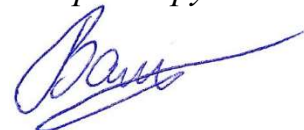


Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б.Н. Ельцина»

На правах рукописи



ВАЛИЕВ РУСТАМ ТАЛГАТОВИЧ

**РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ПОКАЗАТЕЛЕЙ
БАЛАНСОВОЙ НАДЕЖНОСТИ
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Специальность 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические
системы

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Екатеринбург – 2020

Работа выполнена на кафедре «Автоматизированные электрические системы» ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,
Обоскалов Владислав Петрович

Официальные оппоненты: **Тимашев Святослав Анатольевич**,
доктор технических наук, профессор, Федеральное
государственное бюджетное учреждение науки
Научно-инженерный центр "Надежность и ресурс
больших систем и машин" Уральского отделения
Российской академии наук, г. Екатеринбург,
главный научный сотрудник;

Чукреев Юрий Яковлевич,
доктор технических наук, старший научный
сотрудник, Институт социально-экономических и
энергетических проблем севера Коми научного
центра Уральского отделения Российской академии
наук Федерального государственного бюджетного
учреждения науки Федерального
исследовательского центра «Коми научный центр
Уральского отделения Российской академии наук»,
г. Сыктывкар, директор института;

Бык Феликс Леонидович,
кандидат технических наук, доцент, Федеральное
государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования «Новосибирский
государственный технический университет», г.
Новосибирск, доцент кафедры автоматизированных
электроэнергетических систем.

Защита состоится 24.11.2020 г. в 14:00 ч. на заседании диссертационного совета УрФУ 05.02.03 по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»:
<https://dissovet2.urfu.ru/mod/data/view.php?d=12&rid=1604>

Автореферат разослан « » октября 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета  **Самойленко Владислав Олегович**

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Планирование развития электроэнергетических систем (ЭЭС) предполагает необходимость решения задачи определения количественных характеристик единичных свойств надежности ЭЭС и рисков, связанных с её работой, представленных показателями балансовой надежности (ПБН). Решение отмеченной задачи требует учета вероятностных характеристик режим работы ЭЭС.

При централизованном планировании хозяйственной деятельности, существовавшем до 1991 года, задача обеспечения надежной работы электроэнергетической системы, как правило, решалась на этапе планирования развития, при этом согласованные решения по обеспечению надежности принимались на различных уровнях управления развитием и функционированием ЭЭС с учетом действующих на тот момент директивных документов, в которых содержались основные нормативные требования и методические указания по обеспечению надежности при планировании развития, эксплуатации и управлении режимами ЭЭС.

Структура и принципы управления ЭЭС в целом по миру и в т.ч. в России все больше усложняются, что связано с воздействием таких факторов как: увеличение доли распределённой генерации, внедрение новых технологий производства электроэнергии, в основе которых заложено использование возобновляемых источников энергии, усложнение схем сетей электроснабжения, увеличение протяженности ЛЭП, внедрение управления на стороне потребителя и др. В этих условиях все более существенную роль начинает играть оценка надежности сложносвязанных электроэнергетических систем (ЭЭС). В связи с отмеченным, как в России, так и за рубежом наблюдается возрастающий интерес к проблеме расчета ПБН ЭЭС. Несмотря на то, что в России до последнего времени эта тенденция наблюдалась не столь отчетливо, в последние годы можно заметить увеличение числа документов, закрепляющих основные положения и требования к расчетам ПБН. С 1 января 2019 года введен в действие Предварительный национальный стандарт Российской Федерации ПНСТ: «304-2018: Балансовая надежность энергосистем. Часть 1. Общие требования», формирующий понятийный аппарат в области расчета балансовой надежности энергосистем. С 1 сентября 2019 АО «Системный оператор Единой энергетической системы» был введен стандарт технической организации (СТО) 59012820.27.010.005-2018, регламентирующий методические указания по проведению расчетов балансовой надежности, а с 1 марта 2020 года в России вступил в силу национальный стандарт: «ГОСТ Р 58730-2019 Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Планирование развития энергосистем. Расчеты балансовой надежности. Нормы и требования». Следует отметить, что Европейская сеть системных операторов передачи электроэнергии (ENTSO-E) ежегодно представляет отчет по оценке балансовой надежности с рекомендациями по коррекции существующих методик расчета ПБН и в рамках которого отмечаются существующие

проблемы расчета, в число которых входят и отмеченные выше. В США аналогичные задачи решает Североамериканская корпорация по вопросам надежности энергоснабжения (NERC).

В настоящее время наиболее широко распространенным методом расчета ПБН ЭЭС является метод статистического моделирования (Монте Карло) (ММК). Он позволяет достаточно полно учесть основные сетевые ограничения, определяющие надежность ЭЭС, и практически не накладывает ограничения на вид используемых законов распределений. Усложнение структуры управления как ЭЭС России, так и зарубежных ЭЭС требует повышения детализации расчетной модели используемой при расчете ПБН. Отмеченное, в свою очередь приводит к усложнению её вычислительной сложности и, как следствие, увеличивает время, требуемое для получения ПБН с помощью ММК. При этом длительность расчетов становится значительной даже по меркам задач долгосрочного планирования, в рамках которых главным образом и используются ПБН.

Стохастическое состояние ЭЭС характеризуется вероятностью появления локального или глобального дефицита мощности, по заданному критерию распределяемого между отдельными ЭЭС, входящими в состав объединения. Последняя процедура получила название задачи распределения дефицитов мощности (РДМ), и именно она во многом определяет как показатели надежности отдельных ЭЭС, так и время расчетов.

Альтернативой ММК для определения ПБН могут выступать аналитические методы расчета. Суть аналитических методов сводится к преобразованию функций распределения исходных величин (генерации и нагрузки) с помощью методов теории вероятностей и математической статистики для получения результирующих ПБН отдельных ЭЭС входящих в состав объединенной энергосистемы (ОЭС). Погрешность результирующих величин аналитических методов, в отличие от ММК, не зависит от числа моделируемых случайных состояний, однако общая вычислительная сложность и невозможность, в ряде случаев учета сетевых ограничений, не позволяют, на сегодняшний день, полностью заменить ими ММК, что предполагает необходимость разработки новых и совершенствования существующих методов расчета ПБН.

Степень научной проработанности проблемы. Основы отечественной школы надежности были заложены еще в СССР. При этом, несмотря на значительный спад заинтересованности в этой области в 90-е годы после распада СССР, исследования надежности ЭЭС не останавливались и продолжают вплоть до настоящего времени. Среди отечественных публикаций следует особо выделить труды таких ученых как: Ф.Л. Бык, Н.И. Воропай, М.А. Дубицкий, В.Ю. Иткин, В.Г. Китушин, Г.Ф. Ковалев, Ю.Н. Кучеров, Л.М. Лебедева, Н.А. Манов, В.А. Непомнящий, В.П. Обоскалов, М.Н. Розанов, Ю.Н. Руденко, И.А. Ушаков, Г.А. Федотова, М.Б. Чельцов, Ю.Я. Чукреев, М.Ю. Чукреев, В.Д. Шлимович и др. Зарубежную школу надежности главным образом представляют такие исследователи как: Р. Аллан (R. Allan),

Р. Биллinton (R. Billinton), Б. Борковска (B. Borkowska), Ю. Гао (Yi Gao), Дж. Эндрени (Endrenyi, J.). Кроме того, отдельно следует выделить исследовательские группы, сформированные в рамках Международного совета по большим электрическим системам высокого напряжения (CIGRE) и Института инженеров электротехники и электроники (IEEE).

Цель диссертационного исследования: в рамках задачи расчета показателей балансовой надежности сложнзамкнутых ЭЭС:

- модификация существующих математических методов и алгоритмов, используемых при определении ПБН с целью повышения их вычислительной эффективности и учета дополнительных свойств ОЭС;
- разработка и апробирование нового аналитического метода расчета стохастических характеристик перетоков мощности в рамках задачи расчета ПБН.

Задачи диссертационного исследования:

- обзор существующих подходов к расчету ПБН сложнзамкнутых ЭЭС;
- анализ существующих критериев оптимального распределения дефицита мощности в сложнзамкнутых ОЭС;
- модификация расчетной процедуры РДМ с целью повышения ее вычислительной эффективности и учета дополнительных свойств и функциональных характеристик ОЭС, в том числе потенциального принципа распределения потоков мощностей;
- разработка аналитического подхода для расчета стохастических характеристик перетоков мощности в рамках задачи определения ПБН с учётом критерия оптимального РДМ и ограниченной пропускной способности межсистемных связей;
- апробация разработанного аналитического метода и модифицированных процедур РДМ на тестовых схемах.

Объектом исследования является ОЭС, с ограниченными пропускными способностями межсистемных связей и концентрированными ЭЭС в качестве отдельных узлов.

Научная новизна диссертационного исследования:

- разработан аналитический метод расчета вероятностных характеристик перетоков мощности сложнзамкнутой ОЭС;
- разработан математический подход связанный с использованием потенциального принципа распределения потоков мощности в МСС при решении задачи ОРДМ;
- на основе анализа эффективности комбинаций «целевая функция – управляющие переменные» в задаче ОРДМ в ЭЭС предложены оптимальные, с точки зрения вычислительной эффективности и точности получаемых результатов, комбинации как для анализа отдельных детерминированных состояний, так и для использования в рамках расчета вероятностных характеристик перетоков мощности.

Теоретическая значимость работы заключается в разработке аналитического метода вероятностной оценки перегрузки межсистемных связей и математического аппарата учета потенциального принципа распределения потоков мощности по межсистемным связям в задаче анализа балансовой надежности ОЭС.

Практическая значимость работы заключается в разработке модификаций методов расчета ПБН электроэнергетических систем. Предложенные модификации позволяют более полно учесть электрические свойства ЭЭС и ускорить расчеты ПБН электроэнергетических систем при использовании ММК.

Методология исследования. Исследования выполнены на базе теоретических основ электротехники, теории вероятностей и математической статистики. Разработанные алгоритмы тестировались на схемах ЭЭС. Оценка эффективности, рассматриваемых методов и алгоритмов оценивалась методом статистического моделирования (Монте-Карло). Для расчетов и программной реализации алгоритмов использовался программный комплекс MATLAB.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

- анализ и результаты сопоставления существующих методов и алгоритмов решения задачи БН ОЭС;
- анализ критериев оптимальности в оптимизационной процедуре РДМ;
- вероятностно-аналитический метод расчета ПБН;
- модификации существующих процедур ММК, применяемых для расчета ПБН ОЭС;
- алгоритм учета ограниченных пропускных способностей межсистемных связей в вероятностной постановке.

Личный вклад автора заключается в разработке программного обеспечения для проверки работоспособности и эффективности существующих и предлагаемых математических методов, алгоритмов и вычислительных процедур; участии в разработке новых подходов решения задачи БН ОЭС; тестировании вероятностно-аналитического метода расчета ПБН; изучении проблемы учета ограниченных пропускных способностей межсистемных связей в вероятностной постановке, разработке путей и вычислительных процедур ее решения.

Достоверность результатов подтверждается результатами вычислительных экспериментов на тестовых схемах ОЭС.

Апробация результатов работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на 7 конференциях:

- Международная научно-техническая конференция «Электроэнергетика глазами молодежи» – Томск – 2014, Иваново – 2015, Казань-2016;
- 2015 IEEE 56th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTU CON), 2015, Riga, Latvia;
- 2017 IEEE 58th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTU CON), 2017, Riga, Latvia;

- 2017 14th International Conference on Engineering of Modern Electric Systems, (EMES), 2017 Oradea, Romania;
- 2018 IEEE 59th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON), 2018, Riga, Latvia.

Публикации: По результатам работы опубликовано 11 работ, в том числе 8 статей в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК и Аттестационным советом УрФУ, включая 4 статьи в изданиях, индексируемых в международных реферативных базах цитирования Scopus и Web of Science.

Структура работы. Работа состоит из введения, 4 глав, заключения и библиографического списка из 94 наименований и 1 приложения. Содержит 109 страниц, 23 рисунка и 9 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении изложена актуальность выполненного исследования, сформулированы цели, задачи и научная новизна работы, охарактеризована практическая ценность результатов исследования, выделены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлены общие определения надежности ЭЭС принятые в российской практике. Представлены основные виды и показатели надежности ЭЭС используемые в России и за рубежом. Описаны наиболее распространенные методы расчета ПБН ЭЭС. Представлена расчетная модель, используемая в существующих процедурах определения ПБН ЭЭС.

На сегодняшний день, наиболее распространенными методами для расчета ПБН как в России, так и за рубежом являются методы статистического моделирования (Монте-Карло (ММК)), где основные процессы функционирования объекта, имеющие стохастическую природу, представляются многократно испытываемой вероятностной моделью. Данные методы являются по существу, методами «математического испытания на надежность». ММК, как правило, используются в тех случаях, когда еще не проработаны, или недостаточно отлажены аналитические методы. В них алгоритмически учитываются те определяющие надежность ЭЭС факторы, которые еще не имеют математической модели и где, практически, нет ограничений на вид законов распределений моделируемых событий. Необходимая точность, достигается ценой увеличения числа реализаций, что приводит к значительной, даже по меркам задач долгосрочного планирования, длительности расчета ПБН.

Идея аналитических методов заключается в однократном использовании формульных выражений, полученных путем создания математической модели и преобразования функций распределения (рядов вероятностей) исходных величин с использованием методов математической статистики и теории вероятностей.

Не менее важную роль в расчете ПБН играет расчетная модель ЭЭС. Формирование расчетной модели ЭЭС – один из ключевых этапов при планировании развития ЭЭС. Основные факторы, оказывающие влияние на балансовую надежность ЭЭС, главным образом, связаны с тремя категориями:

генерацией, потреблением и передачей электроэнергии. В связи с этим, модели для оценки ПБН достаточно подробно (по меркам задач долгосрочного планирования) должны учитывать стохастический характер величин, характеризующих производство, передачу и потребление электроэнергии.

В российской практике преобладают два подхода представления генерации ЭЭС. Первый подход заключается в использовании вероятностной модели состояний и режимов работы каждого генератора. Второй подход предполагает рассмотрение располагаемой генерирующей мощности в ЭЭС и построение функций распределения (ФР) вероятностей генерации для каждой отдельной ЭЭС в целом (в рамках диссертационной работы используется именно второй подход).

В моделях нагрузки для оценки показателей балансовой надежности ЭЭС, как правило, учитываются: суточные и годовые неравномерности режима электропотребления, ошибки прогнозируемого регулярного максимума и нерегулярные отклонения от средних величин. При этом ковариационная матрица отклонений при оценке ПБН в рамках одного часа (промежутка относительного постоянства нагрузки), может быть представлена диагональной матрицей, то есть располагаемые генерации зон надежности здесь могут рассматриваться как независимые случайные величины. Для описания ФР электропотребления, как правило, используется нормальное распределение.

Стохастический характер пропускных способностей межсистемных связей (ПС МСС) учитывается дискретным вероятностным распределением, представляемым вероятностным рядом. Представление ПС непрерывным распределением приводит к большим погрешностям, поскольку число состояний МСС относительно невелико (два при одной ЛЭП).

Во второй главе представлен обзор наиболее распространенных математических моделей и стратегий ограничения нагрузки при оптимальном распределении дефицита мощности (РДМ) в ОЭС.

Вероятностное состояние ЭЭС связано с возможностью появления локального дефицита мощности, который по некоторому критерию распределяется между ЭЭС, входящими в состав объединения. Последняя процедура получила название задачи РДМ. Правило (критерий) РДМ во многом определяет показатели надежности, в связи с чем возникает потребность учета стратегий взаимопомощи между узлами ОЭС. Стоит отметить, что основное отличие стратегий заключается, главным образом, в формулировке целевой функции, при этом ключевые ограничения, в том или ином виде, соблюдаемые для каждой стратегии представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Основные ограничения в задаче РДМ

Наименование	Ограничение
баланс мощности:	$\bar{L} - \bar{G} + (X - X')\bar{I} = 0$,
ограничение на ПС МСС:	$0 \leq X \leq X_{\max}$,
ограничение величины отключаемой нагрузки:	$\bar{L}^{\min} \leq \bar{L} \leq \bar{L}_{\Phi}$,
ограничение используемой генерации:	$\bar{G}_{\min} \leq \bar{G} \leq \bar{G}_P$,
учет возможности протекания перетоков мощности в прямом и обратном направлении	$\langle X, X' \rangle = 0$.

где: \bar{L}_ϕ, \bar{L} – фактический и покрытый спрос соответственно, \bar{G}_p, \bar{G} – располагаемая и обеспеченная генерация соответственно; $\langle X, X^t \rangle$ – скалярное произведение матриц; $X = \{X_{ij}\}$ – перетоки мощности (в рамках описания стратегий РДМ, более удобным видится представление связей в системе матрицей, однако возможно также использование векторного представления с заданием инцидентных узлов для каждой связи $j, j=1, \dots, k$); 1 – n -мерный вектор из единиц; n – число обобщенных узлов в расчетной схеме.

В таблице 2 представлены основные стратегии РДМ и используемые при расчете ПБН. Любая линейная модель РДМ не гарантирует единственность оптимального решения. При этом выбор решения осуществляется произвольно (например, любое, которое удовлетворяет критерию оптимальности), что приводит к отличию результирующих ПБН. По этой причине сопоставление программных комплексов относительно ПБН требует конкретизации стратегии ограничения нагрузки, используемой в процедуре РДМ. Иными словами, необходимо выделить совокупность «справедливых» или приближенных к реальной практике эксплуатации ЭЭС решений. Для реализации критерия «справедливости» РДМ может быть использована тарифная матрица H , учитывающая плату за передачу электроэнергии, однако она позволяет лишь частично сузить область равнооптимальных решений.

Таблица 2 – Основные стратегии РДМ

Наименование	Основные уравнения	Краткая характеристика
Линейная модель РДМ	$\min_{L, \bar{G}, X} (F = \bar{c}_n^T (\bar{L}_\phi - \bar{L}) + \bar{c}_r^T (\bar{G}_p - \bar{G}))$	Функция ущерба представлена в виде линейной целевой функции (ЦФ), что приводит к бесконечному множеству возможных решений (на грани многогранника ограничений) и требует наличия алгоритма выбора единственного решения.
Линейная модель РДМ, учитывающая затраты на передачу электроэнергии	$\min_{L, \bar{G}, X} (F = \bar{c}_n^T (\bar{L}_\phi - \bar{L}) + \langle H, X \rangle)$	Минимум компенсационных затрат на ограничение электропотребления при оптимальном потокораспределении. Стратегия позволяет сузить область равнооптимальных решений и минимизировать транспортные расходы.
Пропорциональная стратегия РДМ	$\bar{L} = \bar{L}^f ;$ $L_i^f = L_i - \frac{L_i k_{н,i}}{L_c k_{нc}} D_c$	ПРДМ – отражает частотный эффект, в случае наличия дефицита мощности в системе возникает снижение частоты в ОЭС, оно, в свою очередь, приводит к снижению нагрузки (регулирующий эффект нагрузки по частоте).
Стратегия взвешенных наименьших квадратов дефицитов мощности	$\min_{L, \bar{G}, X} (F = \sum c_{н,i} d_i^2)$	Использование ЦФ в виде минимума суммы квадратов отклонений дефицитов мощности позволяет решить проблему единственности решения и учесть насыщение МСС при РДМ.
Стратегия линейного удельного ущерба	$\min_{L, \bar{G}, X} \left(F = \sum \left(\alpha_i + \beta_i \frac{d_i}{L_{\phi,i}} \right) d_i \right)$	ЦФ представляет собой квадратичную форму с линейной составляющей. Представленная нелинейная модель может быть легко адаптирована к стратегии ограничения нагрузки только в изначально дефицитных узлах ОЭС.

При *пропорциональном РДМ* (ПРДМ), как правило, выделяют два подхода: РДМ между всеми потребителями, включая избыточные ЭЭС и РДМ только между потребителями дефицитных ЭЭС. Пропорциональное РДМ являющееся отражением регулирующих эффектов нагрузки системы, и отдельных ЭЭС ($k_{нс}, k_{ни}$ соответственно), позволяет решить проблему однозначности решения за счет дополнительного условия $\bar{L}^f = \{L_i^f, \forall i\}$, $D_c = \sum_{i=1}^n L_{\Phi,i} - \sum_{i=1}^n G_i$. Ограниченные ПС МСС могут привести к ситуации насыщения отдельных МСС. Отсюда целесообразно отказаться от жесткого выполнения условия $\bar{L} = \bar{L}^f$ и перейти к стратегии РДМ, в которой учитывается возможность насыщения связей. В качестве одного из вариантов подобного подхода выступает *стратегия взвешенных наименьших квадратов дефицитов мощности d_i* . Единственность решения обеспечивается также при применении нелинейных моделей оптимизации, например, при минимизации суммарных потерь мощности в ОЭС. Несмотря на многообразие возможных подходов к выбору критериев оптимизации в российской практике предпочтение отдается стратегии пропорционального РДМ. При этом в качестве ЦФ используется минимум по ОЭС суммарного снижения мощности потребления в системе.

В третьей главе предлагается вероятностно-аналитический метод (ВАМ) расчета вероятности и математического ожидания совокупного по ОЭС дефицита мощности и вероятности превышения ПС МСС, в рамках которого учитываются потери мощности в МСС ОЭС, а также зависимость распределения перетоков активной мощности от углов векторов напряжений по концам МСС. В рамках ВАМ не учитываются: балансы реактивных мощностей в сети; стохастический характер структуры и ПС МСС. В узлах ОЭС нагрузки и располагаемые генерации рассматриваются как независимые случайные величины; модули напряжений неизменны и равны номинальному напряжению сети.

Условие распределения резервов и дефицитов мощности по критерию пропорционального распределения, без учета потерь мощности в МСС может быть представлено как:

$$\bar{u} = \mu \bar{L} - \bar{G}, \quad (1)$$

где: \bar{L} – вектор нагрузок; \bar{G} – вектор располагаемой генерации; \bar{u} – вектор инъекций мощности из электрической сети, μ – коэффициент избыточности генерации, определяемый по выражению:

$$\mu = G_{\Sigma} / L_{\Sigma} = (\sum G_i) / (\sum L_i), \quad (2)$$

где: $\{G_i, L_i, i=1, \dots, n\}$ – компоненты векторов \bar{L}, \bar{G} .

При представлении величин в о.е., неучете активных составляющих проводимостей связей, неизменности и равенстве напряжений в узлах сети описывающие баланс активной мощности в узлах ОЭС линеаризованные уравнения узловых напряжений, могут быть представлены в следующем виде:

$$B\bar{\delta} = \bar{u} = \mu\bar{L} - \bar{G}, \quad (3)$$

где: $\bar{\delta}$ – вектор углов векторов напряжений по концам МСС, B – мнимая составляющая матрицы узловых проводимостей.

С учетом выражения (3), вектор перетоков мощности (с заданием инцидентных узлов для каждой связи $j, j=1, \dots, k$) может быть определен как:

$$\bar{X} = B_{br} \hat{M}^T \bar{\delta} = A(\mu\bar{L} - \bar{G}), \quad (4)$$

где: $B_{br}, \dim(B_{br}) = k \times k$ – диагональная матрица сформированная из реактивных проводимостей ветвей; k – число ветвей; \hat{M} – матрица инцидентий (узлы-связи), сокращенная на одну строку; $\dim(M) = n \times k$; n – число узлов; $A = B_{br} \hat{M}^T B^{-1}, \dim(A) = k \times (n - 1)$.

Ввиду того, что МО произведения независимых случайных величин равно произведению их МО и с учетом допущения о независимости располагаемой генерации и нагрузки узлов, также принимая во внимание, что знаменатель и числитель в выражении \bar{L} / L_{Σ} не являются независимыми случайными величинами, математическое ожидание вектора потоков мощности по МСС можно записать в виде:

$$\bar{m}_X = -A \frac{m_{G_{\Sigma}}}{m_{L_{\Sigma}}} \left[\left(1 + \frac{\sigma_{L_{\Sigma}}^2}{m_{L_{\Sigma}}^2} \right) \bar{m}_L - \frac{1}{m_{L_{\Sigma}}} \bar{D}_L \right] - A \bar{m}_G, \quad (5)$$

где: $m_{L_{\Sigma}} = \sum_{i=1}^n m_{L_i}, m_{G_{\Sigma}} = \sum_{i=1}^n m_{G_i}$ – соответственно совокупные величины МО нагрузки и генерации ОЭС, D_{L_i} – дисперсия нагрузки узла i , $\sigma_{L_{\Sigma}}$ – среднеквадратичное отклонение совокупной нагрузки ОЭС.

Помимо МО для определения ПБН необходимо знать среднеквадратичные отклонения перетоков мощности по МСС. Зависимость и наличие корреляции между перетоками мощности в ОЭС, предопределяется распределением небаланса мощности (НМ) $N_i = L_{\Phi_i} - G_i$ между концентрированными ЭЭС с учетом углов векторов напряжений по концам МСС. Уравнение для вычисления корреляционной матрицы (K_X) перетоков мощности может быть представлено как:

$$K_X = (AZ) K_N (AZ)^T, \quad (6)$$

где: K_N – диагональная матрица дисперсий расчетных НМ, Z – матрица из частных производных вектор функции (1), $Z = [Z_{ii} = 1 - m_{L_i} / m_{L_{\Sigma}}; Z_{ij} = -m_{L_i} / m_{L_{\Sigma}}, j \neq i], i=1, \dots, n, j=1 \dots n$.

Для более точного расчета ПБН требуется определение МО и дисперсии потерь мощности в системе, что достаточно проблематично в силу квадратичной функциональной зависимости потерь от зависимых между собой перетоков как активной, так и реактивной мощности. В качестве дополнительных исходных данных при расчетах ПБН могут быть заданы коэффициенты мощности концентрированных узлов нагрузки $\{tg\varphi, i=1, \dots, n\}$, по которым возможно определить значения реактивных мощностей отдельных

концентрированных ЭЭС. В масштабе ОЭС разнородность структуры электропотребления отдельных концентрированных ЭЭС не очень велика, в связи с чем, при расчете потерь мощности $tg\varphi$ для всех узлов можно считать одинаковым и равным, например, средневзвешенному коэффициенту мощности. В таком случае распределение перетоков реактивной мощности по МСС будет пропорциональным распределению активной мощности с тем же значением $tg\varphi$. С учетом этого выражение для расчета суммарных потерь при $U=1$ о.е.:

$$\pi_{\Sigma} = c_{\pi} \sum_{j=1}^k R_j x_j^2, \quad (7)$$

где: x_j – переток активной мощности по МСС j , R_j – активное сопротивление МСС j , $c_{\pi} = (1 + tg^2 \varphi)$.

При представлении случайной величины перетока мощности через центрированную величину перетока мощности \tilde{X} , вектор потерь мощности в МСС может быть рассчитан как:

$$\bar{\pi} = \bar{\pi}(\bar{m}_x) + c_{\pi} \left(2[R_i m_x] \tilde{X} + [R_i] \text{diag}(\tilde{X} \tilde{X}^T) \right), \quad (8)$$

где: $[R_i]$ – диагональная матрица из элементов \bar{R} , $\text{diag}(\tilde{X} \tilde{X}^T)$ – вектор из диагональных элементов матрицы $\tilde{X} \tilde{X}^T$.

МО потерь мощности в связях с учетом (8) могут быть определены как:

$$m_{\pi} = \bar{\pi}(\bar{m}_x) + c_{\pi} \left([R_i] \text{diag}(K) \right),$$

где: $\bar{\pi}(\bar{m}_x)$ – потери мощности рассчитанные для точки соответствующей МО перетоков мощности, $\text{diag}(K)$ – вектор состоящий из элементов матрицы корреляционных моментов перетоков мощности, расположенных на главной диагонали и приближенно равных дисперсии потоков мощности по МСС.

МО потерь мощности в связях:

$$E(\pi) = \bar{\pi}(\bar{m}_x) + c_{\pi} \left(\sum_{j=1}^k R_j \sigma_j^2 \right), \quad (9)$$

где: σ_j^2 – дисперсия перетока мощности по связи j , $j=1, \dots, k$.

При допущении о нормальности распределений перетоков мощности по МСС (приемлемое для задачи определения ПБН ОЭС допущение), дисперсия суммарных потерь может быть рассчитана согласно выражению, полученному на базе математического аппарата регрессионного анализа:

$$\text{var}(\pi_{\Sigma}) = c_{\pi}^2 \left[2 \text{tr} \left(([R_i] K_X)^2 \right) + 4 \bar{m}_x^T [R_i] K_X [R_i] \bar{m}_x \right], \quad (10)$$

где: $\text{tr}(\cdot)$ – след матрицы;

Вероятностные характеристики суммарных потерь мощности, полученные с помощью выражений (9) и (10), позволяют уточнить расчётные процедуры для поиска вероятностных характеристик перетоков мощности за счет коррекции коэффициента избыточности μ . Фактически потери мощности представляют собой дополнительную нагрузку для ОЭС. Это позволяет выполнить коррекцию коэффициента избыточности:

$$\mu = G_{\Sigma} / (L_{\Sigma} + \pi_{\Sigma}) = (\sum G_i) / (\pi_{\Sigma} + \sum L_i). \quad (11)$$

Применяемый в стратегии пропорционального распределения небаланса мощности коэффициент избыточности μ , рассчитываемый как частное совокупной генерации и совокупной нагрузки ОЭС, может быть использован для определения таких характеристик дефицита мощности ОЭС в целом как: вероятность, МО и дисперсия. Состоянию ОЭС, при котором наблюдается дефицит мощности, соответствует значение коэффициента избыточности $\mu(G_{\Sigma}, L_{\Sigma}) < 1$.

Учитывая, что:

$$\frac{\partial \mu}{\partial L_i} = -\frac{G_{\Sigma}}{L_{\Sigma}^2}; \quad \frac{\partial \mu}{\partial G_i} = \frac{1}{L_{\Sigma}}; \quad \frac{\partial^2 \mu}{\partial L_i^2} = -\frac{2G_{\Sigma}}{L_{\Sigma}^3}; \quad \frac{\partial^2 \mu}{\partial L_i \partial G_j} = \frac{\partial^2 \mu}{\partial G_i \partial L_j} = -\frac{1}{L_{\Sigma}^2}; \quad \frac{\partial^2 \mu}{\partial G_i^2} = 0 \quad (12)$$

и используя квадратичную аппроксимацию выражения (11) (считая, что потери мощности отнесены в нагрузку L_{Σ}), коэффициент избыточности может быть представлен в следующем виде:

$$\mu(G_{\Sigma}, L_{\Sigma}) = \frac{m_{G_{\Sigma}}}{m_{L_{\Sigma}}} - \frac{m_{G_{\Sigma}}}{m_{L_{\Sigma}}^2} \tilde{L}_{\Sigma} + \frac{1}{m_{L_{\Sigma}}} \tilde{G}_{\Sigma} - \frac{1}{m_{L_{\Sigma}}^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \tilde{L}_i \tilde{G}_j + \frac{m_{G_{\Sigma}}}{m_{L_{\Sigma}}^3} \sum_{i=1}^n \tilde{L}_i^2. \quad (13)$$

Согласно данному выражению (при допущении, что G_{Σ}, L_{Σ} – независимые случайные величины) МО коэффициента избыточности будет равно:

$$m_{\mu} = \frac{m_{G_{\Sigma}}}{m_{L_{\Sigma}}} \left(1 + \frac{\sigma_{L_{\Sigma}}^2}{m_{L_{\Sigma}}^2} \right). \quad (14)$$

Ограничиваясь в (13) только линейной составляющей, дисперсия коэффициента избыточности, может быть рассчитана согласно выражению:

$$\sigma_{\mu}^2 = \frac{1}{m_{L_{\Sigma}}^2} \left(\frac{m_{G_{\Sigma}}^2}{m_{L_{\Sigma}}^2} \sigma_{L_{\Sigma}}^2 + \sigma_{G_{\Sigma}}^2 \right). \quad (15)$$

Параметры коэффициента избыточности, представленные выше, позволяют рассчитать: вероятность, МО и дисперсию дефицита мощности в ОЭС. При этом дефицит мощности в ОЭС может быть обусловлен как недостаточностью генерирующих мощностей, так и ПС МСС, в связи с чем, достаточно актуальной становится задачи оптимизации не только основных, но и дополнительных параметров ПБН, к числу которых относится вероятность перегрузки МСС.

Ограниченная ПС МСС может быть учтена как напрямую, через детерминированные значения, так и с использованием регламентированных значений вероятностей перегрузки МСС. Для реализации второго подхода можно воспользоваться линейной зависимостью между перетоками мощности по связи и сетевыми инъекциями через матрицу сетевых коэффициентов. Ковариационная матрица сетевых инъекций может быть получена аналогично, ковариационной матрице перетоков мощности, путем исключения из выражения (6) множителя A :

$$K_u = ZK_N Z^T. \quad (16)$$

Для учета вероятности перегрузки МСС в рамках стратегии пропорционального РДМ требуется ввод ЦФ (поскольку ограниченные ПС

МСС не позволяют в чистом виде реализовать пропорциональную стратегию РДМ), в качестве которой, в частности, можно рассматривать минимум суммы квадратов отклонений сетевых инъекций u_i ($i=1, \dots, n$) от значений сетевых инъекций u_{i0} , полученных при отсутствии ограничения на ПС МСС. Наличие в ОЭС узлов с малой нагрузкой может привести к получению относительно больших значений $\Delta u_i = u_i - u_{i0}$. Избежать подобную ситуацию позволяет перевод отклонений в о.е. величины Δu_i с помощью весовых коэффициентов $w_i = 1/L_i$:

$$\min(F = \sum w_i (u_i - u_{i0})^2). \quad (17)$$

В случае, если для поиска отмеченной ЦФ используются обобщенные методы нелинейного программирования (метод последовательного квадратичного программирования, метод обобщенного приведенного градиента и т.д.), искомые значения u_i , могут быть представлены в виде линейной функции от значений сетевых инъекций u_{0j} . При этом значения u_i получаемые на каждом шаге оптимизации могут быть представлены через матрицу коэффициентов W :

$$\bar{u}' = W \bar{u}_0, \quad (18)$$

где: $W = \{W_{ii} = u_i/u_{0i}\}$ – диагональная матрица корректирующих коэффициентов.

Полученные значения сетевых инъекций позволяют выполнить коррекцию ковариационной матрицы перетоков мощности:

$$K_{x'} = (WA)K_{u_0}(WA)^T. \quad (19)$$

Схожим образом могут быть получены новые значения МО перетоков мощности по связям. Для учета вероятностей перегрузки МСС при решении задачи РДМ необходим ввод дополнительного ограничения:

$$\mathcal{P}_{\text{перегрузки}} \leq \mathcal{P}_{\text{перегрузки}}^{\max}, \quad (20)$$

где: $\mathcal{P}_{\text{перегрузки}}$ – вероятность перегрузки МСС, $\mathcal{P}_{\text{перегрузки}}^{\max}$ – регламентированное (заданное) максимальное значение вероятности перегрузки МСС.

Наличие ковариационной связи между отдельными потоками мощности не позволяет напрямую определить значения вероятностей перегрузки. Одним из возможных путей решения данной проблемы может быть представление ковариационной матрицы и значений перетоков мощности в новом базисе, в рамках которого внедиагональные элементы ковариационной матрицы будут равны нулю. В качестве оператора перехода в новый базис может выступать ортогональная матрица V , составленная из собственных векторов ковариационной матрицы перетоков. При этом переход в новый базис может быть осуществлен через выражения:

$$m_{x_{\text{new}}} = V m_{x_0}, \quad (21)$$

$$K_{x_{\text{new}}} = V^T K_{x_0} V, \quad (22)$$

где: $K_{x_{\text{new}}}$, K_{x_0} – ковариационные матрицы перетоков мощности соответственно в новом и старом базисах; $m_{x_{\text{new}}}$ – МО перетоков мощности в новом базисе.

Следует отметить необходимость перевода в новый базис и ПС МСС. Учитывая, что в новом базисе матрица $K_{x_{\text{new}}}$ диагональная, перетоки мощности по МСС могут рассматриваться как независимые величины, что позволяет

определить вероятность перегрузки каждой отдельной МСС, и учесть их в качестве функциональных ограничений при решении задачи оптимизации.

Для проверки предлагаемого ВАМ для расчета ПБН была рассмотрена тестовая схема, изображенная на рисунке 1, исходные данные для схемы представлены в таблице 3 (данные по узлам) и таблице 4 (данные по связям). Для МСС помимо узлов начала и конца связи заданы активные (для расчета потерь мощности) и реактивные (для расчета потокораспределения) сопротивления (R, X), а также ПС МСС.

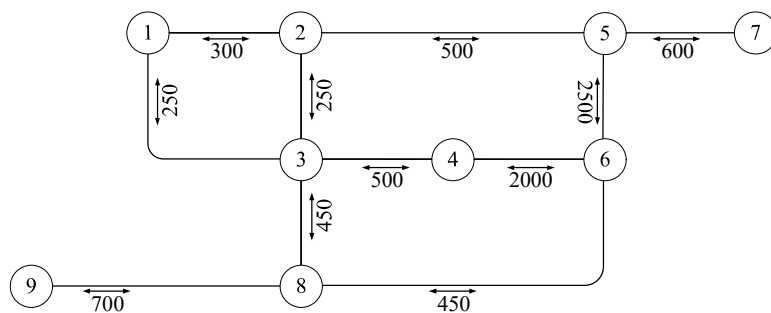


Рисунок 1 – Тестовая схема №1

Таблица 3 – Параметры генерации и нагрузки в узлах ОЭС

№	Рнагр, МВт	онагр, МВт	Рген, МВт	оген, МВт
1	1961	98	1764	44
2	1040	52	1659	41
3	1953	98	1640	41
4	2031	102	2500	16
5	2083	104	2479	62
6	2097	105	1659	41
7	1900	95	1572	39
8	1866	93	2507	63
9	1831	92	1756	44

Таблица 4 – Параметры МСС тестовой схемы и результаты расчетов

Нач. узел	Кон. узел	R, Ом	X, Ом	ПС МСС, МВт	ММК		ВАМ		ВАМ при заданной вероятности превышения ПС МСС 1%	
					МО перетока, МВт	СКО перетока, МВт	МО перетока, МВт	СКО перетока, МВт	МО перетока, МВт	СКО перетока, МВт
1	2	5	24	300	-221,86	50,21	-222,83	50,17	-210,31	49,18
1	3	5	20	250	-63,17	63,12	-64,73	63,98	-59,00	62,12
2	3	5	20	250	198,27	48,01	197,86	49,26	188,84	49,21
2	5	9	41	500	153,20	72,45	152,08	72,13	151,00	71,88
3	4	9	41	500	-132,19	60,26	-132,68	59,86	-119,08	58,01
5	6	7	28	2500	51,03	86,93	51,75	88,37	51,02	88,84
6	4	8	37	2000	-247,09	62,03	-247,17	61,85	-235,27	60,17
5	7	11	49	600	408,50	99,51	401,83	100,90	387,70	102,21
3	8	8	37	450	-132,91	77,58	-135,81	78,04	-123,82	75,81
6	8	8	37	450	-233,31	75,19	-235,75	76,48	-226,95	76,79
8	9	7	41	700	190,95	99,10	188,24	100,11	183,45	99,22

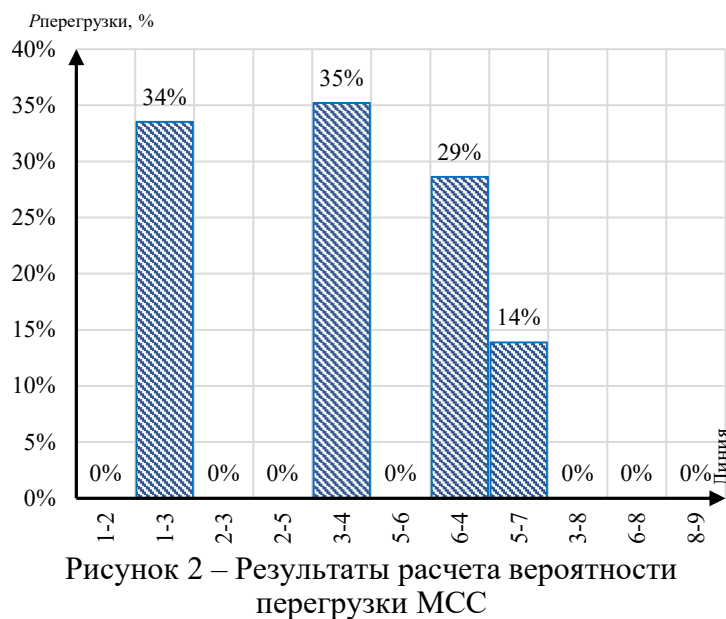


Рисунок 2 – Результаты расчета вероятности перегрузки МСС

Анализируя результаты учета дополнительного ограничения в виде предельной вероятности перегрузки МСС в рамках ВАМ, можно видеть, что довольно незначительные изменения коснулись, главным образом, значений МО перетоков мощности, в то время как значения СКО перетоков остались практически неизменными. На рисунке 2 показаны результаты расчета вероятности перегрузки

МСС. Можно видеть, что вероятности перегрузки для линии 6-4 равняется 29%, несмотря на то, что МО перетока по связи практически в 10 раз меньше максимальной ПС МСС. Отмеченная особенность обусловлена корреляцией между перетоками в системе, которая в свою очередь связана с использованием матрицы потокораспределения при расчетах. Данный факт объясняет значительное изменение МО перетока мощности по связи 3-8, вероятность перегрузки которой до ввода ограничения (20) была равна 0%. В то же время величина МО перетока для линии 5-7 изменилась лишь на 4%, несмотря на исходную вероятность перегрузки 14%.

Результатирующие показатели БН по ОЭС в целом представлены в таблице 5, где для сравнения обозначены расчеты для трех различных значений $tg\varphi$: без учета потерь; с учетом потерь при $tg\varphi = 0$ и при $tg\varphi = 1$ (учет реактивной мощности с заданным $tg\varphi$). Анализ результатов, представленных в таблице показывает, что результаты, полученные при использовании ВАМ, практически совпадают с аналогичными величинами, полученными с помощью ММК.

Таблица 5 – Результатирующие показатели ОЭС

Метод	Неучет потерь		$tg\varphi = 0$		$tg\varphi = 1$	
	$p_{дефицита}, \%$	МО дефицита, МВт	$p_{дефицита}, \%$	МО дефицита, МВт	$p_{дефицита}, \%$	МО дефицита, МВт
МК	0,63	0,587	0,77	0,794	0,89	0,934
ВАМ	0,69	0,701	0,79	0,816	0,89	0,939

Можно видеть, что учет потерь мощности оказывает значительное влияние на итоговое значение вероятности наличия дефицита мощности в системе и величины МО дефицита мощности в системе.

В четвертой главе предлагается модификация расчетных процедур, используемых при реализации стратегии пропорционального РДМ, которые позволяют повысить вычислительную эффективность расчета отдельного детерминированного состояния, что может быть использовано для снижения времени расчета ПБН как в аналитических, так и статистических методах расчета. В таблице 6 представлены варианты составов и краткая характеристика управляющих переменных, используемых при реализации стратегии пропорционального РДМ при ограниченной ПС МСС ОЭС.

Таблица 6 – Варианты составов управляющих переменных при использовании пропорциональной стратегии РДМ

Состав управляющих переменных	Основные выражения характеризующие заданный состав управляющих переменных	Краткая характеристика
Сетевые инъекции, \bar{u}	$\min(F = \sum w_i (u_i - u_{i0})^2),$	Здесь рассматриваются отклонения сетевых инъекций u_i от идеальных значений u_{i0} , полученных при отсутствии ограничений на ПС МСС.
Перетоки мощности по связям, \bar{X}	$\bar{X} = A\bar{u},$ $\bar{u} = \hat{M}\bar{X},$	Перетоки мощности функционально связаны с сетевыми инъекциями через первую матрицу инцидентий, что позволяет рассматривать перетоки мощности как один из вариантов независимых переменных.
Используемая генерация и ограничение нагрузки в узлах ОЭС, $\bar{G}, \bar{\Delta L}$	$u_i = G_i - L_i + \Delta L_i,$ $F = \min \left\{ \begin{array}{l} \text{если } \mu_\Sigma < 1, \\ \sum (\Delta L_i^2 - 2\Delta L_i \Delta L_{i0}) / \bar{L}_i; \\ \text{если } \mu_\Sigma > 1 \\ \sum (\Delta G_i^2 - 2\Delta G_i \Delta G_{i0}) / \bar{G}_i. \end{array} \right\}$ $0 \leq \Delta L_i \leq L_i.$	Сетевая инъекция u_i , однозначно определяются величиной генерации и ограничения нагрузки в узле, что позволяет использовать изменение генерации ΔG_i , либо изменение нагрузки ΔL_i (либо обе величины) в качестве управляющих переменных.

Наличие в ОЭС узлов с малой нагрузкой может привести к получению относительно больших значений $\Delta u = u_i - u_{i0}$, по этой причине, при использовании сетевых инъекций в качестве управляющих переменных, требуется использование весовых коэффициентов $w_i = 1/L_i$. Для узлов, значение нагрузки или генерации которых равны нулю, регулирование коэффициента избыточности не выполняется, инъекции узлов подобного вида в задаче оптимизации не учитываются и определяются только значениями их собственной нагрузки или генерации. Условие баланса мощностей ОЭС при учете потерь мощности представлено выражением $\sum u_i + \pi_\Sigma = 0$.

Говоря об использовании перетоков мощности в качестве управляющих переменных, следует подчеркнуть, что для сложносвязанных систем число узлов n , как правило, меньше числа связей m ($m \geq n$), в результате, одним и тем же значениям вектора сетевых инъекций может соответствовать бесконечное множество возможных вариантов вектора перетоков мощности по связям (включая варианты с циркуляцией потоков в контуре). Это вызывает не только увеличение размерности задачи, но и требует ввода дополнительного критерия для получения однозначного решения, в качестве которого может рассматриваться связь вектора перетоков мощности и вектора сетевых инъекций через матрицу коэффициентов потокораспределения.

Использование двойного блока переменных $(G_i, \Delta L_i)$ в задаче определения ПБН ОЭС с учетом сетевых ограничений предполагает возможность решения двух задач оптимизации: внешней и внутренней. В рамках внутренней задачи оптимизации требуется выполнить поиск оптимального соотношения между ущербом от недоотпуска электроэнергии потребителям и стоимостью производства электроэнергии (решением является условие равенства относительных приростов затрат на производство и компенсацию ущерба), внешняя задача оптимизации требует выполнения критерия $\min(F = \sum w_i (u_i - u_{i0})^2)$.

Для представленных в таблице 6 вариантов независимых переменных (инъекции, перетоки, двойной блок) был выполнен расчет МО и вероятности дефицита мощности в системе, а также МО и дисперсий перетоков мощности по связям с учетом существующих сетевых ограничений. В качестве тестовых были приняты схема, изображенная на рисунке 3, исходные данные для МСС которой представлены в таблице 7, и тестовая схема, представленная на рисунке 1. Исходные данные узлов для обеих схем принимаются идентичными тем, что представлены в таблице 3.

Результаты расчета МО перетоков мощности при учете вероятностей перегрузки МСС, а так же для случаев с различным составом управляющих переменных и при учете ПС МСС в виде детерминированных величин в рамках ММК, представлены на рисунках 4 и 7. На рисунках 5 и 8, представлены изменения величины МО перетока мощности при вводе фиксированного значения вероятности перегрузки равной 1% (изменение величин МО перетоков мощности относительно значений МО перетоков до ввода ограничения на вероятность перегрузки МСС представлены для случая использования сетевых инъекций в качестве управляющих переменных в рамках ММК). Гистограммы, представленные на рисунках 6 и 9 отражают вероятности перегрузки МСС при учете ограниченных ПС МСС в рамках ММК.

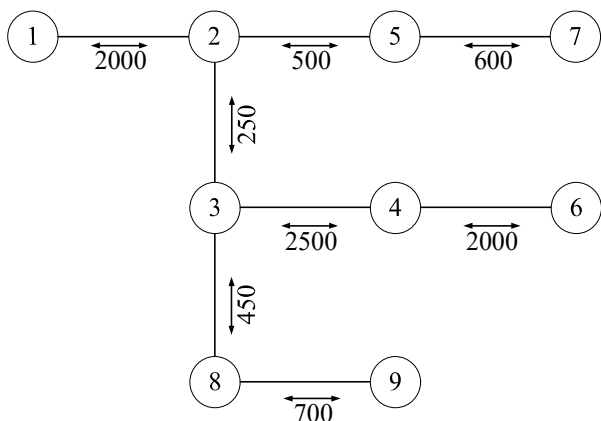


Рисунок 3 – Тестовая схема №2

Таблица 7 – Параметры МСС тестовой схемы №2

Нач.узел	Кон.узел	R, Ом	X, Ом	ПС МСС, МВт
1	2	5	24	2000
2	3	5	20	250
2	5	9	41	500
3	4	9	41	2500
6	4	8	37	2000
5	7	11	49	600
3	8	8	37	450
8	9	7	41	700

Интерес представляет анализ относительного изменения МО перетоков мощности при вводе ограничения в виде вероятности перегрузки МСС. Учет потенциального распределения перетоков через матрицу сетевых коэффициентов закономерно приводит к изменению всех перетоков в системе, при необходимости изменения хотя бы одного из них. Наибольшее изменение величины перетока при вводе ограничения при этом происходит не обязательно только на участке с наибольшей вероятностью перегрузки. Используя полученное распределение, возможно оценить необходимость усиления МСС в случае нормирования вероятности перегрузки МСС, для наиболее критичных участков в ОЭС.

Таблица 8 – Время получения результатов при различном составе независимых переменных

Состав пер-х Схема	сетевые инъекции	ограничение нагрузки, используемая генерация	перетоки мощности
Схема №1	189 сек.	88 сек.	188 сек.
Схема №2	247 сек.	123 сек.	200 сек.

Расчеты выполнялись с использованием программного комплекса MATLAB, при этом во всех случаях, для поиска оптимального решения, использовалась встроенная функция квадратичного программирования quadprog. Время расчетов, при схожих ЦФ (минимум квадратов отклонений сетевых инъекций), во многом определяется заданным составом ограничений и функциональных связей, которые в свою очередь определяют вычислительную сложность алгоритма и время расчетов. Так для случая перетоков мощности качестве независимых переменных помимо увеличенного числа переменных в рамках ЦФ требуется двойной учет функциональных зависимостей между перетоками и сетевыми инъекциями, что в значительной мере замедляет скорость расчета (таблица 8). Кроме того, матрица MM^T , получаемая как результат произведения полных матриц инцидентности M и M^T и используемая при перетоках мощности в качестве управляющих переменных – вырожденная, что требует сокращения матриц инцидентности на одну строку (столбец). Отмеченное приводит к необходимости введения «балансирующего узла» в системе, что в задаче оценки БН ЭЭС нежелательно в силу равноценности узлов. В итоге использование перетоков мощности в качестве управляющих переменных в задаче РДМ вводит

дополнительную погрешность, проявляющуюся в заниженных показателях надежности балансирующего узла, и несколько отличающемуся распределению перетоков мощности в ОЭС.

Представленные результаты показывают, что, несмотря на ввод дополнительного ограничения по вероятности перегрузки МСС, картина распределения перетоков мощности по ОЭС в целом сохраняется. При этом изменения МО перетоков мощности варьируются от крайне значительных до практически полного отсутствия изменений.

Интерес в данном случае представляет анализ относительного изменения МО перетоков мощности (поскольку главным образом меняются именно МО) при вводе ограничения в виде вероятности перегрузки МСС. Учет потенциального распределения перетоков через матрицу сетевых коэффициентов закономерно приводит к изменению всех перетоков в системе, при необходимости изменения хотя бы одного из них. Наибольшее изменение величины перетока при вводе ограничения при этом происходит не обязательно только на участке с наибольшей вероятностью перегрузки. Используя полученное распределение, возможно оценить необходимость усиления МСС в случае нормирования вероятности перегрузки МСС, для наиболее критичных участков в ОЭС.

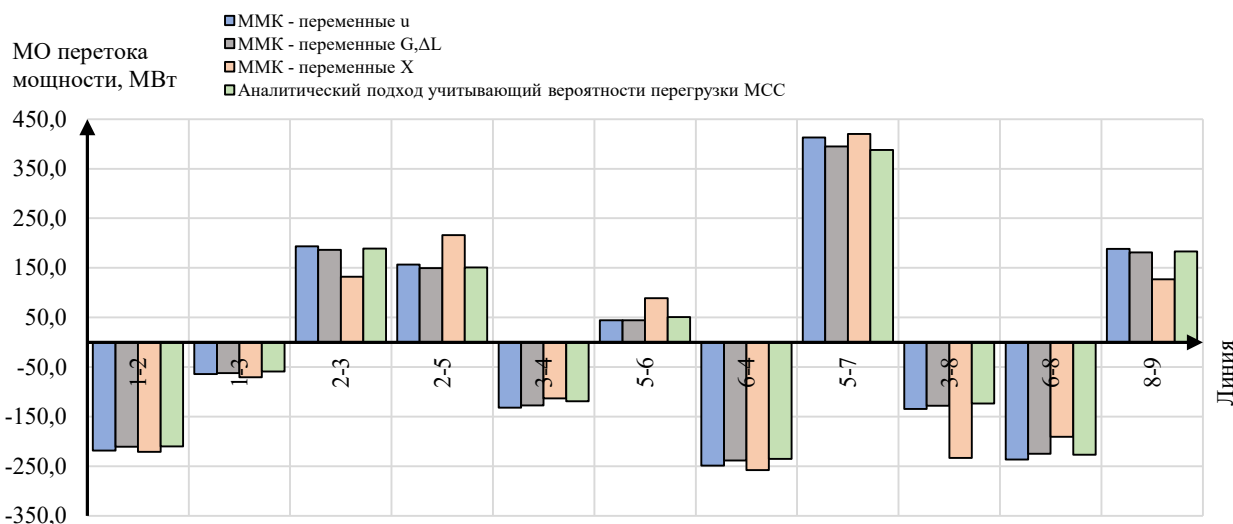


Рисунок 4 – Результаты расчетов МО перетоков мощности тестовой схемы №1

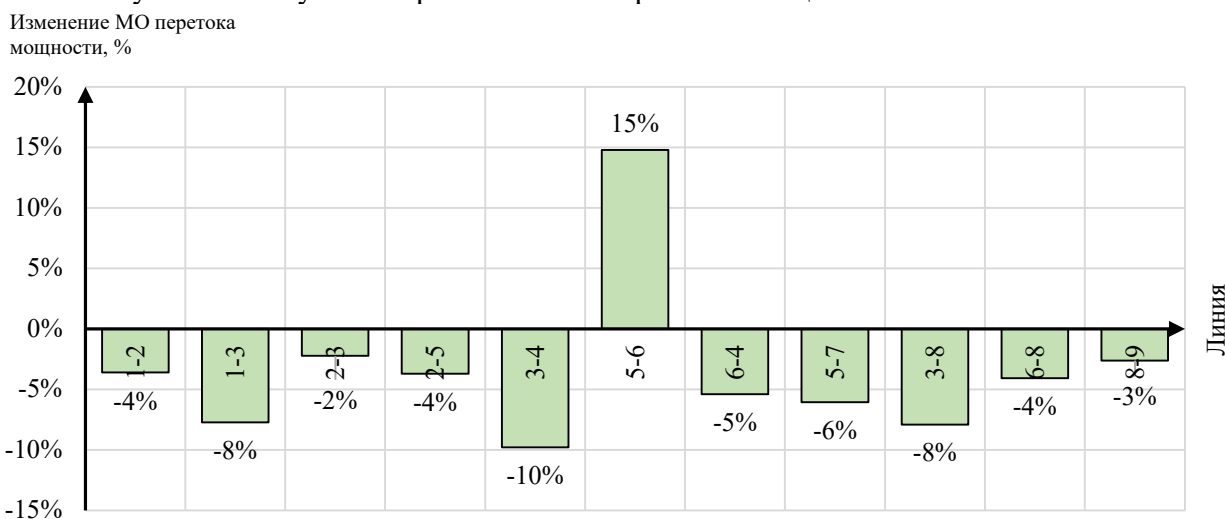


Рисунок 5 – Относительное изменение величины МО перетока мощности при вводе ограничения по вероятности перегрузки МСС для тестовой схемы №1

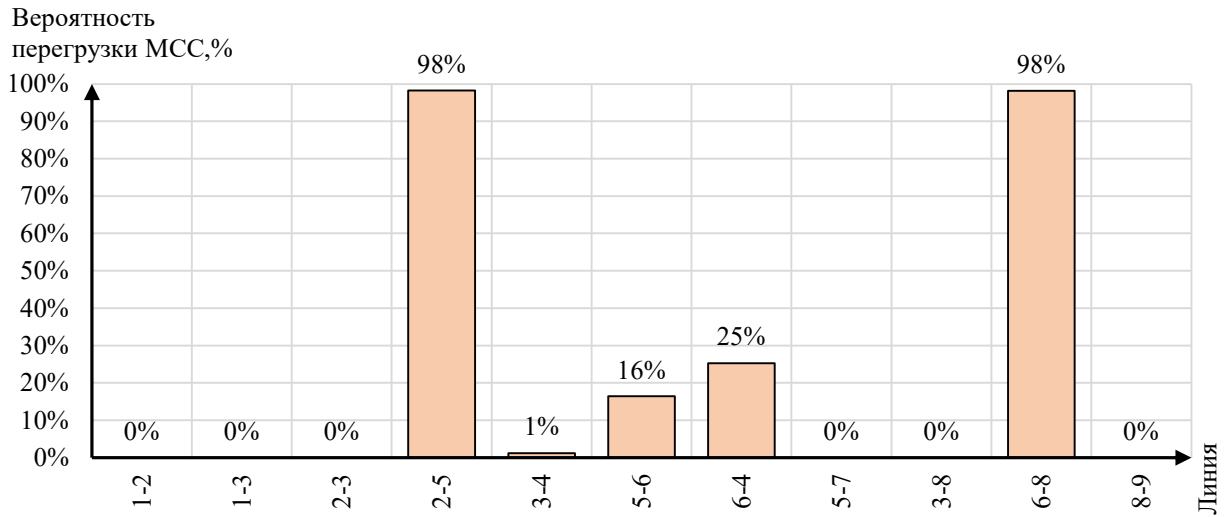


Рисунок 6 – Вероятности перегрузки МСС при учете ограниченных ПС МСС в рамках ММК (управляющие переменные сетевые инъекции) для тестовой схемы №1

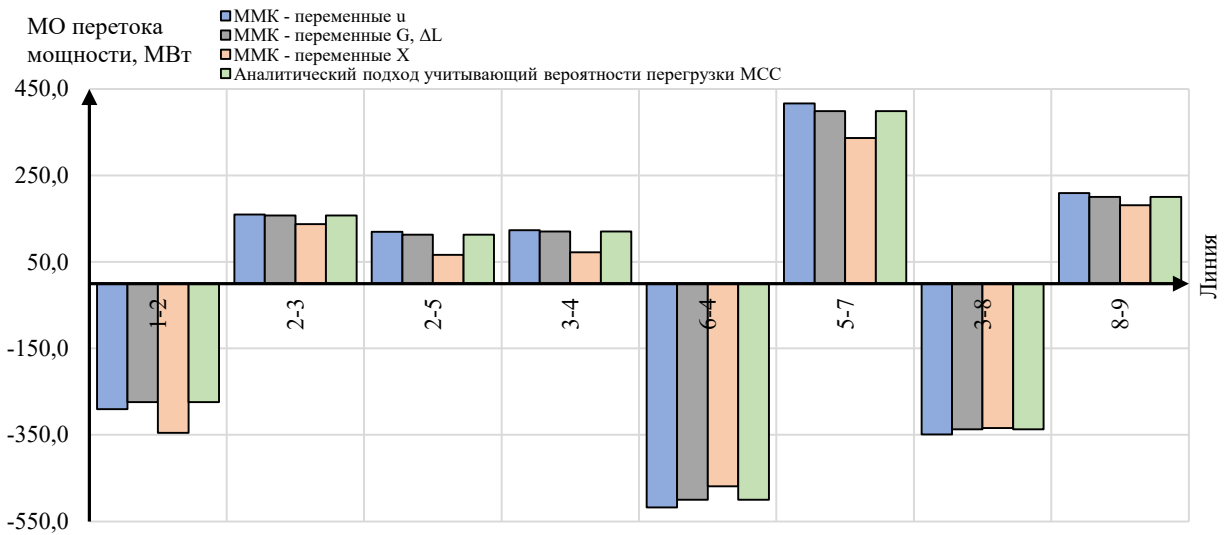


Рисунок 7 – Результаты расчетов МО перетоков мощности тестовой схемы №2

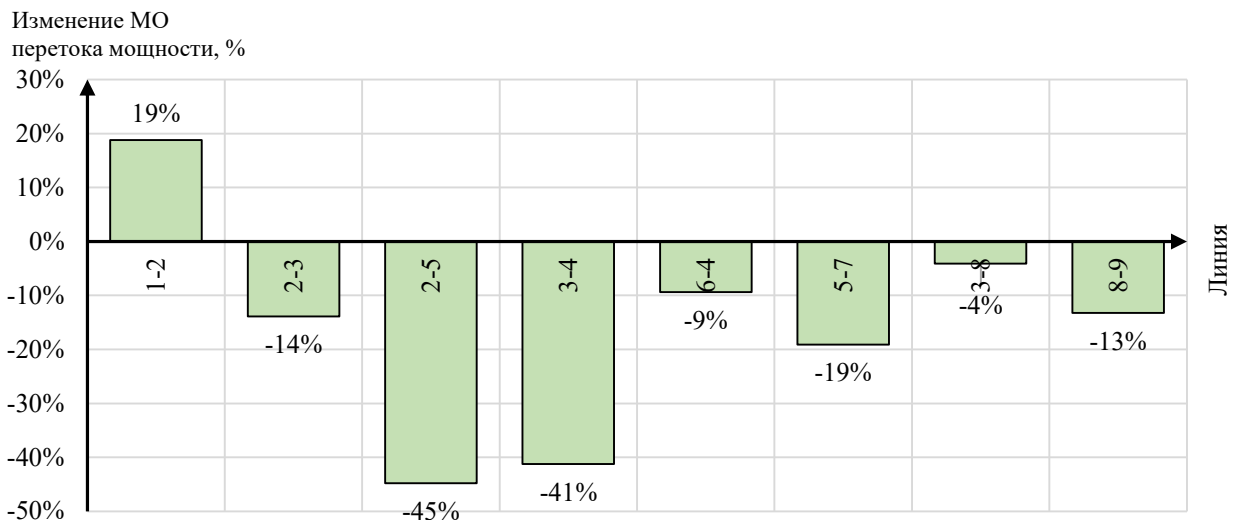


Рисунок 8 – Относительное изменение величины МО перетока мощности при вводе ограничения вероятности перегрузки МСС для тестовой схемы №2

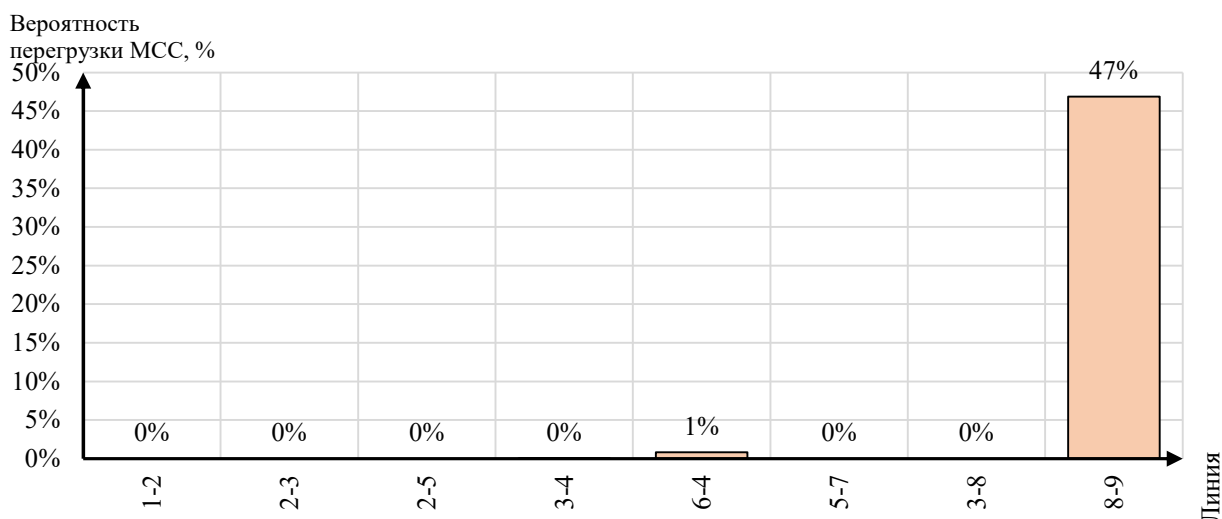


Рисунок 9 – вероятности перегрузки МСС при учете ограниченных ПС МСС в рамках ММК (управляющие переменные сетевые инъекции) для тестовой схемы №2

Подводя итог, следует выделить ряд особенностей, связанных с использованием предлагаемых подходов. Сетевые инъекции в качестве управляющих переменных в рамках задачи РДМ с одной стороны позволяют реализовать процедуру учета вероятностной перегрузки МСС в рамках ВАМ, чего, по причине рассмотрения детерминированных состояний ОЭС, нельзя сделать в рамках ММК. Однако вычислительная эффективность при использовании сетевых инъекций заметно уступает вариации управляющих переменных в виде перетоков мощности по связям или двойного блока переменных – генерации и ограничения нагрузки, причем для последней время расчетов ПБН оказалось практически в два раза меньше. В то же время использование перетоков мощности в рамках ЦФ приводит к значительным погрешностям как при оценке ПБН отдельных узлов, так и ОЭС в целом, что не позволяет при заданной системе допущений рекомендовать его для расчетов.

В заключении приведены выводы и обобщены основные результаты.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. В обзоре научных публикаций рассмотрены существующие методы расчета ПБН, используемые как в России, так и за рубежом. Основным методом расчета ПБН в настоящее время является ММК (Монте-Карло). Однако постоянно расширяющийся в современных условиях набор значимых факторов для более полного учета электрических свойств и режимов ОЭС, требует модификации методов расчета ПБН ОЭС в целом и процедуры ОРДМ в частности (переход от транспортной модели к оптимизационной модели нелинейного программирования);
2. Описаны наиболее значимые критерии решения задачи ОРДМ. Показано, что выбор критерия существенно влияет на результирующие ПБН;
3. Показана необходимость и разработаны алгоритмы более точного учета потерь мощности в МСС;

4. Предложен вероятностно-аналитический метод расчета ПБН. Метод ориентирован на использование дополнительного ПБН – вероятности перегрузки МСС и учет ограничения по вероятности перегрузки МСС при определении ПБН сложнзамкнутых структур ОЭС. Показана вычислительная эффективность предложенного метода;
5. В рамках расчета показателей БН предложено дополнительно учитывать регламентированную вероятность перегрузки МСС. Показано, что подобный подход более полно удовлетворяет требованиям электроэнергетики в части устойчивости работы ЭЭС. Отмечено, что данное ограничение практически не реализуемо в рамках ММК (Монте-Карло). В работе предлагаются пути его учета;
6. Для реализации пропорциональной стратегии РДМ предложены различные варианты управляющих переменных. С помощью ММК (Монте-Карло) показано, что вычислительная эффективность алгоритмов решения задачи РДМ, при одинаковых ЦФ и разном составе управляющих переменных различна. В работе показано, что наиболее эффективным с вычислительной точки зрения составом переменных при решении задачи пропорционального РДМ является двойной блок переменных: генерация и ограничение нагрузки в узле. Использование перетоков мощности в качестве независимых переменных приводит к значительным погрешностям расчетов ПБН как отдельных узлов, так и ОЭС в целом.

СПИСОК НАУЧНЫХ ТРУДОВ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК и Аттестационным советом УрФУ:

1. Vladislav P. Oboskalov Modification of Supplied Demand algorithm for generation adequacy indices calculations / Vladislav P. Oboskalov, Gerhards Janis, Mahnitko Anatolijs, **Rustam T. Valiev** // 56th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University, Riga, Latvia. – 2015. – 7343132 (0,33 п.л./0,1 п.л.), (Scopus)
2. Обоскалов В.П. Сравнительная эффективность методов расчета показателей балансовой надежности энергосистем / В.П. Обоскалов, **Р.Т. Валиев**, С.А. Гусев/ Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2016. № 9-10. – С. 119-125 (0,425 п.л./0,16 п.л.)
3. Обоскалов В.П. Математические модели и стратегии ограничения нагрузки при оптимальном распределении дефицита мощности в ОЭС / В.П. Обоскалов, **Р.Т. Валиев**, С.А. Гусев / Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2017. №4. – С. 25-36 (0,81 п.л./0,3 п.л.)
4. Обоскалов В.П. Методические вопросы распределения дефицита мощности в задаче балансовой надежности электроэнергетических систем / В.П. Обоскалов, **Р.Т. Валиев** / Известия НТЦ Единой энергетической системы. – 2017. №2. – С. 64-73 (0,59 п.л./0,29 п.л.)

5. Oboskalov V.P. Mathematical models and optimal load shedding strategies for power system generation adequacy problem / V.P. Oboskalov, **R.T. Valiev**, S.A. Gusev // 2017 14th International Conference on Engineering of Modern Electric Systems (EMES). – Oradea, Romania. – IEEE. – 2017. – P. 41-46 (0,65 п.л./0,3 п.л.), (Web of science, Scopus)
6. Vladislav P. Oboskalov An analytical approach for calculations of power system generation adequacy indices / Vladislav P. Oboskalov, Igor Moshkin, Mahnitko Anatolijs, **Rustam T. Valiev** // 58th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University, Riga, Latvia – 2017. – P. 1-4 (0,42 п.л./0,1 п.л.), (Scopus)
7. Vladislav P. Oboskalov An analytical method for accelerating calculations of the probability of power flows exceeding the tie-lines capacity / Vladislav P. Oboskalov, S. Gusev, N. Fukalov, N, I. Ziemane, K, Berzina, **R.Valiev** // 59th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University, Riga, Latvia – 2018. – 8659861 (0,6 п.л./0,1 п.л.), (Web of science, Scopus)
8. Обоскалов В.П. Вероятностно-аналитический метод расчета показателей балансовой надежности ОЭС / В.П. Обоскалов, **Р.Т. Валиев** / Известия Российской академии наук. Энергетика / IZVESTIYA ROSSIJSKOI AKADEMII NAUK ENERGETIKA. – 2019. №1. – С. 37-49 (0,67 п.л./0,33 п.л.)

Другие публикации:

9. Влияние конфигурации графика нагрузки на показатели балансовой надежности ЭЭС / В.П. Обоскалов, **Р.Т. Валиев**, И.Л. Кирпикова, С.А. Дехтяр // Электроэнергетика глазами молодежи Научные труды IV международной научно-технической конференции Новочеркасск: Лик. – 2013. – Т2. С. 75-78 (0,2 п.л./0,07 п.л.)
10. **Валиев Р.Т.**, Обоскалов В.П. Модификация алгоритма обеспеченного спроса в задаче расчета показателей балансовой надежности // Электроэнергетика глазами молодежи. Научные труды V международной научно-технической конференции. Томск: Томский политехнический университет. – 2014. – С. 266-271 (0,13 п.л./0,06 п.л.)
11. **Валиев Р.Т.**, Обоскалов В.П. Применение алгоритма обеспеченного спроса для расчета показателей балансовой надежности с учетом вероятностного характера отключений линий электропередач // Электроэнергетика глазами молодежи. Научные труды VI международной научно-технической конференции. Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина. – 2015. – С. 57-60 (0,42 п.л./0,21 п.л.)

Подписано в печать	2020	Печать цветная	Формат 60×84 1/16
Бумага типографская			Усл. печ. л. 1,50
Уч.-изд.л. 1,50		Тираж 120 экз.	Заказ №

Отпечатано в типографии ООО «Таймер - КЦ»
620075, г. Екатеринбург, ул. Луначарского, д. 136