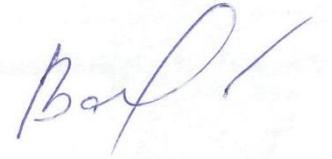


На правах рукописи



Варнавский Кирилл Александрович

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ
СИСТЕМ ВНЕШНЕГО И ВНУТРЕННЕГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ
ПРЕДПРИЯТИЙ НА ОСНОВЕ УВЕЛИЧЕНИЯ ИХ
ИНФОРМАЦИОННОГО РЕСУРСА

Специальность: 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Кемерово – 2017

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

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Матвеев Виктор Николаевич

Официальные оппоненты:
Воропай Николай Иванович член-корреспондент РАН,
доктор технических наук, профессор,
ФБГУН «Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук», научный руководитель

Павлюченко Дмитрий Анатольевич кандидат технических наук, доцент,
ФБГОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет», кафедра «Системы электрооборудования предприятий», заведующий кафедрой

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (г. Томск)

Защита состоится «25» мая 2017 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.102.01 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева» по адресу: 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28, тел./факс: (384-2) 36-16-87, e-mail: siyu.eav@kuzstu.ru

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

<http://science.kuzstu.ru/wp-content/docs/OAD/Soresearchers/2017/var/Dissertation.pdf>

Автореферат разослан « ____ » _____ 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Семькина Ирина Юрьевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Наметившаяся в последние годы тенденция роста числа остановок производственного оборудования горных и промышленных предприятий из-за внезапных прекращений подачи электроэнергии свидетельствует о снижении эффективности функционирования систем электроснабжения (СЭС) предприятий, как внешних, так и внутренних. Под эффективностью функционирования СЭС понимается ее свойство сохранять работоспособность и гарантированно обеспечивать электроснабжение потребителей при возникающих и изменяющихся случайным образом событиях как внутри, так и вне СЭС.

Незапланированные простои промышленного оборудования из-за случайных перерывов электропитания, зачастую длительные, приводят к нарушениям сложных технологических процессов, увеличивая производственные издержки, что, в конечном счете, отрицательно сказывается на конкурентоспособности продукции предприятия. Для отдельных производств случайные перерывы электроснабжения, помимо остановки технологического процесса, могут значительно снизить производственную безопасность.

Для СЭС, как объекта со сложной структурой, высокая эффективность функционирования во многом обеспечивается использованием определенных принципов при ее создании и дальнейшем развитии. Однако на практике в большинстве случаев развитие СЭС происходит при отсутствии должного обоснования изменений структуры системы. Поэтому многие существующие СЭС имеют разнообразные структурные недостатки, обусловленные их «историческим» развитием, которые приводят к неожиданно тяжелым последствиям для конечных потребителей при возникновении аварийных ситуаций на отдельных объектах СЭС. Подтверждением этому служат участвовавшие в последние годы случаи длительных прекращений подачи электроэнергии горным предприятиям Кузбасса из-за аварий в системах внешнего электроснабжения.

Помимо свойств структуры, значительное влияние на СЭС оказывает человек-оператор, выполняющий ключевую роль в процессе управления и обслуживания СЭС, поэтому учет данного факта обязателен при проведении исследования эффективности функционирования.

Отсутствие официальных методик проведения подобной многофакторной оценки эффективности функционирования СЭС определяет актуальность задачи по поиску и разработке новых способов повышения эффективности функционирования СЭС как с научной точки зрения, так и с целью практического применения. Для решения данной задачи необходимо использовать комплексный подход, позволяющий учесть различные факторы, которые влияют на эффективность функционирования СЭС.

Степень разработанности темы исследования. Значительный вклад в исследование эффективности функционирования СЭС внесли такие ученые, как Гамм А.З., Абраменкова Н.А., Воропай Н.И., Ефимов Д.Н., Васин В.П., Войтов О.Н., Голуб И.И., Фокин Ю.А., Туфанов В.А., Кудрин Б.И., Разгильдеев Г.И., Абрамович Б.Н., Лоскутов А.Б., P. Hines, S. Blumsack и др.

Полученные результаты в работах этих авторов позволили сделать вывод о том, что эффективность функционирования СЭС в значительной степени зависит от ее структурных и информационных качеств, характеристики которых до сих пор остаются предметом дискуссий.

Цель работы – разработать научно-обоснованные рекомендации, обеспечивающие повышение эффективности функционирования систем внешнего и внутреннего электроснабжения предприятий.

Идея работы – повышение эффективности функционирования СЭС достигается с помощью увеличения информационного ресурса СЭС посредством совершенствования формирующих его информационных составляющих – структурной и оперативной.

Основные задачи исследования:

1. Провести анализ влияния структурной и оперативной составляющих информационного ресурса СЭС на бесперебойность подачи электроэнергии потребителям.

2. Разработать программу проведения поэтапной комплексной оценки эффективности функционирования СЭС на основе анализа заложенной в ней структурной и оперативной информации.

3. Создать информационно-энергетическую модель (ИЭМ) СЭС промышленного предприятия, позволяющую учесть топологические и эксплуатационные характеристики ее функционирования.

4. Провести анализ качества структур систем внешнего электроснабжения горных и промышленных предприятий.

5. Провести оценку разработанных вариантов повышения эффективности функционирования систем внешнего и внутреннего электроснабжения предприятий при помощи предложенного подхода к исследованию эффективности функционирования СЭС.

Научная новизна работы:

- в качестве критериев, оценивающих свойства топологии СЭС, впервые применены предложенные в работе структурные показатели;

- предложен способ проведения информационного анализа СЭС, отличающийся поэтапным исследованием структурной и оперативной составляющих, при помощи которых формируется итоговый комплексный показатель эффективности функционирования – информационный ресурс СЭС;

- предложен способ выявления «ключевых точек» СЭС, отличающийся использованием степени участия элемента в формировании структуры СЭС, определяемой при помощи его ранга;

- предложен способ структурной классификации СЭС, отличающийся использованием в качестве основного классификатора характеристики, определяющей совершенство топологии СЭС – упорядоченности структуры.

Теоретическая и практическая значимость. Предложенный подход к исследованию СЭС может быть использован для решения широкого спектра технико-эксплуатационных задач, таких как:

- комплексная оценка эффективности функционирования существующих СЭС различных уровней;

- анализ и определение наиболее рационального варианта реконструкции систем внешнего и внутреннего электроснабжения горных и промышленных предприятий;

- выявление «ключевых точек» СЭС и выработка мероприятий по снижению их значимости;

- разработка штатных расписаний структурных подразделений предприятия, должностных инструкций для электротехнического персонала, схем обслуживания и ремонта производственных электроустановок.

Полученные научные результаты могут быть использованы в исследованиях, направленных на повышение эффективности функционирования крупных электроэнергетических объединений, а также в проектах по созданию электрических сетей нового поколения Smart Grid.

Методология и методы исследования. Проведенные исследования основывались на элементах системного анализа, общих положениях теорий графов и информации, методах матричного анализа и математической статистики, имитационном моделировании.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Использованный в качестве комплексного показателя информационный ресурс СЭС, учитывающий как топологические свойства СЭС, характеризующие структурными показателями, так и особенности управляющих воздействий на элементы СЭС, обусловленные перемещением потоков оперативной информации, определяет эффективность функционирования СЭС.

2. Комплексный подход, включающий исследование топологии СЭС с позиции оптимальности по критерию упорядоченности и оценку информационной насыщенности СЭС, позволяет выявить наиболее рациональные варианты ее модернизации и реконструкции.

3. Ранжирование элементов СЭС с позиции их структурной значимости позволяет выявить подстанции (либо отдельные секции шин мощных подстанций) – «ключевые точки», от функционирования которых зависит бесперебойное электроснабжение большого числа потребителей.

Достоверность научных положений и выводов, сформулированных в диссертационной работе, обеспечивается корректностью принятых допущений при постановке задач, использованием апробированных методов структурного анализа и оценки информационной насыщенности сложных технических систем, а также подтверждается результатами вычислительных экспериментов, полученных в процессе исследований, согласующимися со статистическими данными

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. Полученные в диссертационной работе выводы нашли применение в системе внутреннего электроснабжения КАО «АЗОТ» (г. Кемерово).

Структурный анализ систем внешнего электроснабжения угледобывающих предприятий Кузбасса был проведен при финансовой поддержке АО ХК «СДС-Уголь» в рамках гранта на проведение исследований в области энергоэффективности и энергосбережения.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались на IX и XV Международных научно-практических конференциях «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири. Сибресурс» (г. Кемерово, 2012 и 2014 гг.), VII Международной научно-практической конференции «Инновации в технологиях и образовании» (г. Белово, 2014 г.), III Международной научно-практической конференции «Современные тенденции и инновации в науке и производстве» (г. Междуреченск, 2014 г.), а также на ежегодных Всероссийских научно-практических конференциях молодых ученых «Россия молодая», проводимых в Кузбасском государственного технического университете имени Т.Ф. Горбачева (г. Кемерово, 2012-2014 гг.), научно-технических семинарах на кафедре механики и электроники Шаньдунского технологического университета (г. Циндао, КНР, 2016 г.).

Публикации. По результатам выполненных исследований опубликовано 10 печатных работ, 3 из которых – в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, включающего 104 наименования. Работа изложена на 149 страницах машинописного текста, содержит 55 рисунков, 20 таблиц и 3 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 современного состояния эффективности функционирования систем внешнего и внутреннего электроснабжения предприятий.

Для многих предприятий перерыв электроснабжения в несколько секунд (а иногда даже в доли секунды) может привести к нарушению непрерывного технологического процесса и остановке производства, что, как минимум, чревато ощутимым экономическим ущербом. В отдельных случаях, например, для предприятий химической и горной промышленности, случайный перерыв подачи электроэнергии может создать условия для возникновения аварийных ситуаций, угрожающих жизни и здоровью работников предприятия, а также нарушению экологической безопасности.

Исходя из аварийной статистики системы внутреннего электроснабжения крупнейшего химического предприятия Кемеровской области – Кемеровского АО «АЗОТ» (рисунок 1), объединенной энергосистемы (ОЭС) Сибири (рисунок 2), а также данных о числе случаев прекращения подачи электроэнергии горным предприятиям Кузбасса (в 2009 г. – 5 отключений, а в

2013 г. – 17, в 2014 г. – 21, в 2015 г. – 29), можно отметить снижающуюся эффективность функционирования питающих СЭС всех уровней, а соответственно, снижение надежности электроснабжения потребителей.

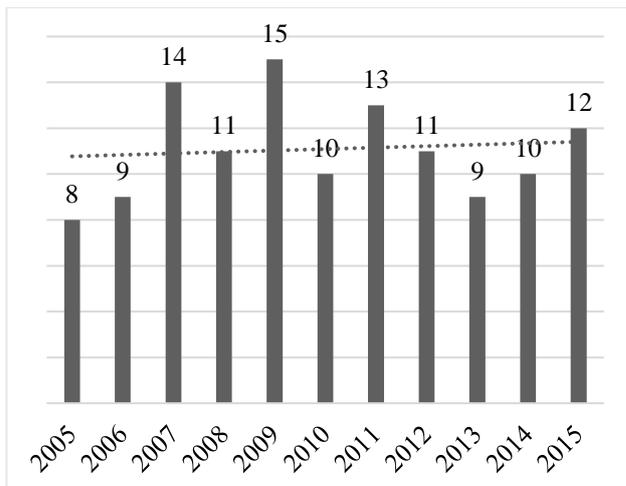


Рисунок 1 – Количество случаев нарушений электроснабжения потребителей КАО «АЗОТ» за 2005-2015 гг.

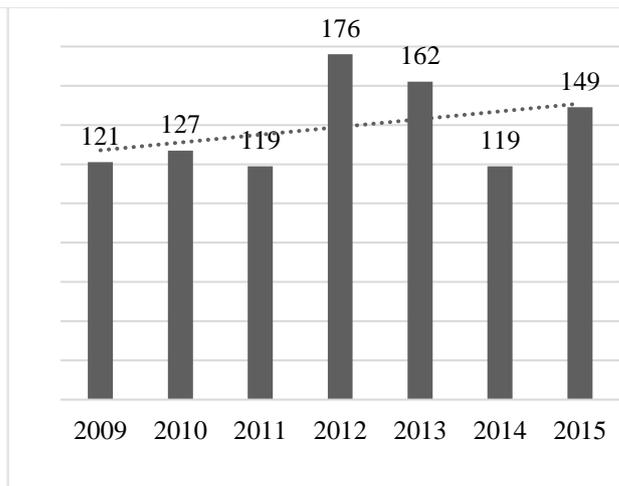


Рисунок 2 – Количество случаев нарушений электроснабжения потребителей ОЭС Сибири за 2009-2015 гг.

Проведенный анализ современного состояния систем внешнего и внутреннего электроснабжения горных и промышленных предприятий позволил выявить следующие основные причины сложившейся ситуации.

1. Несовершенство топологии (структуры) СЭС, заключающееся в недостаточном количестве резервных источников и схем питания, не всегда позволяет обеспечить необходимый уровень надежности и бесперебойности электроснабжения потребителей.

2. Не продуманное развитие СЭС способствует появлению в них скрытых недостатков различного характера, которые оказывают негативное влияние на процессы оперативного управления и организации ремонтных работ, топологические качества и т.п., вследствие чего возникающие нештатные и аварийные ситуации на объектах СЭС могут приводить к неожиданно тяжелым последствиям для конечных потребителей.

3. Отсутствие предшествующего реорганизациям и реконструкциям СЭС комплексного анализа их влияния на эффективность их функционирования (во многом из-за неопределенности выбора конкретной методики проведения подобного анализа).

Вторая глава посвящена описанию разработанного способа информационного исследования эффективности функционирования СЭС.

Любая сложная техническая система обладает определенным количеством внутренней информации, которая определяется двумя составляющими: структурной и оперативной.

Структурная информация характеризует количество и качество связей между элементами системы, а оперативная – отражает ее наполненность различными физическими взаимодействиями, перемещающимися в системе в виде потоков вещества, энергии и информации с различными скоростями. При

этом принято допущение: связь между двумя элементами отражает потенциальную возможность наполнения ее информацией, энергией и веществом.

Оба указанных вида информации формируют информационный ресурс системы, определяющий ее эффективность: чем больше информационный ресурс, тем выше эффективность функционирования системы.

В СЭС структурную информацию определяет ее топология, формируемая силовым стационарным электрооборудованием и линиями электропередачи (ЛЭП), а оперативная информация характеризует изменение состояний элементов СЭС, в результате их взаимодействий, а также вызванных действиями обслуживающего персонала и других управляющих элементов СЭС.

Исследование структурной информации, заложенной в СЭС, дает возможность оценить возможность ее топологии обеспечить надежное бесперебойное электроснабжение потребителей, определить целесообразность дальнейшего развития СЭС и проанализировать влияние возможных вариантов реконструкции на ее структуру.

Оперативная информация, циркулирующая в СЭС, позволяет оценить способность системы своевременно и адекватно приспосабливаться к изменяющимся условиям, как внутри, так вне системы. При этом учитываются скорость и качество оперативных действий электротехнического персонала и управляющих устройств по изменению состояния СЭС, потенциальные возможности оборудования по изменению режимов его работы.

Определение информационного ресурса СЭС проводится поэтапно. Первоначально проводится структурный анализ СЭС, для чего на основе принципиальной схемы СЭС строится ориентированный граф. Ориентация ветвей графа, за которые принимаются соответствующие воздушные или кабельные ЛЭП, соответствует направлению движения электроэнергии в этих ЛЭП; вершины графа – подстанции (ПС), либо отдельные секции шин (СШ) мощных ПС.

Далее построенный граф преобразуется в аналитический вид – матрицу смежности вершин. Строки и столбцы матрицы смежности вершин $M_G = [m_{ij}]$ соответствуют вершинам графа. Элементы матрицы m_{ij} могут принимать значения «0» или «1»: если между вершинами есть связь, то на пересечении соответствующих строки и столбца ставится «1» (в строке, соответствующей номеру вершины, от которой направлено ребро, и в столбце, соответствующем номеру вершины, к которой направлено ребро), если связи нет, – «0».

При помощи полученной матрицы смежности определяются структурные показатели, оценивающие качество структуры СЭС.

- Показатель смежности, определяющий наблюдаемость структуры системы, т.е. возможности получения питания каждым приемником от любого источника по максимально возможному количеству путей

$$A = \frac{\text{rank}(M_G)}{s_m}, \quad (1)$$

где $\text{rank}(M_G)$ – ранг матрицы смежности; s_m – общее число элементов системы.

Для полностью наблюдаемой структуры системы ранг матрицы смежности вершин равен количеству элементов графа системы.

- Энтропия структуры, характеризующая равномерность распределения связей между элементами

$$H(p) = -\sum_{i=1}^{s_M} \lambda_i \log_2 \lambda_i, \quad (2)$$

где λ_i – частота использования связей i -го элемента, причем $\sum_{i=1}^{s_M} \lambda_i = 1$.

$$\lambda_i = \frac{p_i}{p_\Sigma}, \quad (3)$$

где p_i – число связей i -го элемента, p_Σ – сумма числа связей элементов системы.

При идеальном распределении связей между элементами все частоты использования одинаковы, при этом

$$H(p) = \log_2 s_M \quad (4)$$

имеет максимальное значение.

При необходимости сравнения показателей систем с разным количеством элементов использование формулы (2) может привести ошибочным выводам из-за возрастания энтропии с увеличением числа элементов системы. Для устранения этого недостатка формула (2) была модифицирована:

$$H(p) = \frac{-\sum_{i=1}^{s_M} \lambda_i \log_2 \lambda_i}{\log_2 s_M}. \quad (5)$$

- Интегральный показатель – упорядоченность структуры:

$$G = A \cdot H(p). \quad (6)$$

Упорядоченность структуры позволяет оценить приближенность исследуемой структуры к «сотовой», принятой за эталонную ($A = 1$; $H(p) = 0,987$; $G = 0,987$).

На рисунке 3 представлены три небольших фрагмента СЭС, состоящих из нескольких ПС и конечных потребителей в виде электродвигателей. Для каждого из фрагментов построены ориентированные графы, матрицы смежности и определены структурные показатели. Из приведенных данных видно, что при применении более надежных схем распределительного устройства питающей ПС (ПС 2 на рисунке 3, б), либо при добавлении нового источника электроэнергии (ПС 3 на рисунке 3, в), значения структурных показателей возрастают. Увеличение показателей объясняется появлением в структурах СЭС новых потенциальных путей для передачи электроэнергии, благодаря чему повышается надежность электроснабжения конечных потребителей.

При анализе структуры СЭС важно знать наиболее загруженные связями элементы – «ключевые точки», т.к. от их надежной работы во многом зависит бесперебойность электроснабжения большого количества потребителей СЭС. Выявить такие элементы возможно посредством определения рангов элемен-

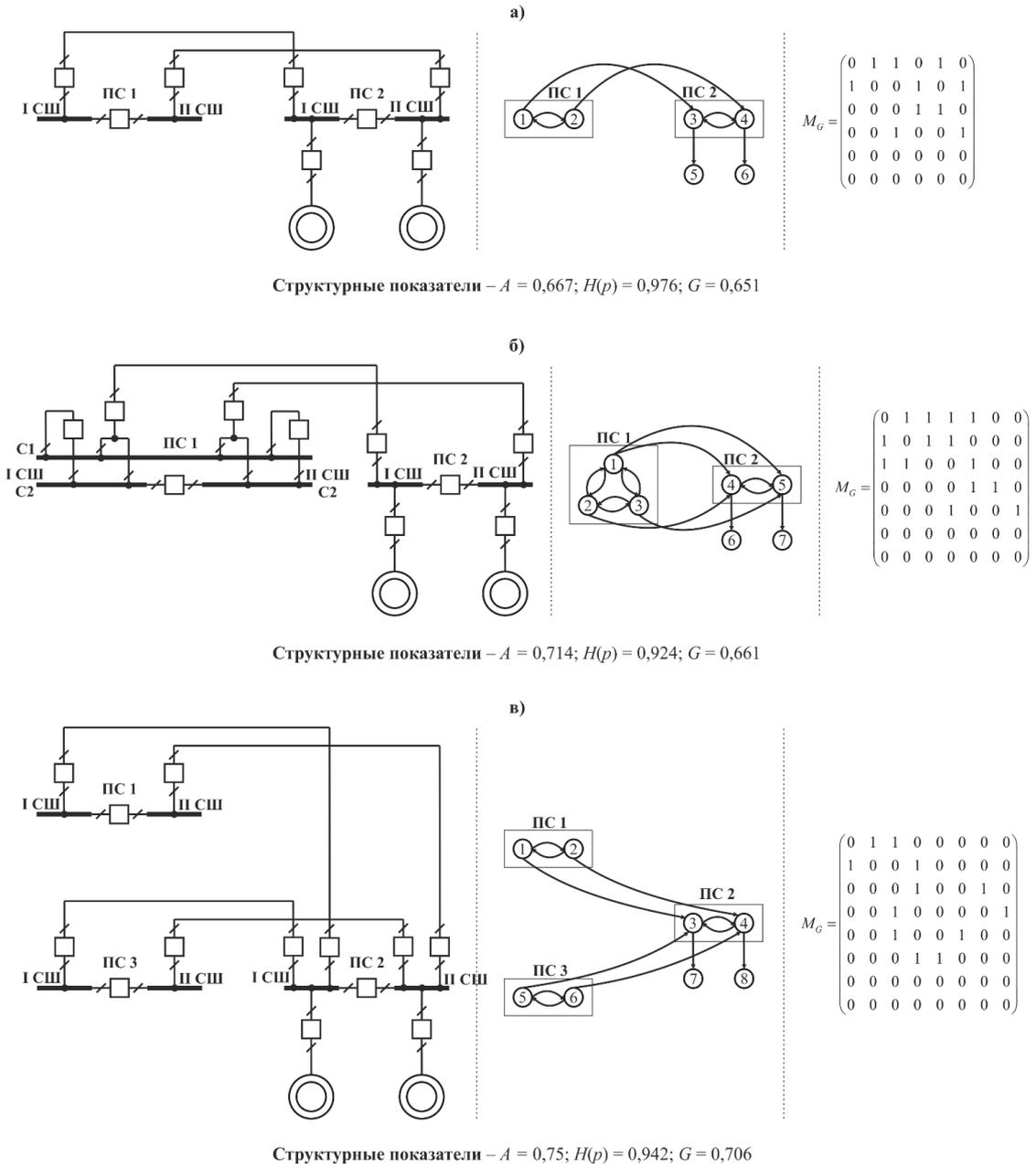


Рисунок 3 – Примеры усложняющихся структур СЭС

тов системы R_i . Ранг элемента позволяет оценить его значимость и степень участия в формировании структуры системы

$$R_i = \frac{\sum_{j=1}^n b_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n b_{ij}}, \tag{7}$$

где b_{ij} – элементы матрицы $\mathbf{B} = \mathbf{M}_G^k, k = 4$, причем $\sum_{i=1}^{S_M} R_i = 1$.

Чем больше ранг элемента, тем больше связей отходит непосредственно от этого элемента, а также больше количество путей проходит через данный элемент.

Следующим этапом определения информационного ресурса является

анализ потоков оперативной информации в СЭС. Потоки оперативной информации отражают постоянно изменяющиеся состояния элементов системы. В то же время эти потоки перемещаются по путям с конечной скоростью, поэтому следует говорить о насыщенности системы оперативной информацией.

Для оценки насыщенности СЭС оперативной информацией построенный граф расширяется до ИЭМ за счет внесения управляющих элементов и связей, по которым циркулирует оперативная информация. Затем определяются конкретные пути движения информации и при помощи оперативного показателя, учитывающего такие важные качества информации как: достоверность, объем и скорость ее перемещения, вычисляется насыщенность СЭС оперативной информацией:

$$D = \sum_{l=1}^{l_m} p_l f_l I_l, \text{ бит/с}, \quad (8)$$

где I_l – количество оперативной информации в l -ом пути, определяющее число распознаваемых технических состояний в данном пути; f_l – скорость перемещения оперативной информации в l -ом пути; p_l – вероятность получения достоверной оперативной информации в l -ом пути; l_m – количество путей в системе.

Для определения количества оперативной информации во всех путях графа может быть использована формула К. Шеннона:

$$I_l = - \sum_{k=1}^{Q_{lm}} p_{lk} \log_2 p_{lk}, \text{ бит}, \quad (9)$$

где p_{lk} – вероятность появления k -го состояния в l -ом пути; Q_{lm} – количество возможных состояний в l -ом пути.

При отсутствии достоверных вероятностей состояний в путях можно принять, что данные равновероятны. В таком случае количество оперативной информации l -го пути будет максимально и определяется по формулам

$$I_l = \log_2(Q_{lm}), \text{ бит}, \quad (10) \quad Q_{lm} = \frac{\sum_{i=1}^{M_l} Q_{li}^e}{M_l}, \quad (11)$$

где Q_{li}^e – число возможных состояний i -х ребер (число технических состояний i -х элементов), входящих в l -й путь; M_l – количество ребер в l -й пути.

Скорость перемещения оперативной информации в пути определяется как

$$f_l = \frac{1}{\sum_{i=1}^m T_{li}}, \text{ 1/с}, \quad (12)$$

где T_{li} – время определения состояния в i -м ребре l -го пути, с; m – количество ребер в пути.

Для оценки всей внутренней информации СЭС использован информационный ресурс СЭС – комплексный показатель, значение которого формируется структурной и оперативной составляющими

$$R = G \cdot D, \text{ бит/с}. \quad (13)$$

Таким образом, использование предлагаемого комплексного критерия, позволяет провести анализ эффективности функционирования СЭС (в том числе эргатических), учитывая как топологические свойства СЭС, так и особенности управляющих воздействий на элементы СЭС.

В третьей главе приводится апробация разработанного способа комплексного анализа эффективности функционирования на примере СЭС КАО «АЗОТ», а также предложены обоснованные варианты ее совершенствования.

Для проведения анализа был построен ориентированный граф, отражающий структуру СЭС 6-110 кВ предприятия. Детализация графа произведена до уровня отдельных СШ ПС. На основе графа была построена матрица смежности вершин и определены структурные показатели СЭС КАО «АЗОТ».

Далее для анализа потоков оперативной информации и определения оперативного показателя эргатической СЭС КАО «АЗОТ» были построены ИЭМ для каждого из 9-ти районов обслуживания (в качестве примера на рисунке 4 приведена ИЭМ района обслуживания ПС «Азот-3,4»).

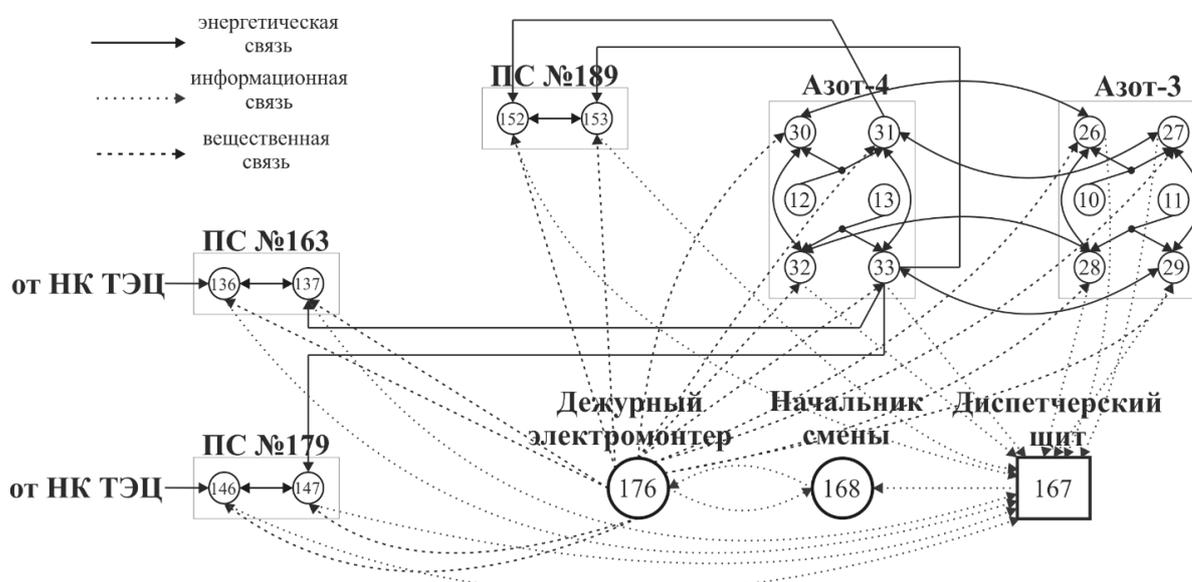


Рисунок 4 – ИЭМ района обслуживания ПС «Азот-3,4»

Построенные модели отражают пути движения оперативной информации при выполнении персоналом следующих эксплуатационных операций:

- переключение вводных коммутационных аппаратов, а также аппаратов, обеспечивающих резервное питание СШ;
- выполнение послеаварийных осмотров;
- подготовка рабочего места и допуск ремонтной бригады.

За возможные состояния элементов в путях были приняты:

- включенные, нормально и аварийно отключенные (под действием различных защит) положения всех коммутационных аппаратов СШ;
- прием сигналов о положении коммутационных аппаратов, а также о возникновении аварийных отключений;
- информационный обмен между дежурными электромонтерами и начальником смены;
- исполнение дежурным электромонтером полученных команд.

При определении скорости циркуляции оперативной информации учитывались: время передачи и приема оперативной информации персоналом, среднее время перемещения персонала от мест базирования к объектам района обслуживания и среднее время выполнения поставленных задач. Вероятность правильного определения состояния в l -х путях p_l определялось произведением вероятностей i -х ребер, входящих в l -й путь.

Итоговые результаты определения информационных параметров существующей СЭС КАО «АЗОТ» показаны в таблице 1.

Таблица 1

Информационные параметры СЭС КАО «Азот»

A	$H(p)$	G	D , бит/с	R , бит/с
0,871	7,019 (0,955)*	6,114 (0,832)	1,862	11,389

* – в скобках указано значение при использовании формулы (5) для расчета энтропии

На основе проведенного анализа и полученных результатов для СЭС КАО «АЗОТ» были разработаны мероприятия по повышению эффективности ее функционирования, оказывающие положительное воздействие на структурную и оперативную составляющие информационного ресурса (таблица 2).

Таблица 2

Мероприятия, повышающие информационный ресурс СЭС

Мероприятие	Содержание	Результат
1	Установка десяти резервных переключек между распределительными ПС, которые запитаны от независимых источников электроэнергии	Повышение качества структурной организации СЭС
2	Использование транспортных средств (ТС), повышающих мобильность оперативного персонала, а также применение видеорегистраторов для записи эксплуатационных операций	Увеличение скорости перемещения оперативной информации, повышение вероятности правильного выполнения операций

Значения информационных параметров СЭС КАО «АЗОТ» при реализации предлагаемых мероприятий представлены в таблице 3. Из полученных данных видно, что мероприятие 2 (особенно в сочетании с применением видеорегистраторов) оказывает большее влияние на информационный ресурс СЭС, нежели мероприятия 1. Соответственно, мероприятие 2 можно считать более предпочтительным вариантом повышения эффективности функционирования СЭС КАО «АЗОТ».

Однако, практическая реализация мероприятия 2, во-первых, сопряжена со значительными материальными затратами, которые вряд ли окупятся в разумные сроки, а, во-вторых, не подразумевает совершенствование структуры СЭС КАО «АЗОТ», что будет способствовать устранению имеющих место случаев полного «погашения» цеховых ПС при повреждении питающих ЛЭП.

Информационные показатели мероприятий по совершенствованию
СЭС КАО «АЗОТ»

Мероприятие	Показатели					Изменение значения R от исходного, %
	A	$H(p)$	G	D , бит/с	R , бит/с	
1	0,877	7,056	6,188	1,932	11,962	5,04
2	0,871	7,019	6,114	2,196 (2,321)*	13,427 (14,194)	17,90 (24,63)

* – значения при условии применения персоналом видеорегистраторов

Поэтому для повышения эффективности функционирования СЭС КАО «АЗОТ» был использован комбинированный подход, заключающийся в следующем.

1. Для повышения структурной организации было предложено к установить только три резервные перемычки, оказывающие наибольшее влияние на упорядоченность структуры (между ПС №160 и ПС №7, ПС №132 и ПС №175, ПС №175 и ПС №172).

2. Для увеличения оперативного показателя исследуемой СЭС предложено уменьшение количества районов обслуживания СЭС до шести штук путем их укрупнения (объединение районов ПС №1 и ПС №6, ПС №5 и ПС №80, ПС №39 и ПС №132), с обязательным приобретением ТС для трех вновь образованных. Также предполагается обязательное применение электромонтерами мобильных видеорегистраторов для записи своих действий и последующей проверкой этих записей административно-техническими работниками.

Полученные информационные показатели для предложенного варианта совершенствования исследуемой СЭС, приведенные в таблице 4, свидетельствуют, что при его реализации можно добиться увеличения значения информационного ресурса на 20% и соответствующего повышения эффективности функционирования СЭС КАО «АЗОТ».

Таблица 4

Информационные показатели усовершенствованной СЭС КАО «АЗОТ»

Показатели					Изменение значения R от исходного, %
A	$H(p)$	G	D , бит/с	R , бит/с	
0,877	7,030	6,167	2,216	13,668	20

Используя данные о средней заработной плате и штатной численности дежурных электромонтеров цеха электроснабжения КАО «АЗОТ», а также о стоимости владения выбранной модели ТС (*Daewoo Matiz*), был проведен экономический расчет, который показал, что при реализации предложенного варианта примерная экономия денежных средств составит около 240 000 руб. в месяц (за счет возможности сокращения 12 электромонтеров).

Четвертая глава посвящена апробации предложенного способа исследования структур на примере питающих СЭС отдельных районов Кемеровской области и региональных СЭС Сибирского Федерального округа, выявления «ключевых точек» в этих СЭС, а также анализу предложенных вариантов

совершенствования структур фрагментов СЭС Кузбасса.

Первоначально был проведен структурный анализ питающих систем внешнего электроснабжения 35-110 кВ отдельных районов Кемеровской области (в соответствии с географическим делением филиала ПАО «Российские сети» – Кузбассэнерго-РЭС»), результаты которого приведены в таблице 5.

Таблица 5

Структурные показатели СЭС отдельных районов Кемеровской области

СЭС	A	$rank(M_G)$	$H(p)$	G
Северо-Восточные электрические сети	0,896	370	0,978	0,876
Центральные электрические сети	0,911	411	0,972	0,886
Южные электрические сети	0,911	308	0,972	0,886

Полученные данные для рассмотренных СЭС были сопоставлены с показателями эталонной «сотовой» структуры, из чего был сделан вывод о недостаточно высокой структурной организации данных СЭС.

При помощи формулы (7) было проведено ранжирование элементов рассмотренных СЭС, результаты которого позволили выявить несколько «ключевых точек»: ПС «Новоленинская», ПС «Беловская» и ПС «ЗСМК». Аварии на СШ этих ПС или на отходящих от них ЛЭП, зачастую, приводят к прекращению электроснабжения большого числа потребителей, в частности угледобывающих предприятий данных районов.

Для снижения структурной значимости «ключевой точки» ПС «Новоленинская» и повышения надежности внешнего электроснабжения угледобывающих предприятий Ленинск-Кузнецкого района Кузбасса был проведен структурный анализ СЭС питающей данных потребителей (для этой СЭС ПС «Новоленинская» является важным источником электроэнергии), а также предложен вариант ее совершенствования (создание в структуре двух резервных перемычек между ПС «Новоленинская», «Полысаевская-3» и ПС «Заречная» по стороне 35 кВ). Расчет структурных характеристик усовершенствованной СЭС (таблица 6) показал рост всех показателей, в том числе увеличение упорядоченности G структуры на 1,5%. Также проведенное ранжирование элементов для данной СЭС показало уменьшение значений рангов I и II СШ ПС «Новоленинская» на 1,29% и 1,49% соответственно (до совершенствования: $R_{I\text{СШ}} = 0,160118$ и $R_{II\text{СШ}} = 0,160118$; после – $R_{I\text{СШ}} = 0,158073$ и $R_{II\text{СШ}} = 0,157765$), что говорит о снижении структурной значимости данной ПС в рассмотренной СЭС.

Таблица 6

Расчет структурных показателей для системы внешнего электроснабжения угледобывающих предприятий Ленинск-Кузнецкого района

Показатели	A	$H(p)$	G
Исходный вариант СЭС	0,942	0,965	0,909
Усовершенствованный вариант СЭС	0,944	0,977	0,923

Аналогичным образом на основе проведенного структурного анализа распределительной СЭС 6-10 кВ подразделения «Кузбассэнерго-РЭС» – Кемеровских районных электрических сетей», обеспечивающего внешнее электроснабжение городских и сельских потребителей, был предложен вариант совершенствования структуры данной СЭС посредством установки семи резервных перемычек между некоторыми фидерными линиями. Результаты расчетов структурных характеристик для усовершенствованной СЭС показали рост всех показателей, в том числе увеличение упорядоченности G структуры на 4,31% (до совершенствования $A=0,254$, $H(p)=0,917$, $G=0,234$; после $A=0,262$, $H(p)=0,921$, $G=0,242$).

В заключении четвертой главы был проведен структурный анализ десяти региональных СЭС, входящих в ОЭС Сибири (Алтайской, Бурятской, Забайкальской, Иркутской, Красноярской, Кузбасской, Новосибирской, Омской, Томской, Хакасской). Результаты анализа приведены в таблице 7.

Таблица 7

Структурные показатели СЭС ОЭС Сибири

СЭС	A	$H(p)$	G
Алтайская	0,850	0,975	0,829
Бурятская	0,774	0,969	0,750
Забайкальская	0,708	0,974	0,757
Иркутская	0,879	0,980	0,862
Красноярская	0,893	0,973	0,867
Кузбасская	0,822	0,970	0,797
Новосибирская	0,881	0,973	0,799
Омская	0,803	0,976	0,784
Томская	0,905	0,979	0,886
Хакасская	0,907	0,969	0,879

Полученные структурные показатели были сопоставлены с аварийной статистикой для каждой СЭС, в частности, с авариями, повлекшими отключение большого числа потребителей или разделение систем на изолированные участки, в результате чего было выявлено наличие зависимости между значениями структурных показателей и числом нарушений электроснабжения. Так, Бурятской и Забайкальской СЭС присуща высокая аварийность, при этом значения их структурных показателей самые низкие из рассмотренных. В то время как аварийность Хакасской и Томской СЭС минимальна, а значения их структурных показателей наиболее высокие из всех рассмотренных СЭС.

В процессе структурного анализа были определены ранги элементов СЭС. Полученные значения были сопоставлены с результатами исследований серьезных аварий, приведших к длительным перерывам электроснабжения большого числа потребителей в СЭС ОЭС Сибири за 2010-2015 гг. При этом было выявлено, что большинству случаев причина их возникновения – выход из строя энергообъектов, обладающих высоким рангом.

На основе полученных результатов создан способ классификации СЭС

по их структурным свойствам, характеризующим качество топологии СЭС, которая определяет эффективность ее функционирования.

Основным критерием классификации является упорядоченность структуры СЭС.

- Класс I (диапазон G 0,75-0,796) – СЭС с низкой структурной организацией. Для таких систем характерно следующее: отсутствие достаточного числа резервных схем электроснабжения, а также значительная перегрузка отдельных элементов, выход из строя которых может значительно снизить её работоспособность.

- Класс II (диапазон G 0,797-0,843) – СЭС со средней структурной организацией. В таких системах присутствует минимум резервных схем электроснабжения, наблюдается перегрузка элементов, однако последствия выхода их из строя не такие критичные, как для систем класса I;

- Класс III (диапазон G 0,844-0,89) – СЭС с высокой структурной организацией, располагающей достаточным числом резервных схем питания для обеспечения электроэнергией основной массы потребителей в случае аварии. При этом распределение нагрузки между элементами достаточно равномерное – отсутствуют элементы с ярко выраженной перегрузкой.

Для отдельных СЭС реально достижимы большие значения упорядоченности, входящие в диапазон 0,94-0,98 (актуальные значения для развития СЭС распределительного комплекса). Такие системы можно отнести к классу IV.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации содержится решение научной задачи поиска способов повышения эффективности функционирования систем внешнего и внутреннего электроснабжения, имеющей важное значение для электрохозяйств предприятий и электросетевого комплекса.

На основании проведенных исследований получены следующие результаты.

1. Установлено, что недостатки структурной организации систем внешнего и внутреннего электроснабжения являются основной причиной прекращения подачи электроэнергии конечным потребителям. Для отдельных предприятий примерно 75% всех случаев нарушений электроснабжения связано со структурными недостатками СЭС. Задержки перемещения оперативной информации в путях, образованных в процессе ликвидаций аварий, могут существенно увеличивать время простоя производственного оборудования.

2. Разработана программа поэтапного исследования СЭС на основе анализа заложенной в ней структурной и оперативной информации с определением итогового комплексного показателя эффективности ее функционирования – информационного ресурса СЭС.

3. Предложен способ построения ИЭМ СЭС, учитывающей топологические и эксплуатационные характеристики ее функционирования, при помощи которой определяется информационный ресурс СЭС.

4. На основе проведенных исследований предложены и обоснованы рекомендации по повышению эффективности функционирования систем

внутреннего электроснабжения, принятые к использованию в КАО «АЗОТ», которые позволили увеличить информационный ресурс на 20%, и добиться снижения эксплуатационных затрат примерно на 240 тыс. руб. в месяц.

5. Предложенный способ исследования структур СЭС, использованный в условиях региональных и районных СЭС Сибирского федерального округа, позволил выявить характерные недостатки их топологии и «ключевые точки», а также разработать варианты структурного совершенствования для систем внешнего электроснабжения, реализация которых для угледобывающих предприятий Ленинск-Кузнецкого района Кемеровской области и городских и сельских потребителей Кемеровского района позволяет повысить упорядоченность их структур на 1,5 и 4,3% соответственно.

6. Предложена концепция классификации СЭС на основе упорядоченности их структур и определены промежуточные диапазоны значений для отнесения СЭС к конкретному классу.

Направлением дальнейшего развития работы является наполнение ИЭМ СЭС различными «стоимостными» показателями (нагрузки электроприемников, загрузки ЛЭП и т.п.), что позволит дать комплексную технико-экономическую оценку СЭС. Еще одним направлением дальнейшего развития работы является интеграция полученных результатов в концепцию Smart Grid.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Матвеев, В.Н. Структурный анализ питающих систем электроснабжения Сибирского региона / В.Н. Матвеев, **К.А. Варнавский** // Вестн. Кузбасского гос. тех. унив., 2012. – № 3. – С. 152–155.

2. Матвеев, В.Н. Структурный анализ эффективности систем электроснабжения Сибирского региона / В.Н. Матвеев, **К.А. Варнавский** // Энергетик, 2014. – №12. – С. 31–33.

3. **Варнавский, К.А.** Анализ путей повышения эффективности эксплуатации систем электроснабжения промышленных предприятий / **К.А. Варнавский**, В.Н. Матвеев // Промышленная энергетика, 2016. – №4. – С. 14-18.

Прочие публикации по теме исследования

4. **Варнавский, К.А.** Структурный анализ систем электроснабжения МРСК Сибири / **К.А. Варнавский**, В.Н. Матвеев // Сборник докладов студентов, аспирантов и профессорско-преподавательского состава университета. По результатам IV Всероссийской, 57 научно-практической конференции молодых ученых «РОССИЯ МОЛОДАЯ», 24-27 апреля 2012 г. / Редкол.: В.Ю. Блюменштейн (отв. редактор) [и др.]; КузГТУ. – Кемерово, 2012. – С. 81–85.

5. Элер, А.В. Структурная оценка системы электроснабжения Кемеровского района / А.В. Элер, **К.А. Варнавский**, В.Н. Матвеев // Сборник докладов студентов, аспирантов и профессорско-преподавательского состава университета. По результатам IV Всероссийской, 57 научно-практической конференции молодых ученых «РОССИЯ МОЛОДАЯ», 24-27 апреля 2012 г. / Редкол.: В.Ю. Блюменштейн (отв. редактор) [и др.]; КузГТУ. – Кемерово, 2012. – С. 78–80.

6. Матвеев, В.Н. К вопросу о стратегической безопасности системы электроснабжения Сибири / В.Н. Матвеев, **К.А. Варнавский** // 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. 19–22.

7. Матвеев, В.Н. К вопросу о надежности электроснабжения угольных шахт Кузбасса / В.Н. Матвеев, **К.А. Варнавский** // Современные тенденции и инновации в науке и производстве. Материалы III Международной науч.-практ. конф., Филиал КузГТУ в г. Междуреченск. – Междуреченск, 2014. – С. 62–63.

8. **Варнавский К.А.** Повышение надежности электроснабжение горных предприятий Кемеровской области / **К.А. Варнавский**, В.Н. Матвеев // Сборник материалов VI Всероссийской, 59 научно-практической конференции молодых ученых с международным участием «Россия Молодая». КузГТУ. – Кемерово, 2014 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://science.kuzstu.ru/wp-content/Events/Conference/RM/2014/materials/pdf1/GI/GMIK/варнавский/index.html>

9. Матвеев, В.Н. Оптимизация систем электроснабжения шахт Кемеровской области / В.Н. Матвеев, **К.А. Варнавский** // Инновации в технологиях и образовании: сборник статей участников VII Международной научно-практической конференции «Инновации образования», 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. 219–222.

10. **Варнавский, К.А.** Повышение надежности электроснабжение горных предприятий Кемеровской области / **К.А. Варнавский**, В.Н. Матвеев // Сборник материалов VI Всерос., 59-й научно-практической конференции с международным участием «Россия молодая», 22-25 апр. 2014 г., Кемерово [Электронный ресурс] / ФГБОУ ВПО «Кузбас. гос. техн. ун-т им. Т. Ф. Горбачева»; редкол.: В. Ю. Блюменштейн (отв. ред.) [и др.]. – Кемерово, 2014.

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

[2], [3] – разработка идеи публикации, разработка основных теоретических положений, выполнение расчетов;

[1], [4-10] – проведение аналитического обзора, построение моделей, проведение вычислительного эксперимента, формулирование выводов.