

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Комсомольский-на-Амуре государственный университет»

На правах рукописи

Чернышова Дарья Витальевна

**Разработка математических моделей для определения  
оптимальных режимов работы энергосистем**

Направление подготовки 01.04.02  
«Прикладная математика и информатика»

**АВТОРЕФЕРАТ  
МАГИСТЕРСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ**

Работа выполнена в ФГБОУ ВО  
«Комсомольский-на-Амуре государственный университет»

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент,  
профессор кафедры «Общая физика»  
Гринкруг Мирон Соломонович

Рецензент: заведующий кафедрой  
информационной безопасности,  
информационных систем и физики  
ФГБОУ ВО «Амурский гуманитарно-  
педагогический государственный  
университет», кандидат физико-  
математических наук  
Анисимов Антон Николаевич

Защита состоится 25 июня 2021 года в 09 часов 50 мин на заседании государственной экзаменационной комиссии по направлению подготовки 01.04.02 «Прикладная математика и информатика» в Комсомольском-на-Амуре государственном университете по адресу: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27, ауд. 204/5.

Автореферат разослан 17 июня 2021 г.

Секретарь ГЭК



Ю.Г. Егорова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИСЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

*Актуальность темы.*

Оптимальное управление режимом энергосистемы является важнейшим условием ее эффективной и надежной работы. Если до реформы электроэнергетики в России оптимизация проводилась централизованно, то в новых экономических условиях решение оптимизационной задачи в той или иной постановке выгодно всем участникам рынка электроэнергии.

Каждый год происходит прирост потребления мощности. В соответствии с прогнозом спроса на электрическую энергию по ЕЭС России на период 2018 – 2024 годов среднегодовой прирост электропотребления по ЕЭС России за прогнозный период составит 1,22 %.

Постоянное развитие рынка электроэнергии ставит новые задачи оптимального управления, возникает необходимость в проведении исследований в направлении отыскания эффективных подходов и методик решения оптимизационных задач для различных электроэнергетических компаний в современных условиях.

Основной причиной повышенного внимания к задачам оптимизации в энергосистемах является возможность без каких-либо дополнительных капитальных вложений на оборудование или другие мероприятия, с помощью оптимизации и анализа той или иной задачи достигнуть экономии затрат на решение поставленной задачи.

*Целью работы является* разработка математической модели для определения оптимальных режимов работы энергосистем.

Для достижения поставленной цели решаются следующие *задачи*:

- изучение систем энергоснабжения;
- изучение существующих методик и математических моделей, которые используются для оптимизации энергосистем;
- разработка математической модели оптимального режима работы энергосистемы;

- описание математической модели оптимизации энергосистемы.
- разработка программного продукта, реализующего полученную математическую модель.

*Объектом исследования* являются системы электроснабжения, включающие в себя источники электроэнергии, сети высокого напряжения и потребителей электроэнергии.

*Предметом исследования* являются способы и методы определения оптимальных режимов работы энергосистем.

*Научная новизна исследования.*

Разработана математическая модель оптимизации энергосистемы и программный продукт, реализующий эту модель.

*Достоверность и обоснованность результатов исследования.* Достоверность научных положений и результатов, сформулированных в диссертации, подтверждается корректным использованием разделов теории оптимизации.

*Практическая значимость* заключается в разработке и программной реализации модели, позволяющей автоматизировать расчеты при определении оптимального распределения мощностей источников энергии для обеспечения минимума стоимости производства электроэнергии.

*Публикации:*

1 Чернышова, Д.В. Задача для определения оптимальных параметров системы электроснабжения при нормальных режимах работы / Д.В. Чернышова, М.С. Гринкруг // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: материалы III Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых Комсомольск-на-Амуре, 06-10 апреля 2020 г.: в 3 ч. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2020. - Ч.1 - С. 357-360.

2 Чернышова, Д.В. Алгоритм для определения оптимальных режимов работы систем электроснабжения / Д.В. Чернышова, М.С. Гринкруг // Производственные технологии будущего: от создания к внедрению:

материалы IV Международной научно-практической конференции. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2021. - С. 302-305.

*Структура и объем.*

Магистерская диссертация состоит из введения, общей характеристики, трех глав, заключения и списка литературы. Объем работы – 62 страницы, в том числе 14 рисунков, 5 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

*Введение* раскрывает актуальность темы, определяются цели и задачи исследования, объект, предмет, указываются научная новизна, практическая значимость, достоверность и обоснованность результатов исследования.

*В первой главе* раскрывается понятие систем электроснабжения, описываются их элементы и характеристики.

Основными элементами систем электроснабжения являются источники электроэнергии (электростанции); понижающие и повышающие трансформаторные подстанции; линии электропередач.

Потребители электрической энергии различаются по классу напряжений и мощности. Крупные источники электроэнергии (электростанции), как правило, располагаются в больших населенных пунктах, которые являются центрами районных распределительных сетей, являющихся потребителями электрической энергии.

Таким образом, система электроснабжения может быть представлена в виде сетки в узлах которой находятся источники электроэнергии и потребители, которые характеризуются параметрами, перечисленными выше. Узлы сетки связаны между собой линиями электропередач высокого напряжения.

Для примера рассмотрена система электроснабжения высокого напряжения Дальневосточного региона. На рисунке 1 отображена схема, на которой узлы, представленные районами электроснабжения, связаны между собой линиями электропередач высокого напряжения с указанием номинального напряжения и пропускной способности.

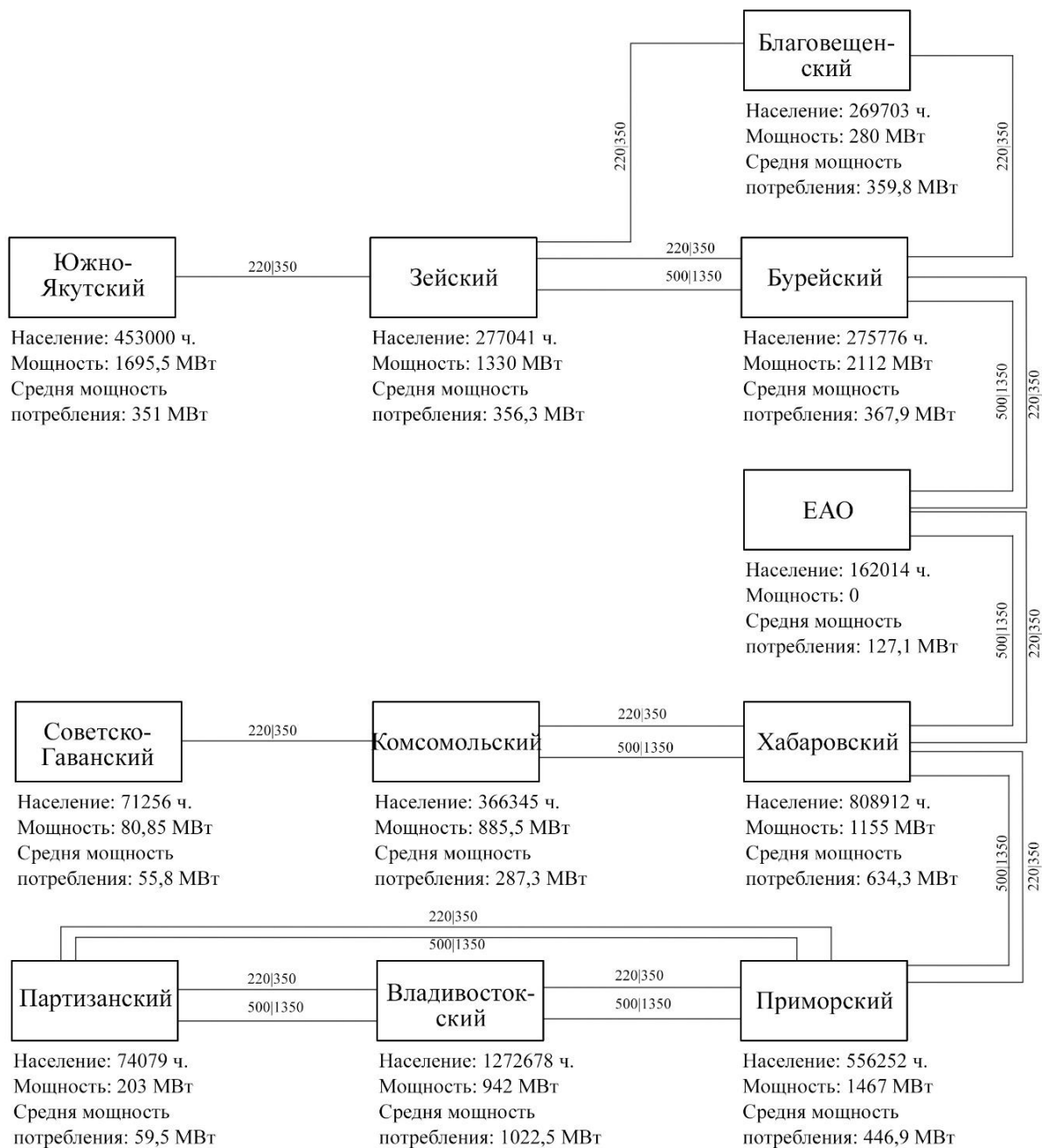


Рисунок 1 – Схема районов электроснабжения

Во второй главе описывается задача исследования, выбирается целевая функция и описывается алгоритм решения задачи.

С формальной точки зрения имеем следующую задачу: имеется система электроснабжения, которая описывается узлами сетки, в которых сосредоточены источники питания с располагаемой мощностью и источники потребления электрической энергии мощностью. Число узлов в сети -  $N$ ,

причем могут существовать узлы, в которых нет источников питания. Основные характеристики узла с номером  $i$  представлены следующими параметрами:

- Суммарная максимальная мощность электростанций в узле  $P_{i\max}$  (кВт).
- Количество и мощность каждого генераторного блока в узле  $P_{ik}$  (кВт), где  $k$  – номер генератора, текущая мощность каждого генератора  $p_{ik}$  (кВт).

При этом выполняется условие

$$\sum_{k=1}^N p_{ik} = P_i$$

- Суммарная мощность потребителей энергии в узле  $P_i$  (кВт). Эта величина является переменной. Она зависит от суточных (день, ночь) и сезонных (зима, лето) колебаний нагрузок.

- Стоимость производимой электроэнергии  $C_{ik}$  (руб/кВт\*ч), где  $k$  – номер генератора в узле. Эта величина даже в одном узле может быть разной для разных электростанций находящихся там.

Узлы сетки соединены между собой линиями электропередач, которые характеризуются следующими основными параметрами:

- Номинальное рабочее напряжение  $U_{ij}$  (кВ), где  $i$  и  $j$  – номера узлов, соединяемых линией электропередачи.
- Сопротивление линии электропередачи  $R_{ij}$  (Ом).
- Максимальный допустимый ток линии электропередач  $I_{\text{ном } ij}$  (А).
- Предельно допустимая пропускная способность линии электропередачи  $N_{ij}$  (кВт).
- Передаваемая мощность по линии электропередач  $Q_{\text{Вх } ij}$  (кВт) в начале линии и  $Q_{\text{Вых } ij}$  (кВт) в конце линии электропередач.
- Мощность потерь в линии электропередач

$$Q_{\text{п } ij} = I_{ij}^2 R_{ij} = Q_{\text{Вх } ij} - Q_{\text{Вых } ij} = \left( \frac{Q_{\text{Вх } ij}}{U_{ij}} \right)^2 R_{ij} \text{ (кВт)}.$$

Не все узлы сетки могут быть соединены между собой. Обычно в реальных системах электроснабжения в узле сходится не более трех-четырех



линий. Возможны также случаи, когда два узла соединяют более одной линии электропередач с разными параметрами.

Рассматривать задачу будем при нормальных режимах работы системы энергоснабжения.

При нормальном режиме работы все текущие показатели работы оборудования и систем (генераторов, трансформаторных подстанций, линий электропередач) работают при текущих значениях меньше либо равных номинальным значениям. Это означает, что вырабатываемые передающие мощности и токи меньше номинальных допустимых значений.

В качестве целевой функции при решении задачи поиска оптимальных параметров систем электроснабжения принимаем минимальное значение суммарной стоимости произведенной энергии. При заданном потреблении энергии и ее ценах это соответствует также условию максимальной получаемой прибыли энергокомпании. Математически сформулируем задачу следующим образом:

$$S = \sum C_{ik} \rho_{ik} \rightarrow \min.$$

При этом должны выполняться следующие условия. Для каждого узла должно выполняться условие равенства (баланса) произведенной и прибывшей в узел энергии с потребляемой энергией:

$$\sum_k \rho_{ik} + \sum_j Q_{Вх\ ij} - \sum_j Q_{Вых\ ij} = P_i$$

Должны выполняться ограничения по допустимой мощности каждого элемента:

- для генераторов

$$\rho_{ik} \leq P_{ik};$$

- для узла

$$\sum \rho_{ik} \leq \sum P_{ik};$$

- для линии электропередач

$$Q_{Вх\ ij} - Q_{Вых\ ij} = Q_{пот} \leq I_{нач\ ij}^2 R_{ij}$$

Для решения этой задачи предлагается следующий алгоритм:

1 Определяются свободные мощности по производству электроэнергии для каждого узла

$$\Delta p_i = P_i - \Pi_i$$

2 Выбираются узлы, имеющие избыточную мощность  $\Delta p_i > 0$ , и ранжируются по величине себестоимости произведенной электроэнергии от минимума к максимуму.

3 Для узла с минимальной себестоимостью производимой электроэнергии находятся ближайшие узлы (в пределах действия одной линии электропередач) куда может передаваться электроэнергия.

4 Формируется новая конфигурация узлов с новыми мощностями источников электроэнергии и себестоимостью ее производства в узлах.

5 В узлах, ближайших к узлу с минимальной себестоимостью электроэнергии появится дополнительный источник электроэнергии с параметрами

$$p_{i1} = N_{ij} \text{ и } C_{i1} = C_i \left(1 + \frac{Q_{ij}}{N_{ij}}\right).$$

В дальнейшем выполняются операции по пунктам 1-5 до достижения одного из двух следующих условий:

- Сумма мощностей потребления от дополнительных узлов, включая основной узел и мощность потерь энергии в линиях, становится равной мощности источника в основном узле.

- Стоимость энергии, вырабатываемой в дополнительном источнике в некотором узле с учетом транспортировки, станет больше либо равной стоимости электроэнергии, производимой в этом узле основным или другим дополнительным источником.

Далее весь цикл вычислений производится для следующего в порядке возрастания себестоимости электроэнергии основного узла.

Предложенный алгоритм решения оптимизационной задачи позволяет определить распределение мощностей источников энергии, обеспечивающее

минимум стоимости производства электроэнергии и распределение электроэнергии по линиям электропередач.

В третьей главе описывается разработанное программное обеспечение.

На рисунке 2 отображена схема электроснабжения, построенная с помощью разработанного ПО. Пример результата расчета мощностей источников энергии, обеспечивающих минимум стоимости производства электроэнергии, отображен на рисунке 3.



Рисунок 2 – Схема системы электроснабжения

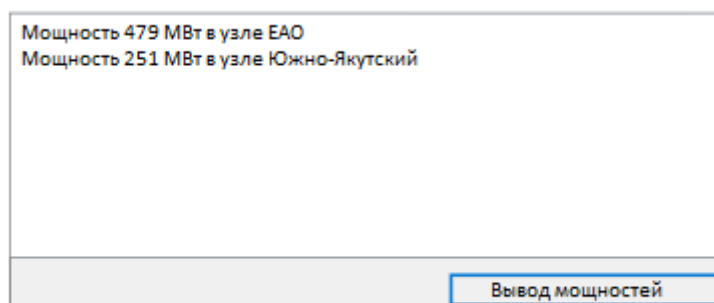


Рисунок 3 – Пример результата расчета мощностей

В заключении подводятся основные итоги исследований, проводится анализ полученных результатов.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

1 Чернышова, Д.В. Задача для определения оптимальных параметров системы электроснабжения при нормальных режимах работы / Д.В. Чернышова, М.С. Гринкруг // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: материалы III Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых Комсомольск-на-Амуре, 06-10 апреля 2020 г.: в 3 ч. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2020. - Ч.1 - С. 357-360.

2 Чернышова, Д.В. Алгоритм для определения оптимальных режимов работы систем электроснабжения / Д.В. Чернышова, М.С. Гринкруг // Производственные технологии будущего: от создания к внедрению: материалы IV Международной научно-практической конференции. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2021. - С. 302-305.