Кемерово, 2013. – С. 154–156.

43. *Беляевский, Р. В.* Основные факторы увеличения потерь холостого хода трансформаторов / *Р. В. Беляевский* // Инновации в технологиях и образовании: сб. ст. участников VI Международной научно-практической конференции «Инновации в технологиях и образовании» (17-18 мая 2013 г.): в 4 частях. / Филиал КузГТУ в г. Белово. – Белово, Россия; Изд-во университета «Св. Кирилла и Св. Мефодия», Велико Тырново, Болгария, 2013. – Ч. 2. – С. 255–259.

44. *Беляевский, Р. В.* Оценка влияния передачи реактивной мощности на параметры распределительных сетей 6–10 кВ/ *Р. В. Беляевский* // Актуальные вопросы современной техники и технологии: Сборник докладов XIII-й Международной научной конференции (Липецк, 25 октября 2013 г.). / Отв. ред. А.В. Горбенко. – Липецк: Издательский центр «Гравис», 2013. – С. 68–71.

45. *Беляевский, Р. В.* Исследование структуры технологических потерь электроэнергии при ее передаче по электрическим сетям территориальных сетевых организаций / *Р. В. Беляевский* // Материалы докладов IX Международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения» / Под общ. ред. ректора КГЭУ Э.Ю. Абдуллазянова. В 4 т.; Т. 1. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2014. – С. 120–121.

46. *Беляевский, Р. В.* Снижение потерь электроэнергии в распределительных сетях филиала ОАО «МРСК Сибири» - «Кузбассэнерго – РЭС» / *Р. В. Беляевский, М. В. Григашкин* // Инновации в технологиях и образовании: сб. ст. участников VII Международной научно-практической конференции «Инновации в технологиях и образовании», 28–29 марта 2014 г.: в 4 ч. / Филиал КузГТУ в г. Белово. – Белово: Изд-во филиала КузГТУ в г. Белово, Россия; Изд-во ун-та «Св. Кирилла и Св. Мефодия», Велико Тырново, Болгария, 2014. – Ч. 1. – С. 197–201.

47. *Беляевский, Р. В.* Повышение энергоэффективности распределительного электросетевого комплекса / *Р. В. Беляевский, М. В. Григашкин* // Тезисы докладов межвузовской молодежной научной конференции «Вклад молодежной науки в реализацию Стратегии «Казахстан-2050»», посвященной 80-летию Караганды (17–18 апреля 2014 г.). В 2-х ч. Ч. 1 / Министерство образования и науки РК; Карагандинский государственный технический университет. – Караганда: Изд-во КарГТУ, 2014. – С. 58–59.

48. Efremenko, V. M. Evaluation of Explosion Protection Means of Mine Electrical Equipment for Operation in Excavations of Coal Mines / V. M. Efremenko, R. V. Belyaevskiy // MINING 2014: Taishan Academic Forum – Project on Mine Disaster Prevention and Control, October 17–20, 2014 / Qinqdao, China. – Amsterdam – Paris – Beijing: Atlantis Press, 2014. – P. 190–194.

49. *Беляевский, Р. В.* Влияние реактивной мощности на параметры распределительных сетей 6–10 кВ территориальных сетевых организаций / *Р. В. Беляевский, В. М. Ефременко* // Введение в энергетику. Материалы I Всероссийской молодежной научно-практической конференции, 17–19 декабря 2014 г., Кемерово [Электронный ресурс] / ФГБОУ ВПО «Кузбас. гос. техн. ун-т им. Т. Ф. Горбачева»; редкол.: В.П. Тащиенко (отв. редактор) [и др.]. – Кемерово, 2014.

50. *Беляевский, Р. В.* Исследование структуры технологических потерь электроэнергии в электрических сетях ТСО / *Р. В. Беляевский, В. М. Ефременко* // Инновации в технологиях и образовании: сб. ст. участников VIII Международной научно-практической конференции «Инновации в технологиях и образовании», 5–6 марта 2015 г.: в 5 ч. / Филиал КузГТУ в г. Белово. – Белово: Изд-во филиала КузГТУ в г. Белово, Россия; Изд-во ун-та «Св. Кирилла и Св. Мефодия», Велико Тырново, Болгария, 2015. – Ч. 2. – С. 189–191.

Личный вклад автора в работах, опубликованных в соавторстве, заключается в следующем:

[1], [3], [5], [7–9], [49], [50] – выполнение основного объема исследований, обработка полученных результатов, формулировка выводов;

[2], [4], [6], [13], [21], [42], [46], [47] – разработка основных теоретических положений, проведение расчетов, формулировка выводов;

[11], [39], [48] – проведение аналитического обзора, формулировка выводов;

[10], [12], [20], [23] – построение моделей, проведение вычислительного эксперимента, формулировка выводов.