

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

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

На правах рукописи



Замараев Евгений Викторович

Математическое моделирование аварийных режимов работы  
энергосистем для определения оптимального состава силовых  
электростанций

Направление подготовки 01.04.02  
«Прикладная математика и информатика»

АВТОРЕФЕРАТ  
МАГИСТЕРСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ

2019

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

Научный руководитель:

кандидат технических наук,  
доцент, профессор кафедры  
«Прикладная математика и  
информатика»  
Гринкруг Мирон Соломонович

Рецензент:

кандидат технических наук,  
доцент кафедры математики  
факультета информационных  
технологий, математики и  
физики ФГБОУ ВО  
«Амурский гуманитарно-  
педагогический  
государственный университет»  
Севастьянов Антон Мамиевич

Защита состоится 25 июня 2019 года в 9 часов 50 минут 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. 321/3.

Автореферат разослан 17 июня 2019 г.

Секретарь ГЭК



Ю.Г. Егорова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

*Актуальность темы* обусловлена ежегодным приростом потребления мощности, что обуславливается увеличением спроса на электрическую энергию. В результате воздействия этого и других факторов, современные энергосистемы становятся все более сложными, что во многом связано с необходимостью учета экономических аспектов.

Согласно плану развития энергосистемы России, одна из основных задач программы развития ЕЭС России – обеспечение надежного функционирования в долгосрочной перспективе (Минэнерго России).

Надежное функционирование энергосистемы обеспечивается при точном соответствии объемов произведенной и потребленной электроэнергии в каждый момент времени.

Для эффективного и безопасного управления энергосистемой осуществляются расчеты электроэнергетических режимов.

*Целью* данной работы является математическое моделирование аварийных режимов работы энергосистем для определения оптимального состава силовых электростанций.

Для достижения поставленной цели решаются следующие *задачи*:

- изучить системы электроснабжения и их режимы работы;
- разработать математическую модель аварийного режима работы энергосистемы;
- разработать алгоритмы и программы, реализующие математическую модель энергосистемы в аварийном режиме.
- средствами разработанного программного обеспечения выполнить исследование аварийного режима энергосистемы, определить оптимальный состав силовых резервных электростанций.

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

*Предметом исследования* является определение на основе построенной схемы электроснабжения и введенных параметров необходимого числа модульных газотурбинных электростанций для экономии энергозатрат системы.

*Научная новизна исследования.* Разработана модель аварийного режима энергосистемы и программный продукт, позволяющие определять оптимальный состав силовых электростанций.

*Достоверность и обоснованность результатов исследования.* Основные положения и полученные в диссертации выводы аргументированы и экспериментально подтверждены. Разработанный программный продукт тестировался на примере существующей объединенной энергетической системы.

*Практическая значимость* заключается в разработке и программной реализации модели, позволяющих автоматизировать расчеты при определения оптимального состава силовых электростанций, числа газотурбинных блоков, их мощности и места установки.

*Апробация результатов*

Публикации:

- Журнал 2-ой Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Молодёжь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований» (2019 г.)

*Структура и объем*

Магистерская диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Объем работы – 135 страниц, в том числе 21 рисунок, 5 таблиц и приложение.

## 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 по устойчивости (кВ|МВт).

*Во второй главе* описываются режимы работы систем электроснабжения, причины и классификация аварийных ситуаций.

Различают нормальные и аварийные режимы работы систем электроснабжения. 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 вырабатываемы передающие мощности и токи меньше номинальных допустимых значений.

Аварийный режим энергосистемы - режим с параметрами, выходящими за пределы требований технических регламентов, возникновение и длительное существование которого представляют недопустимую угрозу жизни людей, повреждения оборудования и ведут к ограничению подачи электрической и тепловой энергии в значительном объеме.

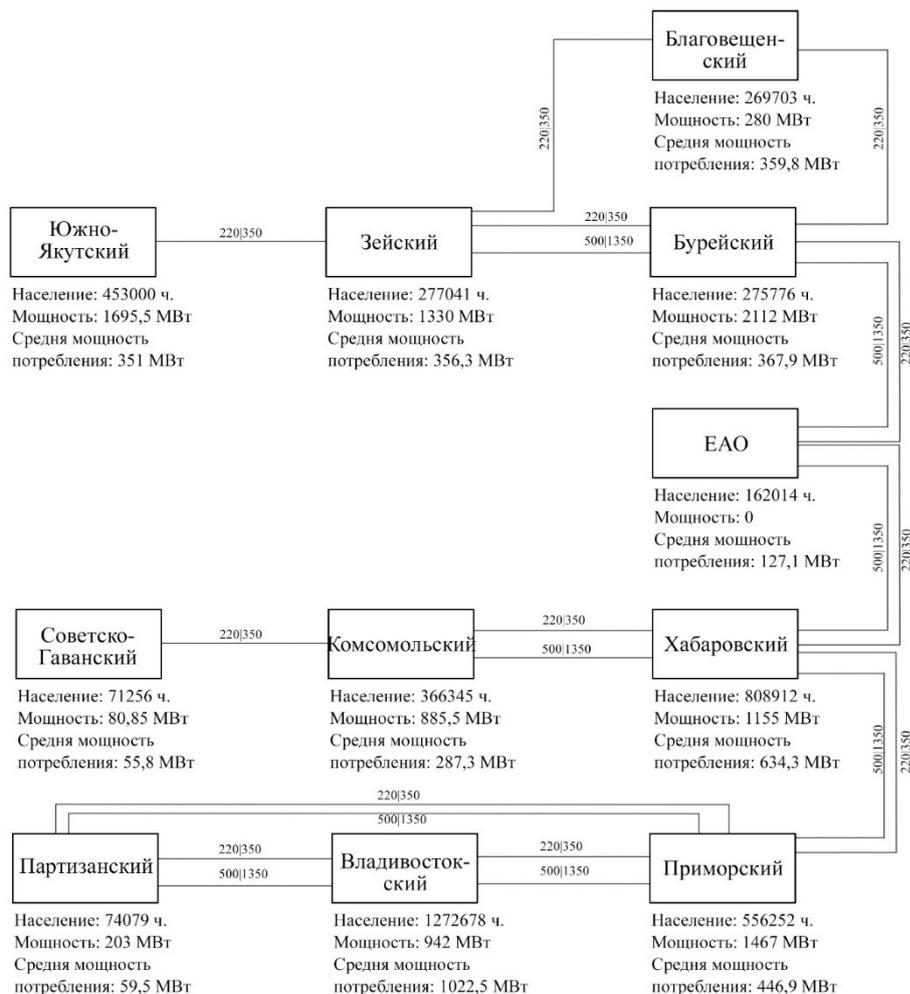


Рисунок 1 – Схема районов электроснабжения

Аварийные режимы работы систем электроснабжения возникают при повышении допустимых мощностей или токов. Различают аварии источников электроснабжения, трансформаторных подстанций и линий электропередач.

Причинами аварий электростанций могут быть перегрузка основного оборудования, короткие замыкания в генераторах и трансформаторных подстанциях на электростанциях, а также различные технические неисправности в основном оборудовании. Время ликвидации аварии и восстановления работоспособности оборудования бывает достаточно длительным (месяц и более). Аварии линий электропередач возникают, как правило, вследствие неблагоприятных погодных условий. Срабатывает защита линии, и она отключается. Восстановление работоспособности линии электропередач, как правило, занимает сутки – двое после прекращения плохой погоды.

В настоящее время принята практика поддержания в постоянной готовности резервных блоков электростанций для выдачи необходимой мощности в случае аварийных ситуаций в системе электроснабжения. В режиме холостой нагрузки поддерживается работа энергоблоков на тепловых электростанциях. При возникновении аварий, в каком-либо месте в сети, на линии или в подстанции, по резервным схемам электроэнергия передается по линиям электропередач в необходимые места. Происходит запуск в работу резервных блоков тепловых электростанций. Время запуска из горячего состояния для блоков тепловых электростанций составляет два-три часа, после чего восстанавливается нормальный режим электроснабжения всех потребителей. Если блоки тепловых электростанций находятся в холодном состоянии, то время пуска до принятия нагрузки составляет двое-трое суток. Все это приводит к тому, что по условиям надежности электрические сети вынуждены держать в горячем состоянии энергоблоки на тепловых электростанциях, работающие в режиме холостого хода и потребляющие энергоресурсы на поддержание такой работы. Это приводит к

дополнительным значительным затратам при производстве и распределении электроэнергии в системах электроснабжения.

Надежность энергетической системы является комплексным свойством и определяется как способность энергосистемы выполнять функции по производству, передаче, распределению и снабжению потребителей электрической энергией в требуемом количестве и нормированного качества путем взаимодействия генерирующих установок, электрических сетей и электроустановок потребителей, в том числе удовлетворять в любой момент времени общий спрос на электроэнергию; противостоять возмущениям, вызванным отказами элементов энергосистемы, включая каскадное развитие аварий и наступление форс-мажорных условий.

*В третьей главе* описывается задача исследования, предлагается решение обеспечения надежности электроснабжения, выбирается целевая функция и описывается алгоритм решения задачи.

В качестве альтернативного решения для обеспечения надежности электроснабжения при аварийных ситуациях в системе электроснабжения предлагается устанавливать модульные газотурбинные электростанции в различных точках системы электроснабжения. Такие электростанции имеют достаточно короткое время пуска до принятия полной нагрузки из холодного состояния (не более двадцати минут). При высокой степени автоматизации они способны самостоятельно запускаться без присутствия персонала и подключаться к нагрузке автоматически. Таким образом, будет экономиться существенная часть энергозатрат системы расходуемая для обеспечения работы резервных энергоблоков тепловых электростанций в холостом режиме.

С формальной точки зрения имеем следующую задачу: имеется система электроснабжения, которая описывается узлами сетки, в которых сосредоточены источники питания с располагаемой мощностью  $P_i$  и источники потребления электрической энергии мощностью  $R_i$ . Число узлов в сети -  $N$ , причем могут существовать узлы, в которых  $P_i$  равно нулю. Узлы

сетки соединены линиями электропередач  $X_{ij}$ , которые характеризуются максимальной пропускной способностью  $S_{ij}$  и номинальным напряжением  $U_{ij}$ . Для каждой линии также задана длина  $L_{ij}$  и сопротивление  $R_{ij}$ .

Требуется создать математическую модель, описывающую поведение такой системы. В зависимости от нагрузки системы определяются величины перетоков энергии по линии и нагрузки электростанций.

В качестве целевой функции предлагается взять суммарную стоимость газотурбинных электростанций. Желательно иметь минимальное суммарное значение стоимости газотурбинных резервных электростанций. Суммарная стоимость газотурбинных резервных электростанций может быть представлена в виде  $C = C_1 n_1 + C_2 n_2 + C_3 n_3 + \dots + C_i n_i$ , где  $C_i$  – стоимости каждого типа электростанций, а  $n_i$  – число каждого типа электростанций. Совокупную мощность резервных электростанций можно представить в виде суммы  $Q = Q_1 \cdot n_1 + Q_2 \cdot n_2 + \dots + Q_i \cdot n_i$ , где  $i$  – количество типов газотурбинных установок,  $Q_i$  – мощность соответствующего типа газотурбинной установки,  $n_i$  – число газотурбинных установок соответствующего типа.

На первом этапе осуществляется ввод всех исходных данных, включающих в себя мощность потребления  $P_i$ , номинальную мощность источников электроэнергии  $\Pi_i$  для каждого узла, а также величины, характеризующие линии электропередач, соединяющие узлы (длина  $L_{ij}$ , номинальное напряжение  $U_{ij}$ , пропускная способность  $S_{ij}$ , сопротивление  $R_{ij}$ ).

Второй этап заключается в том, что определяются узлы с недостатком выработки электроэнергии. Для каждого узла находится величина  $\Delta P_i = P_i - \Pi_i$ , и, если она положительна, то узел не имеет достаточных собственных мощностей по выработке электроэнергии и эта разность равна притоку электроэнергии в узел по линиям электропередач  $X_{ij}$ , приходящим в него. Если она отрицательна, то мощности источников электроэнергии  $\Pi_i$  достаточно для покрытия потребностей электроэнергии  $P_i$  в этом узле и притока электроэнергии может не быть. Для всех узлов, у которых  $\Delta P_i$

положительная, рассматривается вариант поиска необходимой мощности газотурбинных электростанций при обрывах линий электропередач.

Алгоритм работает следующим образом. Для каждого узла, у которого  $\Delta P_i$  больше нуля, рассматривается обрыв каждой из подводящих линий поочередно. При этом возможны различные варианты.

А) Недостающее количество электрической энергии поступает по другим линиям, входящим в узел, если позволяет пропускная способность этих линий ( $S_{ij} \geq \Delta P_i$ ) и имеются дополнительные мощности электроэнергии в соседних узлах ( $\Delta P_{i-1} + \Delta P_{i+1} \geq \Delta P_i$ ).

Б) Запускается пиковая газотурбинная электростанция ( $Q_i = \Delta P_i$ ), которая может быть установлена как в этом узле, так и в другом, соединенном с данным линиями электропередач.

Рассматриваются все варианты, и определяется суммарная мощность газотурбинной электростанции, необходимая для данного узла при аварии на одной из линий. Далее расчет повторяется для этого же узла и обрыва другой линии электропередач. Данная процедура проводится для всех узлов сети с недостаточным значением мощности источников электрической энергии после чего происходит суммирование всех мощностей газотурбинных электростанций ( $Q = Q + Q_i$ ), полученных в результате расчёта и выбирается минимальное значение из всех имеющихся вариантов.

В дальнейшем для полученных значений суммарной мощности производится процедура дискретизации, то есть определяется набор конкретных газотурбинных установок, способных обеспечить заданную суммарную мощность.

На рисунке 2 отображена укрупненная блок-схема расчета мощностей газотурбинных установок.

В четвертой главе описывается разработанное программное обеспечение, проводится расчет необходимой мощности газотурбинных станций.

На рисунке 3 отображена схема электроснабжения, построенная с помощью разработанного ПО. Результат расчета мощности газотурбинных станций отображен на рисунке 4.



Рисунок 2 - Алгоритм вычисления мощностей

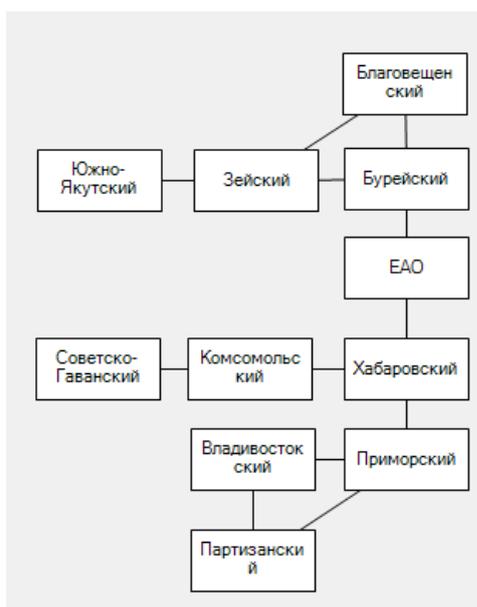


Рисунок 3 – Схема системы электроснабжения

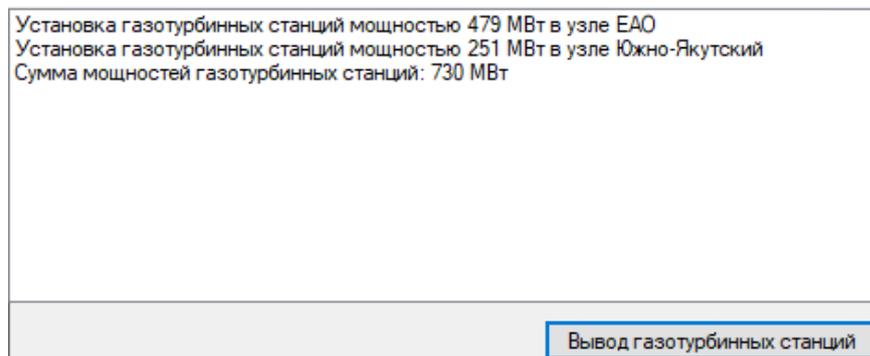


Рисунок 4 – Результат расчета мощностей газотурбинных станций

*В заключении* подводятся итоги работы, проводится анализ полученных результатов.

## **СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ИССЛЕДОВАНИЯ**

1 Замараев, Е.В. Математическое моделирование аварийных режимов работы энергосистем для определения оптимального состава силовых электростанций / Е.В. Замараев, М.С. Гринкруг // Сборник материалов конференции : 2-ая всерос. национальная науч. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных «Молодёжь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований», Комсомольск-на-Амуре, 8-12 апр. 2019 г.