

На правах рукописи

ХА ДЫК НГУЕН

**РАЗРАБОТКА И ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ СИСТЕМЫ
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ГОРОДСКОГО РАЙОНА**

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Казань – 2020

Работа выполнена на кафедре электропривода и электротехники федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет».

Научный руководитель: **Валеев Ильгиз Миргалимович**,
доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Федоров Владимир Кузьмич**,
доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный технический университет», кафедра «Электроснабжение промышленных предприятий», профессор

Вуколов Владимир Юрьевич,
кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», кафедра «Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника», доцент

Ведущая организация: **Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный технический университет», г. Самара**

Защита состоится "25" сентября 2020 г. в 15 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.301.06 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова" по адресу: г. Чебоксары, ул. Университетская, д. 38, учебный корпус № 3, зал заседаний Ученого совета, к. 301.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова" и на сайте www.chuvsu.ru.

Автореферат разослан " ____ " _____ 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.301.06

Н.В. Руссова

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Одним из важнейших направлений в реализации программы энергосбережения и повышения энергетической эффективности системы электроснабжения (СЭС) является совершенствование и разработка новых методов энергосберегающих технологий, оценивающих состояние данной системы и позволяющих своевременно вырабатывать управляющее воздействие и оповещение обслуживающего персонала о ненормативных потерях с целью скорейшего их устранения.

Как известно, система электроснабжения городского района представляет собой сложноразомкнутую сеть напряжением 10(6)–35 кВ, но работает в разомкнутом режиме с использованием нормально разомкнутых линейных выключателей и нормально замкнутых секционных выключателей. Эксплуатация разомкнутых линейных выключателей системы связана с удобством координации защит и снижением токов короткого замыкания, с использованием нормально замкнутых секционных выключателей могут отключить одну из секций фидера. Замыкание линейного выключателя и размыкание соответствующего секционного выключателя позволяют получить новую радиальную конфигурацию сети. Это называется оптимизацией структуры СЭС, что способствует не только повышению надежности, но и снижению потерь активной мощности, а также напряжения в сети.

В диссертационной работе приведены новые методы и алгоритмы оптимизации режимов работы системы электроснабжения городского района на основе эвристического и метаэвристического алгоритмов. Предложенная проблема в данной работе решена с использованием и разработкой новых алгоритмов оптимизации структуры работы СЭС, что открыло возможность учета потерь мощности и отклонений напряжения и позволило повысить технико-экономическую эффективность функционирования системы электроснабжения, а также улучшить условия работы отдельных потребителей электроэнергии.

Степень разработанности темы исследования. Вопросы минимизации потерь мощности и обеспечения более высокого качества электроэнергии в сетях становились предметом внимания многих российских и зарубежных исследователей. Следует упомянуть основные труды таких российских ученых, как А.А. Герасименко, В.Т. Федин, Ю.С. Железко, а также мировых ученых: А. Merlin, Н. Back, S. Civanlar, D. Shirmohammadi, G. Celli, R.R. Srinivasa, X.S. M Yang и др.

Цель диссертационной работы. Совершенствование методов и разработка алгоритмов управления режимами работы системы электроснабжения с наименьшими потерями и улучшенными показателями качества электроэнергии.

Основные задачи работы:

1. Провести сравнительный анализ методов управления и оптимизации режимов работы системы электроснабжения и распределения электроэнергии в сложноразомкнутых электрических сетях с наименьшими потерями и улучшенными показателями качества электроэнергии (ПКЭ).

2. Определить рациональные методы и алгоритмы регулирования режимов работы системы электроснабжения и основные критерии, определяемые нормативными значениями ПКЭ.

3. Провести анализ на основе разработанного математического моделирования сложноразомкнутой распределительной сети городского района 10(6)–35 кВ и определить наилучшие узлы установки коммутационных аппаратов для коррекции перетоков мощности.

4. Разработать алгоритм оптимизации структуры СЭС, улучшенную эвристическую методику по уменьшению потерь и повышению надежности электроснабжения потребителей.

5. Провести регрессионный анализ функциональной зависимости потерь активной мощности от основных показателей качества электрической энергии.

6. Разработать математическую модель задачи оптимизации структуры СЭС и функцию ограничения для каждой конфигурации по поиску и переносу месторасположения узла коммутации в ней, влияющую на ПКЭ и параметры режима сети.

Методология и методы исследования. Методология основана на исследованиях распределительных сетей по пропускной способности и ПКЭ по ГОСТу 32144-2013.

Выполнено математическое моделирование сложноразветвленной сети СЭС городского района 10(6)–35 кВ, которое направлено на определение узлов коммутации и установки коммутационных аппаратов в сети.

На основании регрессионного анализа функциональных зависимостей потерь активной мощности выполняется их сопоставление с основными показателями качества электрической энергии.

Использованы основные положения теоретической электротехники, аппарата математического анализа, теории вероятностей, линейной алгебры, современные методы с применением алгоритма оптимизационного поиска и компьютерное моделирование электротехнических комплексов и динамических систем «Matlab».

Научная новизна работы:

1. Разработан алгоритм управления режимами функционирования СЭС и предложены топологические приемы оптимизации ее структуры, влияющие на показатели качества электроэнергии.

2. Разработана методика расчета потокораспределения сложноразветвленной сети СЭС с применением расчета по методу Ньютона – Рафсона и набором линейных уравнений в программной среде «Matlab».

3. Исследовано влияние распределенных генераций и компенсирующих устройств на оптимизацию топологии СЭС с учетом снижения активной мощности и отклонений уровня напряжений.

4. Разработаны алгоритм оптимизации структуры СЭС и улучшенный эвристический метод по уменьшению потерь активной мощности в распределительных сетях 10(6)–35 кВ.

5. Предложена методика по оптимизации структуры распределительной сети для уменьшения потерь активной мощности и повышения надежности системы электроснабжения с помощью алгоритма «Поиск кукушек».

Практическая значимость результатов работы заключается в использовании предложенных методов для построения оптимальной структуры СЭС в сетях напряжением 10(6)–35 кВ городского района по снижению потери активной мощности и повышению надежности данной системы.

Теоретическая значимость результатов работы. Теоретическая значимость заключается в совершенствовании существующих методов расчета потерь мощности, определении точек потокораздела и разработке методов упрощения исследуемой схемы (например, в СЭС города Chu Prong Вьетнама с учетом топологии сети). Кроме того, оптимальные методы поиска (эвристический или метаэвристический) используются для оптимизации конфигурации сети, которые в итоге упрощают выполнение автоматизации расчетов потокораспределения.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. Методика расчета режимов работы и параметров СЭС с использованием метода потокораспределения по алгоритму Ньютона – Рафсона.
2. Методика управления энергоэффективностью, основанная на определении разности активных потерь электрической энергии от нормативных значений.
3. Методика оптимизации структуры сложноразветвленной сети системы электроснабжения городского района с нормативными ПКЭ и минимизацией потери мощности.
4. Модель ситуационного управления системой электроснабжения, осуществляющая коррекцию ПКЭ в пределах допустимого режима.
5. Топологические приемы по выделению определенно-ограниченного участка из полной схемы электроснабжения городского района напряжением 10(6)–35 кВ.
6. Алгоритм для программного обеспечения, позволяющий автоматизировать процесс оптимизации структуры СЭС городского района с напряжением 10(6)–35 кВ.

Личный вклад автора. В диссертационной работе методики расчета параметров электрической сети и оптимизации структуры сложноразветвленной сети СЭС городского района выполнены лично соискателем. Созданные математические и имитационные модели, разработки функциональных схем сложноразветвленной сети СЭС городского района 10(6)–35 кВ, а также приведенный сравнительный анализ методов оптимизации и выбора системы управления режимами ее работы выполнены соискателем совместно с научным руководителем.

Степень достоверности результатов работы подтверждается сопоставлением имеющихся результатов по существующим и вновь разработанным методам, а также полученными выводами теоретических и практических исследований.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались в материалах следующих научно-технических и научно-практических конференций: XXI Аспирантско-магистерском научном семинаре, посвященном «Дню энергетика» (Казань, 5–6 декабря 2017 г.); Международной научно-практической конференции «Научные механизмы решения проблем инновационного развития» (Уфа, 22 мая 2018 г.); Международной научно-практической конференции «Наукоемкие технологии и интеллектуальные системы» (Самара, 23 ноября 2018 г.); IV Национальной научно-практической конференции «Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве» (Казань, 6–7 декабря 2018 г.).

Публикации. По результатам диссертационной работы опубликовано 7 научных статей, две из которых опубликованы в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень, рекомендованный ВАК Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Структура и объем работы. Диссертационная работа изложена на 153 страницах и состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы, приложений. Она включает в себя 44 рисунка, 31 таблицу. Список литературы содержит 94 источника.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснован выбор темы диссертации, ее актуальность, сформулированы цели и задачи исследований, научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе диссертационной работы были раскрыты теоретические аспекты формирования технологических потерь электрической энергии, изучена нормативно-правовая база их расчета, проведен анализ фактических потерь

электрической энергии, возникающих в электрических сетях ЭАО «Gia Lai», а также разработаны и оценены с точки зрения эффективности мероприятия по их снижению потерь в конкретном филиале.

При анализе информации о потерях электроэнергии в сетях филиалов ЭАО «Gia Lai», используемых для ценообразования за 2017 год, можно сделать вывод, что наибольший объем потерь наблюдается у филиала городского района «Chu Prong», где необходимо внедрить программу энергосбережения и повышения энергетической эффективности.

Поэтому в качестве основного объекта исследований диссертационной работы и сформулированных научно-обоснованных рекомендаций по повышению надежности электроснабжения была выбрана сеть 10(6)–35 кВ городского района «Chu Prong», ЭАО «Gia Lai» Вьетнама, на которую приходится большая часть суммарных потерь электрической энергии.

Во второй главе проведен обзор зарубежных и отечественных работ по решениям оптимизационных задач. Анализ существующих методов оптимизации в области электроэнергетики показал, что для решения задач оптимального управления электроэнергетическими системами используется большое число приемов, достаточно проработанных и внедренных в условия действующих объектов.

Недостатки современных методик расчета уровня потерь мощности объясняются сложностью применения по отношению к электрической сети системы электроснабжения, находящейся в эксплуатации, данное обстоятельство обусловлено несколькими факторами, а именно: большое количество узлов и ветвей в СЭС; сложные взаимосвязи контурных токов в ветвях; динамическое расположение точки потокораздела; трудности в определении месторасположения точки потокораздела; громоздкость и сложность формирования уравнений, описывающих режим работы сети.

Для определения перетоков мощности применяются с помощью алгоритма, полученных из однолинейной схемы СЭС (см. на рисунке 1).

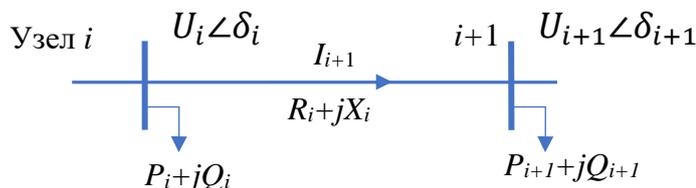


Рисунок 1 – Однолинейная схема СЭС

Мощность, поступающая в узел, определяется

$$S_i = (P_i + jQ_i) = (u'_i + ju''_i) \sum_{k=1}^n (G_{ik} - jB_{ik}) (u'_k - ju''_k) \quad (1)$$

Для решения задачи потокораспределения с применением метода расчета Ньютона – Рафсона, где был использован метод полярных координат. Матрица Якоби обозначены $|U|$ и δ вместо u'_i и u''_i . Тогда уравнение (1) принимает форму

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |U| \end{bmatrix} \quad (2)$$

Недиагональные и диагональные элементы подматрицы Якоби H , N , M , L задаются выражениями

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_k} = |U_i U_k Y_{ik}| \sin(\delta_i - \delta_k - \theta_{ik}); \quad \frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = - \sum_{k=1}^n |U_i U_k Y_{ik}| \sin(\delta_i - \delta_k - \theta_{ik});$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial P_i}{\partial |U_k|} &= |U_i Y_{ik}| \cos(\delta_i - \delta_k - \theta_{ik}); & \frac{\partial P_i}{\partial |U_i|} &= 2|U_i Y_{ii}| \cos(\theta_{ii}) + \sum_{k=1}^n |U_k Y_{ik}| \cos(\delta_i - \delta_k - \theta_{ik}); \\ \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_k} &= -|U_i U_k Y_{ik}| \cos(\delta_i - \delta_k - \theta_{ik}); & \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} &= \sum_{k=1}^n |U_i U_k Y_{ik}| \cos(\delta_i - \delta_k - \theta_{ik}); \\ \frac{\partial Q_i}{\partial |U_k|} &= |U_i Y_{ik}| \sin(\delta_i - \delta_k - \theta_{ik}); & \frac{\partial Q_i}{\partial |U_i|} &= -2|U_i Y_{ii}| \sin(\theta_{ii}) + \sum_{k=1}^n |U_k Y_{ik}| \sin(\delta_i - \delta_k - \theta_{ik}).\end{aligned}$$

Из элементов подматрицы Якоби видно, что симметрия, имеющаяся в случае прямоугольных координат, больше не существует. Выбрав переменную как $\Delta \delta$ и $\Delta U/|U|$, вместо уравнения (2) запишем уравнение:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \frac{\Delta |U|}{|U|} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Потребляемая мощность нагрузки в узле $i+1$ является $P_{i+1} - jQ_{i+1} = \tilde{U}_{i+1} * \tilde{I}_{i+1}$.

Величина напряжения в узле $i+1$ как

$$U_{i+1} = \left[\left(P_{i+1} R_{i+1} + Q_{i+1} X_{i+1} - \frac{|U_i|^2}{2} \right)^2 - (R_{i+1}^2 + X_{i+1}^2) (P_{i+1}^2 + Q_{i+1}^2) \right]^{\frac{1}{2}} - \left(P_{i+1} R_{i+1} + Q_{i+1} X_{i+1} - \frac{|U_i|^2}{2} \right) \quad (4)$$

Потери мощности в ветви от узла i до $i+1$:

$$\Delta P_{i,i+1} = \frac{R_{i,i+1} (P_i^2 + Q_i^2)}{|U_i|^2}. \quad (5)$$

Суммарная потеря активной мощности радиальной схемы может быть определена как

$$\Delta P = \sum_{i=1}^{N_B} k_i \cdot \Delta P_i = \sum_{i=1}^{N_B} k_i R_i \frac{(P_i^2 + Q_i^2)}{|U_i|^2} = \sum_{i=1}^{N_B} k_i R_i I_i^2, \quad (6)$$

где k_i является двоичной переменной, которая представляет собой состояние выключателя ветви ($k_i = 1$, если происходит замыкание выключателя, и $k_i = 0$, если наблюдается размыкание выключателя).

Для того чтобы рассчитать параметры СЭС в целях оптимизации ее структуры, был разработан в среде «Matlab» и проведен расчет потокораспределения СЭС городского района по методу Ньютона – Рафсона.

В третьей главе диссертационной работы сформулирована задача оптимизации структуры СЭС для уменьшения потерь и повышения ее надежности, которая решается с использованием улучшенного эвристического алгоритма. Исследовано влияние на оптимизационные задачи как распределенных генерации (РГ), компенсирующих устройств (КУ), так и их совместного применения. Необходимо отметить, в работе показано, что для нормального режима работы СЭС выбран критерий оптимизации, а именно минимум потерь активной мощности и повышение уровня напряжения узлах в сети, при котором осуществляется путем определенного и рационального управления реконфигурацией топологии СЭС путем размыкания и замыкания ветвей.

$$f = \sum_{i=1}^{n-1} k_i R_i I_i^2 \rightarrow \min \quad (7)$$

Эти ограничения выражаются

$$\begin{cases} k_i |I_i| \leq I_{i,\max}, i = 1, 2, \dots, n-1; \\ k_i |S_i| \leq S_{i,\max}, i = 1, 2, \dots, n-1; \\ U_{j,\min} \leq U_j \leq U_{j,\max}, j = 1, 2, \dots, n. \end{cases} \quad (8)$$

Рассмотрим простую сеть с одним источником и замкнутым контуром в разветвленной ветви MN (см. рисунок 2).

Целевая функция в общей сети системы электроснабжения определяется:

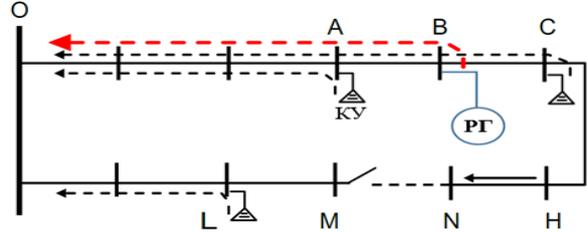


Рисунок 2 – Разомкнутый контур в СЭС

$$\begin{aligned} \Delta P = & \sum_{i=1}^{N_B} \left(I_{p,i} - \sum_{g=1}^G C_{ig} I_{p,g}^{PG} - A_{ij} \sum_{j=1}^K I_{p,j}^{MN} \right)^2 R_i + \sum_{i=1}^{N_B} \left(I_{q,i} - \sum_{g=1}^G C_{ig} I_{q,g}^{PG} - \sum_{l=1}^L B_{il} I_{q,l}^{KV} - A_{ij} \sum_{j=1}^K I_{q,j}^{MN} \right)^2 R_i + \\ & + \sum_{j=1}^K (I_{p,j}^{MN})^2 R_j^{MN} + \sum_{j=1}^K (I_{q,j}^{MN})^2 R_j^{MN} \end{aligned} \quad (9)$$

где K, G, L – количество контуров, РГ и КУ в сети; A_{ij} показывает соотношение направления между j -м контуром и направлением естественного потокораспределения i -й ветви в разомкнутой конфигурации сети; B_{il} описывает отношение местонахождения между l -компенсирующим устройством и i -ветвью; C_{ig} отражает отношение местонахождения между g -РГ и i -ветвями.

Функция ΔP в зависимости от количества передаваемой мощности была описана методом деления контуров (процесс перераспределения нагрузки). Таким образом, показано замыкание нормально замкнутых секционных выключателей в сети для передачи потока мощности через другие выключатели (см. рисунок 3) с определением токов I_p^{MN} и I_q^{MN} , для того

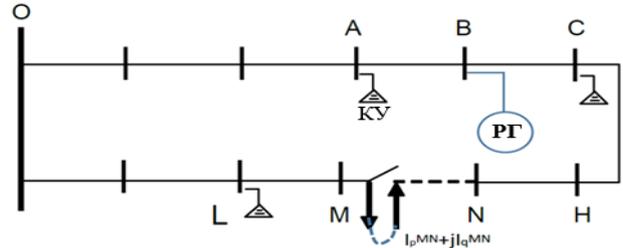


Рисунок 3 – Процесс перераспределения нагрузки

чтобы потери мощности были минимальны: $\frac{\partial \Delta P_2}{\partial I_p^{MN}} = 0, \frac{\partial \Delta P_2}{\partial I_q^{MN}} = 0$.

Отсюда
$$I_{p,j}^{MN} = \frac{-A_{ij} \sum_{i=1}^N I_{p,i} R_i}{R_j^{\text{контур}, MN}} + \frac{A_{ij} \sum_{g=1}^G C_{i,g} I_{p,g}^{PG} R_i}{R_j^{\text{контур}, MN}} \quad (10)$$

$$I_{q,j}^{MN} = \frac{-A_{ij} \sum_{i=1}^N I_{q,i} R_i}{R_j^{\text{контур}, MN}} + \frac{A_{ij} \sum_{g=1}^G C_{i,g} I_{q,g}^{PG} R_i}{R_j^{\text{контур}, MN}} + \frac{A_{ij} \sum_{l=1}^L B_{il} I_{q,l}^{KV} R_i}{R_j^{\text{контур}, MN}} \quad (11)$$

В формулах (10), (11) показано воздействие компенсирующих устройств на токи I_q^{KV} , что может оказать влияние на сети с малочисленными узлами, потому величина A_{ij} и B_{il} могут взаимодействовать и компенсировать друг друга. Тогда уравнения (10), (11) можно переписать следующим образом:

$$\begin{cases} I_{p,j}^{MN} \cdot R_j^{\text{контур},MN} = -A_{ij} \sum_{i=1}^N I_{p,i} R_i + A_{ij} \sum_{g=1}^G C_{i,g} I_{p,g}^{PG} R_i = \alpha_{p,j} \\ I_{q,j}^{MN} \cdot R_j^{\text{контур},MN} = -A_{ij} \sum_{i=1}^N I_{q,i} R_i + A_{ij} \sum_{g=1}^G C_{i,g} I_{q,g}^{PG} R_i = \beta_{q,j} \end{cases} \quad (12)$$

Если принять величину $G = \sum_{j=1}^K (\alpha_{p,j}^2 + \beta_{q,j}^2)$, то целевая функция будет определена

$$\text{по формуле: } G = \sum_{j=1}^K [(I_{p,j}^{MN} R_j^{\text{контур},MN})^2 + (I_{q,j}^{MN} R_j^{\text{контур},MN})^2] = \sum_{j=1}^K (I_j^{MN} R_j^{\text{контур},MN})^2 \rightarrow \min \quad (13)$$

Как видно (13) функция G стремится к нулю. Это можно достичь следующим алгоритмом:

1. Замена больших значений токов в ветвях на меньшие, тогда получим функцию ΔG для независимых контуров:

$$\Delta G = (R_j^{MN})^2 [(I_{p,j}^{MN})^2 + (I_{q,j}^{MN})^2] - [(I_{p,j}^{NH})^2 + (I_{q,j}^{NH})^2] = (R_j^{MN})^2 [(I_j^{MN})^2 - (I_j^{NH})^2] \quad (14)$$

2. Рассчитать ΔG для всех независимых контуров, в котором содержится разомкнутый выключатель, через которого протекает наименьший ток.

3. Рассчитать порядок потери мощности в ветви с наименьшим током в j-ом независимом контуре.

4. Итерационный процесс, для минимизации значений функции ΔG до тех пор, пока в схеме СЭС будет отсутствовать замкнутые контуры.

Предлагаемый алгоритм оценки результатов исследований применялся к трем стандартным международным системам IEEE, и полученные результаты сравнивались с другими алгоритмами исследований.

В исходной конфигурации СЭС с 16 узлами (рисунок 4), которая содержат шесть разомкнутых выключателей (2, 8, 9, 15, 16, 20) и соответственно потери мощности составляют 144,17 кВт.

Из полученных результатов исследований (таблица 1) следует, что предложенный алгоритм оптимизации структуры СЭС, адекватно отражает расчетными данными по минимизации потерей мощности для независимых контуров.

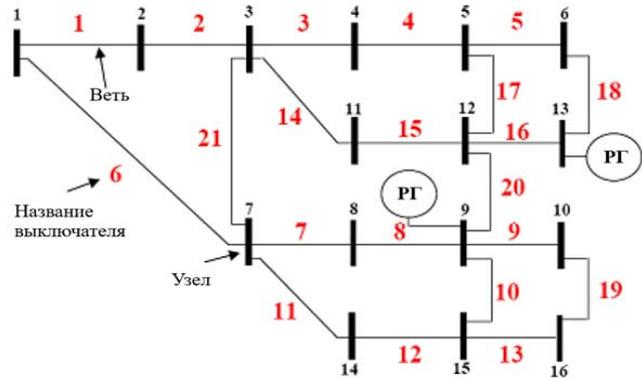


Рисунок 4 – Схема СЭС с 16 узлами

Таблица 1 – Результаты обследования сводки по системе с 16 узлами

Методы	Размыкание выключателя	ΔP (кВт)	РГ1 (кВт)	РГ2 (кВт)	Замечание
G. Celli	2, 8, 9, 15, 16, 20	144,17	-	-	Без подключения РГ
Предлагаемый метод	2, 17, 16, 20, 10, 19	92,265	-	-	РГ
G. Celli	2, 8, 10, 15, 18, 20	76,14	450	630	С подключением обоих РГ
Предлагаемый метод	2, 17, 18, 20, 10, 19	66,33	450	630	
G. Celli	2, 8, 10, 15, 16, 20	102,60	450	-	РГ1 работает и РГ2 не работает
Предлагаемый метод	2, 17, 16, 20, 10, 19	83,71	450	-	
G. Celli	2, 9, 10, 15, 18, 20	82,94	-	630	РГ1 не работает и РГ2 работает
Предлагаемый метод	2, 17, 18, 20, 10, 19	74,31	-	630	

В исходной структуре СЭС с 33 узлами (рисунок 5) имеет 5 разомкнутых выключателей соответственно (37, 33, 35, 34, 36) и образует пять независимых контуров. Рисунок 5 показывает схему решения оптимизации структуры СЭС в случае неподключения и подключения одновременно с 4 РГ.

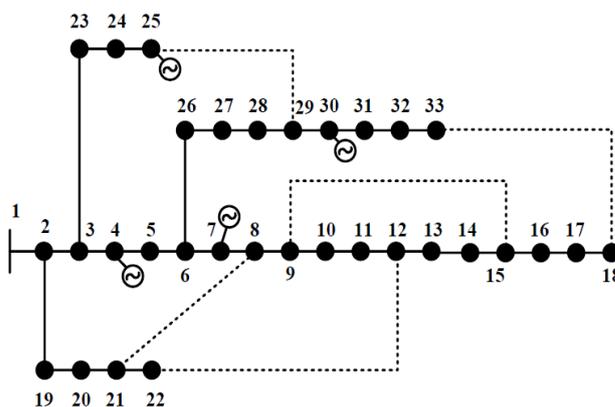


Рисунок 5 – Схемы СЭС с 33 узлами

Исходная конфигурация неподключения РГ к СЭС с потерями мощности 202,69 кВт соответствует размыканию ветвей (33, 34, 35, 36, 37). После выполнения нового оптимизированного алгоритма усиления с разомкнутыми выключателями (7, 37, 9, 14, 32) потери мощности снизились до 138,876 кВт после 8 итерационных циклов.

При введении РГ в операцию после выполнения предлагаемой задачи оптимизации выключатели (7, 28, 9, 14, 32) размыкаются, а общие потери мощности снижаются с 173 до 111,45 кВт после 12 итерационных циклов. Результаты суммированы в таблице 2, где показано сравнение с предыдущим исследованием.

Таблица 2 – Сравнение до и после выполнения оптимизации структуры в 33-узловой системе

Методы	Потери мощности (кВт)	Размыкание выключателя	Итерационный цикл
Система не имеет РГ			
Исходная	202,69	33, 34, 35, 36, 37	-
Предлагаемый метод	136,87	7, 9, 14, 32, 37	8
R.R. Srinivasa	136,87	7, 9, 14, 32, 37	-
Система подключена к РГ (все 4 РГ соединены вместе).			
Исходная	173	33, 34, 35, 36, 37	-
Предлагаемый метод	111,45	7, 9, 14, 28, 32	12
R.R. Srinivasa	111,45	7, 9, 14, 28, 32	-

При исходной конфигурации системы выключатели (73, 72, 70, 69, 71) нормально разомкнуты (см. рисунок 6). Общая потеря мощности без РГ составляет 224,95 кВт. После устранения предлагаемой проблемы в области оптимизации структуры выключатели (69, 14, 70, 55, 62) разомкнуты, а суммарные потери мощности снижаются с 224,95 до 99,75 кВт. При введении РГ в работу происходит размыкание выключателей (73, 72, 70, 69, 71) с общей потерей мощности, равной 274,4 кВт.

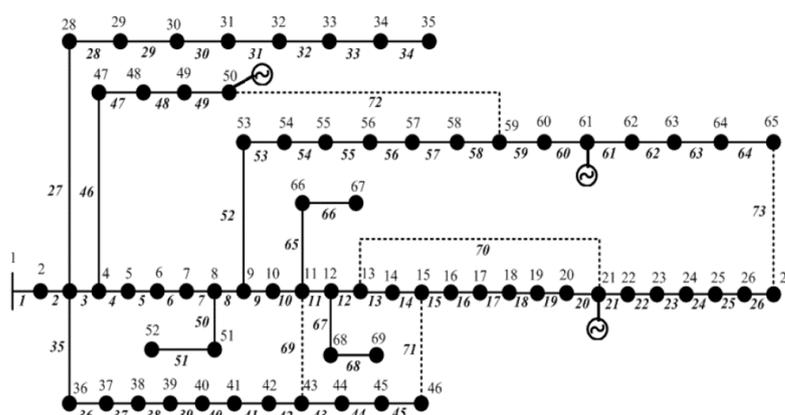


Рисунок 6 – Схема СЭС с 69 узлами

После выполнения предлагаемой задачи оптимизации структуры выключатели (69, 70, 12, 55, 62) размыкаются, а общие потери мощности уменьшаются с 274,4 до 40,21 кВт. Результаты расчетов приведены в таблице 3, в которой они сравнены с предыдущим исследованием.

Таблица 3 – Оптимизация структуры СЭС 69 узлов с предлагаемым алгоритмом

Методы	Потери мощности (кВт)	Размыкание выключателя	Итерационный цикл
Система без РГ			
Исходная	224,95	72, 73, 70, 69, 71	-
Предлагаемый метод	99,75	69, 14, 70, 55, 62	24
R.R. Srinivasa	101,32	69, 14, 70, 57, 61	-
Система подключена к РГ (все 3 РГ соединены вместе)			
Исходная	274,4	72, 73, 70, 69, 71	-
Предлагаемый метод	40,21	69, 70, 12, 55, 62	24
R.R. Srinivasa	40,21	69, 70, 12, 55, 62	-

В результате применения предлагаемого алгоритма была найдена оптимальная конфигурация с минимальными потерями мощности. Данный алгоритм использует более короткое время вычислений, чем существующие, так как расчет происходит один раз и не зависит от начальной конфигурации. Этот алгоритм отличается от метода расчета предлагаемого G. Celli, A. Merlin и H. Back, S. Civanlar, в котором для каждого вычисления рассматривается только одна пара выключателя включен/отключен в независимом контуре, выбранная конфигурация во многом зависит от начальной конфигурации СЭС.

Функция усиления потерь мощности G полностью описывает взаимосвязь между выключателями и токами ветвей в распределительной сети, поэтому все независимые контуры учитываются одновременно.

В четвертой главе диссертационной работы выполнены исследования метода оптимизации структуры распределительной сети СЭС городского района с использованием оптимального алгоритма «Поиска кукушек», который был применен в распределительных сетях для достижения ряда целей и условий эксплуатации.

Математическая модель оптимизации структуры СЭС с учетом снижения потери мощности и повышения качества напряжения узлов с целевой функцией

$$f = \sum_{i=1}^{N_B} R_i \left(\frac{P_i^2 + Q_i^2}{U_i^2} \right) \rightarrow \min. \quad (15)$$

Условия ограничения

$$\begin{cases} P_j = \sum_{k=1}^{N_V} U_j U_k Y_{jk} \cos(\delta_j - \delta_k - \theta_{jk}); \\ Q_j = \sum_{k=1}^{N_V} U_j U_k Y_{jk} \sin(\delta_j - \delta_k - \theta_{jk}). \end{cases} \quad (16)$$

где U_j , δ_j и U_k , δ_k – напряжения амплитуды в относительной единице и фазовых углах в относительном радиане напряжения в узлах j и k ; Y_{jk} и θ_{jk} – амплитуда и угол полной проводимости узлами j и k соответственно.

Для решения задачи примем следующие условия:

- ограничение напряжения узлов и токов ветвей (во время процесса оптимизации должны быть обеспечены эксплуатационные ограничения);
- ограничение конфигурации представляется радиальной сетью.

Алгоритм «Поиска кукушек» (англ. Cuckoo Search Algorithm, CSA) – метаэвристический алгоритм, разработанный в 2009 году Янгом, имитирующий «поведение кукушек» во время откладывания яиц, а именно в процессе вынужденного гнездового паразитизма. В алгоритме поиска кукушек каждое яйцо в гнезде представляет собой решение, в то время как яйцо, принадлежащее кукушке, представляет собой новое решение. Цель заключается в использовании новых и

потенциально лучших решений (кукушкиных), чтобы заменить менее хорошие решения в гнездах. В простейшем варианте алгоритма в каждом гнезде по одному яйцу. Именно этот вариант и рассматривается в дальнейшем.

Далее, на рисунке 7, представлена схема алгоритма «Поиска кукушек» для решения проблемы оптимизации структуры СЭС.

Begin
 Инициализация начальной популяции гнезд X_i
 Определение лучшего решения $Gbest$
while (критерий останова)
 Разработать новое решение с помощью «полеты Леви»
 Определить новые координаты кукушки
 Случайным образом выбрать некоторое гнездо X_i
 if $f(cuckoo) > f(X_i)$
 Заменить X_i на новое решение $X^{нов}_i$
 Сохранить $Gbest$
 end if
end while
 Вывод результатов и визуализация
end

Рисунок 7 – Схема алгоритма поиска кукушек: $GBest$ – лучшее найденное решение; $f(cuckoo)$, $f(X_i)$ – значения функции пригодности для кукушки «*cuckoo*» и для некоторого гнезда X_i

Метод оптимизации структуры СЭС городского района с учетом снижения потерь мощности с использованием CSA действует следующим образом:

1. Определение базовых контуров, содержащих электрические выключатели. Соединение СЭС включает в себя V ветвей и N узлов, которые могут быть представлены матрицей A (размер $V \times N$). В нем каждый ряд матрицы представляет одну ветвь, а каждый столбец – узел.

Любая конфигурация сети будет включать в себя множество разомкнутых выключателей, случайно выбранных из соответствующих базовые контуров. Это помогает оптимизировать алгоритмы для создания более допустимых конфигураций (соответствующих конфигурации радиальной сети). Однако в независимых контурах все еще существует множество ветвей. Предлагаемый алгоритм проверки конфигурации радиальной сети позволяет строить матрицу соединения A и столбцы, соответствующие опорным узлам (узел источника) системы, причем после преобразования матрица A становится квадратной. Эксперименты показывают, что, если определитель квадратной матрицы равен 1 или -1 , конфигурация сети считается радиальной.

2. Определение максимального и минимального пределов каждой переменной для поиска.

3. Инициализация начальной популяции N гнезд X_i . Каждый член начальной популяции имеет конфигурацию и считается птичьим гнездом. Популяции гнезда птиц представлены: $X_i = [X_1^i, \dots, X_{d-1}^i, X_{dim}^i]$, где каждый X_i показывает отдельные решения: $X_i = [SW_1^i, SW_1^i, \dots, SW_{dim}^i]$, dim – размер задачи, равный SW_d^i (или число разомкнутых выключателей), соответствующие гнезда для поддержания радиальной конфигурации сети.

В CSA каждое яйцо в гнезде другого вида считается решением и генерируется случайным образом на начальной стадии. Значения решений в непрерывной области необходимо скорректировать до дискретных значений с помощью числового округления (*round*) следующим образом:

$$X_i = \text{round}[SW_{\min,d}^i + \text{rand} \times (SW_{\max,d}^i - SW_{\min,d}^i)], \quad (17)$$

где $SW_{\min,d}^i$ и $SW_{\max,d}^i$ – минимальный и максимальный порядковый номер выключателей в d -ом базовом контуре СЭС соответственно.

Значение адаптивной функции (Fit) вычисляется на основе целевой функции конфигурации

$$Fit = \sum_{i=1}^{N_B} R_i \cdot \left(\frac{P_i^2 + Q_i^2}{U_i} \right) + K_1 \times \max(U_{\min, \text{норм}} - U_{\min, 0}) + K_2 \times \max(U_{\max, \text{норм}} - U_{\max, 0}) + K_3 \times \max(k_{i, \max} - k_{i, \text{норм}}). \quad (18)$$

K_1, K_2 и K_3 являются коэффициентами нарушения при конфигурации сети нарушения ограничений низкого напряжения, перенапряжения и перегрузки; U_{\min}, U_{\max} – соответственно наименьшая и наибольшая амплитуды напряжения в конфигурации сети; $k_{i, \max} = \max(S_i / S_{i, \text{норм}})$ – максимально допустимый коэффициент перегрузки в сети; $k_{i, \text{норм}}$ – допустимый коэффициент перегрузки на линии.

Исходя из значения целевой функции, гнездо с лучшей адаптивной функцией считается лучшим гнездом в популяции $Gbest$.

4. Разработка нового решения с помощью метода «полет Леви». Все гнезда для лучшего решения заменяются на новые гнезда $X_i^{\text{нов}}$ с яйцами кукушек, что можно записать следующим образом:

$$X_i^{\text{нов}} = \text{round}[Xbest_i + \alpha \times \text{rand} \times \Delta X_i^{\text{нов}}], \quad (19)$$

где $\alpha > 0$ является параметром размера шага; rand – случайное значение в диапазоне $[0, 1]$, а увеличенное значение $\Delta X_i^{\text{нов}}$ определяется следующими факторами:

$$\Delta X_i^{\text{нов}} = \frac{\text{rand}_x}{|\text{rand}_y|^{1/\beta}} \times \frac{\sigma_x(\beta)}{\sigma_y(\beta)} \times (Xbest_i - Gbest_i), \quad (20)$$

где rand_x и rand_y являются двумя нормально распределенными случайными величинами со стандартным отклонением $\sigma_x(\beta)$ и $\sigma_y(\beta)$, которое определяется по формуле:

$$\sigma_x(\beta) = \left[\frac{\gamma(1+\beta) \cdot \sin\left(\frac{\pi\beta}{2}\right)}{\gamma\left(\frac{1+\beta}{2}\right) \cdot \beta \cdot 2^{\left(\frac{\beta-1}{2}\right)}} \right], \sigma_y(\beta) = 1,$$

где β – коэффициент распределения ($0,3 \leq \beta \leq 1,99$) и γ является функцией гамма-распределения.

5. Обнаружение чужеродных яиц. Каждое яйцо кукушек при кладке в гнезде других птиц будет обнаружено с вероятностью P_a . Процесс обнаружения яиц других птиц в CSA также дал новое решение проблемы, похожей на «полет Леви». Яйца будут заменены более качественными яйцами, произведенными случайным движением по сравнению с существующим их положением следующим образом

$$X_i^{\text{нов}} = \text{round} [Xbest_i + K \times \Delta X_i^{\text{нов}}]. \quad (21)$$

K – обновленный коэффициент, определенный на основе вероятности того, что владелец обнаружит странное яйцо в своем гнезде:

$$K = \begin{cases} 1 & \text{если } \text{rand} < P_a \\ 0 & \text{другой} \end{cases}$$

Максимальное значение $\Delta X_i^{нов}$ определяется следующими факторами:

$$\Delta X_i^{нов} = rand \times [randp_1(Xbest_i) - randp_2(Xbest_i)],$$

где $rand$ являются распределенные случайные значения в диапазоне $[0,1]$, $randp_1(Xbest_i)$, $randp_2(Xbest_i)$ являются случайными возмущениями для позиций гнезд в $Xbest_i$. Для вновь полученного решения алгоритм проверки топологии выполняется для регулирования гнезда, значение функции пригодности вычисляется по формуле (17), и гнездо, соответствующее наилучшей функции пригодности, устанавливается в лучшее гнездо $Gbest$.

6. Критерий завершения алгоритма.

Производящие новых кукушек и обнаруживающие чужеродные яйца шаги поочередно выполняются до тех пор, пока число итераторов ($Iter$) не достигает максимального значения ($Iter_{max}$). Блок-схема этапов реализации оптимизации структуры городской СЭС с использованием алгоритма CSA показана на рисунке 8.

Чтобы продемонстрировать эффективность оптимизации структуры СЭС городского района на основе CSA, предлагаемый метод был применен для оптимизации конфигурации сети в трех стандартных системах распределения электроэнергии IEEE, включая 33, 69 и 119 узлов. В частности, в модельных лабораториях предполагается игнорировать потери мощности трансформатора и электрических устройств в сети. Программа оптимизации структуры СЭС городского района использует алгоритм CSA, построенный в среде «Matlab» в форме «file.m», и запускается из «Command Window». Для того чтобы продемонстрировать эффективность метода на основе CSA, программа оптимизации структуры СЭС городского района с применением генетического алгоритма, непрерывного генетического алгоритма (CGA) и оптимального алгоритма стада (PSO) также была построена в среде «Matlab» в форме «file.m» и работала на том же компьютере, чтобы сравнить результаты оптимизации структуры на разных энергосистемах.

Координация и оптимизация уровней напряжения и потери мощности наблюдается в сети с 33 узлами. Рисунок 9 показывает схему решения оптимизации структуры СЭС с 33 узлами в случае не подключения и подключения одновременно с 4 РГ.

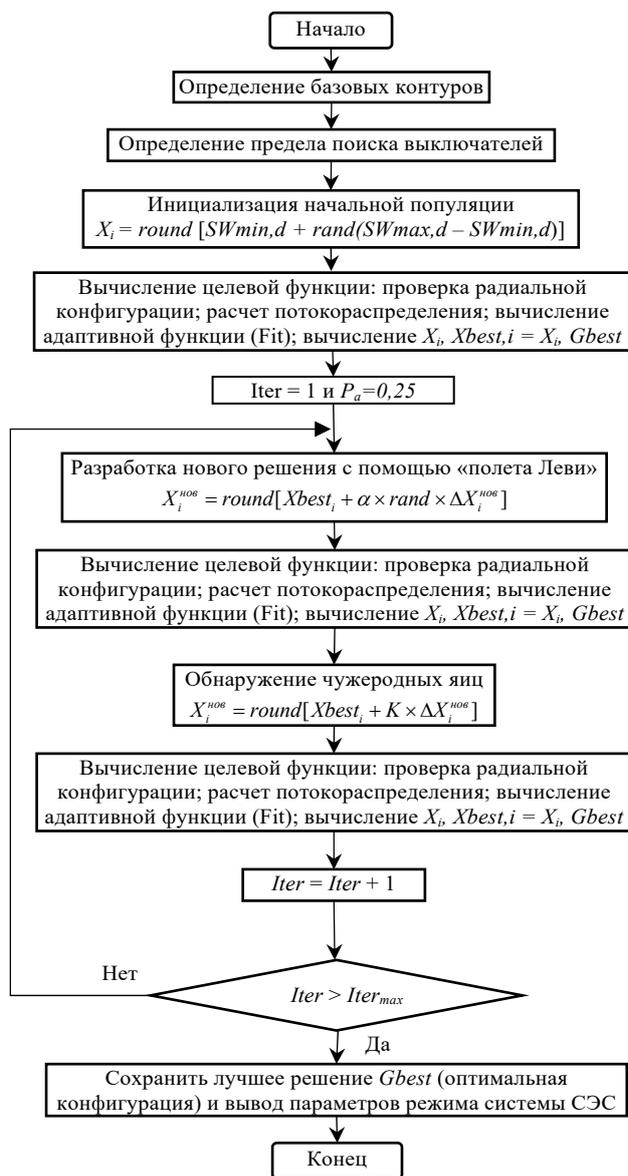


Рисунок 8 – Блок-схема метода оптимизации на основе CSA

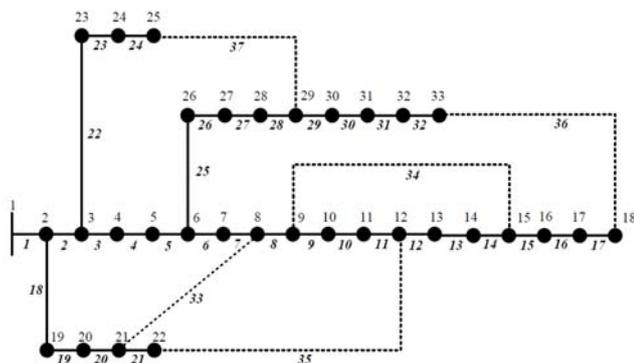


Рисунок 9 – Схема СЭС с 33 узлами

В исходной структуре система имеет 5 разомкнутых выключателей соответственно (37, 33, 35, 34, 36) и образует пять независимых контуров. Результаты реализации трех методов CSA, PSO и CGA в сети с 33 узлами представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Результаты внедрения в сети с 33 узлами

Метод	Размыкание выключателя	ΔP (кВт)	U_{\min} (о.е) (в узле)
Исходная	33, 34, 35, 36, 37	202,69	0,9108 (18)
CSA	7, 9, 14, 32, 37	139,55	0,9378 (32)
PSO	7, 9, 14, 32, 37	139,55	0,9378 (32)
CGA	7, 9, 14, 32, 37	139,55	0,9378 (32)

После выполнения оптимизации структуры потери мощности снизились с 202,69 до 139,55 кВт, а минимальная амплитуда напряжения в системе увеличилась с 0,91081 до 0,9378 о.е при разомкнутых выключателях (7, 9, 14, 32 и 37).

На рисунке 10 показано, что большинство амплитуд напряжения узлов значительно улучшены по сравнению с предыдущей конфигурацией. Рисунок 11 демонстрирует, что после выполнения оптимизации структуры ни одна ветвь не перегружена. Рисунок 12 отражает, что средняя характеристика сходимости CSA намного лучше, чем методы PSO и CGA.

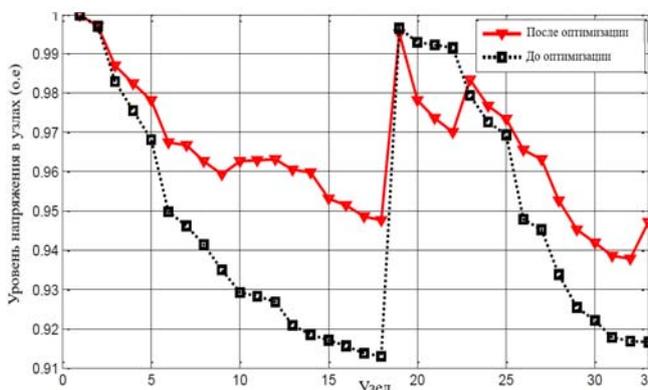


Рисунок 10 – Напряжения до и после оптимизации

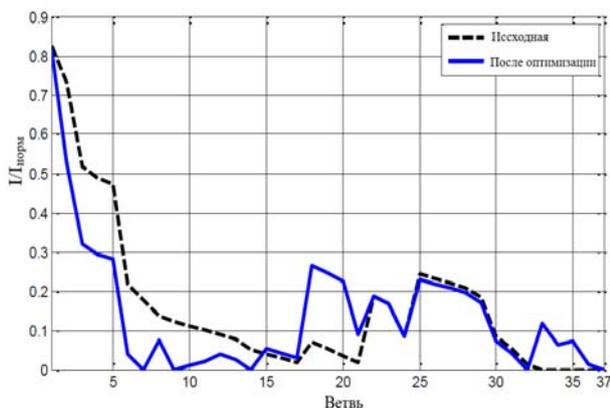


Рисунок 11 – Коэффициент нагрузки до и после оптимизации

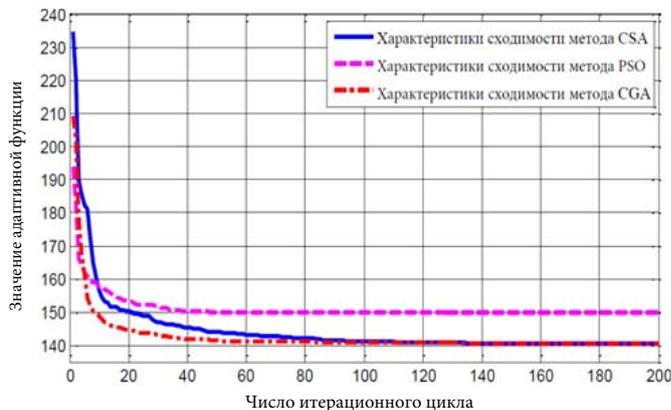


Рисунок 12 – Характеристики сходимости методов CSA, PSO и CGA

Применение алгоритма CSA осуществлено в сетях из 69 узлов. При нормальных условиях работы СЭС с 69 узлами выключатели (69, 70, 71, 72, 73) отключаются, как показано на рисунке 13. После выполнения оптимизации структуры с 69 узлами выключатели (14, 57, 61, 69 и 70) отключаются с уменьшением потерь мощности с 224,95 до 98,59 кВт, а самая низкая амплитуда напряжения узла в системе увеличивается с 0,9092 до 0,9495 о.е. Рисунок 14 демонстрирует, что большая часть амплитуды напряжения узла была значительно улучшена по сравнению с исходной конфигурацией сети.

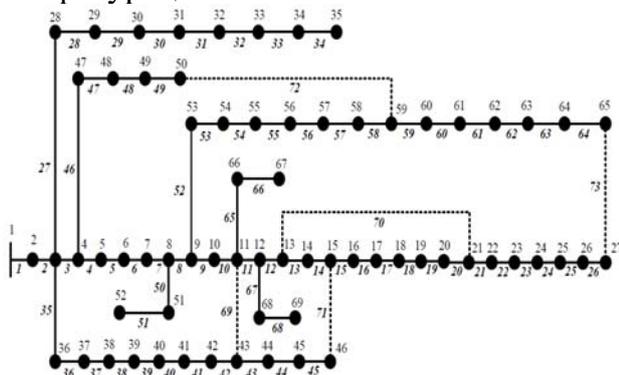


Рисунок 13 – Моделирование схемы СЭС с 69 узлами

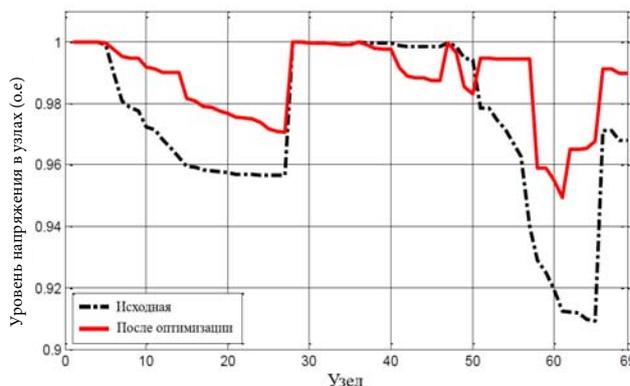


Рисунок 14 – Напряжения в сети с 69 узлами до и после оптимизации

Результаты сравнения трех методов CSA, PSO и CGA представлены в таблице 5. Они показали, что итоговые данные, полученные с CSA и CGA, были почти одинаковыми, в то время как CSA превзошел PSO в среднем в 50 раз после независимой реализации.

Таблица 5 – Результаты внедрения в распределительной сети 69 узлов

Метод	Размыкание выключателя	ΔP (кВт)	U_{min} (о.е) (узел)
Исходная	69, 70, 71, 72, 73	224,95	0,9092
CSA	69, 70, 14, 57, 61	98,59	0,9495 (61)
PSO	69, 70, 14, 57, 61	98,59	0,9495 (61)
CGA	69, 70, 14, 57, 61	98,59	0,9495 (61)

В таблице 6 также показано, что CSA дает лучшие результаты, чем программное обеспечение CGA, PSO. В результате реконфигурирования с использованием метода CSA получена конфигурация с потерями 867,01 кВт, что на 11,97кВт выше, чем по методу CGA. Это показывает эффективность предлагаемого метода в СЭС с большими масштабами.

Таблица 6 – Результаты, выполненные на 119 узлах распределения

Метод	Размыкание выключателя	ΔP (кВт)	U_{min} (о. е) (в узле)
Исходная	118, 119, 120, 121, 122, 123, 124, 125, 126, 127, 128, 129, 130, 131, 132	1273,45	0,8678 (77)
CSA	42, 25, 23, 121, 50, 58, 39, 95, 71, 74, 97, 129, 130, 109, 34	855,04	0,9298 (111)
PSO	26, 11, 22 121, 50, 58, 8, 95, 72, 127, 128, 82, 130, 109, 132	973,98	0,9296 (111)
CGA	42, 25, 23 121, 50, 58, 39, 95, 70, 73, 128, 129, 130, 109, 34	867,01	0,9298 (111)

Итоговые характеристики оптимизации структуры с использованием трех методов, выполненные на 119 узлах распределения, показаны на рисунках 15, 16. После выполнения оптимизации структуры с CSA потери мощности снизились с 1273,45 до 855,04 кВт. Амплитуда узла напряжения значительно улучшилась после выполнения оптимизация топологии с наименьшим напряжением узлов до 0,9298 о.е.

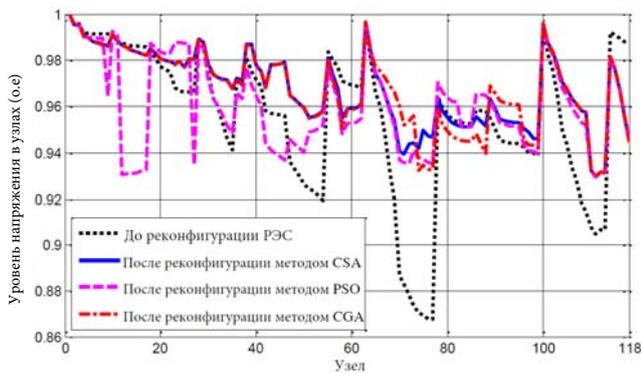


Рисунок 15 – Уровень напряжения в узлах

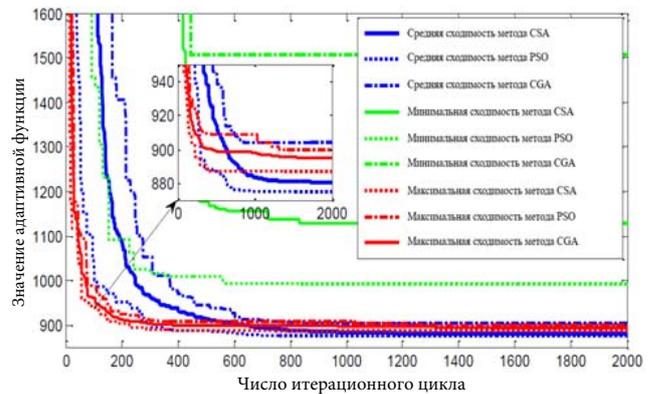


Рисунок 16 – Характеристики сходимости

По результатам, отраженным на рисунках 15, 16 и в таблице 6, можно сказать, что для распределительных сетей с большим масштабом алгоритмы CSA дают более оптимизационные выводы, чем методы PSO и CGA.

Метод оптимизации структуры распределительной сети городского района использует оптимальный алгоритм CSA, который был применен в распределительной сети «Chu Prong» для достижения ряда целей и условий эксплуатации.

Текущая конфигурация сети с разомкнутыми выключателями (257, 258, 259) с наименьшими потерей мощности, напряжением, максимальным коэффициентом нагрузки составляет 81,5655 кВт, 0,9717 (узел 99) и 0,2834 о.е. соответственно. Емкость источников питания в четырех фидерах 474 / 11RC, 472 / F19, 474 / F19 и E480 / E42 равны соответственно 2,3206, 1,6560, 1,9853 и 2,9559 МВА. После выполнения оптимизации структуры СЭС «Chu Prong» с помощью метода CSA потери мощности снизились с 81,5655 до 73,9053 кВт при использовании выключателей (257, 231, 143). Изменения напряжения узлов в системе до и после оптимизации структуры показаны на рисунке 17. Коэффициент нагрузки в ветвях дан на рисунке 18.

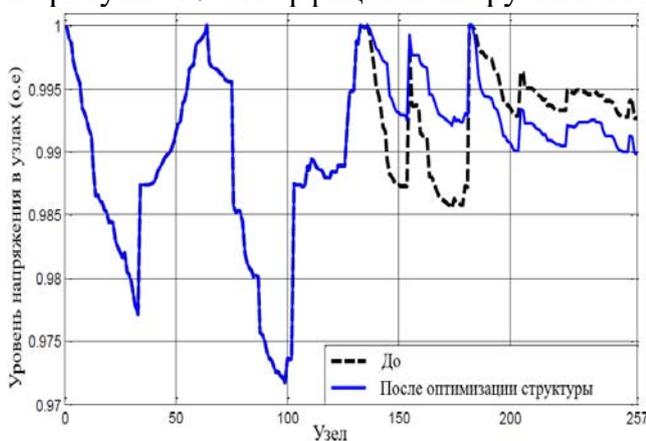


Рисунок 17 – Уровень напряжения до и после оптимизации

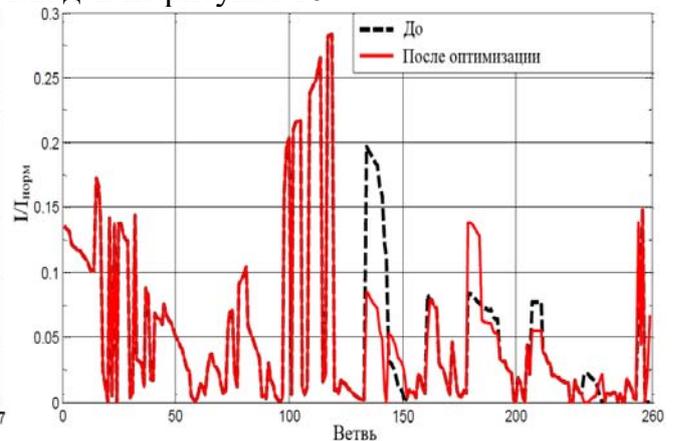


Рисунок 18 – Коэффициент нагрузки в ветвях до и после оптимизации

Из рисунка 18 видно, что при текущей нагрузке коэффициент на ветви сети «Chu Prong» очень низок в диапазоне (0–0,2834). Однако ясно, что баланс мощности четырех фидеров значительно отличается от того, что было до оптимизации структуры с помощью источника питания соответственно (2,3206, 2,7416, 0,8604, 2,9559 МВА). При текущем уровне нагрузки распределительной сети «Chu Prong» оптимизация топологии с CSA определила новую операционную структуру: снижение потерь мощности на 9,4 % по сравнению с существующей структурой сети.

Характеристика сходимости CSA в 20 независимых прогонах показана на рисунке 19.

Наибольшие, наименьшие и средние значения, стандартное отклонение адаптивной функции, данные в таблице 7, демонстрирует, что решение, найденное алгоритмом CSA, надежно, потому что среднее значение адаптивной функции гораздо ближе к их наименьшему значению. Среднее время расчета составляет около 108 секунд.

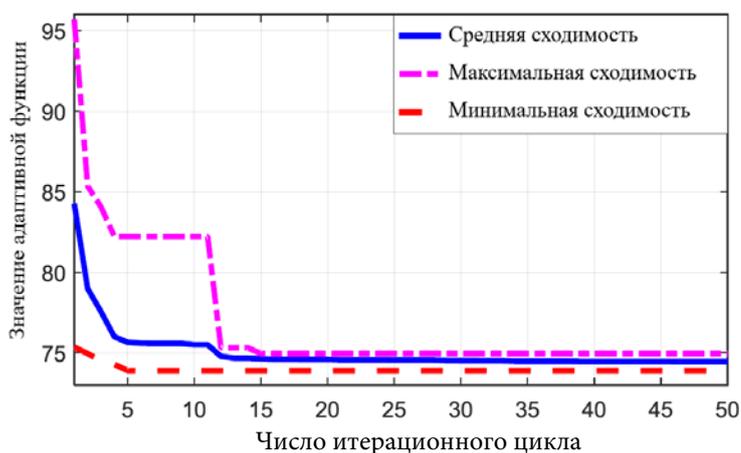


Рисунок 19 – Характеристики сходимости метода CSA

Таблица 7 – Результаты оптимизации с целью снижения потери мощности.

Параметры	Исходная конфигурация	После реконфигурации (по снижению ΔP)
Размыкание выключателя	257, 258, 259	257, 231, 143
ΔP (кВт)	81,5655	73,9053
U_{min} (о.е.)	0,9717 (99)	0,9717 (99)
U_{max} (о.е.)	1 (1)	1 (1)
$(I/I_{норм})_{max}$	0,2834	0,2834
NSW	0	4
Max of Fit	-	74,9624
Min of Fit	-	73,9053
Mean of Fit	-	74,2224
СТД	-	0,381583
Mean of iteration	-	23,6
CPU time	-	107,8014

Основываясь на ситуации с распределительной сетью «Chu Prong», метод оптимизации CSA определил оптимальную эксплуатационную структуру для обеспечения баланса нагрузки между фидерами с наименьшим числом переводов выключателей. Результаты внедрения могут быть применены в качестве справочного материала при добавлении некоторых минимальных выключателей в сеть для удовлетворения потребностей многоцелевого использования.

Таким образом, алгоритм CSA является наилучшим с точки зрения точности и надежности достижения глобального минимума при оптимизации топологии системы электроснабжения.

В заключении формулируются следующие основные выводы дальнейших исследований по результатам диссертационной работы:

1. Разработана новая методика автоматического расчета потокораспределения в сложнзамкнутой сети по методу Ньютона–Рафсона, которая использует приближительное разделение активных и реактивных потоков в процессе расчета потокораспределения, одновременно корректируя значение матрицы Якоби в итерационном цикле.

В алгоритме матрица Якоби инвертируется только один раз и имеет три предположения. Во-первых, проводимость между узлами равна нулю; во-вторых, величина напряжения в узлах составляет единицу (о.е) и, в-третьих, фаза напряжения между узлами равна нулю.

Расчет потокораспределения (с декомпозицией по активной и реактивной мощностям) можно сделать в течение нескольких секунд, в то время как другие методы решения занимают больше времени. Это полезно для управления электрических сетей в реальном времени.

2. Проведен анализ фактических потерь электрической энергии, возникающих в электрических сетях, разработаны и оценены с точки зрения их эффективности мероприятия по снижению потерь мощности.

3. Проведен регрессионный анализ по определению функциональной зависимости потерь активной мощности от основных показателей качества электрической энергии.

4. Разработана новая целевая функция G для решения проблем оптимизации структуры распределительной сети, к которой относится подключение распределенной генерации энергии, в том числе настройка распределительной сети для эксплуатации в режиме онлайн, восстановление энергоснабжения, балансировка нагрузки, перераспределение мощности.

5. Созданы алгоритмы автоматического определения местоположения распределения и состояния (замкнутых/разомкнутых) нормально разомкнутых линейных выключателей и нормально замкнутых секционных выключателей в фидерах сети. Алгоритмы позволяют оперативно и просто находить местоположения распределения выключателей, что, в свою очередь, позволит повысить эффективность управления эксплуатационным режимом системы электроснабжения.

6. По результатам анализа и расчетов проведена оптимизация структуры системы электроснабжения, которая не влияет на применение других методов повышения качества и ее надежности, таких как метод компенсации реактивной мощности, установка распределенной генерации энергии. Для достижения наилучших результатов данные методы можно осуществлять параллельно вместе с методом оптимизации структуры системы.

7. Предложена методика оптимизации структуры сложнзамкнутых сетей, где применялся алгоритм «Поиск кукушек», основанный на паразитическом репродуктивном алгоритме данного вида птиц для достижения ряда целей и условий эксплуатации распределительных сетей городского района.

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, индексируемых по перечню рецензируемых изданий ВАК

1. Ha, Duc Nguyen. Improvement methods for solving the distribution network reconfiguration problem / Duc Nguyen Ha, I. M. Valeev // *Energetika*. – 2018. – Vol. 64. – No. 4. – P. 174–185.

2. Ха, Д. Н. Разработка методики расчета потерь мощности и уровня напряжения в сложных распределительных сетях / Д. Н. Ха, И. М. Валеев // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. – 2017. – Т. 19. – №. 1–2. – С. 75–85.

Другие научные публикации и доклады на научных конференциях

3. Ха, Д. Н. Оптимизация режимов работы распределительной сети с минимизацией активной мощности потерь и уровня напряжения с использованием алгоритма «поиск кукушки» / Д. Н. Ха и др. // *Вестник Казанского государственного энергетического университета*. – 2016. – №. 2(30). – С. 67–81.

4. Ха, Д. Н. Разработка схемы бустерного конвертора для устранения генерации гармоник тока компактными люминесцентными лампами / Д. Н. Ха // *XXI аспирантско-магистерский семинар, посвященный Дню энергетика: тез. докл.* – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2018. – Т. 1. – С. 276–277.

5. Ха, Д. Н. Ранжирование уровня качества электроэнергии на границе между сетями передачи и распределения / Д. Н. Ха // Научные механизмы решения проблем инновационного развития: сбор. ст. по итогам Междунар. науч. -практ. конф. – Стерлитамак: АМИ, 2018. – Ч.2. – С. 124–126.

6. Ха, Д.Н. Усовершенствованный алгоритм реконфигурации распределительной электрической сети / Д. Н. Ха // Научные механизмы решения проблем инновационного развития: сбор. ст. по итогам Междунар. науч. -практ. конф. – Стерлитамак: АМИ, 2018. – С. 79–81.

7. Ха, Д. Н. Совершенствование алгоритма расчета параметров режимов работы распределительной сети / Д. Н. Ха // Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве: матер. IV Национал. науч. -практ. конф. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2018. – Т. 2. – С. 351–359.

Ха Дык Нгуен

РАЗРАБОТКА И ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ ГОРОДСКОГО РАЙОНА

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Подписано в печать 14.01.2020. Формат 60×84 1/16. Печ. л. 1,3.
Бумага офсетная. Печать оперативная. Тираж 100 экз. Заказ № 2.

Отпечатано с готового оригинал-макета в типографии.
ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет»
420015, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 68.