Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего
образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра
Великого»

На правах рукописи

#### Полюхович Максим Алексеевич

### МОДЕЛИ И МЕТОДИКА ГЕОИНФОРМАЦИОННОЙ ПОДДЕРЖКИ УПРАВЛЕНИЯ ТЕРРИТОРИАЛЬНОЙ СИСТЕМОЙ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ РЕГИОНА

1.6.20. Геоинформатика, картография

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор Бурлов Вячеслав Георгиевич

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ4
Глава 1. Научно-технические основы обеспечения безопасности электроснабжения региона в
условиях деструктивного воздействия гидрометеорологических факторов на базе применения
ГИС
1.1. Характеристика особенностей процесса передачи электроэнергии посредством воздушных
линий электропередачи
1.2. Анализ угроз нарушения электроснабжения региона
1.3. Анализ возможностей подходов для обеспечения безопасности электроснабжения региона
на базе применения ГИС41
1.4. Выбор и обоснование методологии решения задачи на базе применения ГИС 54
1.5. Выводы по Главе 1
Глава 2. Разработка модели геоинформационной поддержки управления территориальной
системой обеспечения безопасности электроснабжения региона в условиях деструктивного
воздействия гидрометеорологических факторов
2.1. Общий подход к разработке модели геоинформационной поддержки управления
территориальной системой обеспечения безопасности электроснабжения региона в условиях
деструктивного воздействия гидрометеорологических факторов
2.2. Выбор и обоснование основных соотношений модели геоинформационной поддержки
управления территориальной системой обеспечения безопасности электроснабжения региона
в условиях деструктивного воздействия гидрометеорологических факторов71
2.3. Механизмы связи элементов модели геоинформационной поддержки управления
территориальной системой обеспечения безопасности электроснабжения региона в условиях
деструктивного воздействия гидрометеорологических факторов с показателем безопасности
76
2.4. Анализ возможностей модели геоинформационной поддержки управления
территориальной системой обеспечения безопасности электроснабжения региона в условиях
деструктивного воздействия гидрометеорологических факторов
2.5. Выводы по Главе 2
Глава 3. Разработка методики геоинформационной поддержки управления территориальной
системой обеспечения безопасности электроснабжения региона в условиях деструктивного
воздействия гидрометеорологических факторов на базе применения ГИС
3.1. Общий подход к разработке методики геоинформационной поддержки управления
территориальной системой обеспечения безопасности электроснабжения региона в условиях
деструктивного воздействия гидрометеорологических факторов на базе применения ГИС 89

3	
3.2. Основные соотношения методики геоинформационной поддержки управлен	ия
территориальной системой обеспечения безопасности электроснабжения региона в услови	хкі
деструктивного воздействия гидрометеорологических факторов на базе применения ГИС	96
3.3. Анализ возможностей методики геоинформационной поддержки управлен	ия
территориальной системой обеспечения безопасности электроснабжения региона в услови	ІЯХ
деструктивного воздействия гидрометеорологических факторов на базе применения ГИС. 1	.00
3.4. Выводы по Главе 3	.06
Глава 4. Разработка практических рекомендаций по совершенствованию геоинформационн	юй
поддержки управления территориальной системой обеспечения безопасности электроснабжен	ІИЯ
региона в условиях обледенения воздушных линий электропередачи 1	09
4.1. Обоснование практических рекомендаций по совершенствованию информационно	ЭΓО
обеспечения геоинформационной поддержки управления территориальной систем	юй
обеспечения безопасности электроснабжения региона	.09
4.2. Обоснование практических рекомендаций по совершенствованию техническо	ЭΓО
оснащения геоинформационной поддержки управления территориальной систем	юй
обеспечения безопасности электроснабжения региона	.16
4.3. Обоснование практических рекомендаций по совершенствованию кадрового обеспечен	ия
геоинформационной поддержки управления территориальной системой обеспечен	ІИЯ
безопасности электроснабжения региона	.23
4.4. Выводы по Главе 4	.31
ЗАКЛЮЧЕНИЕ1	.33
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ1	.35
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ1	.36
Приложение А. Список научных работ автора по теме диссертации	.53
Приложение Б. Статистические данные по аварийности на электрических сетях 1	.59
Приложение В. Определение возможности обрыва провода	.69
Приложение Г. Расчет параметров сетевого графика	.74
Приложение Д. Сетевое моделирование процессов геоинформационной поддержки обеспечен	ІИЯ
безопасности электроснабжения региона в условиях деструктивного воздейств	
гидрометеорологических факторов1	.76
Приложение Е. Сетевое моделирование процессов обеспечения безопасности электроснабжен	ия
региона в условиях деструктивного воздействия гидрометеорологических факторов 1	
Приложение Ё. Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ 1	.88
Приложение Ж. Проверка гипотезы о распределении событий процессов геоинформационн	юй
поддержки обеспечения безопасности электроснабжения региона по закону Пуассона 1	
Приложение 3. Акт внедрения результатов диссертационного исследования в учебный проце	есс
	.97

#### **ВВЕДЕНИЕ**

Актуальность темы исследования. В настоящее время, как отмечается многими исследователями (Седнев В.А., Воскобоев В.Ф., Лебедев А.Ю., Колесников Д.Г., Антонов Ю.М., Белов О.А., Karpachevskiy A.M., Filippova O.G., Kargashin, P.E., Gubanov M.M., Potemkin V.V., Morkovkin D.E., Shmanev S.V.), все масштабнее становится проблема обеспечения стабильного и качественного электроснабжения потребителей региона, которые варьируются от небольших населенных пунктов до градообразующих промышленных предприятий, что является актуальной задачей, стоящей перед руководством государства. В связи с особенностями электроэнергетической системы (например, передача электроэнергии посредством воздушных линий электропередачи (ВЛЭП)), так и климатических и территориальных условий такой страны как Россия, вопросы разработки системы, обеспечивающей безопасность электроснабжения, актуальными пор. Статистические ПО аварийности остаются ДО сих данные электроэнергетической системе ясно демонстрируют, что, несмотря на научно-технический прогресс во многих отраслях промышленности, подверженность состояния процесса передачи электроэнергии различным факторам не решена.

Указом Президента РФ от 13 мая 2019 г. № 216 «Об утверждении Доктрины энергетической безопасности Российской Федерации» заложены требования к необходимости обеспечения безопасности электроснабжения. Среди угроз энергетической безопасности отмечены неблагоприятные и опасные природные явления, изменения окружающей среды, приводящие к нарушению нормального функционирования и разрушению инфраструктуры и объектов топливно-энергетического комплекса.

Постановлением Правительства РФ от 16.02.2008 г. № 86 «О штабах по обеспечению безопасности электроснабжения» утверждены основные положения, затрагивающие вопросы обеспечения безопасности и безаварийности на объектах электроэнергетической отрасли, среди которых выделена функция штаба по принятию решений о применении мер, направленных на предотвращение нарушения электроснабжения и (или) ликвидацию его последствий. К угрозам нарушения электроснабжения (режим с высокими рисками нарушения электроснабжения) относят в том числе следующее обстоятельство: прогнозируемое наступление таких неблагоприятных природных явлений, которые могут привести к массовому отключению электросетевого оборудования, как обильные снегопады, сопровождающиеся интенсивным налипанием снега на провода, грозозащитные тросы, опоры ВЛЭП и на оборудование объектов электроэнергетики, гололёдообразование на проводах и грозозащитных тросах ВЛЭП, а также резкие изменения метеорологических условий.

Всё сущее – процессы. Процесс – это объект в действии при фиксированном предназначении. рамках обеспечения безопасности электроснабжения В рассматриваются три процесса: процесс проявления угрозы нарушения электроснабжения региона, процесс идентификации угрозы нарушения электроснабжения региона, процесс нейтрализации угрозы нарушения электроснабжения региона. Очевидно, что для достижения цели деятельности необходимо управлять данными процессами. Субъектами управления являются Ситуационно-аналитический центр Минэнерго России (САЦ Минэнерго России), Региональный штаб по обеспечению безопасности электроснабжения и Электросетевая организация. Среди причин массовых отключений на объектах электроэнергетики, согласно официальным отчетам Минэнерго России, выделены: недостаточный уровень межведомственного взаимодействия; низкий уровень организации аварийно-восстановительных работ в сетевых компаниях (поздняя оценка обстановки, несвоевременное наращивание группировки сил и средств, неэффективное использование привлеченных ресурсов). Соответственно, в настоящее время отсутствует системная интеграция процессов обеспечения безопасности электроснабжения региона.

Безопасность электроснабжения – свойство системы электроснабжения, которое характеризует способность системы электроснабжения сохранять свое предназначение (электроснабжение потребителей) в процессе жизненного цикла в условиях деструктивного воздействия гидрометеорологических факторов. Влияние гидрометеорологических факторов относится к одной из наиболее значительных причин нарушения электроснабжения объектов региона, так как главный элемент процесса передачи электроэнергии – ВЛЭП целиком подвержен ИХ воздействию круглый год. Одновременное воздействие нескольких гидрометеорологических факторов способно привести к продолжительным перебоям в электроснабжении. Одним из наиболее деструктивных гидрометеорологических явлений является гололёдно-изморозевое отложение (ГИО). Нарушение электроснабжения объектов промышленного комплекса с непрерывным циклом производства, как правило, могут повлечь за собой расстройство сложного технологического процесса, опасность для жизни людей, значительный материальный ущерб.

В связи с тем, что ВЛЭП являются территориально распределенным объектом, образующим георегион и имеющим множество рассредоточенных в пространстве и времени характеристик, они относятся к геообъектам. Характеристики такого геообъекта управления, как ВЛЭП, описываются технико-технологическими данными (ТТД) и пространственными географическими данными (ПГД). Таким образом, возникает задача геоинформационного управления (ГИУ). В настоящее время существует несколько определений ГИУ. В научной школе Бурлова В.Г. под ГИУ понимается создание условий реализации возможностей объекта

управления на базе использования информационных ресурсов в виде ПГД и ТТД, характеризующих данный вид целевой деятельности. В научной школе Биденко С.И. оперируют понятием геоинформационная поддержка управления (ГИПУ). Под ГИПУ понимается система выраженных в пространственной (картографической) форме целевых установок, этапов, категорий, методик и технологий управления, направленная на определение и регулирование целесообразного функционирования объектов (систем) в геопространстве для достижения поставленных целей. На основе двух понятий в работе под ГИПУ понимается создание условий реализации возможностей объекта управления в геопространстве для достижения поставленных целей на базе использования информационных ресурсов в виде ПГД и ТТД, характеризующих данный вид целевой деятельности. Особенность ГИПУ состоит в том, что всем известным категориям и понятиям теории управления дается единая пространственная (территориальная) интерпретация.

При решении задачи прогнозирования характеристик гидрометеорологических факторов в интересах управления безопасностью электроснабжения региона (БЭР) важно обеспечить возможность хранения и обработки ПГД, что входит в предмет построения и функционирования геоинформационной системы (ГИС). ГИС-технологии позволяют объединять в единую систему ПГД и ТТД, характеризующие объекты электроэнергетической системы, для решения пространственно-временных задач управления безопасностью электроснабжения региона. Поэтому дополнительно к задаче прогнозирования возникает важная научная задача обоснования требований к информационному обеспечению геоинформационной системы управления безопасностью электроснабжения региона (ГИС УБЭР).

ГИС УБЭР определяется решаемыми в ней научными и прикладными задачами. Они должны быть выстроены в ряд по мере усложнения и наращивания возможностей управления моделируемыми объектами и процессами. В большинстве случаев ГИС создаются на основе обширных банков и баз данных цифровой информации, куда кроме картографических материалов включаются данные многолетних непосредственных наблюдений, статистические сведения, данные дистанционного зондирования. Рассматриваемая тема настоящей диссертации с точки зрения «Наук о Земле», с одной стороны, лежит в русле исследований Института информационных систем и геотехнологий РГГМУ, занимающегося разработкой теории построения и функционирования ГИС. С другой стороны, настоящая тема прорабатывается в научных исследованиях Высшей школы техносферной безопасности СПбПУ, направленных на разработку методик и методов обеспечения безопасности объектов окружающего мира. Данное обосновано современные системы обеспечения безопасности положение тем, что территориально распределённых объектов, к которым относятся ВЛЭП, основаны на применении спрогнозированных характеристик гидрометеорологических факторов. А это

связано с обеспечением возможности хранения и обработки ПГД, что составляет уже предмет теории построения и функционирования ГИС.

**Степень разработанности темы.** Проблематика настоящего диссертационного исследования лежит на стыке двух областей – геоинформатики и безопасности, по которым были проанализированы и изучены научные работы и разделены на несколько направлений, отражающих степень разработанности темы на текущий момент времени.

Геоинформационное обеспечение деятельности человека представлено тремя комплексными направлениями:

- 1. Разработка информационной поддержки принятия решений при управлении объектами, предупреждением чрезвычайных ситуаций. Среди авторов данного направления необходимо выделить работы Биденко С.И., Самотонина Д.Н., Яшина А.И. (2003), Колесенкова А.Н. (2012), Абрахина С.И. (2013), Ларионова Ю.В. (2013), Тхан Зо У (2013), Садыкова А.М. (2014), Насырова Н.Н. (2014), Нгуен Конг Чыонг (2014), Загарских А.С. (2014), Гнатюк А.Б. (2014), Морозова А.Н. (2014), Шайдулина, Р.Ф. (2014), Филькова А.И. (2014), Миранкова В.А. (2015), Яготинцевой Н.В. (2017), Степанова С.Ю. (2017), Бурмина Л.Н. (2017), Брежнева Р.В. (2017), Гарсиа Эскалона Хосе Антонио (2018), Петрова Я.А. (2018), Ложкиной О.В. (2018), Бешеда Ашенафи Оли (2019), Слезина К.А. (2019), Крашенинникова Д.А. (2020), Храмова И.С. (2020), Купцова К.В. (2020), Горбунова Р.Н. (2020), Коломейко Ф.В. (2020), Пирова Ж.Т. (2020), Коцур Е.В. (2020), Сидоренко А.Ю. (2021), Чжо Най Зо Линн (2021), Дзебоева Б.А. (2021), Самойлова А.С. (2021), Евсюткина И.В. (2021), Кутушева Ш.Б. (2021). Данное направление посвящено управлению объектом с учётом характеристик процесса функционирования, индикаторов безопасности и факторов влияния внутренних и внешних факторов, полученных в том числе при мониторинге, прогнозированию развития ситуации и разработке рекомендаций по построению модели системы управления.
- 2. Разработка геоинформационного обеспечения отраслей экономики, промышленности, здравоохранения. К авторам научных работ по данному направлению относятся Шурховецкий А.В. (2012), Троценко Е.С. (2012), Демина О.И. (2013), Дорошков А.А. (2013), Угланов Н.А. (2013), Шишкин И.А. (2014), Александрова Л.В. (2014), Поршаков А.М. (2014), Кануков А.С. (2014), Панов Д.В. (2014), Рычков А.В. (2014), Маркина Т.А. (2014), Давлетбакова З.Л. (2014), Обязов В.А. (2014), Сомов Э.В. (2015), Морозова Л.Ф. (2015), Буряк Ж.А. (2015), Чыонг Нгуен Конг (2015), Виноградов, П.М. (2015), Кожина Т.В. (2015), Калиниченко А.В. (2015), Сапрыкин М.Ю. (2016), Королев А.А. (2016), Осипов А.Г. (2016), Стадник Н.М. (2016), Струков Д.Р. (2016), Романов Р.В. (2016), Карандеев А.Ю. (2016), Чан Чонг Туан (2016), Алябина И.О. (2016), Боровлев А.Э. (2016), Рафикова Ю.Ю. (2016), Сергеев И.С. (2016), Быстров А.Ю. (2018), Папаскири Т.В. (2016), Полевщикова Ю.А. (2016), Таранов Н.Н. (2016), Быстров А.Ю. (2018),

Кравченко А.С. (2018), Просвирнин Г.С. (2019), Чан Хау Тхин (2019), Логвин Ф.В. (2019), Федоров В.И. (2019), Лапин С.Э. (2020), Студеникина Е.М. (2020), Шеуджен З.Р. (2020), Антонов И.В. (2020), Кириенко А.В. (2021), Красильников П.А. (2021), Просекин С.Н. (2021), Широкоступ С.В. (2021), Гусева А.С. (2021), Фан Тхань Кует (2021), Али Махер Саид (2021), Бочаров А.В. (2021). В рамках данного исследования осуществляется анализ информации (комплексные исследования природы, хозяйства, населения, истории, картографических материалов, космических снимков, литературных и архивных материалов и источников) с целью проектирования и строительства объектов разного типа и назначения, определения кадастровой стоимости земель, геолого-геохимических исследований, определения уровня обеспеченностью ресурсами.

3. Исследование и разработка методологии создания баз пространственных данных, сформированное и расширенное следующими авторами: Ребрий А.В. (2012), Теплова Я.О. (2012), Пьянков С.В. (2013), Бешенцев А.Н. (2013), Шандрыголов З.Н. (2013), Белов А.В. (2013), Ружников Г.М. (2014), Железняков В.А. (2014), Бурлаков Н.С. (2014), Паращук Е.М. (2014), Колбина О.Н. (2014), Новопашин, А.В. (2015), Зайцев В.В. (2015), Дорогобед А.Н. (2016), Власов В.В. (2016), Абдуллин Р.К. (2017), Матерухин А.В. (2018), Каримова А.А. (2019), Соколова А.В. (2019), Джалалванд Али (2020), Михеева А.В. (2020), Черниховский Д.М. (2020), Ломакина С.С. (2020), Минеев А.Л. (2020), Тюкавкина О.В. (2021), Глушков А.А. (2021), Ковалев Ю.А. (2021), Андреева О.А. (2021). В результате развития данного направления получены схемы формирования и ведения баз данных, формализованное представление баз данных для создания средств информационной поддержки систем мониторинга, математико-картографического обеспечения, геоинформационного моделирования геосистем и комплексов.

Рассматривая данные направления в рамках постановки задачи настоящего исследования сделаны выводы, что:

- первое направление не в полной мере решает поставленную задачу по формированию решения при управлении электроснабжением региона, так как информационное обеспечение ГИПУ территориальной системой обеспечения безопасности электроснабжения региона (ТС ОБЭР) для формирования решения не разрабатывалось;
- второе направление не в полной мере решает поставленную задачу по анализу ПГД и
   ТТД в области электроснабжения региона в связи с тем, что геоинформационное обеспечение
   электроснабжения региона не рассматривалось;
- третье направление не в полной мере решает поставленную задачу по созданию информационного обеспечения системы электроснабжения региона, так как исследование и создание баз ПГД и ТТД в области обеспечения безопасности электроснабжения региона не рассматривалось.

На данный момент проблема обеспечения безопасности электроснабжения региона в условиях гололёдно-ветровой ситуации (ГВС) решается либо повышением надёжности элементов электроэнергетической отрасли, либо использованием информационно-измерительной системы, позволяющей фиксировать начало процесса гололёдообразования и обнаруживать места повреждений в режиме реального времени.

Научные работы по обеспечению безопасности электроснабжения региона представлены по четырем направлениям:

- 1. Определение по параметрам предаварийного и аварийного режимов мест повреждения ВЛЭП. Авторами являются Абрамочкина Л.В. (2014), Солдатова С.В., Хакимзянов Э.Ф. (2015), Филатова Г.А. (2017). Научное направление посвящено повышению точности определения мест повреждения и сокращению временных и финансовых затрат на поиски места повреждения и организацию ремонтно-восстановительных работ.
- 2. Разработка и применение информационно-измерительной системы контроля аварийных режимов ВЛЭП. Данное направление разрабатывается Шилиным А.А. (2012), Дорониной О.И. (2014), Ле Суан Фу (2016), Варнавским К.А. (2017), Чжо Зин Лин (2018). Оно направлено на разработку методов и способов дистанционного в реальном режиме времени определения вида и места аварии.
- 3. Повышение надёжности и эксплуатационной готовности ВЛЭП на основе оценки надёжности и разработанных рекомендаций по срокам организации капитальных ремонтов и снижению рисков технологических нарушений, в том числе оценка влияния природно-климатических факторов, развиваемого Кабашовым В.Ю. (2011), Складчиковым А.А. (2012), Лопатиным Е.И. (2012), Косорлуковым И.А. (2013), Левиным Д.С. (2013), Зацепиной В.И. (2014), Малеевым П.Г. (2014), Виноградовой А.В. (2015), Федоровым А.В. (2016), Утеулиевым Б.А. (2018), Прохоровым Д.В. (2018), Гатиятовым И.З. (2018), Тошходжаевой М.И. (2019), Горячевым М.П. (2019), Нгуен Ван Ву (2021), Батуевой Д.Е. (2021). В рамках данного направления разрабатываются методики обоснованного и корректного решения задачи проектирования систем электроснабжения, выбора возможных схем резервирования и проведения вариантных ситуационных решений по мероприятиям повышения показателя безопасности системы.
- 4. Обнаружение, предотвращение или устранение образовавшегося ГИО, результаты которого отражены в научных работах Сацука Е.И. (2011), Титова Д.Е. (2014), Щурова А.Н. (2015), Ярославского Д.А. (2017), Елизарьева А.Ю. (2017), Ратушняк В.С. (2021).

Рассматривая данные направления в рамках постановки задачи настоящего исследования сделаны выводы, что:

- первое направление не в полной мере решает поставленную задачу по оценке последствий проявления угрозы нарушения электроснабжения региона, так как не позволяет заблаговременно определить масштаб последствий при реализации аварийной ситуации;
- второе направление не в полной мере решает поставленную задачу по идентификации угрозы нарушения электроснабжения региона в связи с тем, что рассматривает информирование оператора только после проявления угрозы нарушения электроснабжения региона;
- третье направление не в полной мере решает поставленную задачу по нейтрализации угрозы нарушения электроснабжения региона, так как его результаты позволяют устранять именно последствия от реализации угрозы нарушения электроснабжения, но не саму угрозу.

Четвертое направление обеспечивает безопасность электроснабжения региона, но решает только прямую задачу управления безопасностью, что в условиях неопределённости состояния окружающей среды не позволяет достигать требуемого показателя безопасности.

В настоящее время электросетевые компании также рассматривают возможность применения ГИС для получения прогноза метеоусловий (температура окружающей среды, влажность, количество осадков, сила и направление ветра) на территории расположения объектов электроэнергетики, но ими не разработан подход по решению обратной задачи управления процессами обеспечения безопасности электроснабжения региона, что и планируется реализовать в данной исследовательской работе.

Таким образом, к факторам, формирующим потребность в обеспечении безопасности электроснабжения региона, относятся:

- 1. Естественно-научные воздействие экстремальных погодных явлений (сильные снегопады, ветровые нагрузки, грозы, ливневые дожди, ледяной дождь и т.д.). Проблема: отсутствие связи между ПГД и ТТД и элементами контура управления.
- 2. Технические отсутствие системно изложенных результатов, которые связывают технические возможности и процесс управления электроснабжением. Проблема: поздняя оценка обстановки, несвоевременное наращивание группировки сил и средств, неэффективное использование привлеченных ресурсов (согласно отчёту Минэнерго России).
- 3. Организационные стратегическое планирование в сфере обеспечения национальной безопасности Российской Федерации. Проблема: недостаточный уровень межведомственного взаимодействия (согласно отчёту Минэнерго России).

#### Идея работы

Известно, что при электроснабжении региона существует проблема обеспечения безопасности электроснабжения в условиях деструктивного воздействия гидрометеорологических факторов геопространства. Это подтверждается, с одной стороны, статистическими данными, с другой стороны, организационными мероприятиями, в первую

очередь к которым можно отнести создание Штабов по обеспечению безопасности электроснабжения. Таким образом, анализ факторов позволяет сделать следующие выводы, что основа деятельности по обеспечению безопасности электроснабжения региона есть решение человека (академик АН СССР и РАН Моисеев Н.Н.). Решение человека осуществляется на базе трех категорий: модель, система, предназначение (результат) (академик АМН и АН СССР Анохин П.К.). Для того чтобы решить поставленную научную задачу необходимо осуществить системную интеграцию процессов геоинформационной поддержки обеспечения безопасности электроснабжения региона на основе модели ГИПУ ТС ОБЭР, но модель исследуемого объекта должна удовлетворять свойствам системы. Из научных трудов академика Анохина П.К. известно, что для этого необходимо использовать системообразующий фактор (СОФ). Однако, данный фактор в известных публикациях не используется в полной мере, это не позволяет гарантированно достигать цели деятельности по обеспечению безопасности электроснабжения региона. Из этого следует, что для адекватности решения необходимо разработать СОФ. Это следствие теории функциональных систем академика Анохина П.К. Поэтому модель ГИПУ ТС ОБЭР в настоящей работе строится на базе условия существования процесса обеспечения безопасности (УСПОБ), что и является СОФ. УСПОБ разработано и используется в ведущей научно-педагогической школе (НПШ) «Системная интеграция процессов государственного управления». В отличие от известных публикаций такой подход позволяет гарантированно достигать цели деятельности при обеспечении безопасности электроснабжения региона.

**Цель** диссертационной работы — выбор, обоснование и реализация условий гарантированного достижения требуемого показателя безопасности электроснабжения региона в условиях деструктивного воздействия гидрометеорологических факторов окружающей среды на ВЛЭП.

Цель достигается разработкой комплекса научно-технических и кибернетических мероприятий. Цель работы определяется:

- 1. Несоответствием между возможностями системы электроснабжения региона и государственными интересами в изменяющейся обстановке.
- 2. Несоответствием между возможностями целевой деятельности электроэнергетической системы и средствами обеспечения безопасности в изменяющейся социально-экономической и военно-политической обстановке при решении главной задачи страны.
- 3. Несоответствием между техническими возможностями электроэнергетической системы и научными результатами процесса поиска путей повышения эффективности применения электрических сетей за счет разработки, развертывания и использования ГИС в условиях адекватных обстановке действий.

Первое противоречие отражает социально-экономическую грань рассматриваемого процесса, второе – научно-техническую, третье – методологическую.

Для разрешения противоречий решена следующая важная научно-техническая задача: ГИПУ TC ОБЭР В условиях деструктивного методику гидрометеорологических факторов на базе системной интеграции процессов геоинформационной поддержки обеспечения безопасности электроснабжения региона.

Результаты решения данной важной научной задачи предназначены для теоретического обоснования действий соответствующих государственных органов территориальной системы обеспечения безопасности электроснабжения региона, призванных за ограниченное время выработать комплекс мероприятий для поддержания требуемого показателя безопасности электроснабжения региона на уровне разумной достаточности за счет развития ГИС УБЭР в соответствующих условиях обстановки.

**Объект исследования** – территориальная система обеспечения безопасности электроснабжения региона (ТС ОБЭР).

Предмет исследования – модели и методы ГИПУ ТС ОБЭР.

#### Задачи исследования:

- 1. Проанализировать известные модели и методы обеспечения безопасности электроснабжения региона в условиях деструктивного воздействия гидрометеорологических факторов на базе применения ГИС.
- 2. Разработать модель ГИПУ ТС ОБЭР в условиях деструктивного воздействия гидрометеорологических факторов.
- 3. Разработать методику ГИПУ TC ОБЭР в условиях деструктивного воздействия гидрометеорологических факторов.
- 4. Разработать практические рекомендации по совершенствованию ГИПУ ТС ОБЭР в условиях обледенения ВЛЭП.

Методологическая основа исследования базируется на достижениях ведущей НПШ «Системная интеграция процессов государственного управления», зарегистрированной в Реестре ведущих научных и научно-образовательных школ Санкт-Петербурга и использующей естественно-научный подход (ЕНП) к осознанию и познанию закономерностей из Закона сохранения целостности объекта (ЗСЦО).

#### Методы исследования

Для достижения цели настоящего исследования применялись системный анализ, теория вероятностей, теория функциональных систем, теория системной интеграции процессов управления, теория марковских процессов.

Научная обоснованность и достоверность исследования обеспечивается следующим:

- ¬ согласованностью полученных результатов с трудами других исследователей и внутренней непротиворечивости результатов исследования их фундаментальным основам;
- ¬ применением апробированных методик математического и геоинформационного моделирования, системного анализа;
- ¬ апробацией результатов исследования на конференциях и публикациями в открытой печати;
- ¬ утверждением результатов диссертационного исследования в отчётах о выполнении научного проекта Российского фонда фундаментальных исследований.

Также достоверность исследования основывается на применении формального аксиоматического метода (ФАМ), ЕНП и ЗСЦО.

#### Научная новизна работы

Определяется постановкой и решением новой научной задачи системной интеграции процессов геоинформационной поддержки обеспечения безопасности электроснабжения региона в условиях деструктивного воздействия гидрометеорологических факторов на основе реализации СОФ в виде УСПОБ в форме решения обратной задачи, разработанного зарегистрированной в реестре ведущих научных и научно-педагогических школ Санкт-Петербурга НПШ «Системная интеграция процессов государственного управления». Также определяется разработанными научно обоснованными практическими рекомендациями по совершенствованию ГИПУ ТС ОБЭР в условиях обледенения ВЛЭП.

Из теории функциональных систем Анохина П.К. можно показать, что техника (как и все рукотворные объекты, в том числе ВЛЭП) – есть реализация модели решения человека (главного конструктора). Следовательно, чтобы гарантировать выполнение объектом его предназначения (электроснабжение региона посредством ВЛЭП), необходимо иметь модель решения человека.

#### Положения и научные результаты, выносимые на защиту:

- модель ГИПУ ТС ОБЭР, которая отличается тем, что в отличие от известных публикаций была разработана на базе системной интеграции процессов геоинформационной поддержки обеспечения безопасности электроснабжения региона и показателя безопасности;
- *методика ГИПУ ТС ОБЭР*, которая отличается тем, что в отличие от известных публикаций рассматривает задачу управления безопасностью электроснабжения региона как обратную, формируя процессы с наперёд заданными свойствами для достижения требуемого показателя безопасности. Применение методики, по предварительным оценкам, позволяет увеличить показатель безопасности электроснабжения региона на 13,7% (в сопоставлении с использованием датчиков гололёдообразования);

- научно обоснованные практические рекомендации по совершенствованию ГИПУ *ТС ОБЭР*, отличающиеся тем, что в отличие от известных публикаций предложено обоснование требований к информационному и кадровому обеспечению, техническому оснащению процессов геоинформационной поддержки обеспечения безопасности электроснабжения региона в условиях обледенения ВЛЭП.

Полученные результаты позволяют гарантировать достижение показателем безопасности электроснабжения региона требуемого значения, при котором мы можем гарантировать отсутствие перебоев в процессе передачи электрической энергии от источника до потребителя посредством ВЛЭП.

**Соответствие диссертации паспорту специальности.** Полученные научные результаты соответствуют пунктам 1, 3, 6, 7, 9 паспорта научной специальности 1.6.20. Геоинформатика, картография:

1. Теоретические и экспериментальные исследования в области развития научных и методических основ геоинформатики.

Соответствие имеется, так как полученные результаты содержат новые научные и методические основы геоинформатики в области электроснабжения региона.

3. Геоинформационные системы (ГИС) разного назначения, типа (справочные, аналитические, экспертные и др.), пространственного охвата и тематического содержания.

Соответствие имеется, так как полученные результаты основаны на теоретической разработке и применении ГИС, реализующей пространственный охват региона электроснабжения с объектами электроэнергетической отрасли и метеорологическими условиями.

6. Математические методы, математическое, информационное, лингвистическое и программное обеспечение для ГИС.

Соответствие имеется, так как полученные результаты содержат научно обоснованные рекомендации в области математического, информационного и программного обеспечения для ГИС.

7. Геоинформационное картографирование и другие виды геомоделирования, системный анализ многоуровневой и разнородной геоинформации.

Соответствие имеется, так как полученные результаты базируются на геоинформационном моделировании и получении и анализе разнородной геоинформации, куда входят данные по объектам электроэнергетической отрасли и гидрометеорологическим факторам на определённом геопространстве.

9. Геоинформационные инфраструктуры, методы и технологии хранения и использования геоинформации на основе распределенных баз данных и знаний.

Соответствие имеется, так как полученные результаты содержат научно обоснованные рекомендации по разработке базы данных ГИПУ ТС ОБЭР с последующей их реализацией в рамках разработанной методики.

**Теоретическая значимость работы** определяется тем, что получено достаточное УСПОБ, и основана на:

- статистическом обосновании низкого показателя безопасности электроснабжения региона в условиях обледенения ВЛЭП;
- адекватной формализации модели ГИПУ ТС ОБЭР;
- разработке методики ГИПУ ТС ОБЭР.

**Практическая значимость работы** заключается в её направленности на решение задачи системной интеграции процессов геоинформационной поддержки обеспечения безопасности электроснабжения региона и определяется:

- разработкой модели ГИПУ ТС ОБЭР;
- разработкой методики ГИПУ ТС ОБЭР;
- разработкой научно обоснованных практических рекомендаций по совершенствованию ГИПУ ТС ОБЭР, что позволит органам государственного управления безопасностью электроснабжения региона своевременно подготовить перечень управленческих действий;
- разработкой программ для ЭВМ, реализующих этапы методики ГИПУ ТС ОБЭР,
   представляющих собой программное обеспечение в том числе и для геоинформационных систем;
- подготовкой специалистов, задействованных в процессе обеспечения безопасности электроснабжения региона, что подтверждается актом внедрения научных результатов в учебный процесс.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на:

- 1. International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering (EECE 2019). 20 ноября 2019. г. Санкт-Петербург.
  - 2. «Неделя науки СПбПУ». 21 ноября 2019. г. Санкт-Петербург.
- 3. Международная научно-практическая конференция «Современные проблемы гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды на пространстве СНГ», посвященная 90-летию Российского государственного гидрометеорологического университета. 22-24 октября 2020. г. Санкт-Петербург.
- 4. Национальная научная конференция для молодых ученых «Биотехнологии и безопасность в техносфере». 21-22 апреля 2021. г. Санкт-Петербург.

- 5. Всероссийская молодежная конференция с международным участием «Системные исследования в энергетике 2021». 25-28 мая 2021. г. Иркутск.
- 6. DiEarth 2021: Международная научно-исследовательская конференция по перспективным исследованиям Земли: геодезия, геоинформатика, картография, землеустройство и кадастры. 18 ноября 2021. г. Барнаул.
- 7. Научно-практическая конференция молодых ученых ИНФОГЕО–2021 «Информационные системы в Арктике». 27 ноября 2021. г. Санкт-Петербург.
- 8. Вторая национальная научная конференция для молодых ученых «Биотехнологии и безопасность в техносфере». 2-3 марта 2022. г. Санкт-Петербург.
- 9. Международная научно-практическая конференция ИНФОГЕО-2022 «Информационные системы в Арктике». 25-26 ноября 2022. г. Санкт-Петербург.
- 10. Всероссийская научно-практическая конференция «Инновационные методы математики и физики в экологических и гидрометеорологических исследованиях». 7 апреля 2023. г. Санкт-Петербург.

В ходе реализации научного проекта РФФИ № 20-38-90225 по теме диссертации отчёты по результатам проделанной работы были рассмотрены и утверждены экспертной комиссией РФФИ.

Личный вклад автора. Научные положения, выносимые на защиту, получены лично автором. В научных публикациях, подготовленных в соавторстве, автору принадлежат формализация задачи исследования, выбор методологии исследования, математическое, геоинформационное и имитационное моделирование, разработка методики трансформации вербальной модели в формальную на базе регламентации пространственно-временных состояний процессов деятельности, разработка геоинформационных моделей и геоинформационных технологий и анализ результатов системной интеграции процессов геоинформационной поддержки обеспечения безопасности электроснабжения региона. Автор разработал программы для ЭВМ, реализующие некоторые этапы предлагаемой методики ГИПУ ТС ОБЭР, на языке программирования Java. Данные программы могут быть использованы в качестве программного обеспечения ГИС УБЭР.

В научных публикациях соискателем лично получены следующие результаты:

в работах [138, 140, 149, 151] вклад соискателя заключался в формализации задачи исследования, выборе методологии исследования, математическом моделировании, разработке методики трансформации вербальной модели в формальную на базе регламентации пространственно-временных состояний процессов деятельности, что позволило соискателю разработать модель ГИПУ ТС ОБЭР;

- в работах [139, 144, 145, 148, 160, 163, 169] вклад соискателя заключался в обосновании концепции исследования, анализе и обобщении данных научных исследований по тематике диссертационного исследования, имитационном и геоинформационном моделировании, обобщении результатов исследования, что позволило соискателю разработать методику ГИПУ ТС ОБЭР;
- при разработке программ для ЭВМ вклад соискателя заключался в разработке алгоритма, написании исходного кода программ, разработке данных и спецификации программ, программной реализации алгоритма, что позволило соискателю разработать программное обеспечение для ГИС УБЭР с целью реализации некоторых этапов предлагаемой методики ГИПУ ТС ОБЭР;
- в работах [147, 177] вклад соискателя заключался в анализе и обобщении полученных результатов исследования, сборе и систематизации данных, что позволило соискателю разработать научно обоснованные практические рекомендации по совершенствованию ГИПУ ТС ОБЭР.

Публикации. Основные результаты диссертационного исследования изложены в 34 работах, из них 2 в изданиях, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий ВАК РФ по специальности 1.6.20; 6 в изданиях, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий ВАК РФ по смежным научным специальностям; 5 в высокорейтинговых зарубежных изданиях. Разработано и зарегистрировано 6 программ для ЭВМ в рамках диссертационного исследования.

#### Участие в конкурсах на лучшие проекты фундаментальных научных исследований:

- 1. Победа в конкурсе РФФИ «Аспиранты. Конкурс на лучшие проекты фундаментальных научных исследований, выполняемые молодыми учеными, обучающимися в аспирантуре». Получение гранта на научное исследование. Проект № 20-38-90225: «Разработка технологии управления процессами обеспечения безопасности электрических сетей при деструктивном воздействии метеорологических факторов».
- 2. Победа в конкурсе грантов для студентов вузов, расположенных на территории Санкт-Петербурга, аспирантов вузов, отраслевых и академических институтов, расположенных на территории Санкт-Петербурга, 2020.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений, списка литературы из 185 наименований, 9 приложений. Основная часть работы изложена на 152 страницах, содержит 40 рисунков, 9 таблиц.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90225.

Глава 1. Научно-технические основы обеспечения безопасности электроснабжения региона в условиях деструктивного воздействия гидрометеорологических факторов на базе применения ГИС

# 1.1. Характеристика особенностей процесса передачи электроэнергии посредством воздушных линий электропередачи

Поскольку электрификация народного хозяйства является основой комплексной механизации и автоматизации производства и непременным условием повышения производительности труда, она должна строиться на надёжной основе. Бесперебойность электроснабжения воплощает в себе множество взаимозависимых составляющих: начиная от разработки и изготовления огромного количества разнотипного оборудования и аппаратуры, качества проектов, монтажа, наладки и до ввода в действие оборудования и доведения режима его работы до нормы. Поэтому безопасность электроснабжения является наиболее представительным мерилом совершенства энергетического производства и должна обязательно учитываться при оптимизации развития электроэнергетических систем.

Электроснабжение региона — единый и непрерывный технологический процесс, характеризующийся последовательными этапами по производству, передаче, распределению и потреблению электроэнергии [1].

К важной уникальной особенности электроэнергетической отрасли в области управления относятся такие характерные свойства рассматриваемого технологического процесса, как единство и непрерывность [2]. При этом задействовано много различных объектов, являющихся полноправными участниками процесса, что требует наличие центрального органа оперативнодиспетчерского управления на протяжении всего цикла электроснабжения.

Существующая система оперативно-диспетчерского управления электроснабжением объектов на территории России подразумевает под собой совокупность организационно-технических мер, предпринимаемых субъектами оперативно-диспетчерского подразделения с целью централизованного управления в реальном времени технологическими режимами функционирования элементов электроэнергетической системы и объектов потребителей в пределах Единой энергетической системы (ЕЭС) России и технологически изолированных территориальных электроэнергетических систем [3, 4]. Основная задача централизованного управления заключается в обеспечении устойчивой и надёжной передаче электроэнергии в технологической цепочке от производителя до потребителя с заявленными показателями

качества электрической энергии. Фундаментальные положения и принципы оперативнодиспетчерского управления в области электроснабжения содержатся в Федеральном законе «Об электроэнергетике» [5].

Вышестоящим субъектом оперативно-диспетчерского управления является системный оператор Единой энергетической системы (СО ЕЭС) России, нижестоящее звено включает субъекты оперативно-диспетчерского управления (организации и физические лица), которые имеют право выдавать оперативные диспетчерские команды и распоряжения субъектам электроэнергетики и потребителям электрической энергии в пределах своей зоны ответственности [3].

Распределить субъекты оперативно-диспетчерского управления по иерархической цепочке после главного звена — системного оператора ЕЭС России можно следующим образом [3, 6]:

- региональные диспетчерские управления (РДУ), образованные на базе оперативнодиспетчерских служб энергосистем;
- начальники смен электрических станций;
- оперативно-диспетчерские службы предприятий электрических сетей;
- оперативно-диспетчерские подразделения районов электрических сетей;
- оперативный персонал предприятий потребителей электроэнергии.

Первоочередной задачей оперативно-диспетчерского управления является обеспечение безопасного и надёжного электроснабжения, при этом в обязательном порядке учитывается экономическая эффективность оперативно-диспетчерских команд и распоряжений с целью снижения незапланированных издержек.

Электроснабжение региона основано на эксплуатации электрических сетей (ЭС), представляющих собой сочетание электроустановок (объединение преобразующих подстанций, распределительных устройств, переключательных пунктов и соединяющих их линий электропередачи) для передачи к местам потребления и распределения электрической энергии между потребителями на определенной территории [1].

Важным звеном ЭС является линия электропередачи (ЛЭП). ЛЭП – протяжённый комплекс сооружений, состоящий из электрических проводов, кабелей, изоляторов, различных вспомогательных устройств, а также опоры, предназначенные для поддержки и натяжки токонесущих проводов или проводов связи. Назначение ЛЭП как объекта электроэнергетической сети заключается в передаче и распределении электрической энергии от источника (электростанций) к подстанциям и непосредственно потребителям, и вдобавок к перечисленному для соединения смежных энергетических систем, образуя таким образом георегион [7]. ЛЭП в зависимости от конструктивного исполнения делятся на воздушные ЛЭП (ВЛЭП), электрические

провода которых располагаются на расстоянии от земли или воды (подвешиваются), и подземные (подводные) ЛЭП, для которых применяются силовые кабели.

ЛЭП относятся к наиболее ненадёжным элементам системы электроснабжения [8, 9], так как они подвержены воздействию многочисленных факторов геопространства [7], среди которых можно выделить две группы: постоянные (конструкции, материалы, срок эксплуатации, состояние и т.д.) и переменные (гололёдные и ветровые нагрузки, лесные насаждения, повреждение транспортными средствами, вандализм и т.д.).

ВЛЭП – это совокупность взаимосвязанных электротехнических устройств, находящихся в конструктивном и функциональном единстве, предназначенная для передачи или распределения электрической энергии по проводам, находящимся на открытом воздухе и прикреплённым с помощью траверс (кронштейнов), изоляторов и арматуры к опорам или другим сооружениям (мостам, путепроводам) [10]. ВЛЭП подвержены воздействию гидрометеорологических факторов [11 – 14] (ветер, гололёд, дождь, температура окружающей среды) в связи с особенностью их эксплуатации на довольно обширной территории в различных географических районах с резко отличающимися климатическими условиями.

Предприятия, эксплуатирующие ЭС, составной частью которых являются ВЛЭП, ставят перед собой цель обеспечить бесперебойное электроснабжение с заявленными показателями качества электроэнергии в зоне своей ответственности [15, 16]. Комплекс мер, направленных на достижение поставленной цели, включает в себя организацию эксплуатации и ремонта ЭС, своевременное устранение повреждений и реализацию требуемых технических мероприятий.

Режим сети описывает ее электрическое состояние. Возможны следующие режимы работы ЭС:

- 1. Нормальный режим. Данный режим характеризуется следующими условиями:
- значения основных параметров (частота, напряжение) соответствуют номинальным или не превышают допустимых (установленных) значений;
- значение тока находится в пределах допустимых отклонений электрических величин по условиям нагревания;
- нагрузки изменяются медленно (что и обусловливает поддержание основных параметров на допустимом уровне посредством плавного управления функционированием электростанций и сетей).

При этом к виду нормального режима относится также включение и отключение мощных линий или трансформаторов и резкопеременные (ударные) нагрузки. В рассматриваемых ситуациях длительность переходного процесса относительна мала (доли секунды), и затем вновь устанавливается нормальный режим функционирования электроэнергетической системы, при котором значения основных параметров в контрольных точках соответствуют заданным.

- 2. Аварийный режим. В случае возникновения аварии на электрических станциях или сетях (например, при коротком замыкании происходит отключение неисправного участка сети) режим электроэнергетической системы переходит из состояния «нормальный» в состояние «аварийный». Данный переходный режим вызван резко изменившимися параметрами ЭС и наступает при неожиданных изменениях в схеме и резких изменениях генераторных и потребляемых мощностей [17]. Нахождение системы в данном состоянии характеризуется отклонением значений основных параметров в контрольных точках от заданных значений.
- 3. Послеаварийный режим. Электроэнергетическая система переходит в данный режим после локализации аварии. Параметры послеаварийного установившегося режима в большинстве случаев не соответствуют параметрам нормального режима, что вызвано неработоспособностью (повреждением) элемента системы (генератор, трансформатор, линия) вследствие аварийной ситуации. При данном режиме возможно появление «дефицита мощности», который обусловлен тем, что значение передаваемой мощности (мощность генераторов) меньше мощности, необходимой потребителям.

В условиях послеаварийного режима параметры электроэнергетической системы могут либо находиться в пределах допустимых значений, либо выходить за пределы [18 – 20]. В первом случае, если параметры являются допустимыми, то считается, что исход аварии благополучный. Во втором случае диспетчерская служба осуществляет меры по приведению параметров сети к установленным допустимым параметрам.

Эксплуатация электроэнергетической системы осуществляется на основе применения автоматических устройств, что вызвано затруднительным осуществлением персоналом регулирования системы в связи с практически мгновенными изменениями значений электрических величин [21 — 23], в частности, при переходных процессах. Поэтому часть объектов электроэнергетической системы работает без участия обслуживающего персонала. Сложность и непрерывность процессов обусловливает требование к повсеместному применению автоматических устройств, собственно, на всех объектах. При этом автоматические устройства способны осуществить ликвидацию аварий, отрегулировать электрический режим в случае изменения нагрузки.

В системе обеспечения электроэнергией потребителей в настоящее время значительное место занимают электронно-вычислительные машины (компьютеры). При возникновении аварийного события дежурный персонал должен принять своевременное решение (в ряде случаев управляющий сигнал необходимо получить за время, не превышающее 0,05 c) [24 – 27] о том, какие пути и средства возобновления нормального режима следует использовать, нужно ли выполнить требуемые переключения в схеме электрических соединений [28]. Как раз в таких

случаях применение устройств, обрабатывающих за короткий промежуток времени достаточный объём информации, позволяет обеспечить надлежащий уровень быстродействия.

Одним из основных характерных свойств такой системы, как электроэнергетическая, является то, что электростанции должны предоставлять такое количество мощности, которое необходимо в данный момент времени для обеспечения потребителей требуемой электроэнергией, компенсации собственных нужд и потерь в сетях. Таким образом, оборудование, применяемое на электростанции, и сети должны быть потенциально готовы к периодическому изменению нагрузки потребителей в течение суток или года [29, 30]. Данное обстоятельство позволяет внести в управление электроэнергетической системой необходимые коррективы: либо уменьшить выходную мощность посредством остановки некоторого числа генераторов при уменьшении нагрузки, либо запустить в работу резервные генераторы при увеличении нагрузки на систему.

Так как существует определенный набор потребителей, при нарушении электроснабжения которых могут возникнуть нежелательные последствия (человеческие жертвы, техногенные аварии, уменьшение объёма продукции и т.д.), то сформулированы следующие требования, предъявляемые к работе энергосистем [28]:

- плановая выработка электроэнергии и её распределение с покрытием максимальных значений нагрузки;
- непрерывное функционирование электрооборудования и надёжное функционирование систем электроснабжения;
- стабильное снабжение потребителей электроэнергией соответствующего качества по напряжению и частоте.

Реализация указанных требований основана на развитии системы диспетчерских пунктов, в обязательном порядке которые обеспечиваются необходимыми средствами контроля, управления, связью, четкой мнемонической схемой расположения электростанций, ЛЭП и понижающих подстанций [31]. При этом диспетчер несет полную ответственность за работоспособность электроэнергетической системы и его указания обязательны для всех участников энергосистемы.

Постановлением Правительства РФ от 16.02.2008 г. № 86 «О штабах по обеспечению безопасности электроснабжения» утверждены основные положения, затрагивающие вопросы обеспечения безопасности и безаварийности на объектах электроэнергетической отрасли, среди которых можно выделить функцию по мониторингу и прогнозированию развития ситуации при возникновении или угрозе возникновения нарушения электроснабжения. Среди мер, которые могут быть направлены на предотвращение нарушения электроснабжения выделяют формирование и направление оперативных выездных аварийных бригад и определение перечня

объектов электроэнергетики, на которых должно быть обеспечено круглосуточное дежурство персонала. К угрозам нарушения электроснабжения (режим с высокими рисками нарушения электроснабжения) относят также следующее обстоятельство: прогнозируемое наступление таких неблагоприятных природных явлений, которые могут привести к массовому отключению электросетевого оборудования, как обильные снегопады, сопровождающиеся интенсивным налипанием снега на провода, грозозащитные тросы, опоры воздушных линий электропередачи и на оборудование объектов электроэнергетики, гололёдообразование на проводах и грозозащитных тросах воздушных линий электропередачи, а также резкие изменения метеорологических условий [32].

Подверженность объектов топливно-энергетического комплекса влиянию природноклиматических условий, особенно линейных объектов, повреждение которых может повлечь значительный ущерб или возникновение ЧС [33 – 36] приводит к нарушению функционирования особо важных элементов народного хозяйства.

Организация оперативного взаимодействия Правительственной комиссии по обеспечению безопасности электроснабжения (Федерального штаба) с региональными штабами для выполнения возложенных на них задач и функций выполняется САЦ Минэнерго России. Оперативное взаимодействие осуществляется при возникновении или угрозе возникновения нарушения электроснабжения (режим с высокими рисками нарушения электроснабжения) либо при возникновении аварийного электроэнергетического режима в энергосистеме. На Рисунке 1 показана схема взаимодействия и информационного обмена Федерального штаба (ФШ) с региональными штабами.

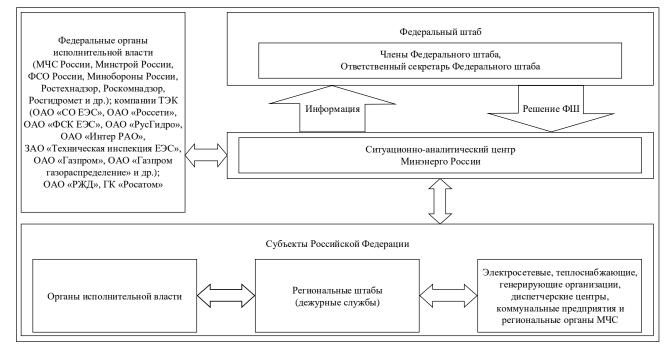


Рисунок 1 – Схема взаимодействия и информационного обмена Федерального штаба с региональными штабами [37]

Согласно Правилам устройства электроустановок (ПУЭ) [38] в отношении обеспечения надёжности электроснабжения потребители подразделяются на следующие три категории:

- І категория очень важные электропотребители. К данной группе относятся электроприемники, нарушение процесса электроснабжения которых влечет или может повлечь за собой человеческие жертвы, является потенциальной угрозой безопасности государства (в том числе происходит сбой в функционировании систем оповещения), наносит значительный материальный ущерб. Отдельной (особой) группой выделяются электроприемники, назначение которых заключается в обеспечении безаварийной остановки промышленного производства с целью предотвращения гибели и травмирования людей, а также угрозы возникновения взрывов и пожаров. Типовыми электроприемниками данной категории являются следующие: противопожарные насосы, аварийное электроосвещение, пожарная и охранная сигнализация, реанимационные и родильные отделения, котельные, лифты, диспетчерские пункты городских систем и т.п.);
- II категория просто важные электропотребители. К данной группе относятся электроприемники, нарушение электроснабжения которых приводит к снижению объёмов выпуска продукции, массовым простоям производств, механизмов и промышленного транспорта, сбою определенной жизнедеятельности большей части населения городов и сельской местности. Типовые электроприемники данной категории расположены в административных зданиях, детских и учебных заведениях, крупных торговых и спортивных центрах (объекты, на территории которых возможно большое скопление людей);
- III категория все остальные электропотребители (группа электроприемников, не относящихся к первым двум). К данной категории относятся объекты, перерыв электроснабжения на которых не является причиной относительно значительных материальных затрат и экономических последствий (небольшие населенные пункты, многоквартирные жилые дома, частный сектор, дачные и гаражные кооперативы).

Электропотребители I категории, согласно требованиям, должны быть подключены к двум независимым взаимно резервирующим источникам питания. При этом перерыв в процессе электроснабжения таких объектов может длиться не больше времени, необходимого на автоматическое восстановление питания (применение устройств автоматического ввода резерва – ABP). Для особой группы электроприемников третьим независимым источником питания (для остальных – вторым независимым источником питания) могут являться находящиеся в относительной близости электростанции, агрегаты бесперебойного питания, аккумуляторные батареи и т.п. Но при отсутствии возможности создать резервный источник питания или при

отсутствии технико-экономического обоснования такого решения допускается применять технологическое резервирование (посредством применения взаимно резервирующих технологических устройств).

Электропотребители II категории в нормальных условиях эксплуатации должны обеспечиваться снабжением электроэнергией от двух независимых взаимно резервирующих источников питания. В данном случае перерыв в электроснабжении такого рода объектов может длиться от начала прекращения подачи электроэнергии до включения резервного источника питания действиями 1) дежурного персонала (например, дежурный электрик зайдет в щитовую и переключит рубильник на второй ввод) или 2) выездной оперативной бригады, то есть допускается некоторое время на переключение.

Электропотребители III категории обеспечиваются электроэнергией от одного источника питания, но при соблюдении условия, что в случае нарушения электроснабжения, время, затрачиваемое на ремонт либо замену неисправной детали системы подачи электроэнергии, не превышает 24 часов (время выполнения аварийно-восстановительных работ).

Потребители электроэнергии, кроме категорирования по надёжности электроснабжения, могут быть разделены на группы с учетом их функционального назначения, схемы подключения питания от энергосистемы, величины и режимов потребления электроэнергии и мощности, спецификой использования электроэнергии [17]:

- промышленные потребители и приравненные к ним (строительные организации, предприятия транспорта, шахты, рудники, карьеры, нефтяные, газовые и другие промыслы, объекты связи, коммунального хозяйства и бытового обслуживания);
- производственные сельскохозяйственные потребители;
- коммунально-бытовые потребители;
- общественно-коммунальные потребители (учреждения, организации, предприятия торговли и общественного питания и др.).

Из вышеперечисленных потребителей наиболее энергоемкой группой является первая – промышленные потребители [39 – 41].

Очевидно, что каждая группа потребителей имеет обусловленный функциональным назначением режим работы. Например, нагрузка коммунально-бытовых потребителей (в большей степени выражающаяся в виде осветительной нагрузки) характеризуется непостоянством в течение суток и может быть представлена в следующем виде: с утра до вечера умеренная, с вечера до ночи достигает своего максимума, с ночи до утра снижается до минимума, утром вновь наблюдается рост. При этом электрическая нагрузка промышленных потребителей отличается равномерностью в течение суток и зависит от таких характеристик, как вид производства, режим рабочего дня и число смен.

Субъектами управления ТС ОБЭР являются:

- Региональный штаб по обеспечению безопасности электроснабжения;
- САЦ Минэнерго России;
- Электросетевая организация.

К недостаткам существующей структуры ТС ОБЭР (Рисунок 2), согласно ежегодным относится недостаточный отчетам Минэнерго России, уровень межведомственного взаимодействия и, как следствие, низкий уровень организации аварийно-восстановительных работ в сетевых компаниях. Данная проблема обусловлена тем, что отсутствует системная интеграция процессов обеспечения безопасности электроснабжения региона, существует их разобщенность. Таким образом, наблюдается несоответствие результатов деятельности ожиданиям лица, принимающего решение (ЛПР). Между процессами, представленными на рисунке 2, отсутствует связь, что не позволяет в полной мере гарантировать достижение цели. Условие, которое необходимо соблюдать при выполнении всех действий субъектам оперативнодиспетчерского управления, это формирование решения, направленного на безопасное функционирование объектов электроэнергетической инфраструктуры [42].

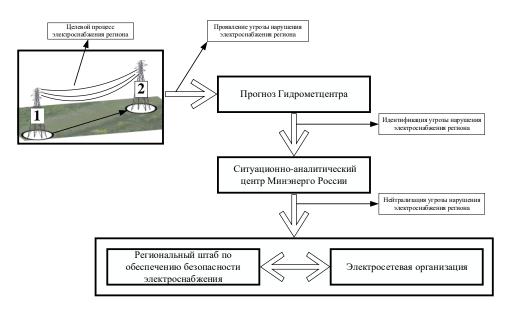


Рисунок 2 – Существующая структурная схема ТС ОБЭР

Таким образом, в диссертационном исследовании ставится задача осуществить системную интеграцию процессов геоинформационной поддержки обеспечения безопасности электроснабжения региона в виде методики ГИПУ ТС ОБЭР.

#### 1.2. Анализ угроз нарушения электроснабжения региона

Аспектом, ограничивающим развитие электроэнергетической отрасли, является неблагоприятная природно-климатическая обстановка, которая для обширной части территории РФ считается как рискоформирующая [43]. Поэтому необходимо проводить тщательные и подробные исследования тех климатических опасностей и факторов риска, которые способны вызвать негативные последствия и значительный ущерб при осуществлении снабжения и распределения электрической энергии как на уровне всего государства, так и в отдельных районах.

В данном исследовании большая часть внимания уделяется вопросу обеспечения электроснабжения безопасности региона В условиях деструктивного воздействия гидрометеорологических факторов. Интенсивность И продолжительность гидрометеорологических факторов может привести к появлению опасного природного явления (ОЯ) или комплекса неблагоприятных явлений (КНЯ) [44 – 46]. Статистические данные по аварийности ЭС представлены в Приложении Б.

Опасные природные явления (ОЯ) – это гидрометеорологические или гелиогеофизические процессы и явления, которые по своей интенсивности развития, масштабу распространения, времени возникновения и продолжительности могут представлять угрозу жизни или здоровью граждан, сельскохозяйственных животных, оказывать деструктивное воздействие на растения и объекты техносферы [47].

Комплекс неблагоприятных явлений (КНЯ) – совокупность нескольких воздействующих одновременно на объект гидрометеорологических явлений, по своей интенсивности не достигающих критериев ОЯ, но находящихся выше безопасных значений и наносящих определенный ущерб объекту.

В общем случае могут быть выделены следующие типы гидрометеорологических явлений, оказывающих значительное деструктивное воздействие на исследуемый геообъект (ВЛЭП):

- сильный ветер;
- ГИО;
- грозовые явления;
- выпадение града;
- выпадение осадков (дождь, снег, смешанные осадки);
- температурные воздействия (жара, морозы);
- солнечная радиация;

- гидрологические явления (затор, паводок, половодье);
- комплексы неблагоприятных явлений (КНЯ):
  - сочетание сильного ветра и ГИО;
  - сочетание сильного ветра, града и выпадения дождя;
  - сочетание града и выпадения дождя;
  - сочетание сильного ветра и выпадения дождя;
  - сочетание сильного ветра и выпадения снега (метель).

Распределение атмосферных явлений по всей земной поверхности и на всём протяжении ВЛЭП неравномерно. Применение ГИС-технологий позволяет определить, какое атмосферное явление будет наблюдаться на рассматриваемом участке ВЛЭП. Пример применения ГИС с целью определения атмосферного явления представлен на Рисунке 3.

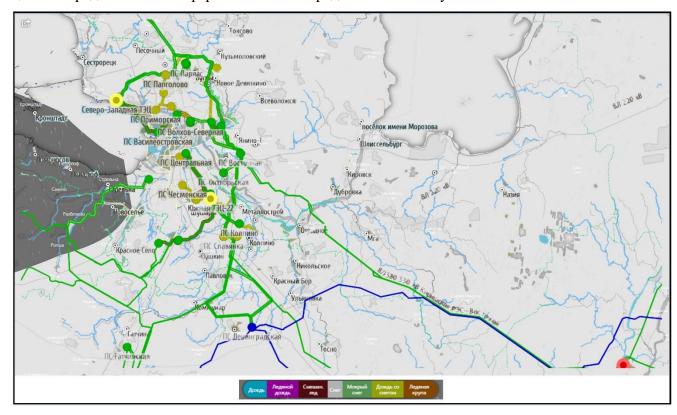


Рисунок 3 – Распределение атмосферных явлений вдоль ВЛЭП

В целях районирования территории страны по показателям гидрометеорологических факторов для каждого отдельного района определяется наивысшая и наименьшая температура окружающей среды (воздуха), температура при максимальной скорости ветра, температура при интенсивном гололёдообразовании, температура при грозе, фиксируется среднегодовая температура [48].

Очевидно, что при проектировании ВЛЭП должны учитываться гидрометеорологические факторы на территории предполагаемого строительства. В процессе проектирования

закладываются основы обеспечения безопасности объекта. В случае с ВЛЭП данный подход реализуется в виде расчета проводов и тросов на механическую прочность. При этом расчет опор и прочих составляющих ВЛЭП (изоляторов, линейной арматуры) не производится, так как данные элементы выбираются по справочным данным согласно гидрометеорологическим факторам района сооружения ВЛЭП.

Расчет проводов (тросов) ВЛЭП на механическую прочность заключается в определении механического напряжения в проводах (тросах) при различных сочетаниях гидрометеорологических факторов и сравнении полученных механических напряжений с допустимыми значениями [48].

К основным гидрометеорологическим факторам, оказывающим влияние на механическое напряжение в проводе, относятся [48]:

- температура окружающей среды (влияет на внутреннее механическое напряжение в проводе за счет изменения длины провода в пролете);
- гололёдные нагрузки (влияют на механическое напряжение в проводе за счет внешнего механического воздействия);
- ветровые нагрузки (влияют на механическое напряжение в проводе за счет внешнего механического воздействия).

Большая часть аварийных отключений ЛЭП связана с воздействием таких гидрометеорологических явлений, как грозовые явления, ветровая нагрузка, ГИО, затопление и т.п. [49 – 52]. При этом наиболее значительный вред составляющим объекта (провода, опоры) наносится при совместном действии гололёдной и ветровой нагрузок.

В большей степени воздействие OT гололёдной нагрузки оказывается на функционирование воздушных линий связи (ЛС) и электропередачи (ВЛЭП) [53, 54]. Такая нагрузка порождает добавочную весовую нагрузку на участок линии и опоры. В случае обледенения линии существенно увеличивается нагрузка от действия ветра, при этом не исключено скручивание провода, что приводит к появлению их вибрации («пляска проводов»). В дополнение, ГИО, кроме нагрузочного эффекта, также порождают помехи в процессе передачи сигналов. Аварийные ситуации на ЛС и ВЛЭП, причиной которых является гололёдная нагрузка, производят значительный ущерб не только энергетической отрасли, но и всему народному хозяйству государства. Без всякого сомнения, правильная и своевременная оценка возможных нагрузок от ГИО на этапах проектирования и эксплуатации участков ЛС и ВЛЭП и их опор имеет большую роль. Мало того, при ГИО обычно возникает также ветровая нагрузка, следовательно, необходимо комплексно учитывать гололёдно-ветровые нагрузки. Умышленное превышение проектных (заложенных нормативами) нагрузок позволяет гарантировать устойчивость сооружения, но при этом приводит к увеличению его стоимости. И, наоборот, умышленное занижение заложенных проектом гололёдно-ветровых нагрузок влечет за собой появление аварии, например, происходит обрыв провода, поломка опор и т.д. [55 - 57].

В условиях рыночной экономики проблемы обслуживания и эксплуатации изношенного электрооборудования являются, несомненно, актуальными. ВЛЭП характеризуются большой протяженностью и представляют собой те элементы энергетической системы, которые в наименьшей степени надёжны. Суммарное за год количество отключений на ВЛЭП, относящейся к средней энергосистеме, достигает значения до сотни, на сетях, питающихся от нее, исчисляется тысячами. Большая доля повреждений ВЛЭП заключается в обрывах проводов и в коротких замыканиях. Повреждения вызываются как естественными, так и искусственными причинами. К ним можно отнести климатические условия, земные катаклизмы и деятельность людей. Нахождение поврежденных участков линии и ремонтно-восстановительные работы считаются действительно сложными технологическим операциями с высокими затратами временных ресурсов. ГИО, покрывающие поверхность провода, дополнительно оказывают механическую нагрузку на конструкции ВЛЭП (опоры и провода) [58], что является причиной разрушения участка линии и появления опасности для человека. В связи с этим, при проектировании сетей электроэнергетической отрасли в обязательном порядке следует принимать во внимание влияние ГИО на прочностные свойства элементов, составляющих часть ЭС. Аварии, вызванные ГИО, рассматриваются как одни из самых трудно-устранимых по причине зимнего бездорожья, мерзлого грунта, а также рассредоточенности поврежденных участков линии на большой территории. Данный вид аварии занимает 25% от всех видов повреждений на ВЛЭП с продолжительностью приблизительно 40% от суммарного числа аварийных отключений [59].

Проблема учета ГИО при эксплуатации объекта частично решается на этапе проектирования ВЛЭП, стоимость строительства и эксплуатации которых во многом зависит от возможной толщины стенки гололёда на рассматриваемой территории, так как ГИО являются одной из наиболее значительных внешних механических нагрузок на провода ВЛЭП, что сказывается на технико-экономических показателях объекта [60 – 62]. В случае умышленно неверного или ошибочного расчета возможной гололёдной нагрузки возрастает вероятность обрыва провода в процессе эксплуатации ВЛЭП, что несомненного приведет к перебоям в процессе электроснабжения (и, вероятней всего, на относительно длительный промежуток времени) с последующими затратами на ремонтно-восстановительные работы.

Температура окружающей среды оказывает влияние на формирование определенного вида обледенения и также играет значительную роль в продолжительности процесса гололёдообразования. Уменьшение температуры наружного воздуха при наличии ГИО способствует продолжительному сохранению льда на поверхности провода, и в случае

воздействия ветра возможно возникновение вибрации и пляски проводов, что в конечном итоге может привести к их обрыву. От температуры также зависит плотность ГИО. Продолжительность замерзания различного размера переохлажденных капель воды, являющихся причиной образования ГИО на поверхности объекта, зависит от температуры поверхности и воздуха, размера капель. Перечисленные факторы оказывают влияние как на структуру самого ГИО, так и на его плотность. Максимальная скорость ветра при начале обледенения проводов может достигать 15 м/с [63]. Ветер также участвует в процессе формирования структуры и размеров ГИО в зависимости от расположения линии электропередачи по отношению к гололёдонесущему потоку (Рисунок 4). В определенных обстоятельствах под действием ветра происходит слияние мелких капель воды в крупные, что приводит к растеканию капель по поверхности объекта. Но может протекать и другой процесс: разделение крупных капель на более мелкие.

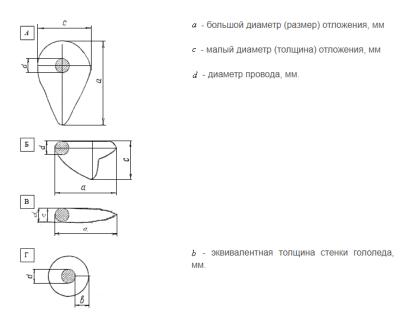


Рисунок 4 – Возможные формы ГИО (A, Б, В) и эквивалентная им цилиндрическая форма гололёда (Г) [64]

Факторы, влияющие на возникновение гололёдных образований на линиях электропередачи [65]:

- температура воздуха образование того или иного вида обледенения (плотность отложений), продолжительность процесса гололёдообразования, длительность сохранения льда на проводах;
- ветер формирование структуры отложений (кристаллическая изморозь, зернистая изморозь, гололёд, смешанные отложения);
- высота подвеса проводов характер и масса гололёдных отложений (увеличение высоты приводит к увеличению массы);

- закручивание проводов образуется устойчивая муфта, которая в течение активной фазы гололёдообразующего процесса постоянно растет;
- диаметр проводов увеличение плотности осадка (чем больше диаметр), масса гололёдных отложений сначала увеличивается (до d<sub>пр.</sub> = 3-8 см), далее уменьшается;
- действие электрического тока притяжение к заряженной поверхности и осаждение на ней дождевых капель с наведенным зарядом;
- протекание нагрузочного тока выделение тепла пропорционально активному сопротивлению и квадрату тока (чем меньше теплоотвод от провода в зависимости от условий окружающей среды, тем температура провода выше, при температуре провода выше +1°C гололёд не образуется).

Образование льда в виде сосулек на проводах происходит в результате осаждения капель дождя с их последующим охлаждением. Тяжесть массы образовавшихся ГИО может превышать допустимую проектную нагрузку, поэтому опоры ВЛЭП деформируются и разрушаются.

Образование ГИО начинается с наветренной стороны [66]. Если увеличить жесткость провода, например, используя специальные компенсаторы, то ГИО обретают более вытянутую форму со стороны действия ветровой нагрузки, что приводит к двум последствиям такого гололёдообразования: 1) при положительной температуре ГИО такой формы отваливаются по причине увеличения массы в результате постепенного нарастания; 2) процесс нарастания останавливается по причине хорошей обтекаемости. Если жесткость провода недостаточная, то провод постепенно начинается закручиваться вследствие воздействия ветра и веса ГИО, что приводит к нарастанию ГИО со всех сторон провода [67]. В результате такого процесса на проводе образуется гололёдная муфта — имеющее цилиндрическую форму ГИО, превосходящее по массе обледенение, расположенное на одной стороне провода, в 1,5-2 раза [68]. Толщина цилиндрических ГИО достигает нескольких десятков сантиметров. При отсутствии ветра ВЛЭП покрываются равномерно распределенным по всей длине линии прозрачным льдом. В случае ветреной погоды поверхность ГИО принимает бугристую форму.

Устойчивость ВЛЭП к воздействию факторов окружающей среды в том числе зависит и от возможности образования ГИО допустимой толщины на проводе, которая задается в зависимости от географического расположения участка линии. Интенсивность образования ГИО зависит от нескольких факторов, например, высота местности над уровнем моря. Территория нашей страны поделена на пять гололёдных районов. Некоторые области характеризуются особыми микроклиматическими условиями, поэтому в том числе рассматривают особые гололёдные районы. При проектировании и строительстве ВЛЭП проводится анализ территории, предполагаемой к использованию, на соотнесение ее к определенным районам по гололёдным и ветровым нагрузкам на базе климатического районирования территории России.

В настоящее время виды обледенения проводов по происхождению можно разделить на четыре группы [69-71]:

- 1 группа обледенения, возникающие в результате сублимации водяного пара. К ним относятся иней и кристаллическая изморозь. Кристаллическая изморозь образуется в туманную погоду при затишье или слабом ветре путем непосредственного перехода в твердую фазу паров воды, возникающих при испарении капель тумана, в отсутствие тумана за счет паров воды, содержащихся в воздухе;
- − 2 группа обледенения, возникающие в результате осаждения и замерзания переохлажденной воды. К ним относятся зернистая изморозь и гололёд. Вид отложения в большей степени определяется размерами самих капель и скоростью их замерзания. Если температура окружающего воздуха примерна равна 0 °C, то крупные капли после растекания формируют пленку воды, пленка медленно замерзает, в результате чего образуется гололёд. Если по поверхности провода растекание мелких капель воды не происходит, и температура окружающего воздуха находится в диапазоне от минус 8 до минус 3 °C, то в таком случае между льдинками остаются пузырьки воздуха, то есть образуется зернистая изморозь. Главным отличием данного вида ГИО является то, что в данном случае поверхность отложения имеет бугристый вид с отдельными выступами, в отличие от гололёда, у которого поверхность отложения гладкая;
- 3 группа обледенения, возникающие в результате отложения и замерзания мокрого снега. Мокрый снег по своему виду не отличается от обычного, но обладает большой липкостью, образуется при затишье;
- 4 группа сложное отложение гололёда: несколько слоев изморози и гололёда.

В соответствии с принятой в стране классификацией отложения на проводах ВЛЭП делятся на следующие пять основных групп (Таблица 1) [63, 70].

Таблица 1 – Классификация отложений на ВЛЭП

Dwy		Плотность, г/см <sup>3</sup>	Условия образования		
Вид обледенения	Характеристика		температура воздуха, °С	скорость ветра, м/с	атмосферное явление
Гололёд	прозрачный или полупрозрачный лёд	0,9	от минус 5 до 0	ус 5 до ) от 2 до 4 (в 30% случаях), до 15; 40 (макс.)	морось, дождь, туман
	непрозрачный лёд (содержит воздушные включения)	0,6-0,8			
Зернистая (плотная) изморозь	снеговидный рыхлый лед, образовавшийся из капель переохлажденного тумана вследствие намерзания их на проводах	0,1-0,6	от минус 20 до минус 3	от 1 до 15; 40 (макс.)	туман, морось

Вид обледенения	Характеристика	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Условия образования		
			температура воздуха, °С	скорость ветра, м/с	атмосферное явление
Кристаллическая изморозь	слой кристаллического льда белого цвета, ажурного строения, по своему внешнему виду не отличающаяся от инея, длина кристаллов в среднем не превышает 1 см, появляется в результате сублимации водяного пара или замерзания очень мелких капель воды	0,01-0,09	от минус 30 до минус 5	затишье (40-50% случаев), от 0 до 3; 5-7 (макс.)	дымка, туман
Смешанное отложение	последовательное наслоение гололёдных и изморозевых образований	0,15-0,6	от минус 20 до 0	от 2 до 4 (34 % случаев), до 15; 30- 40 (макс.)	морось, дождь, крупа, мокрый снег, туман
Мокрый снег	не отличается от обычного, но обладает большой липкостью	0,2-0,6	от минус 2 до 1	затишье (40-50% случаев), от 0 до 10; 20-30 (макс.)	налипающий мокрый снег

Учитывая тот факт, что ГИО образуется при определенных условиях, имеется возможность на базе применения ГИС сформировать карту с нанесением на слой с метеорологическими показателями слоя с ВЛЭП, что позволит определить районы, для которых высока вероятность проявления угрозы нарушения электроснабжения региона. Пример подобной интеграции представлена на Рисунке 5.

Получить зависимость объёмного веса ГИО от скорости ветра довольно затруднительно. Напротив, анализируя сводные характеристики метеорологических условий образования ГИО, можно выяснить, что диапазон температуры невелик. Но при этом образовавшиеся ГИО могут существовать продолжительное время из-за отрицательной температуры.

При воздействии нагрузки ВЛЭП начинают нагреваться [72]. Если температура провода превышает температуру наружной среды на 1-2 °C, то в данном случае ГИО не появляются. Соответственно, наиболее нагруженные ВЛЭП менее подвержены нарастанию ГИО, чем мало нагруженные или вообще выключенные [73].

Если гололёдные нагрузки не превышают норму, то в результате аэродинамического действия появляются колебания (так называемая «пляска проводов») в случае одностороннего образования ГИО либо вибрация в случае цилиндрического образования ГИО [74, 75].

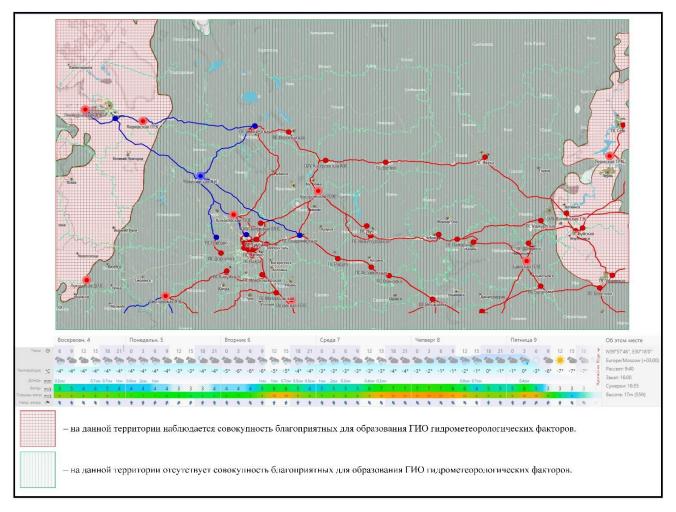


Рисунок 5 – Карта с нанесением зон по условиям образования ГИО

Пляска проводов – устойчивые низкочастотные колебания линии электропередачи (а именно натянутого в пролете ВЛЭП провода) с односторонними либо с асимметричными ГИО различной плотности (гололёд, мокрый снег, смесь, изморозь), возникающие в результате воздействия ветра и образующие стоячие волны с числом полуволн от одной до двадцати [70].

Частота колебания проводов при воздействии ветровой нагрузки (пляске) варьируется в диапазоне от 0,2 до 1 Гц [70] и обусловлена тяжением, направленным вдоль оси электрического провода, массой погонного метра электрического провода с гребешком осадка, величиной расстояния между соседними опорами воздушных линий электропередачи (длиной пролета), видом опорной конструкции пролета (анкерная, промежуточная и т.д.) и собственно скоростью ветрового потока.

Пляска появляется в случае воздействия на электрический провод с ГИО на его поверхности периодически изменяющейся подъемной силы, вызванной равномерным и поперечно направленным ветром со скоростью от 6 до 25 м/с [66, 70]. Одним из важнейших показателей, оказывающим влияние на значение и направление подъемной силы и аэродинамического крутящего момента, является угол атаки воздушного потока по отношению

к профилю гололёда [76]. Причина развития пляски заключается в синхронизации изменения угла атаки с одной из низших собственных частот провода в пролете (Рисунки 6, 7). В свою очередь, изменение угла атаки обусловлено вертикальными и крутильными колыханиями (колебаниями) электрического провода в результате воздействия воздушного потока.

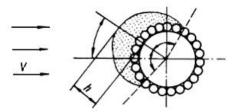


Рисунок 6 – Угол атаки неподвижно закрепленного провода с гололёдом, имеющим толщину стенки h [76]

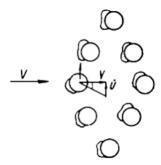


Рисунок 7 – Изменение углов атаки провода с гололёдом, движущегося со скоростью V в поперечном воздушном потоке [76]

Возникновение пляски может быть вызвано и незначительной толщиной гололёда на проводе, которого с земли можно даже не обнаружить. Диапазон толщины гололёда, при которой в большинстве случаев возникает пляска проводов в отечественных электроэнергетических системах, составляет от 3 до 20 мм. Действие ветра играет существенную роль в процессе образования и формирования ГИО на электрических проводах. Кроме того, характеристики условий гололёдообразования могут изменяться в течение всего процесса, например, направление и скорость ветра, что напрямую оказывает влияние на пляску проводов: происходит либо усиление, либо ослабление, либо вообще прекращение.

Инженерно-геологические условия, характеризующие территорию, на которой проектируется и эксплуатируется участок ЛЭП, вносят существенный вклад в развитие пляски проводов, интенсивность которой напрямую связана с формой рельефа. При расположении ВЛЭП на ровной и открытой местности либо на вершинах холмов происходит усиление пляски проводов по очевидным причинам. Участки линий, расположенные на гребнях невысоких горных хребтов и проложенные по горной долине, также подвержены интенсивным колебаниям

[70]. И наоборот, при наличии естественных (лес, сильно изрезанный рельеф) или искусственных (высокая застройка) преград, выполняющими ветрозащитную функцию, участки ВЛЭП практически не подвержены пляске.

Пляска может возникать фактически на всех проводах вне зависимости от их конструкции и диаметра. Существует ряд условий, который влияет на вероятность появления пляски. Например, одиночные провода меньше подвержены пляске, чем провода расщепленных фаз, что обусловлено наличием в последних внутрифазовых дистанционных распорок, от которых зависит форма гололёдного отложения [77, 78]. Еще одним из условий, увеличивающим вероятность интенсивной пляски, является расщепление проводов на более трех составляющих, что приводит к практически одинаковым значениям частот подобных друг другу форм вертикальных и крутильных колебаний [70].

Согласно статистическим данным [79] примерно до 90% случаев пляски проводов являются причиной нарушения процесса передачи электроэнергии или приводят к повреждению элементов ВЛЭП. При этом 70% происшествий вызывают продолжительные отключения и перебои в работе ВЛЭП, а в некоторых эпизодах работы по ремонту и восстановлению могут длиться до нескольких суток.

При конструктивном исполнении ВЛЭП в виде вертикального или треугольного положения электрических проводов имеет место быть междуфазное замыкание при интенсивной пляске. С меньшей долей вероятности могут возникнуть замыкания на землю по причине нарушения изолирующего воздушного промежутка между проводом и грозозащитным тросом, либо между проводом и заземленными конструкциями опор, перекрытия на близко растущие деревья. Большой ток короткого замыкания является причиной появления ожогов на проводах и грозозащитных тросах, повреждения коммутационной аппаратуры и силового электрооборудования.

Интенсивные колебания (пляска провода) приводят к тому, что составляющие ВЛЭП элементы, такие как линейная арматура, изолирующая подвеска и элементы опор, подвергаются действию серьезных циклических нагрузок. При этом амплитудные величины переменной составляющей тяжения одиночного электрического провода либо каждого из проводов расщепленной фазы могут приближаться к значениям от 1 до 4 т [70]. Динамические нагрузки, передающиеся на изолирующую подвеску и траверсы опор ВЛЭП с расщеплением фаз на N составляющих, могут достигать в таком случае (1÷4)N тонн. В конечном счете длительное действие подобных нагрузок может привести к разрушению элементов ВЛЭП. Наиболее существенными аварийными случаями являются обрыв проводов, разрушение подвесной и сцепной арматуры, повреждение элементов опор, падение опор и т.д.

Собственные характеристики ВЛЭП также оказывает влияние на характер и массу ГИО. Опытные данные, приведенные в [65, 74], демонстрируют зависимость массы ГИО от высоты подвеса ВЛЭП: при изменении расстояния от земли с 2 до 20 метров масса возрастает в три раза. Закручивание электрических проводов, обусловленное собственной «жесткостью» — есть следующая причина, влияющая на характер ГИО. В период интенсивных гололёдных образований при формировании отложения на одной стороне жесткого стержня происходит его попеременное разрушение из-за собственной массы и ветра. Напротив, на одиночном проводе или тросе по причине его закручивания появляется прочная гололёдная муфта, которая в сезон активного гололёдообразования непрерывно увеличивается. Эксплуатация закручивающихся проводов может привести к тому, что ГИО приобретает цилиндрическую форму, нарастает продолжительное время (до нескольких недель) и достигает крупных размеров (10-20 кг/м и более) [65]. В то же время на жестких проводах образуется несколько ГИО с не превышающей 0,5 кг/м массой отложения. Очевидно, что закручивание электрических проводов заметно оказывает влияние на характер и массу ГИО, при этом возрастает время сохранения гололёдной муфты на участке линии.

Диаметр электрических проводов тоже имеет значение при гололёдообразовании. Увеличение диаметра провода с учетом скорости ветра приводит к увеличению массы ГИО, причем максимум достигается при  $d_{np}=3-8$  см, а затем происходит постепенное её уменьшение. Нарастание напрямую зависит от скорости ветра. По проведенным наблюдениям [80], увеличение диаметра электрического провода влияет к тому же и на плотность осадка — примерно на 60% плотность увеличивается при замене провода диаметром 0,5 см на провод диаметром 4,0 см.

Немалое влияние на процесс гололёдообразования на ВЛЭП оказывает режим эксплуатации энергосистемы. Действие электрического поля, образующегося вокруг участка ВЛЭП высокого напряжения, приводит главным образом к тому, что капли дождя, находясь в зоне его влияния, приобретают наведенный заряд, и в результате они оседают на заряженной поверхности при притягивании к ней.

Прохождение нагрузочного тока по ВЛЭП порождает выделение тепловой энергии прямо пропорционально активному сопротивлению и квадрату тока. Вместе с тем, увеличение температуры электрического провода напрямую зависит от фактического теплоотвода от провода с учетом текущих условий метеорологической обстановки. Отмечено, что при собственной температуре электрического провода выше плюс 1 °С ГИО на поверхности провода не образуются [63]. В ситуации, когда гололёдная муфта уже имеется, то для очищения от нее проводов применяют нагрев токами повышенного значения.

ГИО на ВЛЭП, включая сверхнормативные, чаще всего одновременно возникают на различных участках ряда энергосистем. Вызванные образованием на поверхности провода гололёдных отложений аварии (массовые обрывы проводов, разрушения арматуры и изоляции, поломки опор ВЛЭП) приостанавливают процесс электроснабжения потребителей, расположенных в различных административных районах. Массовость таких аварий демонстрирует, что просто спроектировать ВЛЭП (провести расчет и установить геометрические характеристики линии) без применения доступных на сегодняшний день подходов и технических устройств, которые позволяют ограничить воздействие гидрометеорологических факторов, не выйдет [81].

Суммарная нагрузка на провода ВЛЭП складывается из следующих составляющих [74, 80, 81]:

– нагрузка от собственного веса провода:

$$Y_1 = \frac{G_0 g}{F} \,, \tag{1}$$

- нагрузка от веса гололёда определяется из условий, что отложения гололёда на проводах имеют цилиндрическую форму и плотность  $\rho$ =900 кг/м<sup>3</sup>:

$$Y_2 = \frac{\pi b(d+b)\rho g}{F},\tag{2}$$

- нагрузка от собственного веса гололёда и провода:

$$Y_3 = Y_1 + Y_2, (3)$$

– ветровая нагрузка без гололёда:

$$Y_4 = \frac{\alpha C_x dq \sin \varphi}{F},\tag{4}$$

 ветровая нагрузка при наличии гололёда рассчитывается с учетом увеличения площади поверхности провода из-за гололёда:

$$Y_5 = \frac{\alpha C_x (d+2b)q \sin \varphi}{F},\tag{5}$$

– нагрузка от веса провода и давления ветра без гололёда:

$$Y_6 = \sqrt{Y_1^2 + Y_4^2} , (6)$$

- суммарная нагрузка от веса провода, гололёда и давления ветра:

$$Y_7 = \sqrt{Y_3^2 + Y_5^2} \,\,\,(7)$$

где  $G_0$  — масса провода, кг; F — площадь поперечного сечения, мм²; d — диаметр провода, мм; b — толщина стенки гололёда, мм;  $\phi$  — угол между направлением ветра и проводами (90°); q — скоростной напор ветра (Па);  $C_x$  — аэродинамический коэффициент, который принимают в

зависимости от диаметра проводов;  $\alpha$  – коэффициент неравномерности ветра по длине пролета, находится в пределах 1,0-0,7. Нагрузка дается в  $\Pi$ а.

Предотвратить нарастание слоя ГИО можно следующими путями:

- применением комплексного оборудования, снижающего скорость образования гололёда [82, 83];
- организацией плавки гололёда [84, 85].

Среди подходов по борьбе с образованием на ВЛЭП ГИО четко выделяются два основных направления. Первое рассматривает возможность повышения механической прочности ВЛЭП. Но так как значительные гололёдные нагрузки существуют только небольшой период времени по сравнению с общим сроком эксплуатации ВЛЭП (0,03-0,5% от полного срока) [71, 86], наиболее экономически предпочтительным является второе направление, заключающееся в активном подходе к устранению ГИО с поверхности провода при помощи плавки током повышенного значения. Но эффективность плавки по большей части зависит от времени её начала (своевременности). Отличительно, что плавка ГИО, запущенная с опозданием, не гарантирует ожидаемых результатов и, более того, может способствовать текущему развитию аварийной ситуации.

Кроме того, ГИО приводят к увеличению затухания высокочастотных (ВЧ) сигналов, передающихся посредством ВЛЭП. Это вызвано диэлектрическими потерями в среде ГИО, что в свою очередь обусловлено прохождением электромагнитной волны в несовершенном диэлектрике с частичной затратой её энергии для нагрева ГИО [63]. В тоже время ГИО способствуют снижению скорости распространения ВЧ сигналов по причине перемены диэлектрических свойств окружающей провод среды. Возникает задержка импульсных сигналов, передающихся при помощи электрических проводов. При этом величина задержки напрямую зависит от массы ГИО на проводе [54]. Применение линий электропередачи как средство осуществления ВЧ связи обусловлено их направлением, которое практически аналогично необходимому направлению каналов связи, а, следовательно, нет необходимости в проектировании, строительстве и эксплуатации специальных линий для проводной связи. Ко всему прочему, надёжность ВЛЭП выше, чем у тех же ЛС. Это объясняется тем, что на ВЛЭП используются более толстые провода, которые, к тому же, подвержены нагреву из-за тока промышленной частоты, что в свою очередь означает, что каналы ВЧ связи в меньшей степени зависимы от воздействия гололёда.

### 1.3. Анализ возможностей подходов для обеспечения безопасности электроснабжения региона на базе применения ГИС

Очевидно, что с целью обеспечения безопасности ВЛЭП от деструктивного воздействия гидрометеорологических факторов необходимо получать своевременные и полные данные об их показателях. С этой целью целесообразно разрабатывать и внедрять информационные технологии определенного назначения. Наиболее активно совершенствующимися и развивающимися в сфере информационных технологий за несколько последних десятилетий являются ГИС, под которыми понимается система сбора, хранения, анализа и графической визуализации пространственных географических данных и связанной с ними информацией о рассматриваемых объектах [87].

Так как распределение деструктивных гидрометеорологических явлений по земной поверхности имеет неоднородный и комплексный характер, то полноценный и качественный пространственный анализ, по всей видимости, может быть эффективно реализован только при помощи современных географических методов, например, технологий ГИС [43].

Сфера использования ГИС раздвинулась от классических топографических съемок до получения данных о состоянии окружающей природной среды, которые непрерывно изменяются в пространстве и во времени. ГИС связывает традиционные процессы получения и обработки информации с базами данных (БД) — запрос и анализ — с возможностью визуализации и географического анализа, которыми располагает карта. Это объясняет уникальные и неограниченные преимущества использования ГИС для решения колоссального ассортимента задач, относящихся к изучению явлений и событий, обзору и прогнозированию их наиболее вероятных последствий, разработке и планированию стратегических решений по управлению процессами, в том числе обеспечения безопасности объектов. ПГД в ГИС содержатся в формате комплекта слоев, которые сгруппированы по принципу их географического положения. Такой интегральный подход дает преимущество ГИС использовать как векторные, так и растровые данные. При этом полученные электронные базы данных характеризуются мобильностью и гибкостью при обработке и анализе приличного объёма непрерывно изменяющейся информации [88]. Вдобавок ГИС непосредственно связаны с различными информационными системами и применяют их данные с целью анализа характеристик разного рода объектов.

К отличительным особенностям ПГД относится их достаточно большой объём, так как они содержат распределение определенных характеристик в пространственных и временных интервалах. Инструменты ГИС реализуют дополнительные функциональные способы картографической визуализации с целью представления динамики течения опасных и

неблагоприятных процессов. Такое представление данных позволяет за относительно короткое время проанализировать и отобразить на карте полученную информацию, демонстрирует наглядную визуализацию направленности определенных гидрометеорологических факторов (например, ветра) и способствует комплексному анализу информации о характеристиках протекания и проявления опасностей разнообразного и разнородного происхождения. Исключительной ценностью ГИС считается то, что создание карты не является конечным результатом, фактически продолжается содержательное дополнение все новыми и новыми данными [89].

Основополагающая концепция функционирования ГИС состоит в том, что применяются следующие принципы [43, 90]:

- принцип комплексного системного подхода для разработки картографических моделей;
- принцип математико-картографического моделирования в качестве способа представления моделей объектов окружающего мира;
- принцип растрового ввода-вывода графической, табличной, картографической информации, а также её обработки и хранения в векторной форме;
- принцип обеспечения многократного и многоцелевого доступа к цифровой графической, табличной и картографической информации.

Поддержка ГИС реализуется следующим обеспечением:

- программным;
- аппаратным;
- информационным;
- нормативно-правовым;
- кадровым;
- организационным.

На Рисунке 8 представлена типовая структурная схема ГИС, используемой для оценки негативных природно-климатических факторов, лимитирующих развитие аграрного природопользования.

В данном исследовании наибольший интерес представляет информационное обеспечение ГИС. Программный комплекс ГИС, предназначенный для получения информации о гидрометеорологических факторах, кроме, непосредственно самой ГИС и её составляющих, также состоит из метеорологической базы данных, специальных приложений и разнообразных технологических возможностей получения, сбора, распространения ПГД. Программный комплекс позволяет автоматически (по предварительно разработанному сценарию) либо в интерактивном режиме создавать несколько производных слоев с информационной

составляющей на главном слое с географической картой, что позволяет прогнозировать погодные условия, в том числе гидрометеорологические факторы.

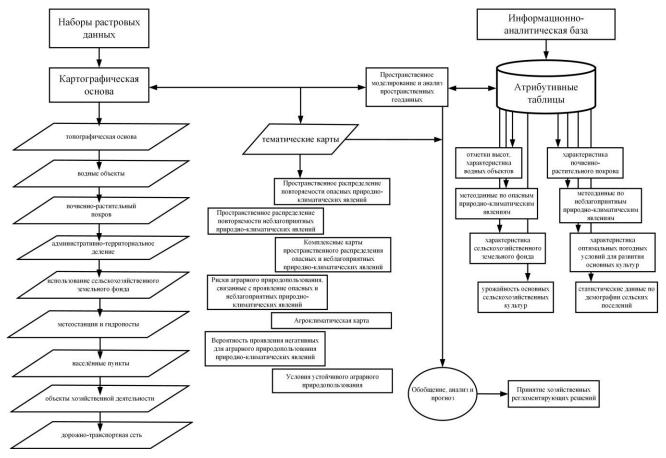


Рисунок 8 – Типовая структурная схема ГИС (на примере аграрного природопользования) [43]

Например, ПК ГИС Метео предоставляет оператору следующие функции [91, 92]:

- 1) создание географической опорной части для карты совершенно различных территорий;
- 2) выборка параметров гидрометеорологических факторов из метеорологической базы данных и их нанесение на основной слой в виде разнообразных данных (значения, изолинии и т.д.);
  - 3) нанесение на слой линий различного типа;
  - 4) составление описательного информационного текста к объектам на слое;
  - 5) совмещение на основном слое всех доступных и полученных данных;
  - 6) просмотр существующих метеорологических слоев;
  - 7) выделение интересующих участков слоя для их подробного представления; и многие другие.

ПК ГИС Метео создает картографические слои с оперативной информацией наземных гидрометеостанций и постов, морских и океанических станций, средств дистанционного зондирования атмосферы, поступающей со всего земного шара [93].

Если рассматривать вопросы, представляющие наибольшую ценность для данного

исследования, то они также решаются при помощи ПК ГИС Метео путем создания следующих метеорологических материалов [93]:

- прогностических карт давления, геопотенциала, температуры, влажности, ветра;
- карт прогнозов осадков с определением их фазового состояния, прогнозов облачности и фронтальных зон;
- карт прогнозов вертикальных скоростей ветра и турбулентности по модели пограничного слоя;

и многих других, также имеющих важное значение при определении параметров гидрометеорологических факторов в режиме реального времени.

В настоящее время ПАО «Россети» уже реализует применение ГИС как средство получения информации об объектах электроэнергетического комплекса. Основная задача ГИС «Россети» – обеспечивать информационную поддержку при выполнении работ по снижению вероятности возникновения аварий, технологических нарушений и иных нештатных ситуаций, а также по смягчению их негативных последствий.

Для оперативного реагирования штабов электросетевого комплекса на угрозы и возникновение чрезвычайных ситуаций данная ГИС выполняет сбор, обработку, передачу и хранение оперативной информации о наличии и местах размещения аварийного резерва, мобильных бригад и спецтехники, мобильных модульных подстанций, резервных источников снабжения электроэнергией, комплектных распределительных устройств мобильного исполнения.

Надёжность и устойчивость процесса снабжения потребителей электрической энергией напрямую зависят от организации действий по наблюдению за ВЛЭП в осенне-зимний период с целью предупреждения аварий, связанных с образованием ГИО [94, 95]. Задача состоит в отыскании связей между гидрометеорологическим факторами, воздействующими на систему электроснабжения, и критерием эффективности её функционирования, соблюдение которого гарантирует с определенной вероятностью безопасное электроснабжение региона при любом известном из предыдущего опыта воздействия внешней среды в условиях ГВС.

При этом мониторинг процесса гололёдообразования оперативно-выездной бригадой (ОВБ) прямо на местах расположения участков ВЛЭП характеризуется рядом недостатков [67, 96 – 97]:

- отсутствие своевременного мониторинга текущей ситуации на рассматриваемом объекте;
- невозможность достоверной и правильной оценки свойств ГИО в связи с глазомерным методом определения;
- проблематичность в реализации такого подхода в условиях недостаточной видимости;

- отсутствие в осенне-зимний сезон возможности получения доступа к конкретной части трассы ВЛЭП из-за небольшой продолжительности светового дня и полного бездорожья;
- отсутствие объективной возможности точного прогноза времени начала процесса плавки, и, в свою очередь, времени, необходимого на осуществление организационных мероприятий по отключению участка линии;
- внушительные операционные издержки электросетевой организации.

Автором [71] определено, что в сезон повышенной интенсивности процесса гололёдообразования затраты электросетевой организации приближаются к отметке несколько сотен тысяч рублей, в то время как эксплуатационный персонал, к должностным обязанностям которого относится техническое обслуживание ВЛЭП со специализированной техникой совершенно не занимается текущими плановыми работами в виду необходимости проведения аварийно-восстановительных работ. При таких условиях высока вероятность отсутствия оперативного реагирования на остальные непредвиденные ситуации. Решением подобной проблемы является применение подходов по дистанционному автоматизированному мониторингу состояния ВЛЭП, который может быть реализован на основе применения ГИС.

Для предотвращения угрозы нарушения электроснабжения региона, в первую очередь, необходимо её своевременно распознать. Для этого в настоящее время реализовано несколько подходов.

На сегодняшний день наиболее распространенным подходом к мониторингу процесса гололёдообразования является применение датчиков, устанавливаемых непосредственно на ВЛЭП.

Существует способ установления гололёдных и ветровых нагрузок [71] посредством диагностирования силы натяжения электрического провода участка линии на основе данных магнитоупругих датчиков, расположенных в гирляндах изоляторов. На базе сведений, полученных от датчиков, создается управляющая команда, далее проводится регистрация величины выходного сопротивления передающего устройства использованием преобразователя, в частности, варистора. Определяемое напряжение на таком приборе меняется пропорционально изменению выходного напряжения датчика силы, и, соответственно, пропорционально совокупной нагрузке от гололёдообразования на проводе участка линии. После определенных процедур цифровой сигнал достигает диспетчерского центра с дальнейшим поступлением на автоматизированное рабочее место (АРМ) диспетчера. К главным недостаткам вышеприведенного способа относятся недостаточная степень информативности и низкая скорость канала связи.

Помимо способа, основанного на применении магнитоупругих датчиков, общеизвестно электротехническое устройство телеизмерения нагрузок от ветра и ГИО на электрических проводах ВЛЭП с применением концевых линейных заградителей и систем присоединения. В наиболее опасных с точки зрения гололёдообразования районах размещается датчик, регистрирующий гололёдно-ветровые нагрузки через механическое прикрепление к траверсе опоры ВЛЭП и к проводу линии посредством плунжера — с противоположной стороны. Выходные каналы амплитудных детекторов присоединяются к соответствующим входам оборудования дифференциального сопоставления значений [98]. К недостаткам рассмотренного устройства относятся сложность и массивность конструкционной составляющей, невысокая скорость каналов связи.

В свою очередь, также есть система распространения сигналов по ВЛЭП с целью выявления гололёдных отложений на проводах, состоящая из блока управления обменом данными в виде ВЧ генератора. К задачам такого блока относится выработка сигнала, выражающего интенсивность образования ГИО в виде дискретных ВЧ колебаний на выходе генератора. При этом на входном канале блока управления обменом данными размещен блок прогнозирования. В роли начального сигнала блок прогнозирования оперирует показателями метеорологических датчиков для определения продолжительности ВЧ дискретных сигналов [71]. В результате запущенных в системе операций время начального этапа гололёдообразования и предельная гололёдная нагрузка устанавливаются по временным показателям, которые в дальнейшем могут использоваться для прогнозирования количественных показателей скорости гололёдообразования [98]. К недостаткам вышеописанной системы относятся низкая надёжность и невозможность своевременного контроля гололёдных и ветровых нагрузок на ВЛЭП.

Из-за выявленных недостатков устройств на данный момент электросетевые организации в большей степени используют системы мониторинга, предоставляющие в режиме реального времени информацию, необходимую для контроля процесса образования ГИО. В настоящее время достаточно широкое распространение получили системы мониторинга гололёдообразования на базе применения тензометрических весовых датчиков. Но данные системы также имеют ряд определенных недостатков [99]:

- 1. Так как посты расположены преимущественно точечно в наиболее доступных к воздействию ГИО пролетах, с целью гарантии требуемого уровня наблюдаемости участка линии нужно устанавливать датчики через незначительное расстояние друг от друга.
- 2. Визуализация и анализ получаемой телеметрической информации должна осуществляться на основе специализированного программного обеспечения, для применения которого необходима организация дополнительного рабочего места.
  - 3. Дороговизна оборудования и комплектующих.

После распознания угрозы нарушения электроснабжения региона необходимо данную угрозу нейтрализовать (устранить). К современным методам активной борьбы с обледенением относятся [100-102]:

- механические;
- электротермические;
- физико-химические;
- электромеханические.

Механические методы применяются чаще остальных и основаны на использовании специальных средств, позволяющих сбивать ГИО с участка линии [74, 80]. Наиболее доступный способ механического устранения гололёдообразования — сбивание, осуществляющееся посредством применения длинных шестов (деревянных, бамбуковых, стеклопластиковых либо бакелитовых), имеющих длину в среднем от 5 до 8 м, при этом на участке около 2 метров от верхнего среза шеста находится виток алюминиевой проволоки с сечением 2-3 мм. Обивка осуществляется с поверхности земли или с люльки коленчатого подъемника боковыми ударами, порождающими волнообразное качание линии, вызывающее разрушение ГИО. Но существенный недостаток такого метода — требуется доступ к ВЛЭП, что приводит к временной остановке работы участка линии. Вместе с тем механический метод не предотвращает гололёдообразование, а только устраняет уже существующий слой.

Устранение ГИО с участка линии при помощи шестов фактически невозможно без привлечения нескольких рабочих из общего числа персонала. Данный способ затрачивает большое количество времени и целесообразен к использованию исключительно на коротких промежутках линий [101], в случае, когда плавка гололёда экономически не обоснована либо технически неосуществима.

Также существует способ передвижения по участку линии электропередачи специальных средств для устранения гололёдных образований — роликов-ледорезов, заключающийся в применении трактора со штангой, к которой прикреплены ролики-ледорезы. Такое устройство, попадая на участки линии с ГИО, последовательно приподнимают и перегибают их, при этом нарушая целостность гололёдообразования и, таким образом, очищая поверхность проводов. Применение роликов-ледорезов имеет ряд недостатков: неудовлетворительная производительность, высокая вероятность повреждения и деформирования проводов, что может вызвать обрыв линии либо увеличить изношенность самих проводов. Ко всему прочему, низкая эффективность удаления ГИО может быть обусловлена использованием трактора, особенно в условиях полного бездорожья.

В дополнение к вышеперечисленным способам необходимо отметить, что в настоящее время проводятся испытания нескольких новых изобретений [100, 101]:

- 1. Многозарядное пневматическое устройство (компания «Хайдро-Квебек»). Так как ГИО представляют собой в достаточной степени хрупкое обледенение, то применение ударных воздействий приводит к нарушению целостности образования на ограниченном участке линии.
- 2. Мобильный робот для удаления гололёдных образований с поверхности провода. Такой робот передвигается по функционирующим линиям ЭС и предоставляет сведения о состоянии участков ВЛЭП. Специально обученный сотрудник манипулирует роботом на расстоянии (дистанционно) с земли. К очевидным преимуществам можно отнести следующее: есть возможность обнаружить деформацию проводов, снять гололёдообразование с поверхности линии и даже провести несложный ремонт, для контроля линии нет необходимости её обесточивать, следовательно, такое изобретение позволяет увеличить безаварийность работы и, самое главное, уровень безопасности труда человека. Среди недостатков такого способа, в первую очередь, выделяются значительные финансовые затраты (обучение персонала, закупка дополнительной техники и стоимость самого работа), маловероятность использования в труднодоступных районах, необходимость подготовки для каждого робота отдельного оператора.

Электропередачи электрическим током, создающим условия для предупреждения возможного гололёдообразования или его устранения, и к ним относятся профилактический подогрев и плавка гололёда [82, 103].

В процессе осуществления профилактического подогрева электрических проводов осуществляется повышение токовой нагрузки участка линии до величины, при котором образование ГИО на линии электропередачи невозможно. Собственно говоря, в таком случае температура самого провода при процессе гололёдообразования должна быть выше 0 °С. При значении температуры окружающего воздуха около 0 °С и скорости ветра приблизительно от 1 до 2 м/с, то есть при характерных условиях для большинства случаев формирования обледенения, применение профилактического подогрева приводит к желаемой цели. В случае, если скорость ветра достигает значений более 3-4 м/с, а температура окружающего воздуха при этом ниже минус 5 °С, то для профилактического подогрева необходим ток больших значений. Профилактический подогрев линий электропередачи используется для ситуаций, при которых ГИО покрывают локальный участок линии, на котором можно увеличить ток до необходимого значения. Для профилактического подогрева проводов используются схемы питания, не требующие прекращения процесса электроснабжения.

Для определения целесообразности проведения профилактического подогрева электрических проводов с целью предотвращения образования ГИО необходимо воспользоваться данными ГИС, которая позволяет определить температуру окружающего

воздуха и скорость и направление ветра на рассматриваемой территории с прогнозом на несколько часов. Примеры реализации такого подхода представлены на Рисунках 9-10.

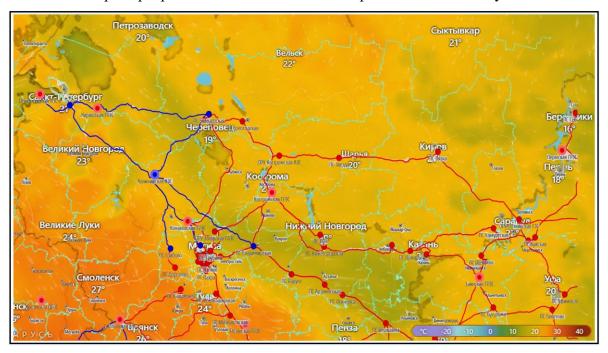


Рисунок 9 — Распределение температуры окружающей среды вдоль трассы ВЛЭП в весеннелетний период

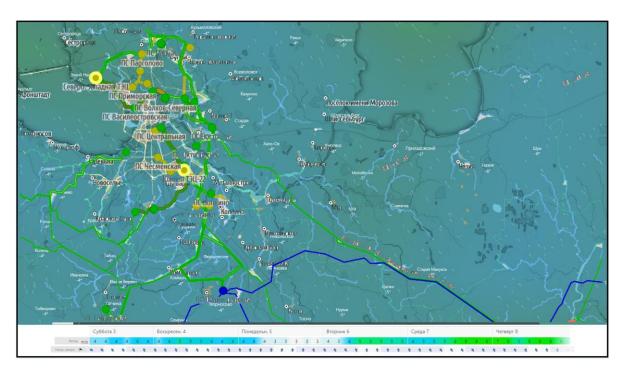


Рисунок 10 — Распределение скорости и направления ветра вдоль трассы ВЛЭП в осеннезимний период

Обледенение на высоковольтных линиях устраняют путем нагревания участка линии электропередачи либо постоянным, либо переменным током частотой 50 Гц до температуры

приблизительно от 100 до 130 °C. Но данный способ имеет ряд недостатков: тратится большое количество энергии (необходимый ток для плавки льда в 1,5 раза превышает нормативное значение, установленное для ВЛЭП), требуется изрядно много времени (в некоторых случаях до 90 минут) [104 - 106].

Наиболее применяемым способом эффективного удаления ГИО с ВЛЭП является плавка наледи при передаче по электрическим проводам тока повышенного значения [107].

Установление значений тока и продолжительности плавки основано на учете энергии, требуемой для растапливания обледенения и затрачиваемой на теплоотдачу в окружающее пространство и непосредственно на нагрев электрического провода до необходимой температуры для начала процесса плавки (до подачи тока плавки провод может иметь температуру, которая приблизительно будет равна температуре окружающей среды).

Рекомендуется плавку гололёда осуществлять настолько большими значениями тока, чтобы как можно скорее ее завершить и настроить штатную схему функционирования ЭС. Также это напрямую влияет на уменьшение возможных затрат электрической энергии при проведении плавки, так как часть энергии, рассеивающейся в окружающем пространстве, естественно зависит от продолжительности обогрева [108].

Само собой разумеется, что выбирать режим требуемой плавки гололёда необходимо по в наибольшей степени обледенелой части линии электропередачи, следовательно, процесс плавки в любом случае будет длиться даже тогда, когда участки линий с несколько меньшими размерами ГИО освободятся от гололёдного наслоения и станут быстро нагреваться. Но возможен случай неравномерного обледенения проводов ЭС, то есть возможно наличие участков линии с отсутствием ГИО на их поверхности. Таким образом, предельный ток плавки обязательно должен подбираться с условием нагрева провода или грозозащитного троса, на которых не имеется гололёдных образований [109].

Разрешенная температура нагрева провода устанавливается в зависимости от двух обстоятельств:

- сохранение существующей механической прочности электрического провода;
- возможное приближение проплавляемого провода к земной поверхности или к пересекаемым на рассматриваемой территории объектам.

По разрешенным на период плавки дистанциям между проводом и земной поверхностью или пересекаемым объектам фиксируются длина стрелы провеса, сочетающееся с ней механическое напряжение в электрическом проводе и возможная температура нагрева провода.

Для расчета максимально допустимых токов плавки показатели температуры окружающей среды и скорости ветра определяют по данным, получаемым при помощи метеорологических станций либо с гололёдных постов на участках ЛЭП с небольшой толщиной

стенки гололёда или на участках, где ГИО отсутствуют в течение процесса проведения плавки гололёла.

В качестве тока нагрева может использоваться как переменный, так и постоянный. Плавка ГИО переменным током не имеет больших затрат, вследствие осуществления путем подключения к имеющейся ЭС, но целесообразна только при сравнительно небольшой длине проплавляемых участков ВЛЭП. В случае применения данного способа для линий большой протяженности и с большим размером сечения электрических проводов преимущество уже за постоянным током. Для ВЛЭП напряжением 220 кВ и выше мощность источника плавки постоянным током должна быть примерно около 20% от необходимой мощности источника при плавке переменным током. Но при этом обязательно применение выпрямительной установки (ВУ) [71], имеющей большую стоимость.

На сегодняшний день плавка током является самым распространенным способом удаления ГИО с поверхности ВЛЭП [87].

Требования п. 2.5.16 ПУЭ [38] предусматривают плавку гололёда на электрических проводах и грозозащитных тросах ВЛЭП, которые расположены на территории районов с толщиной стенки гололёда 25 мм и более, в областях с интенсивным образованием ГИО при больших скоростях ветра и в районах с многократной и значительной пляской проводов. Кроме того, для защиты ВЛЭП от пляски проводов перспективным направлением считается использование новых композитных проводов, имеющих повивы проволок из алюминиевоциркониевых и других сплавов, так как данные провода в сопоставлении с применяемыми сейчас отличаются значительными достоинствами: лучшей пропускной способностью по передаваемой мощности, меньшей по длине стрелой провеса и превосходящими показателями рабочей температуры (высокотемпературные провода) [71].

На ВЛЭП, рассчитанных на возможное применение плавки гололёда, обязательно предусматривается мониторинг процесса гололёдообразования, для этого целесообразно устанавливать сигнализаторы начального момента гололёдообразования и контрольные устройства, регистрирующие конец плавки. В настоящее время разработано довольно немалое число различных систем плавки гололёда, обусловленное схемой ЭС, характером потребительской нагрузки, объективной возможностью временного вывода из эксплуатации на период ремонтно-восстановительных работ линий и иными факторами. Но основываясь на статистических данных, можно сделать вывод, что на практике до сих пор отсутствует правильно построенная система обеспечения безопасности электроснабжения региона, направленная на своевременное устранение ГИО с поверхности проводов и гарантирующая круглосуточный и оперативный мониторинг состояния ВЛЭП и своевременную плавку гололёда.

Плавка гололёда путем протекания по проводу переменного тока находит применение исключительно для линий с напряжением ниже 220 кВ и с сечением проводов меньшим, чем 240 мм². ВЛЭП с одной стороны соединяется с источником питания, большей частью это шины 6-10 кВ подстанций или отдельный трансформатор, при этом на другой стороне провода ВЛЭП замыкаются. Напряжение и мощность источника подбираются такими, чтобы была возможность создания по участку линии тока со значением примерно в 1,5...2 раза больше, чем значение длительно допустимого тока, что оправдано краткосрочным периодом процесса осуществления плавки гололёда (примерно около 60 минут), к тому же в данное время года (зима) наблюдается сильное охлаждение проплавляемых проводов.

К числу явных преимуществ такого способа относится уменьшение возможных энергозатрат и трудовых издержек. Но между тем здесь тоже можно выделить некоторые недостатки: необходимость непрерывного нагрева участка линии с целью предупреждения процесса образования ГИО; дороговизна источников ВЧ тока требуемой мощности; появление радиопомех в ультракоротковолновом (УКВ) диапазоне [71].

На протяжении последнего десятилетия для предотвращения образования обледенения на проводе предлагают использовать физико-химические методы, в основе которых заложено нанесение на поверхность объекта растворов из веществ со специальным составом, температура замерзания которых намного ниже, чем у воды [69]. Данный вид методов подразумевает применение покрытий с незначительной адгезией к каплям воды. Но продолжительность полезного действия полученных «незамерзающих жидкостей» небольшая, к тому же регулярно наносить такие растворы на ЛЭП невозможно.

Электромеханические методы удаления ГИО с поверхности проводов ВЛЭП являются новым классом способов и технических устройств устранения гололёдных образований. Удаление ГИО предлагается осуществлять не посредством термического воздействия проходящим по электрическим проводам тока, а путем создания электромеханического воздействия на обледенение. Метод заключается в следующем: по участку линии пропускают импульсы тока заданной частоты и формы, в результате прохождения тока возникает сила Ампера, из-за воздействия которой возникают механические колебания, предотвращающие формирование обледенения и устраняющие слой ГИО [69]. Таким образом, так как используется не термическое воздействие, а механическое, считается, что можно добиться необходимого уменьшения времени и энергии, затрачиваемых на удаление ГИО. Но при этом, если уже образовался достаточно плотный слой ГИО, то в таком случае невозможно создать более высокие знакопеременные растягивающие и сжимающие напряжения, обусловленные возникновением изгиба и колебаний покрытых обледенением проводов, для осуществления гораздо более эффективного удаления гололёдообразования при наименьших токах, то есть при меньшем

энергопотреблении. Очень важно при использовании данного способа выполнить точный и тщательный расчет частоты и величины импульсов тока для исключения негативных последствий резонанса.

В целом, существующие методы удаления гололёдных образований можно свести в единую Таблицу 2.

Таблица 2 – Методы удаления ГИО с поверхности провода ВЛЭП

Название метода	Принцип действия	Достоинства	Недостатки
Механический (удаление уже существующего слоя	использование шестов	-	требуется доступ к линии, её обесточивание, привлечение большого количества сотрудников, затрачивается много времени
	применение роликов- ледорезов	-	требуется доступ к линии, низкая производительность, высокая вероятность повреждения провода, затрачивается много времени
ГИО)	применение многозарядных пневматических устройств		требуется доступ к линии, низкая производительность, затрачивается много времени
	применение мобильных роботов есть возможность обнаружить деформацию проводов, провести простой ремонт, нет необходимости обесточивать линию	требуется доступ к линии, значительные финансовые затраты, необходимость подготовки для каждого робота отдельного оператора	
Электротермический (нагрев провода ВЛЭП)	профилактический нагрев	нет необходимости обесточивать линию	тратится большое количество энергии, требуется изрядно много времени
	плавка льда переменным током	уменьшение возможных энергозатрат и трудовых издержек, нет необходимости обесточивать линию	целесообразна только при сравнительно небольшой длине проплавляемых участков, необходимость непрерывного нагрева участка линии; дороговизна источников ВЧ тока требуемой мощности; появление радиопомех в УКВ диапазоне
	плавка льда постоянным током	применима для линий большой протяженности и с большим размером сечения проводов, уменьшение возможных энергозатрат и трудовых издержек, нет необходимости обесточивать линию	обязательно применение выпрямительной установки (ВУ), имеющей большую стоимость, которая большую часть времени простаивает; требуется доступ к участку линии

Название метода	Принцип действия	Достоинства	Недостатки
Физико-химический (предотвращение образования ГИО)	нанесение на поверхность объекта растворов из веществ со специальным составом, температура замерзания которых намного ниже, чем у воды	низкая адгезия покрытий к водной среде, нет необходимости обесточивать линию	кратковременный эффект; для использования на ВЛЭП не целесообразно в виду их огромной протяженности
Электромеханический (удаление и предотвращение ГИО)	удаление льда путем создания электромеханического воздействия на обледенение, устройства работают в двух режимах: в вибрационном и в ударно-встряхивающем	уменьшение возможных энергозатрат и времени на устранение ГИО; при вибрационном режиме нет необходимости обесточивать линию	если гололёдный слой достаточно плотный, то увеличивается энергопотребление; при ударно-встряхивающем режиме нужно обесточивать линию и подключать источник постоянного тока; возможно явление резонанса

### 1.4. Выбор и обоснование методологии решения задачи на базе применения ГИС

Методология — наука о методах, предназначение которой дать исследователю условие существования процесса, с которым он работает [110-111].

При проектировании линий электропередачи стремятся учесть все возможные нагрузки с целью предотвращения обрыва провода. Но при реальной эксплуатации возможно преувеличение заложенных значений предполагаемых нагрузок, что, естественно, приводит к реализации (проявлению) угрозы нарушения электроснабжения региона.

Проведенный анализ научных работ показал, что в основном процесс обеспечения безопасности электроснабжения региона рассматривается как решение прямой задачи, а она в не полной мере позволяет гарантированно достигать цели деятельности. Для рассматриваемой задачи нужно решать обратную задачу, используя УСПОБ электроснабжения региона. Только системная интеграция процессов геоинформационной поддержки обеспечения безопасности электроснабжения региона, а именно целевой деятельности, проявления угрозы, идентификации угрозы, нейтрализации угрозы, в интересах обеспечения требуемого показателя безопасности электроснабжения региона позволит получить это условие.

В основе деятельности, в том числе по обеспечению безопасности электроснабжения региона, лежит решение человека (ЛПР) [112]. Человек (ЛПР) работает с тремя категориями: система, модель, предназначение (результат) [113]. Из теории функциональных систем Анохина П.К. можно утверждать, что объекты окружающего мира, созданные для удовлетворения потребностей человека, есть следствие реализации модели решения главного конструктора.

Отсюда следует, что необходимо разработать математическую модель решения человека, которая является УСПОБ электроснабжения региона.

Таким образом, с целью гарантированного достижения цели деятельности, в данном случае обеспечения безопасности электроснабжения региона, нужно устранить две проблемы методологического уровня.

*Первая проблема*. В системотехнике для разработки системы применяют два подхода (Г. Гуд, Р. Макол, 1957):

- подход на основе анализа (характеризуется простым перебором вариантов);
- подход на основе синтеза (необходимо знать закон построения и функционирования системы) [114].

На практике наиболее распространен первый подход, но при его применении не всегда удается достичь поставленных целей [115, 116]. Поэтому для разработки ГИПУ ТС ОБЭР рекомендуется применять второй подход, который основан на синтезе. В качестве инструмента, позволяющего осуществить данную идею, можно рассмотреть ЗСЦО [117], который на протяжении нескольких лет активно прорабатывается ведущей НПШ «Системная интеграция процессов государственного управления».

Вторая проблема. Человек как ЛПР решает задачи на основе модели (Майкл А. Арбиб, 1964; академик АМН СССР и АН СССР Анохин П.К., 1979). Очевидно, что возникает необходимость синтезировать адекватные сложившейся обстановке модели [118]. Адекватность модели может быть оценена путем применения трех подходов [119, 120]: проверка на практике, сравнение с эталоном, полнота учета основных закономерностей предметной области. Для решения поставленной в данном исследовании задачи целесообразно использовать третий подход, но здесь возникает сложность в поиске закона, позволяющего учитывать основные закономерности рассматриваемого процесса. Предлагается использовать ЗСЦО.

В известных публикациях, рассматривающих вопросы построения и формирования решения, как в прошлом, например, работы академика АН СССР и РАН Моисеева Н.Н. [112]. Орловского С.А. [121], так и настоящего времени, например, работы член-корреспондента РАН Новикова Д.А. [122], под решением обычно понимается «выбор альтернатив». Для этого зачастую использовался аппарат теории игр, нелинейного программирования и т.п. Но как отмечали известные системотехники В.В. Дружинин, Д.С. Конторов, подход на основе «выбора альтернатив» страдает концептуальной неполнотой [123]. А это на практике приводит к тому, что результат деятельности не соответствует ожиданиям ЛПР.

Если руководствоваться методологией построения правильно построенной системы [124, 125], то необходимо реализовать схему, представленную на Рисунке 11а. В настоящее время в известных публикациях представлены результаты формирования модели решения на базе схемы

Рисунка 116. Модели решения, полученные по этой схеме, страдают концептуальной неполнотой и зачастую не позволяют гарантированно достигать цели деятельности.

Поэтому в настоящей работе рассматривается возможность построения модели на базе схемы, представленной на рис. 11а. Это позволит разрабатывать модели решения задач различных видов деятельности, гарантирующих достижение поставленных целей.

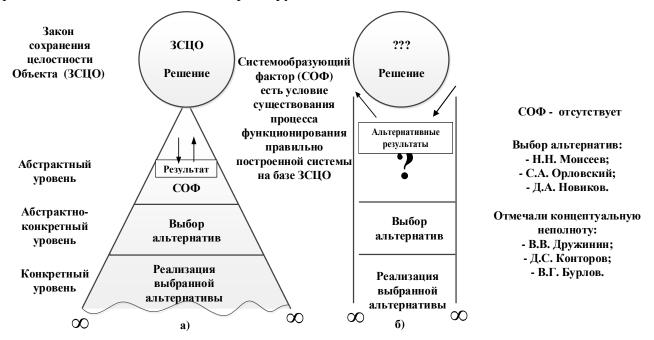


Рисунок 11 – Системообразующий процесс функционирования сложной системы (a) при наличии СОФ; б) при отсутствии СОФ)

С целью обеспечения безопасности электроснабжения региона необходимо получать требуемые характеристики ГВС на рассматриваемой территории. Такими возможностями обладает ГИС, база данных которой содержит ТТД об объектах электроэнергетической отрасли и ПГД о погодных условиях. Данные ГИС описывают состояние окружающей среды не только в текущий момент времени, но и с определенной точностью на ближайшие несколько дней.

Для решения поставленной задачи необходимо разработать на основе модели решения человека модель ГИПУ ТС ОБЭР с соответствующим информационным обеспечением, включающим набор ТТД и ПГД.

Под ГИПУ понимается создание условий реализации возможностей объекта управления в геопространстве для достижения поставленных целей на базе использования информационных ресурсов в виде ПГД и ТТД, характеризующих данный вид целевой деятельности.

Человек в своей деятельности работает с четырьмя процессами:

- целевой процесс (электроснабжение региона);
- процесс проявления угрозы нарушения электроснабжения региона;
- процесс идентификации угрозы нарушения электроснабжения региона;

– процесс нейтрализации угрозы нарушения электроснабжения региона.

Показатель эффективности ГИПУ P (в частном случае показатель эффективности – показатель безопасности электроснабжения региона) может быть представлен в следующем виде:

$$P = f(a,b,c,d,e), \tag{8}$$

где а — обобщённая характеристика целевого процесса; b — обобщённая характеристика срыва целевого процесса; с — обобщённая характеристика процесса проявления угрозы нарушения электроснабжения региона; d — обобщённая характеристика процесса идентификации угрозы нарушения электроснабжения региона; е — обобщённая характеристика процесса нейтрализации угрозы нарушения электроснабжения региона.

При наличии СОФ P, a, b, c являются известными характеристиками, а d и e — свободными переменными, которые требуется определить для достижения требуемого показателя эффективности ГИПУ.

Для формирования УСПОБ необходимо осуществить системную интеграцию четырех вышеприведенных процессов с показателем безопасности. Безопасность — свойство, которое характеризует способность объекта сохранять свое предназначение в процессе жизненного цикла в условиях деструктивных воздействий. Адекватность комплекса мероприятий по обеспечению безопасности основана на познании и осознании окружающей нас действительности. Формирование любого решения на этапах разработки, экспериментальной отработки и применении таких систем требует осуществления геоинформационного моделирования процесса применения системы. Квалификация любого специалиста определяется его потенциальными возможностями по моделированию процесса, с которым работает этот специалист (или на который он воздействует). Квалифицированный специалист основывает свою деятельность на знаниях конкретной предметной области [126].

Объекты, составляющие окружающий мир, существуют в пространственно-временных координатах. Поэтому для обеспечения их безопасности необходимо разработать подход, который позволит формировать свойства множества требуемых пространственно-временных состояний системы, обеспечивающей своевременное обнаружение и предотвращение угрозы нарушения функционирования геообъекта на всех этапах его существования. Наиболее подверженным воздействию различных факторов окружающей среды элементом электроэнергетической отрасли являются ВЛЭП [127, 128]. Основная трудность, возникающая обеспечении безопасности подобных территориально распределенных объектов, заключается в постоянной изменчивости климатических параметров обстановки.

Проблемы электроснабжения потребителей в условиях деструктивного воздействия гидрометеорологических факторов окружающей среды вынуждают искать решение в

применении современных технологий [129], которые способствуют формированию решений, обеспечивающих комплексную политику по управлению безопасностью электроснабжения. Однако такой подход, который обеспечивал бы взаимодействие передовых технологий с системой формирования решений при возникновении угроз нарушения электроснабжения, пока достаточно не проработан [33].

Из постановки вопроса об обеспечении безопасности электроснабжения региона в условиях деструктивного воздействия гидрометеорологических факторов, вытекает задача получения прогноза о характеристиках гидрометеорологических факторов. Изменчивость характеристик процессов окружающей среды требует постоянного контроля и наблюдения, что уже предполагает использование автоматизированной информационной системы для обработки пространственно-временных данных, основой интеграции которых должна служить географическая информация. Необходимость моделирования поведения системы и ее компонентов требует выбора инструментов представления. В настоящее время в области обеспечения безопасности широко используются преимущества веб-технологий, искусственного интеллекта, интеллектуального анализа данных, параллельной обработки в реальном времени, ГИС, дистанционного зондирования, мобильной и спутниковой связи [130 – 133]. Основываясь на научных исследованиях и передовой практике, реализуемой в настоящее время, ГИС признана научным сообществом как наиболее подходящий инструмент для сбора и преобразования ПГД [134], а также как инструмент для геопространственной визуализации полученных результатов [135]. Геопространственное представление результатов используется как при формировании решений в реальных ситуациях [136], так и в пределах теоретических методов научного познания [137]. В рамках данного исследования наибольший интерес представляют ПГД, полученные при помощи ГИС.

Стабильное функционирование любого объекта невозможно без организации его защиты, включающей в себя комплекс мер, направленных на выявление основных угроз и опасных ситуаций, оценки ущерба при реализации этих угроз и создания системы управления безопасностью объекта. В данном исследовании рассматриваются угрозы при воздействии гидрометеорологических факторов.

Для управления безопасностью рекомендуется использовать модели, разработанные путём применения подхода на основе синтеза [115, 138], что позволяет применять подход, основанный на решении обратной задачи управления. Для синтеза применяется ЕНП [139], базирующийся на ЗСЦО [117]. На основе данного подхода можно осуществить системную интеграцию процессов геоинформационной поддержки обеспечения безопасности электроснабжения региона с показателем безопасности, что и является, по мнению автора, решением существующей проблемы.

Результаты применения ЗСЦО предназначены для теоретического обоснования разработанного комплекса мероприятий, обеспечивающего безопасность геообъекта и поддержание показателя безопасности электроснабжения региона на требуемом уровне.

Так как решение — основа деятельности человека, то необходимо сформировать решение для обеспечения безопасности.

Управление процессом геоинформационной поддержки обеспечения безопасности электроснабжения региона требует формировать процессы с наперёд заданными свойствами. В работе представлена концепция управления, основанная на синтезе, которая позволяет удовлетворять этим требованиям. Обеспечение безопасности электроснабжения региона для территориально разнесенных объектов строится на базе использования данных ГИС, которые должны быть заложены в процесс формирования решения уполномоченным лицом. При этом возникает проблема установления связи между данными ГИС и моделью решения ЛПР в интересах гарантированного достижения цели деятельности по обеспечению безопасности электроснабжения региона. Не располагая методологическими основами решения задачи управления безопасностью электроснабжения региона в форме условия существования процесса, нельзя гарантировать достижения цели деятельности. В основе деятельности лежит решение человека. Человек осуществляет свою деятельность на основе модели решения [138]. Поэтому для осуществления деятельности, соответствующей гидрометеорологической обстановке, необходимо располагать адекватной математической моделью решения человека. В публикациях по данной теме утверждается, что построение математической модели решения человека является сложной или даже невыполнимой задачей. Стоит отметить, что в публикациях представлены только результаты обоснования решения, но не модель самого решения. Без математической модели решения весьма сложно гарантировать достижение цели управления безопасностью электроснабжения региона. Такая же ситуация складывается и с построением ГИПУ ТС ОБЭР, так как отсутствует критерий синтеза правильно построенной системы [115, 140]. Только УСПОБ электроснабжения региона позволит связать в единое целое данные ГИС с элементами математической модели решения ЛПР. Получение УСПОБ электроснабжения региона позволяет разработать конструктивную методику. Методика ГИПУ ТС ОБЭР - это преобразование информационных и деятельностных ресурсов ГИПУ ТС ОБЭР в интересах достижения требуемого показателя безопасности электроснабжения региона.

При решении задачи обеспечения безопасности электроснабжения региона зачастую возникает проблема: полученные результаты управляющих воздействий не соответствуют ожидаемым. Данная ситуация возникает по причине наличия противоречивых выводов, исключить которые можно применением ФАМ. Данный метод в обязательном порядке должен включать [117]:

- 1) основные допущения и предположения;
- 2) базовые понятия, ключевые слова, аксиомы.

Необходимо отметить, что процесс деятельности человека включает следующие элементы:

- 1) человек, его сознание;
- 2) окружающий мир (объект);
- 3) нечто, что дано природой и позволяет осуществлять познание (всеобщая связь).

Для достижения цели деятельности человека необходимо формировать условия на основе ЕНП. Данный подход реализуется в результате интеграционного взаимодействия свойств мыслительных процессов человека, объектов окружающего мира в их едином и разобщенном представлении, и обязательно познавательной деятельности (познания). ЕНП широко применяется для решения обширного спектра задач различной направленности и тематики ведущей НПШ «Системная интеграция процессов государственного управления», лидером и идейным вдохновителем которой является доктор технических наук Бурлов Вячеслав Георгиевич.

Трехкомпонентность ЕНП представляется в виде трех основополагающих принципов.

- 1. Принцип трехкомпонентности познания, включающий следующие компоненты:
- абстрактное представление (компонент A), заключающийся в формировании условия существования процесса геоинформационной поддержки обеспечения безопасности электроснабжения региона, представляет собой методологический уровень научного познания;
- абстрактно-конкретное представление (компонент Б), заключающийся в формировании причинно-следственных связей процесса геоинформационной поддержки обеспечения безопасности [126] электроснабжения региона, представляет собой методический уровень научного познания;
- конкретное представление (компонент В), заключающийся в формировании алгоритмов реализации предназначения процесса геоинформационной поддержки обеспечения безопасности электроснабжения региона, представляет собой технологический уровень научного познания.
- 2. Принцип целостности Мира, выражающийся в виде ЗСЦО.
- 3. Принцип познаваемости Мира, основанный на применении методов научного познания: декомпозиция, абстрагирование, агрегирование [117].

Трудности, возникающие при достижении цели, определяются:

1. Методологическим аспектом – получение условия существования процесса управления.

- 2. Методическим аспектом разработка метода, который обеспечит условия перевода объекта управления из настоящего состояния в требуемое.
- 3. Технологическим аспектом получение условия реализации процесса перевода объекта управления из настоящего состояния в требуемое.

#### 1.5. Выводы по Главе 1

По результатам исследования научно-технических основ обеспечения безопасности электроснабжения региона в условиях деструктивного воздействия гидрометеорологических факторов на базе применения ГИС можно сделать следующие выводы:

- 1). Важным элементом системы электроснабжения региона является ВЛЭП.
- 2). ВЛЭП относятся к наиболее ненадёжным элементам системы электроснабжения, так как они подвержены воздействию многочисленных факторов, среди которых можно выделить две группы: постоянные (конструкции, материалы, срок эксплуатации, состояние и т.д.) и переменные (гололёдные и ветровые нагрузки, лесные насаждения, повреждение транспортными средствами, вандализм и т.д.).
- 3). Предприятия, эксплуатирующие ВЛЭП, ставят перед собой цель обеспечить бесперебойное электроснабжение с заявленными показателями качества электроэнергии в зоне своей ответственности. Комплекс мер, направленных на достижение поставленной цели, включает в себя организацию эксплуатации и ремонта ВЛЭП, своевременное устранение повреждений и реализацию требуемых технических мероприятий.
- 4). Постановлением Правительства РФ от 16.02.2008 г. № 86 «О штабах по обеспечению безопасности электроснабжения» утверждены основные положения, затрагивающие вопросы обеспечения безопасности и безаварийности на объектах электроэнергетической отрасли, в том числе заявлено о создании штабов по обеспечению безопасности электроснабжения как федерального уровня, так и регионального.
- 5). Организация оперативного взаимодействия Федерального штаба с региональными штабами для выполнения возложенных на них задач и функций осуществляется Ситуационно-аналитическим центром Минэнерго России (САЦ Минэнерго России).
- 6). В общем случае могут быть выделены следующие типы гидрометеорологических явлений, оказывающих значительное деструктивное воздействие на исследуемый объект (ВЛЭП) и, как следствие, способные привести к нарушению процесса электроснабжения региона:
  - сильный ветер;

- ГИО;
- грозовые явления;
- выпадение града;
- выпадение осадков (дождь, снег, смешанные осадки);
- температурные воздействия (жара, морозы);
- солнечная радиация;
- гидрологические явления (затор, паводок, половодье);
- комплексы неблагоприятных явлений (КНЯ):
  - сочетание сильного ветра и ГИО;
  - сочетание сильного ветра, града и выпадения дождя;
  - сочетание града и выпадения дождя;
  - сочетание сильного ветра и выпадения дождя;
  - сочетание сильного ветра и выпадения снега (метель).
- 7). К основным гидрометеорологическим факторам, оказывающим влияние на механическое напряжение в проводе, относятся:
- температура окружающей среды (влияет на внутреннее механическое напряжение в проводе за счет изменения длины провода в пролете);
- гололёдные нагрузки (влияют на механическое напряжение в проводе за счет внешнего механического воздействия);
- ветровые нагрузки (влияют на механическое напряжение в проводе за счет внешнего механического воздействия).

Большая часть аварийных отключений линий электропередачи связана с воздействием таких гидрометеорологических явлений, как грозовые явления, ветровая нагрузка, ГИО, затопление и т.п.

При этом наиболее значительный вред составляющим объекта (провода, опоры) наносится при совместном действии гололёдной и ветровой нагрузок.

8). Проблема учета ГИО при эксплуатации объекта частично решается на этапе проектирования ВЛЭП, стоимость строительства и эксплуатации которых во многом зависит от возможной толщины стенки гололёда на рассматриваемой территории, так как ГИО являются одной из наиболее значительных внешних механических нагрузок на провода ВЛЭП, что сказывается на технико-экономических показателях объекта. В случае умышленно неверного или ошибочного расчета возможной гололёдной нагрузки возрастает вероятность обрыва провода в процессе эксплуатации ВЛ, что несомненного приведет к перебоям в процессе электроснабжения

(и, вероятней всего, на относительно длительный промежуток времени) с последующими затратами на ремонтно-восстановительные работы.

9). Температура окружающей среды оказывает влияние на формирование определенного вида обледенения и также играет значительную роль в продолжительности процесса гололёдообразования. Уменьшение температуры наружного воздуха при наличии ГИО содействует продолжительному сохранению льда на поверхности провода, и в случае воздействия ветра возможно возникновение вибрации и пляски проводов, что в конечном итоге может привести к их обрыву. От температуры окружающей среды также зависит плотность ГИО.

Продолжительность замерзания различного размера переохлажденных капель воды, являющихся причиной образования ГИО на поверхности объекта, зависит от температуры поверхности провода и воздуха, размера капель. Перечисленные факторы оказывают влияние как на структуру самого ГИО, так и на его плотность.

- 10). Надёжность и устойчивость процесса снабжения потребителей электрической энергией напрямую зависят от организации эффективных действий по наблюдению за ВЛЭП в осенне-зимний период с целью предупреждения аварий, связанных с образованием ГИО.
- 11). В сезон повышенной интенсивности процесса гололёдообразования затраты электросетевой организации приближаются к отметке несколько сотен тысяч рублей, в то время как эксплуатационный персонал, к должностным обязанностям которого относится техническое обслуживание ВЛЭП, со специализированной техникой совершенно не занимается текущими плановыми работами. При таких условиях высока вероятность отсутствия оперативного реагирования на остальные непредвиденные ситуации. Решением подобной проблемы является применение подходов по дистанционному автоматизированному мониторингу ВЛЭП.
  - 12). К современным методам активной борьбы с обледенением относятся:
  - механические;
  - электротермические;
  - физико-химические;
  - электромеханические.

Механические методы применяются чаще остальных и основаны на использовании специальных средств, позволяющих сбивать ГИО с участка линии.

Электротермические методы удаления ГИО основаны на подогреве участков линий электропередачи электрическим током, создающим условия для предупреждения возможного гололёдообразования, и к ним относятся профилактический подогрев или плавка гололёда.

Физико-химические методы основаны на нанесении на поверхность объекта растворов из веществ со специальным составом, температура замерзания которых намного ниже, чем у воды. Данный вид методов подразумевает применение покрытий с незначительной адгезией к каплям

воды. Но продолжительность полезного действия полученных «незамерзающих жидкостей» небольшая, к тому же регулярно наносить такие растворы на линии электропередачи невозможно.

Электромеханические методы удаления ГИО с поверхности проводов ВЛЭП являются новым классом способов и технических устройств устранения гололёдных образований. Удаление ГИО предлагается осуществлять не посредством термического воздействия проходящим по электрическим проводам тока, а путем создания электромеханического воздействия на обледенение.

13). С целью обеспечения безопасности ВЛЭП от деструктивного воздействия гидрометеорологических факторов необходимо получать своевременные и полные данные об их показателях. С этой целью целесообразно разрабатывать и внедрять информационные технологии определенного назначения. Наиболее активно совершенствующимися и развивающимися в сфере информационных технологий за несколько последних десятилетий являются ГИС.

Инструменты ГИС реализуют дополнительные функциональные способы картографической визуализации с целью представления динамики течения опасных и неблагоприятных процессов. Такое представление данных позволяет за относительно короткое время проанализировать и отобразить на карте полученную информацию, демонстрирует наглядную визуализацию направленности определенных гидрометеорологических факторов (например, ветра) и способствует комплексному анализу информации о характеристиках протекания и проявления опасностей разнообразного происхождения.

- 14). Проанализировав существующие и инновационные подходы к решению задачи обеспечения безопасности ВЛЭП, можно сделать вывод, что на данный момент отсутствует подход, базирующийся на получении прогноза о характеристиках гидрометеорологических факторов и на последующем решении обратной задачи управления безопасностью электроснабжения региона.
- 15). Принятое определение понятия «решение» как выбор альтернатив страдает концептуальной неполнотой (Дружинин В.В., Конторов Д.С.). Для получения результатов, гарантирующих достижение цели деятельности, согласно Анохину П.К. необходимо иметь СОФ. В технико-технологических системах СОФ является модель решения человека, так как техника рукотворные объекты окружающего мира, созданные для удовлетворения потребностей человека на основе модели решения конструктора (инженера). Получить СОФ позволяет применение ЗСЦО.
- 16). В основе любой деятельности лежит решение человека (академик АН СССР и РАН Моисеев Н.Н., 1981). Для поиска выхода из возникающих перед ним ситуаций человеку

необходимо работать с тремя категориями: система, модель и предназначение (академик AMH CCCP и AH CCCP Анохин П.К.).

17). Из вышесказанного следует, что для ЛПР необходимо иметь условие существования процесса геоинформационной поддержки обеспечения безопасности электроснабжения региона в виде модели решения человека. И если передача электроэнергии осуществляется, то можно говорить о том, что обеспечивается безопасность электроснабжения, то есть цель данной работы достигается. При этом, согласно ЗСЦО, решение должно быть получено на основе системной интеграции свойств мышления человека, свойств объектов окружающего мира и всеобщей связи явлений.

*При решении первой задачи* было установлено, что для обеспечения безопасности электроснабжения региона необходимо иметь модель ГИПУ ТС ОБЭР, разработанную путём применения подхода на основе синтеза.

Глава 2. Разработка модели геоинформационной поддержки управления территориальной системой обеспечения безопасности электроснабжения региона в условиях деструктивного воздействия гидрометеорологических факторов

# 2.1. Общий подход к разработке модели геоинформационной поддержки управления территориальной системой обеспечения безопасности электроснабжения региона в условиях деструктивного воздействия гидрометеорологических факторов

Любая деятельность, которую осуществляет человек, основана на решении человека (ЛПР). Ликвидируя пожар, переходя дорогу, проектируя здание или сооружение, ЛПР реализует свои действия на основе модели решения. Под моделью объекта будем понимать описание или представление объекта, соответствующее объекту и позволяющее получать характеристики об этом объекте [141]. Из чего вытекает, что решение – это, несомненно, модель процесса, который направлен на достижение поставленных целей. Процесс – это объект в действии при фиксированном предназначении [142]. Как выше уже было сказано, для синтеза целесообразно использовать ЕНП, в основе которого лежит ЗСЦО [143]. ЗСЦО проявляется во взаимной трансформации свойств объекта и свойств его действия при фиксированном предназначении.

Синтез математической модели решения осуществляется на основе разработанной методики трансформации вербальной модели в формальную (математическую) на базе регламентации пространственно-временных состояний процессов деятельности принципами трёхкомпонентности познания, целостности Мира и познаваемости Мира.

Для сложных систем, к которым относится электроэнергетическая отрасль, целесообразно использовать подход, основанный на «полноте учета основных закономерностей предметной области» [124]. Реализовать данный подход позволяет применение ЗСЦО.

Принято, что решение – есть условие реализации предназначения объекта [124] электроэнергетической отрасли (электроснабжение региона посредством ВЛЭП) при деструктивном воздействии гидрометеорологических факторов на базе применения ГИС в интересах достижения цели (безопасность электроснабжения региона).

Обстановка — факторы и условия, в которых осуществляется деятельность. Факторы и условия характеризует совокупность ПГД. Это гидрометеорологические факторы на определенный период времени (относительная влажность воздуха, скорость и направление ветра, температура окружающего воздуха и т.д.). Также эти факторы и условия характеризуют ТТД, которые включают характеристики об объектах системы электроснабжения (расположение и

протяженность ВЛЭП, их технические характеристики, наличие и состав аварийного резерва, состав мобильных бригад), о штатной нагрузке, повышенной нагрузке, с учётом которых осуществляется деятельность по обеспечению безопасности электроснабжения региона на базе применения ГИС.

Информационно-аналитическая работа – непрерывное добывание, сбор, изучение, отображение и анализ данных об обстановке.

Чтобы определить условия существования процесса ГИПУ ТС ОБЭР на базе применения ГИС, необходимо учитывать три фактора:

- характеристики внешнего мира, выраженные в устойчивой связи трёх компонентов процесса, соответствующих свойствам «Объективность», «Целостность» и «Изменчивость» (или понятиям «Объект», «Предназначение» и «Действие», соответственно);
- характеристики свойств человеческого мышления, основанные на абстрактном, абстрактно-конкретном и конкретном мышлении и выраженные соответственно в методологии, методах и технологии (алгоритмах);
- особенности деятельности человека, при которой человек использует три основных метода решения практических задач: декомпозиция, абстрагирование и агрегирование.

На Рисунке 12 представлена структурная схема развертывания содержания категории «Решение» как процесса.

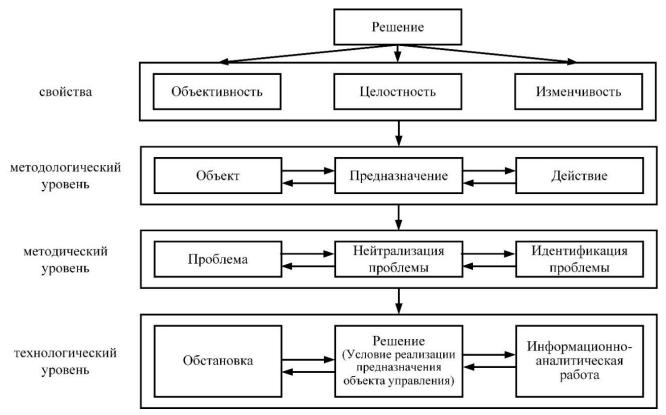


Рисунок 12 — Структурная схема развертывания содержания категории «Решение» как процесса

На 1-ом уровне применяется метод декомпозиции – решение расчленяется при сохранении связей на три элемента: «Обстановка», «Решение» и «Информационно-аналитическая работа», которые характеризуют условия деятельности.

На 2-ом уровне применяется метод абстрагирования. Человек воспринимает факты, соотнесенные во времени, поэтому целесообразно «Объект» («Обстановка») охарактеризовать средним временем проявления угрозы нарушения электроснабжения региона —  $\Delta t_{IIV}$ . «Действие» («Информационно-аналитическая работа») отождествляется со средним временем идентификации угрозы нарушения электроснабжения региона (средним временем адекватного сложившейся обстановке распознания ситуации) —  $\Delta t_{IIV}$ . «Предназначение» («Решение») отождествляется со средним временем нейтрализации угрозы нарушения электроснабжения региона (предотвращение нарушения электроснабжения региона) человеком —  $\Delta t_{IIV}$ .

В работе предполагается, что эти промежутки времени являются случайными величинами, и используется следующая диаграмма изменения базовых компонентов формирования модели решения (Рисунок 13 (а) среднее время проявления угрозы нарушения электроснабжения региона; б) среднее время идентификации угрозы нарушения электроснабжения региона; в) среднее время нейтрализации угрозы нарушения электроснабжения региона).

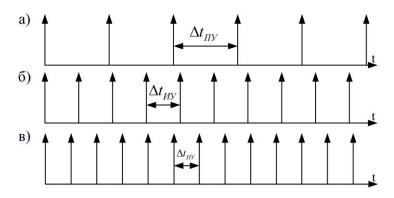


Рисунок 13 – Диаграмма проявления базовых элементов формирования модели решения

В Таблице 3 представлены ранее озвученные направления в области обеспечения безопасности электроснабжения региона с указанием диаграммы проявления базовых элементов формирования модели решения.

Таблица 3 – Направления в области обеспечения безопасности электроснабжения региона

Направление	Диаграмма проявления базовых элементов формирования модели решения	Показатель безопасности
Определение по параметрам предаварийного и аварийного режимов мест повреждения ВЛЭП	$\Delta t_{HV}$	Отсутствует.

Направление	Диаграмма проявления базовых элементов формирования модели решения	Показатель безопасности
Разработка и применение информационно-измерительной системы контроля аварийных режимов ВЛЭП	$\Delta t_{HV}$	Отсутствует.
Повышение надёжности и эксплуатационной готовности ВЛЭП на основе оценки надёжности и разработанных рекомендаций по срокам организации капитальных ремонтов и снижению рисков технологических нарушений, в том числе оценка влияния природно-климатических факторов	отсутствует	В концепции данного исследования отсутствует.
Обнаружение, предотвращение или устранение образовавшегося ГИО	$\begin{array}{c c} \Delta t_{HV} \\ \hline \\ \Delta t_{HV} \\ \hline \\ \end{array}$	Решается прямая задача управления безопасностью.

Базируясь на трёх базовых элементах: «Обстановка», «Информационно-аналитическая работа» и «Решение (Условие реализации предназначения объекта управления)», можно осуществить синтез модели решения. На Рисунке 14 представлена структурная схема интерпретации процесса синтеза математической модели решения.

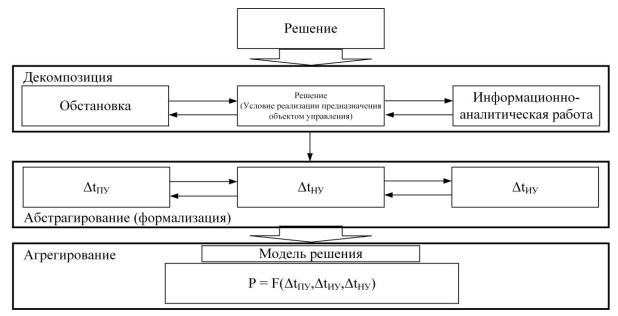


Рисунок 14 — Структурная схема интерпретации процесса синтеза математической модели решения

В результате применения методов декомпозиции, абстрагирования и агрегирования понятие «Решение» преобразуется в агрегат — математическую модель следующего вида:

$$P = f(\Delta t_{HV}, \Delta t_{HV}, \Delta t_{HV}). \tag{9}$$

Это есть условие существование процесса [144] ГИПУ ТС ОБЭР на базе применения ГИС.

Математической моделью процесса проявления угрозы нарушения электроснабжения региона является среднее время проявления угрозы  $\Delta t_{\Pi Y} = f_1(x_1, x_2, \dots x_a, x_{a+1}, \dots, x_b)$ , где вектор X характеризует состояния процесса проявления угрозы.  $X \in G_x$ , где  $G_x$  – ограниченное замкнутое множество. Совокупность характеристик состояний  $(x_1, x_2, \dots x_a)$  представляет собой набор ТТД, а совокупность характеристик состояний  $(x_{a+1}, \dots, x_b)$  – набор ПГД.

Математической моделью процесса идентификации угрозы нарушения электроснабжения региона является среднее время идентификации угрозы  $\Delta t_{\rm HV} = f_2(y_1, y_2, ..., y_c, y_{c+1}, ..., y_d)$ , где вектор Y характеризует состояния процесса идентификации угрозы. Y  $\in$   $G_{\rm y}$ , где  $G_{\rm y}$  — ограниченное замкнутое множество. Совокупность характеристик состояний  $(y_1, y_2, ..., y_d)$  представляет собой набор ТТД, а совокупность характеристик состояний  $(y_{c+1}, ..., y_d)$  — набор ПГД.

Математической моделью процесса нейтрализации угрозы нарушения электроснабжения региона является среднее время нейтрализации угрозы  $\Delta t_{\rm HY} = f_3(z_1,z_2,...,z_e,z_{e+1},...,z_f)$ , где вектор Z характеризует состояния процесса нейтрализации угрозы.  $Z \in G_z$ , где  $G_z$  – ограниченное замкнутое множество. Совокупность характеристик состояний  $(z_1,z_2,...,z_e)$  представляет собой набор ТТД, а совокупность характеристик состояний  $(z_{e+1},...,z_f)$  – набор ПГД.

Математические модели процессов геоинформационной поддержки обеспечения безопасности электроснабжения региона с указанием совокупностей ТТД и ПГД представлены на Рисунке 15.

$$\Delta t_{IIV} = f_1(x_1, x_2, ..., x_a, x_{a+1}, ..., x_b)$$

$$\Delta t_{IIV} = f_2(y_1, y_2, ..., y_c, y_{c+1}, ..., y_d)$$

$$\Delta t_{HV} = f_3(z_1, z_2, ..., z_e, z_{e+1}, ..., z_f)$$
\*- технико-технологические данные;
\*\*- пространственные географические данные

Рисунок 15 — Математические модели процессов геоинформационной поддержки обеспечения безопасности электроснабжения региона с указанием совокупностей ТТД и ПГД

В силу того, что базовая модель ГИПУ ТС ОБЭР имеет три элемента, представим структурную схему ГИС УБЭР в виде, показанном на Рисунке 16.

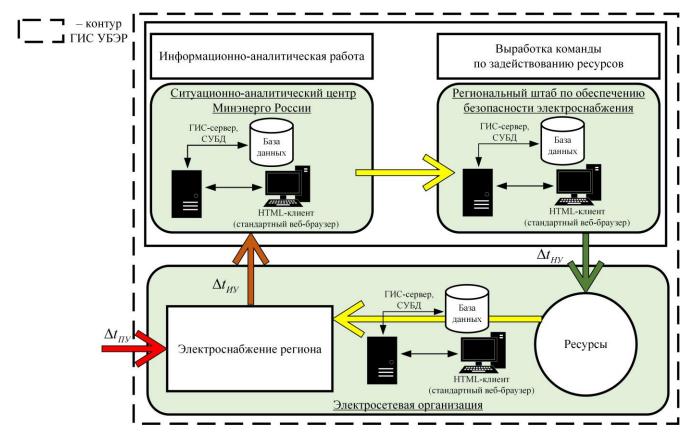


Рисунок 16 – Структурная схема ГИС УБЭР с базовыми элементами ГИПУ ТС ОБЭР

# 2.2. Выбор и обоснование основных соотношений модели геоинформационной поддержки управления территориальной системой обеспечения безопасности электроснабжения региона в условиях деструктивного воздействия гидрометеорологических факторов

ЛПР при обеспечении безопасности электроснабжения региона может выполнять в различных сочетаниях две функции [138]:

- идентифицировать угрозу нарушения электроснабжения региона;
- нейтрализовать угрозу нарушения электроснабжения региона.

В соответствии с изложенным модель ГИПУ ТС ОБЭР характеризуют четыре базовых состояния:  $(S_{00})$ » — ЛПР не идентифицирует угрозу нарушения электроснабжения региона;  $(S_{10})$  — ЛПР идентифицирует угрозу нарушения электроснабжения региона;  $(S_{10})$  — ЛПР идентифицирует угрозу нарушения электроснабжения региона;  $(S_{01})$  — ЛПР не идентифицирует угрозу нарушения электроснабжения региона и нейтрализует угрозу нарушения электроснабжения региона;  $(S_{11})$  — ЛПР идентифицирует угрозу нарушения электроснабжения региона;  $(S_{11})$  — ЛПР идентифицирует угрозу нарушения электроснабжения региона.

В реальной обстановке мы используем абсолютные значения времен. В связи с тем, что ГИПУ ТС ОБЭР может находиться в одном из четырёх состояний, нам необходимо знать вероятность нахождения ГИПУ ТС ОБЭР в одном из рассматриваемых состояний. Определением вероятности нахождения системы в состояниях графа занимался академик Колмогоров, поэтому можно использовать систему дифференциальных уравнений (ДУ) Колмогорова-Чепмена, в которых вероятность нахождения ГИПУ ТС ОБЭР зависит от частот. Поэтому от абсолютных значений времен необходимо перейти к частотам.

В соответствии с описанной особенностью модели необходимо ввести вероятности нахождения ГИПУ ТС ОБЭР в этих четырех состояниях. Соответственно получаются вероятности  $P_{00}$ ,  $P_{10}$ ,  $P_{01}$ ,  $P_{11}$  нахождения ГИПУ ТС ОБЭР в состояниях « $S_{00}$ », « $S_{10}$ », « $S_{11}$ » [139].

Процесс формирования решения можно рассмотреть как цепь Маркова. В связи с тем, что такой подход не позволяет в достаточной мере учитывать динамику процесса, в настоящей работе целесообразно использовать непрерывные цепи Маркова. Для реализации такого подхода необходимо составить систему ДУ Колмогорова — Чепмена. Характеристика переходов системы представлена на Рисунке 17.

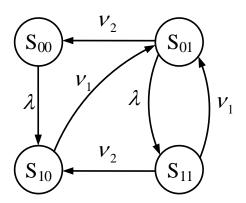


Рисунок 17 – Граф состояний процесса формирования решения

Предполагается, что ГИПУ ТС ОБЭР находится в начальном состоянии (штатное функционирование) « $S_{00}$ ». При появлении угрозы нарушения электроснабжения региона под воздействием интенсивности  $\lambda$  (обратная величина среднему времени проявления угрозы нарушения электроснабжения региона —  $\Delta t_{IIV}$ ) ГИПУ ТС ОБЭР переходит в состояние « $S_{10}$ », т.е. в состояние идентификации угрозы нарушения электроснабжения региона. Из этого состояния ГИПУ ТС ОБЭР под воздействием интенсивности  $v_1$  (обратная величина среднему времени идентификации угрозы нарушения электроснабжения региона —  $\Delta t_{IIV}$ ) осуществляет переход в состояние « $S_{01}$ », в котором начинается процесс нейтрализации угрозы нарушения электроснабжения региона с интенсивностью  $v_2$  (обратная величина среднему времени

нейтрализации угрозы нарушения электроснабжения региона —  $\Delta t_{HV}$ ) и затем переходит в состояние « $S_{00}$ ». Эта ситуация возможна, если угроза нарушения электроснабжения нейтрализована (предотвращено нарушение электроснабжения региона), а очередная угроза нарушения электроснабжения региона еще не образовалась. Если угроза образовалась, то с интенсивностью  $\lambda$  ГИПУ ТС ОБЭР переходит в состояние « $S_{11}$ ». Находясь в состоянии « $S_{11}$ », под воздействием интенсивности  $v_1$  ГИПУ ТС ОБЭР переходит в состояние « $S_{01}$ », если угроза нарушения электроснабжения региона идентифицирована (распознана), и переходит в состояние « $S_{00}$ » под воздействием интенсивности  $v_2$ , если угроза нарушения электроснабжения региона нейтрализована. Далее на вход поступает очередная угроза нарушения электроснабжения региона, и ее надо идентифицировать. Цикл ГИПУ ТС ОБЭР повторяется.

Для описания изменения состояний процесса формирования решения необходимо сделать следующие допущения и предположения.

- 1. Рассматривается схема формирования решения человека в форме ГИПУ ТС ОБЭР. На основе решения формируется процесс геоинформационной поддержки обеспечения безопасности электроснабжения региона.
- 2. Промежутки времени между моментами обнаружения фактов проявления угроз нарушения электроснабжения региона являются величинами случайными.
  - 3. Обнаруженные факты образуют поток во времени, близкий к потоку Пуассона.
  - 4. Время обработки данных о требуемом признаке является величиной случайной.
- 5. Данные о признаках распределяются далее между выделенными ресурсами, решающими соответствующие целевые задачи по обеспечению безопасности электроснабжения региона.
- 6. Рассматривается случай, когда время пребывания требуемых признаков (фактов) в области действия ГИПУ ТС ОБЭР весьма ограничено и соизмеримо со временем, которое необходимо для их идентификации, а также обработки данных и принятия адекватных действий по этим признакам.
- 7. ГИПУ ТС ОБЭР подготовлено к решению задач по идентификации и нейтрализации угроз нарушения электроснабжения региона.
- 8. Разрабатываемое ГИПУ ТС ОБЭР предназначено для оценивания потенциальных возможностей системы электроснабжения в условиях воздействия гидрометеорологических факторов в зависимости от обстановки.

Введенные допущения и предположения позволяют использовать систему ДУ Колмогорова—Чепмена. Необходимо составить систему ДУ Колмогорова для рассматриваемой ситуации. Она имеет следующий вид:

$$\begin{cases}
\frac{d}{dt} P_{00}(t) = -P_{00}(t)\lambda + P_{01}(t)\nu_{2} \\
\frac{d}{dt} P_{10}(t) = P_{00}(t)\lambda - P_{10}(t)\nu_{1} + P_{11}(t)\nu_{2} \\
\frac{d}{dt} P_{01}(t) = -P_{01}(t)(\lambda + \nu_{2}) + P_{11}(t)\nu_{1} + P_{10}(t)\nu_{1} \\
\frac{d}{dt} P_{11}(t) = P_{01}(t)\lambda - P_{11}(t)(\nu_{1} + \nu_{2})
\end{cases}$$
(10)

Для полученной системы накладывается следующее ограничение:

$$P_{00}(t) + P_{10}(t) + P_{01}(t) + P_{11}(t) = 1. (11)$$

Система решается для заданных начальных условий.

1. В общем случае используется соотношения (12), где правые части — это некоторые константы, вероятности нахождения ГИПУ ТС ОБЭР в соответствующих состояниях:

$$P_{00}(0) = P_{00^*}, P_{10}(0) = P_{10^*}, P_{01}(0) = P_{01^*}, P_{11}(0) = P_{11^*}.$$
(12)

2. Случай, когда ГИПУ ТС ОБЭР находится в состоянии «1», т.е. угроза нарушения электроснабжения региона, на которую надо реагировать, отсутствует, не рассматривается и не обрабатывается:

$$P_{00}(0) = 1, P_{10}(0) = 0, P_{01}(0) = 0, P_{11}(0) = 0.$$
(13)

Рассмотрев процесс геоинформационной поддержки обеспечения безопасности электроснабжения региона как динамический, можно перейти к выявлению возможностей рассмотрения этого процесса как стационарного, не нарушая общности рассуждений.

Если предположить, что рассматривается стационарный процесс, то система ДУ трансформируется в систему линейных однородных алгебраических уравнений следующего вида:

$$\begin{cases}
-P_{00}(t)\lambda + P_{01}(t)\nu_{2} = 0 \\
P_{00}(t)\lambda - P_{10}(t)\nu_{1} + P_{11}(t)\nu_{2} = 0 \\
-P_{01}(t)(\lambda + \nu_{2}) + P_{11}(t)\nu_{1} + P_{10}(t)\nu_{1} = 0
\end{cases}$$

$$P_{01}(t)\lambda - P_{11}(t)(\nu_{1} + \nu_{2}) = 0$$
(14)

Это есть система линейных алгебраических уравнений относительно четырех неизвестных:  $P_{00}$ ,  $P_{10}$ ,  $P_{01}$ ,  $P_{11}$ , которые связаны между собой следующим соотношением:

$$P_{00} + P_{10} + P_{01} + P_{11} = 1. (15)$$

Искомые вероятности уже не зависят от времени. Решением данной линейной алгебраической системы уравнений являются следующие соотношения:

$$\begin{cases}
P_{00} = \frac{v_1 v_2}{\lambda(\lambda + v_1 + v_2) + v_1 v_2} \\
P_{10} = \frac{\lambda v_2 (\lambda + v_1 + v_2)}{(v_1 + v_2)(\lambda(\lambda + v_1 + v_2) + v_1 v_2)} \\
P_{01} = \frac{\lambda v_1}{\lambda(\lambda + v_1 + v_2) + v_1 v_2} \\
P_{11} = \frac{\lambda^2 v_1}{(v_1 + v_2)(\lambda(\lambda + v_1 + v_2) + v_1 v_2)}
\end{cases}$$
(16)

Получив соотношения, определяющие вероятности нахождения ГИПУ ТС ОБЭР в состояниях « $S_{00}$ », « $S_{10}$ », « $S_{01}$ », « $S_{11}$ », можно выработать требования к свойствам процесса идентификации угрозы нарушения электроснабжения региона и к свойствам процесса нейтрализации угрозы нарушения электроснабжения региона при ГИПУ ТС ОБЭР:

$$P_{00} = \frac{v_1 v_2}{\lambda(\lambda + v_1 + v_2) + v_1 v_2} \,. \tag{17}$$

В этом соотношении связаны три параметра. Таким образом, установлена аналитическая зависимость обобщенных характеристик обстановки  $(\Delta t_{IIV})$ , информационно-аналитической деятельности  $(\Delta t_{IIV})$  и нейтрализации угрозы  $(\Delta t_{IIV})$ , возникшей при ГИПУ ТС ОБЭР. Следуя работе академика П.К. Анохина, был получен СОФ ГИПУ ТС ОБЭР в форме соотношения (17).

Учитывая вышесказанное, вектор ГИПУ ТС ОБЭР представляется в следующем виде:

$$\vec{U}^{\mathrm{T}} = \left[\Delta t_{HV}, \Delta t_{HV}\right],\tag{18}$$

где  $\Delta t_{NV}$ ,  $\Delta t_{HV}$  – компоненты вектора управления. Таким образом, при ГИПУ ТС ОБЭР у ЛПР имеется возможность варьировать в различных сочетаниях две функции управления (идентификация и нейтрализация) для достижения требуемого показателя безопасности электроснабжения региона.

Соотношение (17) рассматривается как УСПОБ электроснабжения региона. Показатель  $P_{00}$ , безопасности электроснабжения при региона задается виде этом  $\Delta t_{IIV} = f_1(x_1, x_2, ..., x_a, x_{a+1}, ..., x_b)$  — характеристика обстановки. Исходя из условия обеспечения безопасности электроснабжения региона, можно сформировать требуемый показатель процесса информационно-аналитической работы  $\Delta t_{\mathit{HV}} = f_2(y_1, y_2, ..., y_c, y_{c+1}, ..., y_d)$  и требуемый показатель обеспечению безопасности электроснабжения результата деятельности ПО региона  $\Delta t_{HV} = f_3(z_1, z_2, ..., z_e, z_{e+1}, ..., z_f).$ 

На Рисунке 18 представлена схема гносеологического значения ЗСЦО для полученных результатов.

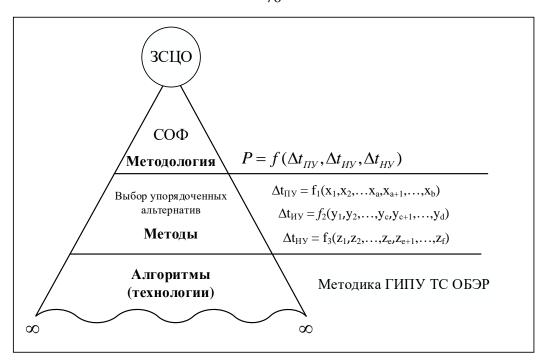


Рисунок 18 – Схема гносеологического значения ЗСЦО

### 2.3. Механизмы связи элементов модели геоинформационной поддержки управления территориальной системой обеспечения безопасности электроснабжения региона в условиях деструктивного воздействия гидрометеорологических факторов с показателем безопасности

Управление процессами геоинформационной поддержки обеспечения безопасности электроснабжения региона требует формировать процессы с наперёд заданными свойствами [138]. При разработке ГИПУ ТС ОБЭР необходимо рассматривать модели двух процессов:

- 1. Модель процесса функционирования ЭС (составной частью которых являются ВЛЭП).
- 2. Модель процесса идентификации угрозы нарушения электроснабжения региона в условиях деструктивного воздействия гидрометеорологических факторов.

Сложный характер зависимостей от гидрометеорологических факторов отказов структурных составляющих ЭС и сложность процесса предупреждения аварийных ситуаций определяют актуальность рассмотрения целевого процесса системы электроснабжения, заключающегося в устойчивом и бесперебойном электроснабжении потребителей региона, и системной интеграции процессов геоинформационной поддержки обеспечения безопасности электроснабжения региона на базе применения ГИС [145].

Модель процесса функционирования ЭС целесообразно представить в виде графа с двумя состояниями: начальное  $(S_1)$  и конечное  $(S_2)$ . Среднее время выполнения целевой задачи

обозначается как « $T_{\mathfrak{I}}$ », которое можно задать следующим образом:

$$T_{\mathfrak{I}} = f_4(k_1, k_2, ..., k_n), \tag{19}$$

где  $k_1, k_2, ..., k_n$  — состояния процесса функционирования ЭС на протяжении всего периода электроснабжения региона. Процесс нормального (штатного) функционирования ЭС можно описать частотой удовлетворительного снабжения электроэнергией потребителей « $\zeta^+$ » (обратная величина среднему времени выполнения целевой задачи « $T_3$ » — устойчивое электроснабжение региона). Из-за воздействия гидрометеорологических факторов, неквалифицированных действий персонала и прочих участников системы электроснабжения, неудовлетворительного технического состояния оборудования [146] возникает угроза нарушения электроснабжения региона. В связи с чем появляется проблема: как связать процесс функционирования ЭС с ГИПУ ТС ОБЭР. В основу решения данной проблемы положен ЕНП.

Человек в своей деятельности работает с 4 процессами [147]:

- 1. Целевой процесс (электроснабжение региона).
- 2. Процесс проявления угрозы нарушения электроснабжения региона.
- 3. Процесс идентификации угрозы нарушения электроснабжения региона.
- 4. Процесс нейтрализации угрозы нарушения электроснабжения региона.

Стабильное функционирование любого объекта невозможно без организации его защиты, включающей в себя комплекс мер, направленных на выявление основных угроз и опасных ситуаций, оценку ущерба при реализации этих угроз и создания системы обеспечения безопасности объекта [148]. В данном исследовании рассматриваются угрозы при воздействии на объект электроэнергетической системы (ВЛЭП) гидрометеорологических факторов.

Для системной интеграции процессов геоинформационной поддержки обеспечения безопасности электроснабжения региона с показателем безопасности применяется ЕНП, базирующийся на ЗСЦО.

В связи с тем, что была введена новая переменная « $T_9$ », характеризующая целевой процесс, в результате применения методов декомпозиции, абстрагирования и агрегирования понятие «Решение» было преобразовано в агрегат — математическую модель следующего вида (Рисунок 19), которая и является УСПОБ электроснабжения региона [149].

$$P = f(T_{2}, \Delta t_{HV}, \Delta t_{HV}, \Delta t_{HV}), \tag{20}$$

где  $T_3$  — среднее время выполнения целевой задачи (электроснабжение региона);  $\Delta t_{IIV}$  — среднее время проявления угрозы нарушения электроснабжения региона;  $\Delta t_{IIV}$  — среднее время идентификации угрозы нарушения электроснабжения региона;  $\Delta t_{IIV}$  — среднее время нейтрализации угрозы нарушения электроснабжения региона; P — показатель эффективности

реализации решений по обеспечению безопасности электроснабжения региона (показатель безопасности).

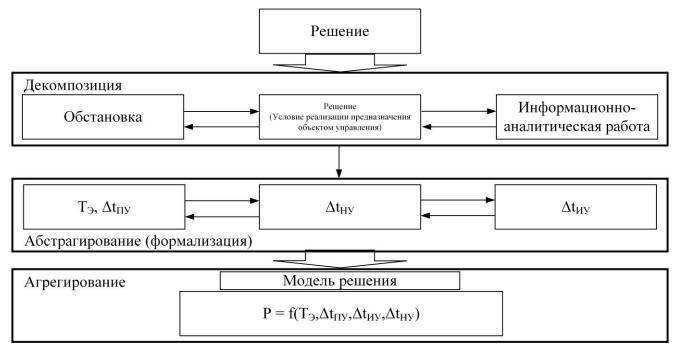


Рисунок 19 — Структурная схема интерпретации процесса синтеза математической модели решения

В работе предполагается, что эти промежутки времени являются случайными величинами, и используется следующая диаграмма изменения базовых компонентов формирования модели решения (Рисунок 20 (а) среднее время выполнения целевой задачи (электроснабжение региона); б) среднее время проявления угрозы нарушения электроснабжения региона; в) среднее время идентификации угрозы нарушения электроснабжения региона; г) среднее время нейтрализации угрозы нарушения электроснабжения региона)).

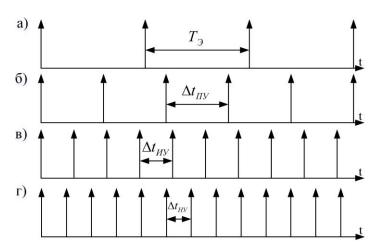


Рисунок 20 — Диаграмма проявления базовых элементов формирования модели решения с учетом целевого процесса

Математической моделью целевого процесса является среднее время целевого процесса  $T_{\ni}=f_0(\boldsymbol{x}_1,\boldsymbol{x}_2,...,\boldsymbol{x}_n,\boldsymbol{x}_{n+1},...,\boldsymbol{x}_m)$ , где вектор  $\boldsymbol{x}$  характеризует состояния целевого процесса деятельности ЛПР.  $\boldsymbol{x} \in G_{\infty}$ , где  $G_{\infty}$  – ограниченное замкнутое множество. Совокупность характеристик состояний  $(\boldsymbol{x}_1,\boldsymbol{x}_2,...,\boldsymbol{x}_n)$  представляет собой набор ТТД, а совокупность характеристик состояний  $(\boldsymbol{x}_{n+1},...,\boldsymbol{x}_m)$  – набор ПГД.

Формализованный критерий ГИПУ ТС ОБЭР определяется как отображение декартового произведения множества функций, характеризующих ПГД, и множества функций, описывающих ТТД, на числовое множество, элементы которого есть значения показателя эффективности целевой деятельности:

$$G_{xx} \times G_{x} \times G_{y} \times G_{z} \to \Pi_{\Pi \ni U \coprod},$$
 (21)

$$P = f(T_{\Im}, \Delta t_{\Pi V}, \Delta t_{HV}, \Delta t_{HV}) \in \Pi_{\Pi \Im \Pi \Pi}, \tag{22}$$

где  $\Pi_{\Pi \ni \Pi \downarrow \Pi}$  — множество значений показателя эффективности целевой деятельности от 0 до 1.

Только формализованные связи позволяют нам получать адекватные результаты, тем самым обеспечивая гарантию достижения цели деятельности.

При функционировании возможно неудовлетворительное решение задачи (прекращение электроснабжения региона) продолжительностью « $T_{CP}$ », которое можно обозначить как частота срыва выполнения целевой задачи — « $\zeta^-$ » (обратная величина  $T_{CP}$ ).

Учитывая целевой процесс и две основные функции ЛПР (идентификация и нейтрализация угрозы нарушения электроснабжения региона), необходимо выделить четыре основных состояния.

Состояние « $S_1$ » — штатное, исходное состояние функционирования системы электроснабжения. Начало описания базового процесса целевой деятельности ЛПР. Состояние « $S_2$ » — требуемое конечное состояние функционирования системы электроснабжения, в которой она находится в результате реализации управляющего воздействия, выработанного ГИПУ ТС ОБЭР на основе идентификации и нейтрализации угрозы нарушения электроснабжения региона. В учете состояний « $S_1$ » и « $S_2$ » заключается «объективность».

В процессе управления возможны штатные ситуации, которые характеризуются отработанными схемами, и нештатные ситуации, когда в процессе управления возникает угроза (такая ситуация, в условиях которой возможности персонала не соответствуют сложившейся ситуации и приходится искать ресурсы по разрешению возникшей проблемы). В связи с этим появляется третье базовое состояние « $S_3$ » — состояние проявления угрозы нарушения электроснабжения региона в контуре ГИПУ ТС ОБЭР. При нахождении ГИПУ ТС ОБЭР в состоянии « $S_3$ » персонал электроэнергетического объекта должен идентифицировать возникшую

угрозу нарушения электроснабжения региона. Способность ЛПР своевременно реагировать на потенциальную возможность проявления угрозы определяет его профессиональную пригодность, основанную на квалифицированной подготовке кадров [145]. На этом этапе происходит подготовка к привлечению дополнительных ресурсов для устранения угрозы. Таким образом, ГИПУ ТС ОБЭР переходит в состояние «S<sub>4</sub>» – состояние идентификации угрозы нарушения электроснабжения региона, которую надо нейтрализовать ГИПУ ТС ОБЭР (анализ необходимости применения конкретных ресурсов для достижения цели управления и разработка первоочередных действий).

На Рисунке 21 представлен граф состояний процесса формирования решения с учетом целевого процесса.

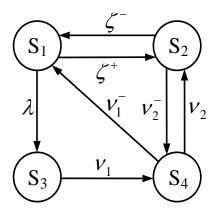


Рисунок 21 – Граф состояний процесса формирования решения с учетом целевого процесса

Переходы между состояниями характеризуются следующим образом:

- $-\zeta^+=rac{1}{T_9}$  обратная величина среднему времени выполнения целевой задачи (электроснабжение региона),  $T_9=f_0(k_0,k_1,...,k_n)$  среднее время штатной эксплуатации объекта электроэнергетической системы;
- $-\lambda=rac{1}{\Delta t_{\Pi Y}}$  обратная величина среднему времени проявления угрозы нарушения электроснабжения региона,  $\Delta t_{\Pi Y}=f_1(x_1,x_2,...,x_a,x_{a+1},...,x_b)$  среднее время проявления угрозы нарушения безопасности электроснабжения региона;
- $-v_1=rac{1}{\Delta t_{_{
  m UV}}}$  обратная величина среднему времени идентификации угрозы нарушения электроснабжения региона,  $\Delta t_{_{
  m HV}}=f_2(y_1,y_2,...,y_c,y_{_{c+1}},...,y_d)$  среднее время идентификации угрозы нарушения электроснабжения региона;

- $v_2 = \frac{1}{\Delta t_{\mathrm{HV}}}$  обратная величина среднему времени нейтрализации угрозы нарушения электроснабжения региона,  $\Delta t_{HV} = f_3(z_1, z_2, ..., z_e, z_{e+1}, ..., z_f)$  среднее время нейтрализации угрозы нарушения электроснабжения региона;
- $-\zeta = \frac{1}{T_{CP}}$  частота срыва целевого процесса (электроснабжение региона), где  $T_{CP}$  среднее время повторения факта срыва целевого процесса, обычно это значение должно варьироваться в пределах 0,1 [150];
- $-v_1^-=rac{N_{MY}^{CP}}{N_{MY}}$  частота срыва идентификации угрозы нарушения электроснабжения региона, где  $N_{MY}^{CP}$  количество срывов процессов идентификации угрозы из-за неспособности ЛПР распознать условия текущей ситуации (показатель профессиональной квалификации) [138],  $N_{MY}$  общее количество процессов идентификации угрозы;
- $-v_2^-=rac{N_{HY}^{CP}}{N_{HY}}$  частота срыва нейтрализации угрозы нарушения электроснабжения региона, где  $N_{HY}^{CP}$  количество срывов процессов нейтрализации угрозы,  $N_{HY}$  общее количество процессов нейтрализации угрозы.

Процесс формирования решения в данном случае также можно рассмотреть как цепь Маркова. В связи с тем, что такой подход не позволяет в достаточной мере учитывать динамику процесса, в настоящей работе целесообразно использовать непрерывные цепи Маркова. Для реализации такого подхода необходимо составить систему ДУ Колмогорова—Чепмена.

Для описания процесса изменения состояний на графе необходимо сделать аналогичные допущения и предположения, введенные в п. 2.2.

Система ДУ Колмогорова для рассматриваемой ситуации имеет следующий вид:

$$\begin{cases}
\frac{dP_{1}(t)}{dt} = -(\zeta^{+} + \lambda)P_{1}(t) + \zeta^{-}P_{2}(t) + \nu_{1}^{-}P_{4}(t) \\
\frac{dP_{2}(t)}{dt} = \zeta^{+}P_{1}(t) - (\zeta^{-} + \nu_{2}^{-})P_{2}(t) + \nu_{2}P_{4}(t) \\
\frac{dP_{3}(t)}{dt} = \lambda P_{1}(t) - \nu_{1}P_{3}(t) \\
\frac{dP_{4}(t)}{dt} = \nu_{2}^{-}P_{2}(t) + \nu_{1}P_{3}(t) - (\nu_{2} + \nu_{1}^{-})P_{4}(t)
\end{cases}$$
(23)

Руководствуясь аналогичными п. 2.2. выводами, можно составить следующие соотношения, которые являются решением данной системы:

$$\begin{cases}
P_{1} = \frac{\zeta^{-}v_{1}v_{2} + v_{1}v_{1}^{-}(\zeta^{-} + v_{2}^{-})}{\zeta^{-}v_{2}(\lambda + v_{1}) + v_{1}^{-}(\lambda + v_{1})(\zeta^{-} + v_{2}^{-}) + v_{1}(\zeta^{+} + \lambda)(v_{2} + v_{2}^{-}) + v_{1}(\zeta^{+}v_{1}^{-} + \zeta^{-}\lambda)} \\
P_{2} = \frac{v_{1}v_{2}(\zeta^{+} + \lambda) + \zeta^{+}v_{1}v_{1}^{-}}{\zeta^{-}v_{2}(\lambda + v_{1}) + v_{1}^{-}(\lambda + v_{1})(\zeta^{-} + v_{2}^{-}) + v_{1}(\zeta^{+} + \lambda)(v_{2} + v_{2}^{-}) + v_{1}(\zeta^{+}v_{1}^{-} + \zeta^{-}\lambda)} \\
P_{3} = \frac{\zeta^{-}\lambda v_{2} + \lambda v_{1}^{-}(\zeta^{-} + v_{2}^{-})}{\zeta^{-}v_{2}(\lambda + v_{1}) + v_{1}^{-}(\lambda + v_{1})(\zeta^{-} + v_{2}^{-}) + v_{1}(\zeta^{+} + \lambda)(v_{2} + v_{2}^{-}) + v_{1}(\zeta^{+}v_{1}^{-} + \zeta^{-}\lambda)} \\
P_{4} = \frac{v_{1}v_{2}^{-}(\zeta^{+} + \lambda) + \zeta^{-}\lambda v_{1}}{\zeta^{-}v_{2}(\lambda + v_{1}) + v_{1}^{-}(\lambda + v_{1})(\zeta^{-} + v_{2}^{-}) + v_{1}(\zeta^{+} + \lambda)(v_{2} + v_{2}^{-}) + v_{1}(\zeta^{+}v_{1}^{-} + \zeta^{-}\lambda)}
\end{cases}$$
(24)

Получив соотношения, определяющие вероятности нахождения ГИПУ ТС ОБЭР в состояниях « $S_1$ », « $S_2$ », « $S_3$ », « $S_4$ », можно выработать требования к свойствам процесса идентификации угрозы нарушения электроснабжения региона и к свойствам процесса нейтрализации угрозы нарушения электроснабжения региона при ГИПУ ТС ОБЭР [151] для достижения требуемого показателя безопасности электроснабжения региона:

$$P_{2} = \frac{v_{1}v_{2}(\zeta^{+} + \lambda) + \zeta^{+}v_{1}v_{1}^{-}}{\zeta^{-}v_{2}(\lambda + v_{1}) + v_{1}^{-}(\lambda + v_{1})(\zeta^{-} + v_{2}^{-}) + v_{1}(\zeta^{+} + \lambda)(v_{2} + v_{2}^{-}) + v_{1}(\zeta^{+}v_{1}^{-} + \zeta^{-}\lambda)}.$$
(25)

В этом соотношении связаны три параметра. Таким образом, была установлена аналитическая зависимость обобщенных характеристик обстановки  $(\Delta t_{IIV})$ , информационно-аналитической деятельности  $(\Delta t_{IIV})$  и нейтрализации угрозы  $(\Delta t_{IIV})$ , возникшей при ГИПУ ТС ОБЭР. Следуя работе [152], был получен СОФ ГИПУ ТС ОБЭР в форме соотношения (P2).

Соотношение (25) рассматривается как УСПОБ электроснабжения региона. Таким образом, на основе модели ГИПУ ТС ОБЭР с учётом целевого процесса было осуществлена системная интеграция процессов геоинформационной поддержки обеспечения безопасности электроснабжения региона с показателем безопасности.

Необходимо отметить, что достижение требуемого показателя безопасности электроснабжения региона возможно только при соблюдении следующего неравенства:

$$\frac{\Delta t_{HV} + \Delta t_{HV}}{\Delta t_{HV}} < 1. \tag{26}$$

Теперь базовая модель ГИПУ ТС ОБЭР имеет семь элементов. Структурная схема ГИПУ ТС ОБЭР, реализованная на базе системной интеграции процессов геоинформационной поддержки обеспечения безопасности электроснабжения региона с показателем безопасности, представлена на Рисунке 22.

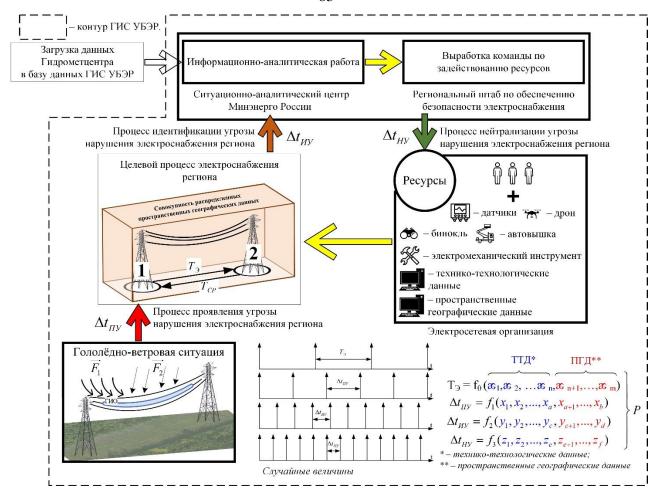


Рисунок 22 — Структурная схема ГИПУ ТС ОБЭР, реализованная на базе системной интеграции процессов геоинформационной поддержки обеспечения безопасности электроснабжения региона с показателем безопасности

#### 2.4. Анализ возможностей модели геоинформационной поддержки управления территориальной системой обеспечения безопасности электроснабжения региона в условиях деструктивного воздействия гидрометеорологических факторов

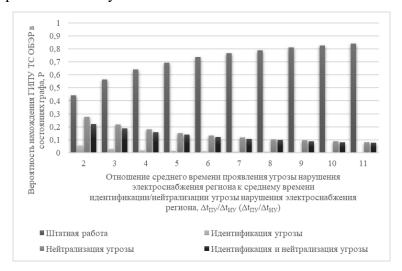
Модель ГИПУ ТС ОБЭР может быть представлена в виде следующих математических агрегатов:

- 1) без учета целевого процесса:  $P = f(\Delta t_{HV}, \Delta t_{HV}, \Delta t_{HV});$
- 2) с учетом целевого процесса:  $P = f(T_3, T_{CP}, \Delta t_{IIV}, \Delta t_{HV}, \Delta t_{HV})$ ;

где P – вероятность нахождения ГИПУ ТС ОБЭР в базовых состояниях графа на Рисунках 17 и 21, соответственно.

Изучая полученную модель ГИПУ ТС ОБЭР в рамках процесса геоинформационной поддержки обеспечения безопасности электроснабжения региона, можно математически подобрать необходимые средние значения времен, затрачиваемых на идентификацию и нейтрализацию угрозы нарушения электроснабжения региона с целью обеспечить требуемый показатель безопасности электроснабжения региона [153].

Смоделируем ситуацию:  $\Delta t_{IIV}=24$  ч,  $\Delta t_{IIV}=3$  ч,  $\Delta t_{HV}=1$  ч. Представим распределение вероятности нахождения ГИПУ ТС ОБЭР в базовых состояниях графа при увеличении отношения среднего времени проявления угрозы нарушения электроснабжения региона к среднему времени идентификации или нейтрализации угрозы нарушения электроснабжения региона на Рисунке 23.



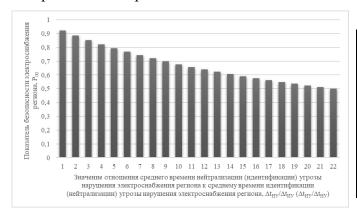
$\Delta t_{\Pi y}/\Delta t_{H y} \ (\Delta t_{\Pi y}/\Delta t_{H y})$	P <sub>00</sub>	P <sub>10</sub>	P <sub>01</sub>	P <sub>11</sub>
2	0,444	0,056	0,278	0,222
3	0,563	0,031	0,219	0,188
4	0,640	0,020	0,180	0,160
5	0,694	0,014	0,153	0,139
6	0,735	0,010	0,133	0,122
7	0,766	0,008	0,117	0,109
8	0,790	0,006	0,105	0,099
9	0,810	0,005	0,095	0,090
10	0,826	0,004	0,087	0,083
11	0,840	0,003	0,080	0,076

Рисунок 23 — Распределение вероятности нахождения ГИПУ ТС ОБЭР в четырёх состояниях графа

В соответствии с критерием гарантированного управления бесперебойным и устойчивым электроснабжением региона показатель безопасности электроснабжения региона достигает значения 0.8, считающегося наиболее приемлемым значением для удовлетворительного обеспечения безопасности объекта [124, 125], при отношении среднего времени проявления угрозы нарушения электроснабжения региона к среднему времени идентификации/нейтрализации угрозы нарушения электроснабжения региона равном 8:  $\Delta t_{\Pi y}/\Delta t_{H y}$  ( $\Delta t_{\Pi y}/\Delta t_{H y}$ )  $\geq$  8. Таким образом, рекомендуемые значения средних времен идентификации и нейтрализации угрозы нарушения электроснабжения региона должны быть меньше среднего времени проявления угрозы нарушения электроснабжения региона в 8 раз.

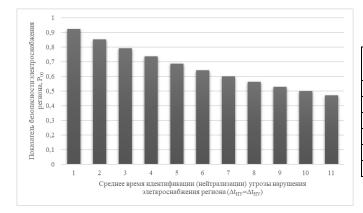
Зависимость на Рисунке 24 демонстрирует, что показатель безопасности электроснабжения региона достигает значения 0,8 и выше при менее 5-кратного превышения среднего времени нейтрализации (идентификации) угрозы нарушения электроснабжения

региона среднего времени идентификации (нейтрализации) угрозы нарушения электроснабжения региона. Зависимость, представленная на Рисунке 25, показывает, что при значении средних времен идентификации и нейтрализации угрозы нарушения электроснабжения региона менее 3 часов обеспечивается приближение показателя безопасности электроснабжения региона к 0,8. Таким образом, при ограничении на временные, материальные, финансовые и кадровые ресурсы обосновывается максимально достигаемый показатель безопасности электроснабжения региона.



$\Delta t_{\mathrm{Hy}}/\Delta t_{\mathrm{Hy}} \ (\Delta t_{\mathrm{Hy}}/\Delta t_{\mathrm{Hy}})$	P <sub>00</sub>	$\Delta t_{\rm Hy}/\Delta t_{\rm Hy} \ (\Delta t_{\rm Hy}/\Delta t_{\rm Hy})$	$P_{00}$
1	0,922	12	0,640
2	0,886	13	0,623
3	0,853	14	0,606
4	0,823	15	0,591
5	0,794	16	0,576
6	0,768	17	0,562
7	0,743	18	0,549
8	0,720	19	0,536
9	0,698	20	0,524
10	0,678	21	0,512
11	0,658	22	0,501

Рисунок 24 — Зависимость показателя безопасности электроснабжения региона от значения отношения среднего времени нейтрализации (идентификации) угрозы нарушения электроснабжения региона к среднему времени идентификации (нейтрализации) угрозы нарушения электроснабжения региона



$\Delta t_{\mathrm{HY}} = \Delta t_{\mathrm{HY}}$	$P_{00}$	$\Delta t_{\mathrm{HY}} = \ \Delta t_{\mathrm{HY}}$	$P_{00}$
1	0,922	7	0,599
2	0,852	8	0,563
3	0,790	9	0,529
4	0,735	10	0,498
5	0,685	11	0,470
6	0,640		_

Рисунок 25 — Зависимость показателя безопасности электроснабжения региона от равнозначных значений среднего времени идентификации и нейтрализации угрозы нарушения электроснабжения региона

Добавим к вышеприведенным переменным модели ГИПУ ТС ОБЭР следующие переменные:  $T_3 = 720$  ч (осуществление электроснабжения в течение месяца),  $T_{CP} = 240$  ч (среднее время проявления факта срыва целевой деятельности),  $V_1^- = 0{,}001$ ,  $V_2^- = 0{,}001$ . На Рисунке 26 представлена зависимость, анализ которой позволяет сделать вывод, что показатель

безопасности электроснабжения региона достигает значения 0,8, если значение среднего времени проявления угрозы нарушения электроснабжения региона равно 3 ч, 3,6 ч, 4 ч, 4,3 ч при отношении среднего времени проявления угрозы нарушения электроснабжения региона к среднему времени идентификации (нейтрализации) угрозы нарушения электроснабжения региона, равному 2, 3, 4, 5, соответственно. Согласно зависимости, представленной на Рисунке 27, если среднее время проявления угрозы нарушения электроснабжения региона равно 3,5 ч, 3,9 ч, 4,1 ч, 4,2 ч, то при отношении среднего времени нейтрализации угрозы нарушения электроснабжения региона к среднему времени её идентификации, равному 2, 3, 4, 5, соответственно, показатель безопасности принимает значение 0,8.

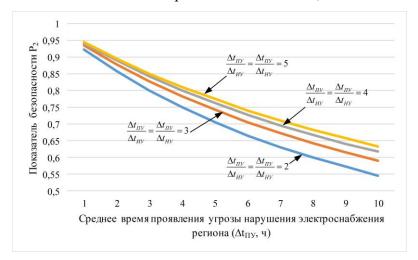


Рисунок 26 — Зависимость показателя безопасности электроснабжения региона от среднего времени проявления угрозы нарушения электроснабжения региона при различных отношениях среднего времени проявления угрозы нарушения электроснабжения региона к среднему времени идентификации или нейтрализации угрозы нарушения электроснабжения региона

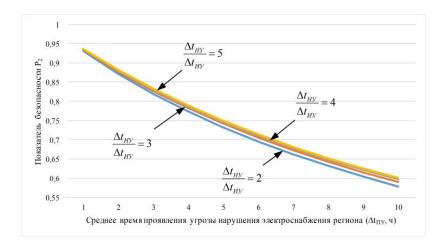


Рисунок 27 — Зависимость показателя безопасности электроснабжения региона от среднего времени проявления угрозы нарушения электроснабжения региона при различных отношениях среднего времени нейтрализации угрозы нарушения электроснабжения региона к среднему времени идентификации угрозы нарушения электроснабжения региона

Так как вектор управления содержит два компонента, то целесообразно представить зависимость показателя безопасности электроснабжения региона от отношения среднего времени идентификации (нейтрализации) угрозы нарушения электроснабжения региона к среднему времени проявления угрозы нарушения электроснабжения региона (Рисунок 28).

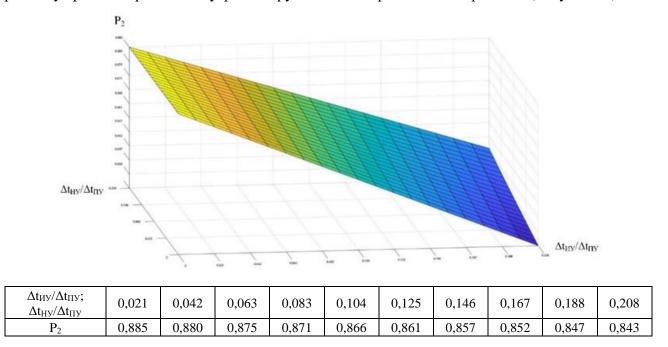


Рисунок 28 — Зависимость показателя безопасности электроснабжения региона от отношения среднего времени идентификации (нейтрализации) угрозы нарушения электроснабжения региона к среднему времени проявления угрозы нарушения электроснабжения региона

#### 2.5. Выводы по Главе 2

- 1). Базовыми процессами геоинформационной поддержки обеспечения безопасности электроснабжения региона являются:
  - процесс проявления угрозы нарушения электроснабжения региона;
  - процесс идентификации угрозы нарушения электроснабжения региона;
  - процесс нейтрализации угрозы нарушения электроснабжения региона.
  - 2). Человек в своей деятельности работает с 4 процессами:
  - целевой процесс (электроснабжение региона);
  - процесс проявления угрозы нарушения электроснабжения региона;
  - процесс идентификации угрозы нарушения электроснабжения региона;
  - процесс нейтрализации угрозы нарушения электроснабжения региона.
  - 3). Для управления безопасностью рекомендуется использовать модели, разработанные

путём применения подхода на основе синтеза, что позволяет решать обратную задачу управления. Для синтеза применяется ЕНП, базирующийся на ЗСЦО. На основе данного подхода можно осуществить системную интеграцию процессов геоинформационной поддержки обеспечения безопасности электроснабжения региона с показателем безопасности. В результате был получен СОФ ГИПУ ТС ОБЭР в виде математической модели решения человека следующего вида:

- без учета целевого процесса:  $P = f(\Delta t_{HV}, \Delta t_{HV}, \Delta t_{HV});$
- с учетом целевого процесса:  $P = f(T_{\ni}, T_{CP}, \Delta t_{IIV}, \Delta t_{HV}, \Delta t_{HV})$  .
- 4). Разработаны графы процесса формирования решений при ГИПУ ТС ОБЭР без учета и с учетом целевого процесса. На основе системы ДУ Колмогорова—Чепмена был получен критерий гарантированного управления безопасностью электроснабжения региона в условиях воздействия гидрометеорологических факторов.
- 5). Разработан формализованный критерий ГИПУ ТС ОБЭР, в связи с тем, что только формализованные связи позволяют нам получать адекватные результаты.
- 6). Имитационное моделирование ГИПУ ТС ОБЭР позволило выявить, что в целях обеспечения безопасности электроснабжения региона достаточно рассматривать поэтапно реализуемые ЛПР процессы идентификации угрозы нарушения электроснабжения региона и нейтрализации угрозы нарушения электроснабжения региона.
- 7). Модель ГИПУ ТС ОБЭР позволяет подобрать необходимые соотношения между показателями процессов геоинформационной поддержки обеспечения безопасности электроснабжения региона для гарантированного достижения цели деятельности. Например, для реализации показателя эффективности ГИПУ ТС ОБЭР, равного 0,8, необходимо, чтобы интенсивности идентификации угрозы нарушения электроснабжения региона и нейтрализации угрозы нарушения электроснабжения региона превышали интенсивность проявления угрозы нарушения электроснабжения региона в 8 раз.

*При решении второй задачи* было установлено, что необходимо разработать методику ГИПУ ТС ОБЭР для достижения требуемого показателя безопасности электроснабжения региона.

Глава 3. Разработка методики геоинформационной поддержки управления территориальной системой обеспечения безопасности электроснабжения региона в условиях деструктивного воздействия гидрометеорологических факторов на базе применения ГИС

# 3.1. Общий подход к разработке методики геоинформационной поддержки управления территориальной системой обеспечения безопасности электроснабжения региона в условиях деструктивного воздействия гидрометеорологических факторов на базе применения ГИС

Говорить о нормальном (штатном) функционировании геообъекта можно только при условии обеспечения его безопасности. Безопасность — свойство системы сохранять свое предназначение (в данном случае — электроснабжение потребителей). Нарушения электроснабжения особенно характерны для ЭС, расположенных в гололёдных районах, где ВЛЭП подвержены деструктивным воздействиям гидрометеорологических факторов. Практика показывает, что гололёдные аварии на ВЛЭП относятся к числу наиболее тяжелых и могут дезорганизовать электроснабжение больших экономических районов.

ПГД имеют фундаментальное значение для установления взаимосвязи между различными явлениями. Для этого их необходимо собирать, хранить, анализировать и представлять с помощью специально разработанных платформ [154]. ГИС являются наиболее подходящими платформами для этих целей. Интеграция ГИС в процессы геоинформационной поддержки обеспечения безопасности электроснабжения региона позволяет автоматически оценивать ситуацию на определенной территории и принимать необходимые меры по устранению возможной угрозы нарушения электроснабжения. Инфраструктура ГИС должна охватывать соответствующие подходы к сбору данных, методы геопространственного анализа для преобразования и интерпретации ПГД и представления полученных результатов в виде, обеспечению пригодном для применения в целях деятельности по безопасности электроснабжения региона.

Назначение ГИС в системе обеспечения безопасности объекта – оптимизировать и упростить процессы формирования решений на всех иерархических уровнях ЛПР и повысить эффективность использования имеющихся ресурсов [155].

Такой подход к использованию ГИС предполагает анализ имитационных моделей объекта в текущих условиях окружающей среды для предотвращения аварийных ситуаций (моделирование угроз, оценка уязвимости) и разработки предложений по устранению угроз, обеспечивая при этом снижение влияния человеческого фактора.

Несомненно, что упреждающее снижение вероятности срыва процесса электроснабжения региона является предпочтительным и гораздо более эффективным во всех аспектах по сравнению с действиями аварийных служб при реагировании и восстановлении объектов электроэнергетической системы [143, 156]. Следовательно, стратегии планирования и предотвращения срыва электроснабжения должны включать краткосрочный, среднесрочный и долгосрочный мониторинг и оценку вариаций такого срыва [157, 158]. Для достижения требуемого уровня безопасности геообъекта на геопространстве определяются и исследуются определенные критерии опасности: экономические (перебои в функционировании и потери производительности, повреждение имущества критически важной инфраструктуры, прекращение электроснабжения социально значимых объектов (общественные здания, школы, больницы), сетей связи и т.п.), социальные (гибель и ранение людей при нахождении вблизи поврежденного участка ВЛЭП, потребность людей в краткосрочной или долгосрочной помощи после прекращения электроснабжения), воздействие на окружающую среду (гибель и ранение животных, пожар), и другие (политические последствия, потеря доверия к местным властям и т.д.).

Кроме того, ГИПУ ТС ОБЭР для снижения вероятности наступления негативного события должна включать методологию мониторинга и оценки эффективности принятия различных мер с использованием установленных критериев [159], таких как прямые потери, косвенные затраты, затраты на реализацию превентивных мер и другие возможные косвенные выгоды, отрицательные и / или положительные побочные эффекты.

В ходе проведенного исследования была осуществлена системная интеграция процессов геоинформационной поддержки обеспечения безопасности электроснабжения региона с показателем безопасности, на основе которой разрабатывается ГИПУ ТС ОБЭР.

В контексте ТС ОБЭР межведомственное взаимодействие между субъектами управления (Региональный штаб по обеспечению безопасности электроснабжения (закладывает требования к процессу нейтрализации угрозы нарушения электроснабжения), САЦ Минэнерго России (закладывает требования к процессу идентификации угрозы нарушения электроснабжения региона), электросетевая организация (закладывает требования к целевому процессу)) требует единой модели, которая объединит основные структурные элементы, чтобы обеспечить адекватное формирование процесса формирования решений [160]. Модель ГИПУ ТС ОБЭР, основанная на использовании ТТД и ПГД, как раз позволяет обеспечить межведомственное взаимодействие данных субъектов управления.

В контуре ГИПУ ТС ОБЭР целесообразно выделить два объекта, характеристики которых необходимо получить: ВЛЭП и гидрометеорологические факторы. Описать характеристики данных объектов необходимо при помощи ТТД и ПГД. Для того чтобы определить, что должно включать информационное обеспечение ГИПУ ТС ОБЭР, необходимо рассмотреть процесс проявления угрозы нарушения электроснабжения региона.

В первую очередь рассматривается образование ГИО на проводе ВЛЭП. Совокупность гидрометеорологических факторов, при которых образуется или отсутствует тот или иной вид ГИО, характеризует обстановку на определенной территории за конкретный период времени. Обозначим такую совокупность символом «С», тогда за время t территорию можно охарактеризовать как:

$$C_t^T = (C_1 \qquad C_2 \qquad \dots \qquad C_n). \tag{27}$$

Объединение последовательностей значений параметров гидрометеорологических факторов позволяет получить матричное представление ГВС в районе пролегания контролируемой ВЛЭП:

$$C_i^T = \begin{pmatrix} t_{603\partial i} & V_i & P_i & Z_i \end{pmatrix}, \tag{28}$$

где  $t_{\text{возді}}$  – температура окружающей среды, °С;

 $V_i$  – скорость ветра, м/с;

 $P_i$  – атмосферное давление, мм. рт. ст.;

 $Z_i$  – атмосферное явление.

Полученная матрица отражает ГВС в районе пролегания рассматриваемой ВЛЭП.

Примем следующие обозначения:  $V_{\text{maxi}}$  – максимальная скорость ветра, м/с;  $Z_m$  – морось;  $Z_d$  – дождь;  $Z_t$  – туман;  $Z_s$  – мокрый снег.

Тогда благоприятствующие образованию ГИО условия (используя приведённые в п. 1.2. данные) можно представить в следующем виде:

– для гололёда:

$$\begin{pmatrix}
-5 \le t_{603\partial i} < 0 \\
2 \le V_i < 15 \\
V_{\max i} < 40 \\
Z_m \lor Z_d \lor Z_t
\end{pmatrix};$$
(29)

– для зернистой (плотной) изморози:

$$\begin{pmatrix}
-20 \le t_{\theta \circ 3 \partial i} < -3 \\
1 \le V_i < 15 \\
V_{\max i} < 40 \\
Z_m \lor Z_t
\end{pmatrix};$$
(30)

– для кристаллической изморози:

$$\begin{pmatrix}
-30 \le t_{603\delta i} < -5 \\
0 \le V_i < 3 \\
5 \le V_{\max i} < 7 \\
Z_t
\end{pmatrix};$$
(31)

- для смешанного отложения:

$$\begin{pmatrix} -20 \le t_{aosoi} < 0 \\ 2 \le V_i < 15 \\ 30 \le V_{\max i} < 40 \\ Z_m \lor Z_d \lor Z_t \end{pmatrix}; \tag{32}$$

для мокрого снега:

$$\begin{pmatrix} -2 \le t_{603\partial i} < +1 \\ 0 \le V_i < 10 \\ 20 \le V_{\max i} < 30 \\ Z_s \end{pmatrix}. \tag{33}$$

При температуре провода ВЛЭП ( $T_{прi}$ ) выше 0 градусов и влажности воздуха ( $\phi_i$ ) менее 80%, обстановка для образования гололёда не формируется. Условия исключения образования ГИО на поверхности провода можно представить в следующем виде:

$$\begin{pmatrix}
T_{npi} > 0 \\
\varphi_i < 80\%
\end{pmatrix}.$$
(34)

Определить толщину ГИО на поверхности провода можно по следующей формуле (в случае, если направление ветра перпендикулярно оси провода) [161, 162]:

$$\Delta R = \frac{WV_d \Delta t_{FMO}}{\rho_i \pi} \sqrt{1 + \left(\frac{V}{V_d}\right)^2} , \qquad (35)$$

где W – содержание воды в воздухе, кг/м<sup>3</sup>;

 $V_d$  – скорость падения капли воды, м/с;

 $\Delta t_{\Gamma UO}$  – время образования ГИО, с;

 $\rho_i$  – плотность ГИО, кг/м<sup>3</sup>;

V – скорость ветра, м/с.

Но так как направление ветра по отношению к оси провода может изменяться в пределах от 0 до  $90^{\circ}$ , то была предложена следующая формула для оценки толщины ГИО [162]:

$$\Delta R = \frac{W \cdot V_i \cdot \Delta t_{IMO} \cdot (0, 1 + 0, 9 \cdot \cos^3(90 - \gamma))}{\pi \cdot \rho_i},$$
(36)

где W — содержание воды в воздухе, кг/м $^3$ ;

 $V_i$  – скорость капли воды при столкновении с поверхностью провода, м/с;

 $\Delta t_{TUO}$  — среднее время образования ГИО, с;

у – угол между осью провода и потоком ветра;

 $\rho_i$  – плотность ГИО, кг/м<sup>3</sup>.

Скорость капли воды при столкновении с поверхностью провода можно определить по формуле:

$$V_i = \sqrt{V_d^2 + V^2 + 2 \cdot V_d \cdot V \cdot \cos \beta}, \qquad (37)$$

где  $V_{\scriptscriptstyle d}$  — скорость падения капли воды, м/с (зависит от атмосферного явления);

 $\beta$  – угол между векторами  $V_d$  и V.

Для определения возможности обрыва провода требуется обработать данные по трем блокам. Блоки представлены в приложении В.

Первый блок включает в себя алгоритм определения проявления угрозы нарушения электроснабжения региона, который представлен на Рисунке В.1. Цель данного алгоритма заключается в анализе ПГД в контуре ГИС УБЭР с целью прогнозирования возможности образования ГИО на поверхности провода.

Второй блок (Рисунок В.2) посвящен алгоритму определения предполагаемой толщины стенки ГИО на основе обработки ПГД в ГИС УБЭР.

Третий блок (Рисунок В.3) является заключительным и содержит расчет возможности обрыва провода. Если обрыв провода возможен, то предпринимаются действия по его предотвращению (по нейтрализации угрозы нарушения электроснабжения региона).

Таким образом, можно сделать вывод, что в рамках ГИПУ ТС ОБЭР среднее время целевого процесса, среднее время проявления факта срыва целевой деятельности, средние времена процессов геоинформационной поддержки обеспечения безопасности электроснабжения региона являются функциями от ТТД и ПГД:

$$T_{\mathfrak{I}} = f(\underbrace{l_{i}, U_{i}, K_{i}}_{TT\mathcal{I}}, \underbrace{t_{eos}}_{\Pi T\mathcal{I}}, \underbrace{v_{i}}_{\Pi T\mathcal{I}}) , \qquad (38)$$

$$T_{CP} = f(\underbrace{K_i, F_i, M_i}_{TTJ}, \underbrace{t_{aosoi}, V_i}_{\Pi TJ}) , \qquad (39)$$

$$\Delta t_{IIV} = f\left(\underbrace{r_i, \rho_{npi}, l_i, T_{npi}}_{TTI}, \underbrace{\varphi_i, t_{so3di}, \gamma_i, V_i, W_i}_{\Pi TIJ}\right) , \tag{40}$$

$$\Delta t_{HV} = f(\underbrace{l_i, R_i, I_i}_{TTZ}, \underbrace{\varphi_i, t_{eos\partial i}, \gamma_i, V_i, W_i}_{\Pi TZ}) \quad , \tag{41}$$

$$\Delta t_{HV} = f(\underbrace{l_i, R_i, N_i}_{TTJ}, \underbrace{\varphi_i, t_{eosoi}, \gamma_i, V_i, W_i}_{TTJ}) , \qquad (42)$$

где  $l_i$  – протяженность участка ВЛЭП, м;  $U_i$  – напряжение ВЛЭП, кВ;  $K_i$  – категория потребителей;  $t_{\text{воздi}}$  – температура окружающей среды, °C;  $V_i$  – скорость ветра, м/с;  $F_i$  – допустимая нагрузка на линию электропередачи, Па;  $M_i$  – ресурсы технического оснащения и

кадрового обеспечения процесса передачи электроэнергии;  $r_i$  – радиус провода ВЛЭП, мм;  $\rho_{npi}$  – плотность материала провода,  $\kappa r/m^3$ ;  $T_{npi}$  – температура провода, °C;  $\phi_i$  – влажность воздуха, %;  $\gamma_i$  – угол между осью провода и потоком ветра, °;  $W_i$  – содержание воды в воздухе,  $\kappa r/m^3$ ;  $R_i$  – удаленность участка ВЛЭП от ответственного структурного подразделения, m;  $I_i$  – ресурсы технического оснащения и кадрового обеспечения процесса идентификации угрозы нарушения электроснабжения региона;  $N_i$  – ресурсы технического оснащения и кадрового обеспечения процесса нейтрализации угрозы нарушения электроснабжения региона.

При использовании вышеприведённых результатов появляется возможность выработать требования к набору данных информационного обеспечения ГИПУ ТС ОБЭР в условиях обледенения ВЛЭП. Загрузка данных Гидрометцентра в ГИС УБЭР позволяет в автоматическом режиме определить возможность образования на ВЛЭП ГИО. Для определения характеристик текущей обстановки с определенными условиями ГВС на рассматриваемой территории, необходимо иметь следующие данные геопространства [163 – 165]:

- параметры участка ВЛЭП (радиус провода, плотность материала провода, протяженность участка линии, температура провода, категория потребителей) ТТД;
- характеристики гидрометеорологических факторов (влажность, температура окружающего воздуха, направление ветра, скорость ветра, содержание воды в воздухе)

– ПГД.

Таким образом, разработанная на основе вышеприведённых результатов структурная схема алгоритма методики ГИПУ ТС ОБЭР представлена в следующем виде (Рисунок 29). Основные этапы реализации методики ГИПУ ТС ОБЭР в соответствии с Рисунком 29:

- 1. Обработка в автоматическом режиме ПГД и ТТД САЦ Минэнерго России каждые три часа (время получения обновлённого прогноза).
  - 2. Автоматический расчет толщины стенки ГИО.
- 3. Автоматический расчет суммарной нагрузки на провод воздушной линии электропередачи при ГВС.
- 4. Автоматический расчет значения среднего времени проявления угрозы нарушения электроснабжения региона.
- 5. Определение ограничений на ресурсы по идентификации угрозы нарушения электроснабжения региона.
- 6. Выезд оперативно-выездной бригады на участок ВЛЭП и/или фиксация нарастания ГИО при помощи датчиков с целью идентификации угрозы нарушения электроснабжения региона.

- 7. Идентификация угрозы нарушения электроснабжения региона (выявление факта образования ГИО на проводе ВЛЭП).
- 8. Разработка мероприятий по нейтрализации угрозы нарушения электроснабжения региона Региональным штабом по обеспечению безопасности электроснабжения.
- 9. Автоматический расчет показателя безопасности электроснабжения региона с учётом текущего плана мероприятий по нейтрализации угрозы нарушения электроснабжения региона.
- 10. Сравнение рассчитанного показателя безопасности с требуемым показателем безопасности электроснабжения региона.
- 11. При достижении показателя безопасности электроснабжения региона требуемого значения реализация мероприятий по нейтрализации угрозы нарушения электроснабжения региона Электросетевой организацией.
- 12. При несоответствии показателя безопасности электроснабжения региона требуемому значению автоматический расчет требуемого значения среднего времени нейтрализации угрозы нарушения электроснабжения региона.
- 13. Разработка перечня мероприятий по нейтрализации угрозы нарушения электроснабжения региона Региональным штабом по обеспечению безопасности электроснабжения.
- 14. При отсутствии ограничений на ресурсы по идентификации угрозы нарушения электроснабжения региона автоматический расчет требуемого значения среднего времени идентификации угрозы нарушения электроснабжения региона.
- 15. Разработка мероприятий по идентификации угрозы нарушения электроснабжения региона САЦ Минэнерго России.
- 16. Осуществление идентификации угрозы нарушения электроснабжения региона на базе применения установленного технического оснащения.
- 17. Идентификация угрозы нарушения электроснабжения региона (выявление факта образования ГИО на проводе ВЛЭП).

Для реализации пунктов 2, 3, 4, 5, 8, 9, 10, 12, 13, 14, 15 методики ГИПУ ТС ОБЭР были разработаны программы для ЭВМ, свидетельства о государственной регистрации которых представлены в приложении Ё. Программный код разработанных программ для ЭВМ может быть положен в основу программного обеспечения ГИС УБЭР.

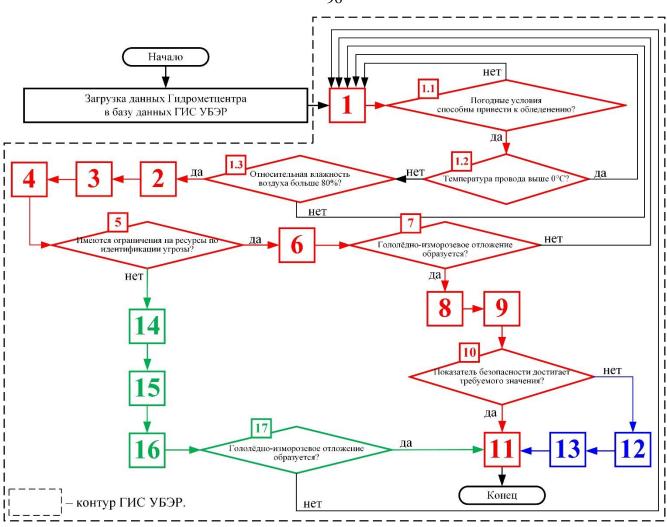


Рисунок 29 — Структурная схема алгоритма методики ГИПУ ТС ОБЭР

# 3.2. Основные соотношения методики геоинформационной поддержки управления территориальной системой обеспечения безопасности электроснабжения региона в условиях деструктивного воздействия гидрометеорологических факторов на базе применения ГИС

Переходы ГИПУ ТС ОБЭР между состояниями процесса формирования решения характеризуются определенными переменными [166 – 168]. На Рисунке 30 показана взаимосвязь переменных модели ГИПУ ТС ОБЭР с субъектами управления.

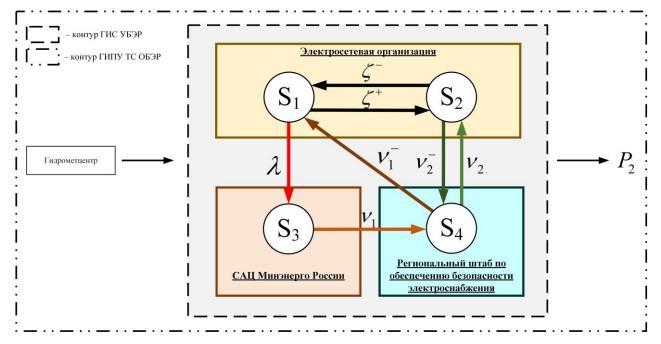


Рисунок 30 – Взаимосвязь субъектов ГИПУ ТС ОБЭР с переменными модели ГИПУ ТС ОБЭР

Значение переменной  $\zeta^+$  ЛПР не в состоянии изменить, так как она зависит от характеристик самой электроэнергетической системы (задаётся требованиями к процессу передачи электрической энергии). Переменная  $\zeta^-$  характеризует срыв целевой деятельности и представляет собой приемлемый (допустимый) риск. Приемлемый (допустимый) риск – риск, при котором объект управления выполняет свое предназначение с требуемым показателем безопасности [169]. То есть имеется возможность допустить срыв целевого процесса с учётом соблюдения количественных и качественных показателей процесса передачи электрической энергии от источника до потребителя. ЛПР допускает такой риск, который позволяет достичь показателя безопасности электроснабжения региона не ниже требуемого:

$$\lim_{\zeta^- \to \zeta^{-*}} P_2 = P_2^* , \tag{43}$$

где  $P_2^*$  — заданная предельная вероятность идентификации и нейтрализации угрозы нарушения электроснабжения региона (требуемый показатель безопасности электроснабжения региона);

 $\zeta^{-*}$  — частота срыва целевого процесса, которая допускается и позволяет достичь требуемого значения  $P_2^*$ .

Важно помнить, что при обеспечении безопасности электроснабжения региона  $\zeta^-$  никогда не реализуется, это только право на ошибку, смысл в том, что ЛПР достигает цели при заданном допустимом риске.

Каждая деятельность человека характеризуется приемлемым (допустимым) риском, обусловленным техническим, экономическим, социальным и политическим аспектами. Но при

необходимости допустимый риск может быть уменьшен, если для этого имеются определенные ресурсы.

Допустимый риск закладывается либо на этапе проектирования системы управления с целью обеспечения заданных количественных и качественных показателей процесса, например, при электроснабжении потребителей существует нормативно установленная продолжительность перерыва, тем самым задается среднее время повторения факта срыва, либо на этапе эксплуатации объекта управления в случае изменения его технико-технологических показателей или требований к целевому процессу.

В осенне-зимний период (ОЗП), когда наблюдаются гидрометеорологические условия окружающей обстановки, наиболее благоприятствующие образованию ГИО, ГИПУ ТС ОБЭР, разработанная на базе системной интеграции процессов геоинформационной поддержки обеспечения безопасности электроснабжения региона с показателем безопасности, позволяет решать обратную задачу управления [163]. В частности, можно установить обоснованные требования к частоте срыва целевого процесса.

В связи с тем, что ГИПУ ТС ОБЭР осуществляется на базе использования информационных ресурсов в виде ПГД и ТТД, наиболее подходящим инструментом для его реализации является ГИС УБЭР [170], применение которой позволяет получить переменные модели ГИПУ ТС ОБЭР. Значение переменной  $\lambda$  определяется путём обработки данных, полученных от Гидрометцентра [171]. Значение переменной  $\nu_1$  определяется средним временем обработки ТТД и ПГД, полученных на базе применения ГИС УБЭР [172, 173]. При этом  $\lambda$  зависит от гидрометеорологических условий на рассматриваемой территории в конкретный промежуток времени и характеристик ВЛЭП, в то время как  $\nu_1$  задается САЦ Минэнерго России для достижения требуемого показателя безопасности электроснабжения региона. Переменная  $\nu_2$  задается Региональным штабом по обеспечению безопасности электроснабжения, исходя из характеристик системы оперативно-диспетчерского управления и последующей реализации разработанных мероприятий Электросетевой организацией [174, 175]. Переменные  $\nu_1^-$  и  $\nu_2^-$  задаются исходя из опыта и квалификации персонала, задействованного при управлении процессом передачи электроэнергии.

При обеспечении безопасности электроснабжения региона участвует человек (оператор), который использует технические средства в процессе своей деятельности. Таким образом, в процессах идентификации и нейтрализации угроз обнаруживаются две составляющие: человеческий фактор (ЧФ) и техническое оснащение (ТО). Разумеется, что данными показателями нужно оперировать в интересах достижения цели деятельности [163, 169].

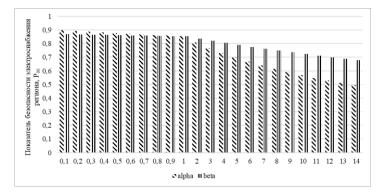
Среднее время идентификации угрозы нарушения электроснабжения региона имеет 2 составляющие:  $\Delta t_{HV}^{TO}$  — среднее время сокращения идентификации угрозы при помощи технических средств,  $\Delta t_{HV}^{Y\Phi}$  — среднее время идентификации угрозы самим человеком:

$$\Delta t_{HV} = \Delta t_{HV}^{Y\phi} + \Delta t_{HV}^{TO} \,. \tag{44}$$

Аналогично для среднего времени нейтрализации угрозы нарушения электроснабжения региона:

$$\Delta t_{HV} = \Delta t_{HV}^{Y\Phi} + \Delta t_{HV}^{TO} \,. \tag{45}$$

На Рисунке 31 представлена зависимость показателя безопасности от  $\alpha \left( \Delta t_{HV}^{V\phi} / \Delta t_{HV}^{TO} \right)$  и  $\beta \left( \Delta t_{HV}^{V\phi} / \Delta t_{HV}^{TO} \right)$ . Отмечается, что техническое оснащение позволяет значительно повысить показатель безопасности, при этом его влияние на процессы идентификации и нейтрализации угрозы нарушения электроснабжения региона не одинаково. Используя полученные результаты, ЛПР может выработать требования к техническому оснащению деятельности персонала электроэнергетической системы, к обучению персонала или профессиональной подготовке различных категорий сотрудников для достижения требуемого показателя безопасности электроснабжения региона.



α	$P_{00}$	α	$P_{00}$	ß	$P_{00}$	ß	$P_{00}$
0,1	0,898	4	0,731	0,1	0,869	4	0,805
0,2	0,893	5	0,698	0,2	0,867	5	0,790
0,3	0,888	6	0,668	0,3	0,865	6	0,776
0,4	0,883	7	0,640	0,4	0,864	7	0,762
0,5	0,878	8	0,614	0,5	0,862	8	0,749
0,6	0,873	9	0,591	0,6	0,860	9	0,736
0,7	0,868	10	0,569	0,7	0,858	10	0,723
0,8	0,863	11	0,549	0,8	0,857	11	0,711
0,9	0,858	12	0,530	0,9	0,855	12	0,699
1	0,853	13	0,512	1	0,853	13	0,688
2	0,808	14	0,495	2	0,837	14	0,677
3	0,768	_	_	3	0,821	_	_

Рисунок 31 — Зависимость показателя безопасности электроснабжения региона от значения α (отношение среднего времени идентификации угрозы самим человеком к среднему времени сокращения идентификации угрозы при помощи технических средств) и β (отношение среднего времени нейтрализации угрозы самим человеком к среднему времени сокращения нейтрализации угрозы при помощи технических средств)

Таким образом, интенсивность идентификации угрозы нарушения электроснабжения региона и интенсивность нейтрализации угрозы нарушения электроснабжения региона (предотвращения нарушения электроснабжения региона) можно представить в следующем виде, соответственно:

$$v_{1} = \frac{1}{\Delta t_{HV}^{q\phi} + \Delta t_{HV}^{TO}},\tag{46}$$

$$v_2 = \frac{1}{\Delta t_{HV}^{q\phi} + \Delta t_{HV}^{TO}} \,. \tag{47}$$

Проблема учета человеческого фактора очевидна. Каждый человек имеет собственные психологические и физиологические показатели, которые к тому же могут меняться с течением времени из-за влияния тех или иных условий и обстоятельств. Хотя можно предпринять попытку усреднить среднее время идентификации ИЛИ нейтрализации нарушения угрозы электроснабжения региона, пользуясь данными об обучении персонала или профессиональной подготовке категорий сотрудников. Тем не менее, несомненно, техническое оснащение играет важную роль в процессах идентификации и нейтрализации угроз, так как позволяет значительно сократить время их продолжительности. Используя вышеприведенные результаты, ЛПР может выработать требования к техническому оснащению персонала электроэнергетической системы для достижения требуемого показателя эффективности ГИПУ ТС ОБЭР.

# 3.3. Анализ возможностей методики геоинформационной поддержки управления территориальной системой обеспечения безопасности электроснабжения региона в условиях деструктивного воздействия гидрометеорологических факторов на базе применения ГИС

Использование ПГД и ТТД как основы информационного обеспечения ГИПУ ТС ОБЭР в целях обеспечения безопасности электроснабжения региона позволяет решать обратную задачу управления. При прямой задаче управления ЛПР не изменяет параметры ГИПУ ТС ОБЭР и получает тот показатель безопасности электроснабжения региона, который обусловлен сложившейся ГВС. Но при своевременной идентификации угрозы нарушения электроснабжения региона ЛПР в состоянии достичь требуемого показателя, контролируя состав и перечень ресурсов и подбирая персонал с соответствующими квалификацией и опытом.

Структурная схема ГИПУ ТС ОБЭР с указанием этапов методики ГИПУ ТС ОБЭР представлена на Рисунке 32.

Впервые разработанная методика ГИПУ ТС ОБЭР на базе применения ГИС УБЭР позволяет рассматривать два варианта управления процессом геоинформационной поддержки обеспечения безопасности электроснабжения региона [176]:

- путём решения прямой задачи управления (задача анализа), которая состоит в оценке результата функционирования системы при заданных ее свойствах и условиях применения. При этом вычисляются и анализируются показатели эффективности. В итоге осуществляется перебор вариантов решения, которые не позволяют достигать цели деятельности;
- путём решения обратной задачи управления (задача синтеза), которая связана с определением свойств, характеристик и условий использования системы, при которых эффективность системы будет оптимальной (требуемой или максимальной) в смысле выбранного критерия.

При решении прямой задачи путем подстановки переменных в соотношение (25) определяется показатель безопасности электроснабжения региона. Затем проводится сравнение полученного показателя с заранее определенным допустимым показателем. Если выявляется несоответствие (показатель безопасности электроснабжения региона ниже допустимого), то решается обратная задача (путем подстановки в соотношение (25) необходимых значений определяется, какое значение должны иметь  $V_1$  и  $V_2$ ).

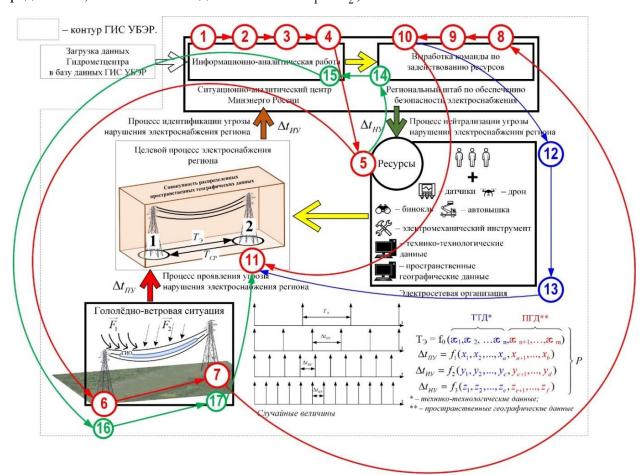


Рисунок 32 – Структурная схема ГИПУ ТС ОБЭР с указанием этапов методики ГИПУ ТС ОБЭР

Предложенная в рамках данного исследования методика ГИПУ ТС ОБЭР обладает рядом преимуществ, среди которых возможность оперировать средними временами процессов идентификации и нейтрализации угрозы нарушения электроснабжения региона и задавать необходимый показатель эффективности ГИПУ ТС ОБЭР.

Структурная схема алгоритма расчёта показателя безопасности электроснабжения региона представлена на Рисунке 33 (с указанием этапов реализации методики ГИПУ ТС ОБЭР).

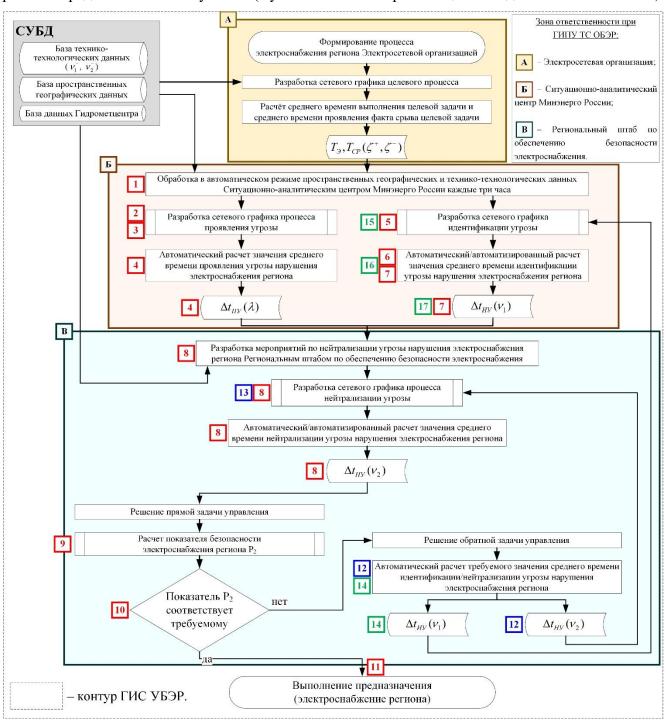


Рисунок 33 — Структурная схема алгоритма расчёта показателя безопасности электроснабжения региона

Получение переменных модели ГИПУ ТС ОБЭР основано на разработке сетевых графиков целевого процесса и процессов проявления, идентификации и нейтрализации угрозы нарушения электроснабжения региона. Сетевые графики предназначены для установления связи временных характеристик УСПОБ электроснабжения региона с требуемыми работами для реализации СОФ. Правила расчета показателей сетевых графиков, которые позволяют определять средние времена проявления, идентификации и нейтрализации угрозы нарушения электроснабжения региона, приведены в Приложении Г. Примеры разработанных сетевых графиков при ГИПУ ТС ОБЭР приведены в Приложении Д. Также были разработаны сетевые графики процессов обеспечения безопасности электроснабжения региона в условиях деструктивного воздействия гидрометеорологических факторов без реализации ГИПУ ТС ОБЭР с целью сравнения полученных результатов с результатами геоинформационного моделирования ГИПУ ТС ОБЭР. В приложении Е представлены сетевые графики и результаты расчётов основных показателей.

Среди всех очевидных преимуществ применения ГИС УБЭР необходимо отметить возможность автоматического построения карт с указанием полей распределения показателя безопасности электроснабжения региона вдоль участка ВЛЭП для определения соответствия требуемому показателю безопасности. Пример подобного построения полей представлен на Рисунке 34.

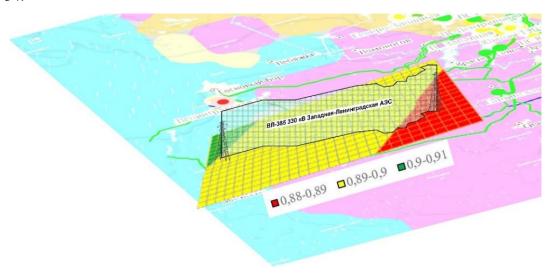


Рисунок 34 — Пример построения полей распределения показателя безопасности электроснабжения региона по территории

Формирование процессов с наперёд заданными свойствами гарантирует достижение цели деятельности. По этой причине в области безопасности необходимо решать обратную задачу управления. В Таблице 4 представлен пример реализации разработанной методики ГИПУ ТС ОБЭР на основе решения прямой и обратной задачи управления.

Таблица 4 – Результаты решения прямой и обратной задачи управления при реализации ГИПУ ТС ОБЭР

	1. Решение прямой задачи управления				
Переменная	Значение переменной		$\mathbf{P}_2$		
ζ+	0,0014 (целевой процесс выполняется в течение месяца)	$T_{\mathfrak{I}} = 720$ ч.			
ζ-	0,0042 (количество возможных перерывов электроснабжения региона в течение месяца $-3$ )	$T_{CP} = 240$ ч.			
λ	0,0208 (интенсивность проявления угрозы нарушения электроснабжения региона)	$\Delta t_{\Pi \mathrm{Y}} = 48 \ \mathrm{ч}.$			
$\nu_1$	0,0217 (интенсивность идентификации угрозы нарушения электроснабжения региона)	$\Delta t_{\rm HY} = 46$ ч.	0,73		
V <sub>2</sub>	1 (интенсивность нейтрализации угрозы нарушения электроснабжения региона)	$\Delta t_{\mathrm{HY}} = 1$ ч.			
$ u_1^- $	0,001 (частота срыва процесса идентификации угрозы нарушения электроснабжения региона)	_			
$ u_2^- $	0,001 (частота срыва процесса нейтрализации угрозы нарушения электроснабжения региона)	_			
	2. Решение обратной задачи управления				
Переменная	Значение переменной		_		
$\zeta^+$	0,0014 (целевой процесс выполняется в течение месяца)	$T_{9} = 720$ ч.			
ζ-	0,0042 (количество возможных перерывов электроснабжения региона в течение месяца $-3$ )	$T_{CP} = 240$ ч.			
λ	0,0208 (интенсивность проявления угрозы нарушения электроснабжения региона)	$\Delta t_{\Pi \mathrm{Y}} = 48 \ \mathrm{ч}.$	$\Delta t_{HY} =$		
$ u_1^- $	0,001 (частота срыва процесса идентификации угрозы нарушения электроснабжения региона)	_	14 ч. Δt <sub>HУ</sub> =		
$ u_2^- $	0,001 (частота срыва процесса нейтрализации угрозы нарушения электроснабжения региона)	_	1 ч.		
P <sub>2</sub>	0,8 (показатель безопасности электроснабжения региона может выбираться исходя из целесообразности затрат и выгод с учетом ограничений на ресурсы)	_			

По результатам проведенного расчёта было установлено, что при решении прямой задачи управления показатель безопасности электроснабжения региона равен 0,73. С целью достижения показателем безопасности значения 0,8 необходимо, чтобы среднее время идентификации и нейтрализации угрозы нарушения электроснабжения региона равнялось 14 ч и 1 ч, соответственно.

В результате проведенного анализа возможностей подходов для обеспечения безопасности электроснабжения региона было установлено, что одним из наиболее эффективных способов определения начала процесса гололёдообразования является применение датчиков.

Результаты сравнительного расчёта показали, что применение методики ГИПУ ТС ОБЭР с требуемым набором ТТД и ПГД позволяет повысить показатель безопасности на 13,7%:  $P_2 = 0,73$  (при  $\Delta t_{\rm HV} = 46$  ч – среднее время срабатывания датчиков гололёдообразования) по сравнению с  $P_2 = 0,83$  (при  $\Delta t_{\rm HV} = 3$  ч – среднее время получения обновлённого прогноза).

Ещё одним из преимуществ разработанной методики на базе применения ГИС УБЭР является определение кратчайших путей по расстоянию и длительности до объекта и пунктов резерва.

Смоделируем гипотетическую ситуацию по выбору метода нейтрализации угрозы нарушения электроснабжения региона: плавка гололёда или механическое сбивание ГИО с поверхности проводов. Время, выделяемое на плавку гололёда, состоит из времени сборки схемы, непосредственно самой плавки и разборки схемы плавки. Для механического сбивания необходимо затратить время на дорогу до объекта и пеший обход со скоростью 2,5 км/ч (учитывая бездорожье в ОЗП и время, затрачиваемое непосредственно на сбивание ГИО). По результатам, представленным в Таблице 5, ЛПР может реализовать любое мероприятие, так как в обоих случаях показатель безопасности выше требуемого значения.

Таблица 5 — Результаты расчёта показателя безопасности электроснабжения региона в зависимости от выбранного мероприятия по нейтрализации угрозы нарушения электроснабжения региона

Мероприятие	Характеристика участка	Среднее время нейтрализации	Показатель безопасности
Плавка гололёда	Длина – 2 км	$\Delta t_{HY} = \Delta t_{CB} + \Delta t_{\Pi J I} + \Delta t_{PA3B} = 1 + 1,5 + 1 = 3,5 \text{ y}$	$P_2 = 0.822 > 0.8$
Механическое сбивание	Длина – 2 км	$\Delta t_{HY} = \Delta t_{JOP} + \Delta t_{OBX} =$ = 5 + 2 km/2,5 km/y = 5,8 y	$P_2 = 0.814 > 0.8$

Смоделируем гипотетическую ситуацию с расположением оперативно-выездных бригад (ОВБ) на разном расстоянии от рассматриваемого участка ВЛЭП (Рисунок 35).

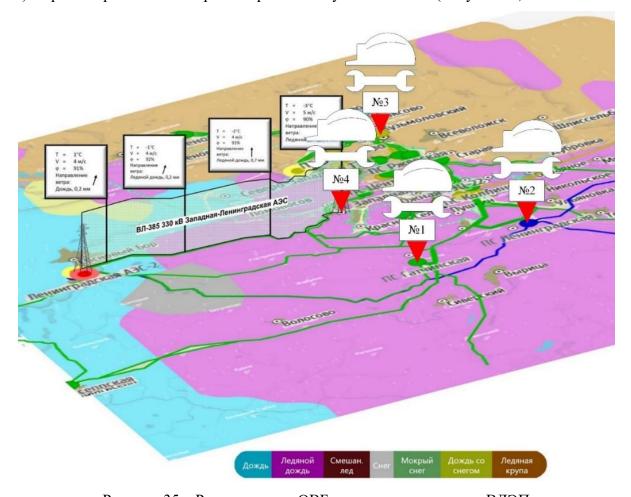


Рисунок 35 – Расположение ОВБ относительно участка ВЛЭП

Среднее время нейтрализации угрозы нарушения электроснабжения региона состоит из среднего времени, затрачиваемого на дорогу до объекта, и среднего времени обхода участка. По результатам расчёта (Таблица 6) определено, что для данной ситуации удаленность расположения ОВБ никак не повлияет на показатель безопасности электроснабжения региона (во всех случаях расчётное значение превышает плановое).

Таблица 6 — Результаты расчёта показателя безопасности электроснабжения региона при изменении расстояния от ОВБ до объекта

Оперативно- выездная бригада	Удаленность от участка	Среднее время нейтрализации	Показатель безопасности
<b>№</b> 1	14 км	$\Delta t_{HY} = \Delta t_{ДOP} + \Delta t_{OEX} =$ = 14 km/60 km/4 + 2 km/2,5 km/4 = 1,03 4	$P_2 = 0.830 > 0.8$
<b>№</b> 2	30 км	$\Delta t_{HY} = \Delta t_{DOP} + \Delta t_{OBX} =$ = 30 km/60 km/q + 2 km/2,5 km/q = 1,3 q	$P_2 = 0.829 > 0.8$
№3	51 км	$\Delta t_{HY} = \Delta t_{ДOP} + \Delta t_{OBX} =$ = 51 km/60 km/4 + 2 km/2,5 km/4 = 1,65 4	$P_2 = 0.828 > 0.8$
№4	2 км	$\Delta t_{HY} = \Delta t_{\text{ДОР}} + \Delta t_{\text{OBX}} =$ = 2 km/60 km/4 + 2 km/2,5 km/4 = 0,83 4	$P_2 = 0.831 > 0.8$

В случае наблюдения на большей части территории совокупности гидрометеорологических факторов, способствующих образованию ГИО на поверхности проводов ВЛЭП, ЛПР, с целью сохранения ресурсов для ситуации с возможным ухудшением обстановки, обоснованно может направить на объект ОВБ, размещенную на большем расстоянии, чем другие ОВБ.

#### 3.4. Выводы по Главе 3

- 1). Говорить о нормальном (штатном) функционировании объекта можно только при условии обеспечения его безопасности. Безопасность свойство системы сохранять свое предназначение (в данном случае электроснабжение потребителей).
- 2). ПГД имеют фундаментальное значение для установления взаимосвязи между различными явлениями. Для этого их необходимо собирать, хранить, анализировать и представлять с помощью специально разработанных платформ. ГИС являются наиболее подходящими платформами для этих целей. Интеграция ГИС и процессов геоинформационной поддержки обеспечения безопасности электроснабжения региона позволяет автоматически оценивать ситуацию на определенной территории и принимать необходимые меры по устранению возможной угрозы.

- 3). Назначение ГИС в системе обеспечения безопасности объекта оптимизировать и упростить процессы формирования решений на всех иерархических уровнях ЛПР и повысить эффективность использования имеющихся ресурсов.
- 4). ТС ОБЭР включает три субъекта управления: Электросетевая организация, САЦ Минэнерго России, Региональный штаб по обеспечению безопасности электроснабжения, каждый из которых дает возможность получить характеристики процессов геоинформационной поддержки обеспечения безопасности электроснабжения региона, позволяющие определить показатель безопасности или, наоборот, достичь требуемого показателя безопасности на основе решения обратной задачи управления.
- 5). Наибольший интерес в рамках данного исследования представляет собой состояние «S<sub>2</sub>» (в условиях дефицита ресурсов), так как в этом случае все угрозы нарушения электроснабжения региона, возникающие в контуре ТС ОБЭР, идентифицированы и нейтрализованы, то есть объекты электроэнергетической системы выполняют свое предназначение стабильное электроснабжение потребителей. В рамках принятой терминологии вероятность нахождения ГИПУ ТС ОБЭР в состоянии «S<sub>2</sub>» требуемый показатель эффективности системы обеспечения безопасности, то есть это показатель безопасности электроснабжения региона.
- 6). В контексте ГИПУ ТС ОБЭР взаимодействие между субъектами ТС ОБЭР (Региональный штаб по обеспечению безопасности электроснабжения, САЦ Минэнерго России, Электросетевая организация) требует единой модели. Такой моделью является модель ГИПУ ТС ОБЭР, полученная в Главе 2.
- 7). Системная интеграция процессов геоинформационной поддержки обеспечения безопасности электроснабжения региона с показателем безопасности позволяет формировать решения, соответствующие характеристикам сложившейся обстановки. Анализируя данные, полученные при помощи ГИС УБЭР, и проецируя результаты на регион электроснабжения с привязкой к объектам электроэнергетической системы, можно, используя такие составляющие подсистемы знаний как декларативное знание (требования стандартов, руководящие документы), знание технологического процесса (программа поиска неисправностей, аналитический метод), стратегическое знание (надёжность элементов, суррогатная модель), идентифицировать возможную угрозу нарушения электроснабжения региона и принять своевременные предупреждающие меры.
- 8). Предложенная в рамках данного исследования методика ГИПУ ТС ОБЭР обладает рядом преимуществ, среди которых возможность оперировать средними временами процессов идентификации и нейтрализации угрозы нарушения электроснабжения региона и задавать необходимый показатель безопасности электроснабжения региона.

- 9). При обеспечении безопасности электроснабжения региона участвует человек (оператор), который использует технические средства в процессе своей деятельности. Таким образом, в процессах идентификации и нейтрализации угрозы нарушения электроснабжения региона обнаруживаются две составляющие: человеческий фактор и техническое оснащение. Разумеется, что данными показателями нужно оперировать в интересах достижения цели деятельности.
- 10). Разработанная методика ГИПУ ТС ОБЭР позволяет рассматривать два варианта управления процессом геоинформационной поддержки обеспечения безопасности электроснабжения региона: путем решения прямой задачи управления, путем решения обратной задачи управления.

*При решении третьей задачи* было установлено, что необходимо разработать практические рекомендации по совершенствованию ГИПУ ТС ОБЭР.

Глава 4. Разработка практических рекомендаций по совершенствованию геоинформационной поддержки управления территориальной системой обеспечения безопасности электроснабжения региона в условиях обледенения воздушных линий электропередачи

### 4.1. Обоснование практических рекомендаций по совершенствованию информационного обеспечения геоинформационной поддержки управления территориальной системой обеспечения безопасности электроснабжения региона

Объём информационного потока, поступающего на вход системы управления, нередко превышает возможность восприятия и осознания информации человеком. Это снижает эффективность деятельности ЛПР.

Актуальна задача разработки инструментов, облегчающих формирование приемлемых решений ЛПР в процессе управления объектами электроэнергетической отрасли [166, 167]. Не менее важная проблема связана с обучением и постоянной тренировкой оперативного персонала, развитием его способностей быстро формировать решения в нестандартных ситуациях. Очевидная взаимосвязанность этих проблем предполагает их рассмотрение и решение в неразрывном единстве.

Это достаточно сложная задача, которую нельзя решить только организационно-административными методами. В таких ситуациях следует рассмотреть возможность разработки требуемого информационного обеспечения ГИПУ ТС ОБЭР.

ГИС УБЭР в ГИПУ ТС ОБЭР выполняет роль активного партнера ЛПР, участвующего в решении задачи выбора программы действий. Для этого необходимо разрабатывать специальные программы, в которых используется текущая информация, накапливаемая в оперативно-информационном комплексе.

Этапы оперативной деятельности структурированы следующим образом:

#### ПОДГОТОВКА $\rightarrow$ РЕШЕНИЕ $\rightarrow$ РЕАЛИЗАЦИЯ.

Очевидно, что первый этап «ПОДГОТОВКА» требует как раз инструмента в виде ГИС УБЭР, позволяющего в явном и понятном виде представить обширный поток информации, поступающей на вход ТС ОБЭР. Такое представление информации является для ЛПР наиболее предпочтительным, так как позволяет затрачивать на обработку информации меньше времени и возможно формирование вновь поступающей информации в режиме реального времени.

ГИС УБЭР является тем необходимым инструментом, который может использоваться для определения конкретных действий со стороны ЛПР. При этом ЛПР должен, несомненно, являться профессионалом в конкретной предметной области.

Подход, реализованный в ГИС УБЭР, представляет собой методологию построения диалоговых систем оперативно-диспетчерского управления электроэнергетическими системами и позволяет:

- совместно описывать постановку и методы решения большой совокупности локальных задач, составляющих одну общую задачу оперативно-диспетчерского управления;
- интегрировать в модели всю пользовательскую информацию о предметной области управления, включая данные о состоянии объекта управления;
- установить связь этих данных с постановкой любой совокупности задач с методами управляющих решений;
- автоматизировать планирование процессов поиска решения задач и обмена информацией;
- наблюдать за логикой формирования решений и получением объяснений как о действиях оперативного персонала, так и о процедурах и данных, положенных в основу разработки предупреждающих действий.

Несомненно, что для формирования решения требуется достаточно много времени, особенно, если учитывать, что органы управления электроэнергетической системы должны стремиться к экономической эффективности предпринимаемых действий. Именно здесь следует искать резервы времени. Быстрая и точная информация о сложившейся ГИО, о действующих и резервных ВЛЭП, об источниках энергии и её потребителях, об оснащенности аварийных бригад, об их составе с учетом личностных характеристик, об их территориальном расположении и много другой оперативной и априорной информации необходимо ЛПР для формирования быстрого и адекватного решения.

В рамках предложенного подхода по применению ГИС УБЭР самым первым этапом деятельности представителя органа управления ТС ОБЭР является контроль и наблюдение за состоянием параметров объекта электроэнергетической отрасли и показателей гидрометеорологических факторов на рассматриваемой территории [168, 169]. Следующий этап должен быть посвящен распознанию ситуации, то есть определению текущих параметров гидрометеорологической обстановки, в условиях которой функционируют ВЛЭП. При этом особое внимание следует уделить развитию навыков диагностики неисправности, которая позволит заранее определить поврежденные участки ВЛЭП и предотвратить дальнейшую

эскалацию аварийного события. Одним из важнейших этапов оперативной деятельности является планирование. Суть данного этапа заключается в заблаговременной подготовке перечня действий по управлению в условиях текущей и прогнозируемой обстановке. Совокупность разработанных действий складывается в программу деятельности, которая может корректироваться в зависимости от складывающихся обстоятельств в процессе управления. Этапы деятельности можно представить в виде последовательной схемы:

- контроль и наблюдение;
- распознание ситуации;
- планирование;
- выбор программы деятельности;
- коррекция программы деятельности в процессе ГИПУ ТС ОБЭР.

Предполагается, что для выбора оптимального варианта стратегии должна быть разработана организующая программа, которая реализует следующие действия:

- ориентировочно оценивается суммарное время на идентификацию и нейтрализацию угрозы нарушения электроснабжения региона  $\Delta t_{\rm HY}$  и  $\Delta t_{\rm HY}$  и выбираются только те варианты, у которых оно меньше заданного критического времени  $\Delta t_{\rm \Pi Y}$ ;
- на основе информации о гидрометеорологических факторах, географии расположения
   ВЛЭП, данных о дислокации отдельных ремонтных бригад предполагаются несколько
   вариантов предотвращения нарушения электроснабжения региона;
- рассматриваются варианты предотвращения образования или устранения ГИО;
- по полученным результатам выбирается окончательный вариант (при достаточно полном описании стратегии выбора ограничительных факторов, целевых функций и т.п.).

Идентификация и нейтрализация угроз нарушения электроснабжения региона предполагают серию оперативных задач, которые охватывают все значимые стороны оперативной деятельности персонала. Любая из этих задач допускает несколько вариантов решения (способов действий) с различной эффективностью достижения цели деятельности.

Целеустремленная система, которой является TC ОБЭР, позволяет моделировать продуктивную деятельность персонала, в то время как целенаправленное поведение основано только на актуализации уже имеющихся знаний. Главная особенность операторов диспетчерской службы состоит в том, что они не способны давать собственное толкование фактам и противиться навязываемым шаблонам.

Взаимодействие составляющих ТС ОБЭР и их причинно-следственные связи проявляются под воздействием СОФ – модели ГИПУ ТС ОБЭР.

Сохранение предназначения объектом электроэнергетической отрасли определяется не только значением  $P_2$ , но еще компенсирующими возможностями, заложенными проектировщиками в структуру и в характеристики, а также механизмами, которые реализуют эти возможности (например, система автоматического управления, регулирования, защит и блокировок).

В случае, когда системой управляют только автоматические устройства, вероятность выбора того или иного способа действий при определенной и опознанной конфигурации входных воздействий на объект будет равна единице. Поскольку разработчики автоматизированной системы управления технологическим процессом не могут заранее подробно охарактеризовать возникающие ситуации, а также текущее техническое состояние и режим работы оборудования, эффективность выбранного способа может оказаться низкой или равной нулю.

Так как техника — это реализация модели решения человека (главного конструктора), то только на её базе могут быть сформулированы четкие рекомендации для проектных организаций, заводов и монтажных подразделений.

Главная задача ЛПР заключается в распознании состояния технического объекта в условиях недостаточной информации о гидрометеорологических факторах [170]. При этом он имеет перечень возможных неисправностей объекта, который ограничен (например, обрывы, замыкания) и ему необходимо по полученным из контура ГИПУ ТС ОБЭР переменным определить эффективность реализации планируемых действий.

Определение  $\Delta t_{\Pi Y}$  целесообразно организовать на основе данных о состоянии ВЛЭП и ПГД, полученных на основе применения ГИС, так как оно зависит от следующих факторов:

- техническое состояние опор ВЛЭП: состояние проводов, изоляторов, заделки и пр., материал опор, размеры, площадь ветрового воздействия, протяженность ВЛЭП, длина пролета между опорами;
- характеристики ГИО: толщина, скорость нарастания, прочность льда;
- метеоусловия: скорость ветра, порывистость, длительность воздействия ветра,
   температура и влажность окружающего воздуха.

Для реализации предложенной методики ГИПУ ТС ОБЭР необходимо разработать ГИС УБЭР.

Проблема геоинформационной поддержки обеспечения безопасности электроснабжения региона должна решаться в следующей последовательности:

1) мониторинг гидрометеорологических факторов;

- 2) прогнозирование развития обстановки;
- 3) инвентаризация элементов электроэнергетической системы;
- 4) формирование решения.

Классическая схема функций ГИС представлена на Рисунке 36.

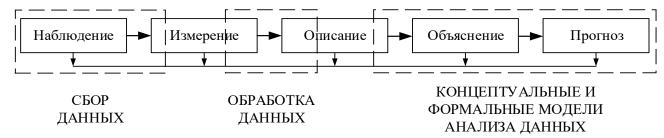


Рисунок 36 – Классическая схема функций ГИС

В первую очередь требуется сформировать необходимый набор  $\Pi\Gamma Д$  [171 – 173], который должен строиться на базе следующих сведений:

- цифровые карты (информация о природных и техногенных элементах ландшафта);
- табличные данные;
- метеорологические данные (сведения о параметрах климата);
- данные электроэнергетической системы (параметры электроэнергетического режима,
   сведения о характеристиках объектов электроэнергетической системы, места
   размещения аварийного резерва, мобильных бригад и спецтехники и т.д.);
- данные из других баз данных, в зависимости от специфических особенностей объекта
   электроэнергетической системы.

Следующим важным этапом должно являться отображение при помощи технических и программных средств полученных ПГД.

Технические и программные средства направлены, в первую очередь, на выполнение следующих операций с ПГД:

- ввод и коррекция;
- хранение и обновление;
- анализ и моделирование;
- вывод (карты, изображения, таблицы, данные для других баз данных и моделей анимации).

ЛПР в данном случае может выступать как «пользователь» данной ГИС УБЭР или как «эксперт», участвующий в её разработке. При решении текущих задач «пользователь» имеет

доступ непосредственно к обработанным ПГД, представленным в требуемом виде для формирования решения.

В случае необходимости в разработанную ГИС УБЭР «экспертом» вносятся соответствующие корректировки как в плане постановки проблемы геоинформационной поддержки обеспечения безопасности электроснабжения региона, так и в плане изменения набора ПГД с увеличением или уменьшением массива информации.

Требуемая архитектура ГИС УБЭР представлена на Рисунке 37.

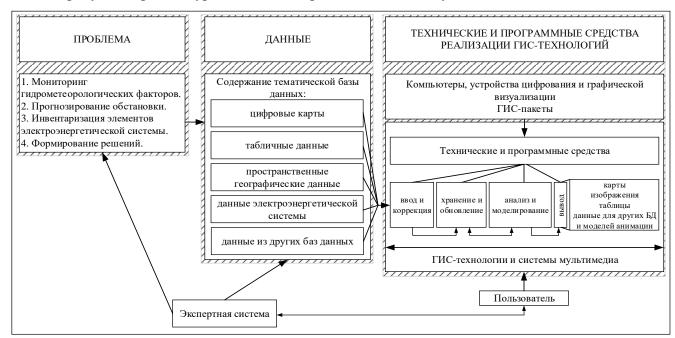


Рисунок 37 – Структурная схема ГИС УБЭР

В целях информационного обеспечения методики ГИПУ ТС ОБЭР ГИС УБЭР предназначена для формирования атласа карт, топографических планов, дорожно-транспортной сети, моделей объектов электроэнергетической системы, зданий и сооружений. Связь с электроэнергетической системой осуществляется через идентификационные ссылки на объекты электроэнергетической системы. В результате предоставляется возможность обработки и хранения кадастровых, нормативных, описательных, функциональных, технологических, экономических, финансовых и других данных об объектах электроэнергетической отрасли. Данные накладываются и при помощи технических и программных средств отображаются в системе оперативно-диспетчерского управления.

На Рисунке 38 представлена структурная схема интеграции элементов ТС ОБЭР и ГИС общего назначения.

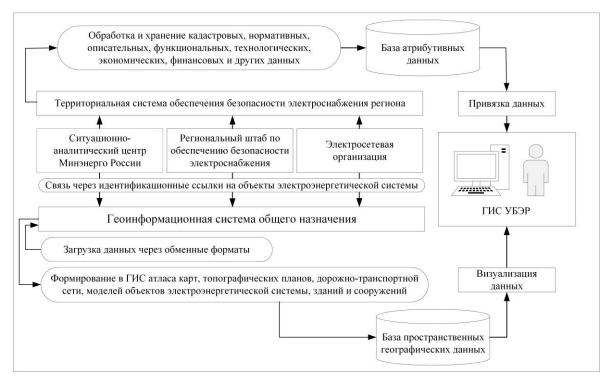


Рисунок 38 – Структурная схема интеграции элементов ТС ОБЭР и ГИС общего назначения

Таким образом, резюмируя вышеприведённые материалы, структура требуемого информационного обеспечения ГИС УБЭР должна быть представлена в следующем виде (Рисунок 39) [177].

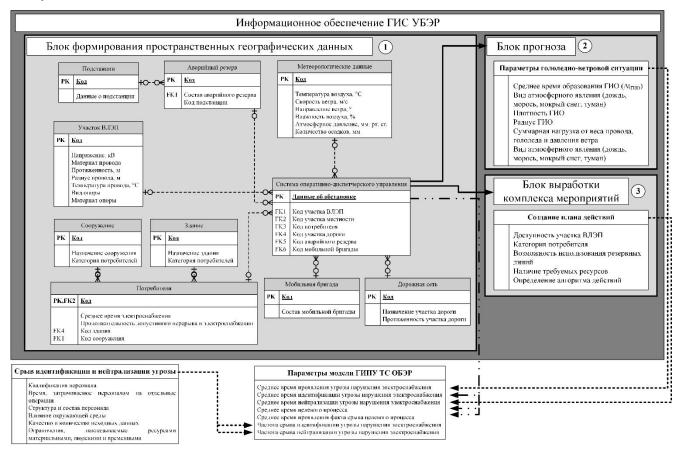


Рисунок 39 – Структура требуемого информационного обеспечения ГИС УБЭР

В Таблице 7 представлены группы базовых слоев и их обязательные составляющие, которые должны быть включены в ГИС УБЭР.

Таблица 7 – Базовые слои и их составляющие ГИС УБЭР

№ п/п	Группа слоев	Составляющие							
Цифровые карты									
1	Природные элементы ландшафта	рельеф							
		водные объекты							
		почвенный покров							
		растительность							
2	Техногенные элементы ландшафта	сооружения							
		здания							
		дорожная сеть							
	Технико-те	ехнологические данные							
1	Сооружения	подстанции							
		опоры							
		воздушные линии электропередачи							
		категория потребителей							
2	Места размещения	аварийный резерв							
		мобильные бригады							
		спецтехника							
		мобильные модульные подстанции							
		резервные источники снабжения электроэнергией							
3	Характеристики воздушной линии	сведения о проводе (материал, плотность, радиус)							
	электропередачи	протяженность участка							
		температура провода							
		допустимая нагрузка							
		ные географические данные							
1	Гидрометеорологические факторы	температура воздуха, °С							
		скорость ветра, м/с							
		направление ветра, °							
		влажность воздуха, %							
		атмосферное давление, мм. рт. ст.							
		количество осадков, мм							
2	Гидрометеорологические явления	гроза							
		град							
		дождь							
		снег							

# 4.2. Обоснование практических рекомендаций по совершенствованию технического оснащения геоинформационной поддержки управления территориальной системой обеспечения безопасности электроснабжения региона

Система электроснабжения — совокупность объектов (элементов) электроснабжения и обслуживающих их людей, занятых достижением общей цели и включенных в общую сеть обмена информацией. Безопасность системы является функцией самих элементов и их взаимодействий и взаимозависимостей. Компоненты системы (объекты и люди) обладают присущими им свойствами, которые могут различаться признаками.

Например, признаками ВЛЭП являются класс напряжения, протяженность, марка провода, тип и количество опор, наличие грозозащитного троса и т.п. Признаками же людей, обслуживающих ВЛЭП, следует считать их квалификацию, психофизиологические и психосоциальные характеристики. Видимым результатом взаимодействия компонентов системы является изменение этих признаков.

Система электроснабжения обладает как внутренней, так и внешней средой. Под внешней средой понимается множество всех объектов и обслуживающих их людей вне системы. Внешняя среда имеет следующие особенности:

1. Изменение признаков внешней среды (или внешних факторов) влияет на систему электроснабжения. Среди внешних факторов выделяются как воздействия, имеющие отрицательное влияние на объект управления (гидрометеорологические факторы, плохое качество элементов объекта электроэнергетической отрасли, плохая подготовка персонала и т.д.), так и воздействия, предназначенные для оказания положительного эффекта (плавка гололёда, изменение режима работы сетей, переключения и др.).

В качестве критерия эффективности реализуемых мероприятий целесообразно рассматривать неравенство:

$$\Delta T_{\text{KM}} < t_{\Pi \text{Y}},$$
 (48)

где  $T_{\text{км}}$  — сумма фактически затраченного времени при реализации комплексных мероприятий (КМ), оперативно предпринятых для предупреждения или ликвидации опасного положения, возникшего от гололёдообразования в системе электроснабжения,  $\Delta T_{\text{км}} = \Delta t_{\text{ИУ}} + \Delta t_{\text{HУ}}$ ;  $\Delta t_{\text{ПУ}}$  — время наступления необратимых последствий, нарушающих электроснабжение в период гололёдообразования.

2. Изменение признаков самой системы электроснабжения оказывает влияние на внешнюю среду, например, если ухудшится такой признак ВЛЭП (компонент системы электроснабжения), как соответствие реальных и проектных (расчетных) гололёдно-ветровых нагрузок, то это приведет к изменению такого признака проектных решений проектной организации (объект внешней среды), как новые карты нормативных районов по ветру и гололёду.

К внутренней среде системы должны принадлежать объекты и люди, непосредственно обеспечивающие электроснабжение. Внутренняя среда – это ЭС плюс оперативный персонал, внешняя – все остальное.

Комплексная система мероприятий по предотвращению и ликвидации гололёдных аварий должна включать:

- уточнение климатического районирования в зоне действующих и сооружаемых ВЛЭП;

- совершенствование проектных решений;
- повышение качества строительно-монтажных работ при сооружении;
- повышение квалификации и оперативности персонала (инструктажи, обучение на рабочем месте, дублирование, проверка знаний, техническая учеба на полигонах и тренажерах, противоаварийные тренировки);
- организационные мероприятия (совершенствование организации; совершенствование оперативного управления);
- технические мероприятия:
  - реконструкция;
  - капитальный ремонт (организация комплексного ремонта, внедрение бригадного подряда);
  - улучшение технического состояния существующих ЭС (перетяжка и перевязка проводов, замена дефектных участков провода, расчистка трас ВЛЭП, сокращение пролетов, внедрение изоляционных распорок, укрепление контактов, замена изоляторов);
  - внедрение новых схем плавки гололёда с переходом на автоматизированную систему плавки (увеличение охвата количества ВЛЭП одновременной плавкой и сокращение времени плавки);
  - внедрение информационной системы о гололёдообразовании.

Важнейшей задачей является перевод системы электроснабжения из независимой в целостную, т.е. в такую систему, основные (значимые) связи между компонентами которой выявлены, описаны и постоянно учитываются для поддержания требуемого показателя безопасности.

Соотношение (25) представляется как критерий эффективности ГИПУ ТС ОБЭР в условиях ГВС. При возникновении ГВС необходимо выбрать такие технические средства, чтобы с учетом вероятностных значений время  $\Delta T_{\rm км}$  оказалось меньше  $\Delta t_{\rm ПУ}$ . Предлагаемый критерий эффективности является характерным признаком системного подхода. Полученное соотношение связывает в один математический агрегат все значимые факторы, прямо и косвенно влияющие на  $\Delta T_{\rm км}$ .

Применение комплексных мероприятий в целях обеспечения безопасности электроснабжения региона должно быть обосновано следующим образом:

$$\sum_{1}^{k} 3_{KM} < \sum_{1}^{k} 3_{\Pi O T} , \tag{49}$$

где  $\sum_{1}^{k} 3_{kM}$  — сумма затрат на комплексные мероприятия, осуществляемые для обеспечения безопасности электроснабжения региона;

 $\sum_{1}^{k} 3_{\Pi O T}$  — сумма затрат, обусловленных потерями (например, в случае перерыва в электроснабжении региона (недоотпуск электроэнергии)) при отказе от выполнения тех или иных комплексных мероприятий.

Предотвращение нарушения электроснабжения региона в первую очередь основано на получении своевременной информации о начале и течении процесса гололёдообразования на ВЛЭП по всему региону [172, 178].

Идентификация угрозы нарушения электроснабжения региона подразумевает ответы на следующие вопросы:

- в чем проявляется угроза нарушения электроснабжения региона;
- какой элемент выйдет из строя;
- какой прогноз развития складывающейся ситуации;
- как влияет угроза нарушения электроснабжения региона на свойства объекта управления и качество технологического процесса (электроснабжение региона).

Идентификация угрозы нарушения электроснабжения региона — способность ЛПР на основе обработки информации выяснить изменения в объекте управления по ограниченному числу признаков (параметров), которыми он характеризуется [173, 179].

Любые отклонения параметров приводят к изменениям в характеристиках объекта управления, при этом причинами таких изменений могут быть либо управляющие воздействия, осуществляемые самим ЛПР [180] или устройствами автоматики, либо следствия неисправности или изменения внешней окружающей среды.

Формально задача идентификации угрозы сводится к тому, чтобы по текущему значению параметров гидрометеорологических факторов определить характер угрозы нарушения электроснабжения региона и её интенсивность.

Раннее обнаружение возможности проявления угрозы нарушения электроснабжения региона способствует как устойчивому ведению технологического процесса, так и повышению эффективности деятельности оперативного персонала. Обычно функционирование оборудования осуществляется в заданном режиме, параметры которого известны. Для

идентификации и контроля решения, а также диагностики состояния должен применяться анализ отклонений параметров процесса.

Согласно ранее приведенным в п. 3.2. соотношениям (44) и (45) очевидно, что, заранее установив показатель эффективности ГИПУ ТС ОБЭР, можно подобрать требуемое техническое оснащение для осмотра и контроля состояния ВЛЭП, а также устранения ГИО.

Согласование технико-технологических параметров объектов электроэнергетической отрасли, ресурсов информационных систем с возможностями и свойствами людей, управляющих техникой, – важный резерв повышения эффективности ГИПУ ТС ОБЭР.

В целях обеспечения безопасности электроснабжения региона ВЛЭП с определенной периодичностью осматриваются специалистами (инженерами-техниками, электромонтерами). Назначение данной операции заключается в нахождении каких-либо неисправностей, являющихся причиной нарушения электроснабжения региона. Кроме того, такие неисправности могут привести к несчастным случаям среди персонала электросетевой организации и третьих лиц.

Осмотр ВЛЭП проводится согласно утвержденному графику. При этом частота проведения обследования обусловливается погодными условиями, характеристиками ландшафта и местности. Проводящие осмотр специалисты оценивают возможность возникновения повреждений и загрязнений. При этом периодически возникает необходимость в внеплановых осмотрах, чаще всего из-за неблагоприятных погодных условий. В качестве примеров можно привести образование на ВЛЭП ГИО, наличие лесных пожаров.

Осмотр может осуществляться разными способами, которые группируются следующим образом: пешие, воздушные (с самолета, с вертолета, с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и автовышек). По периодичности они подразделяются на плановые и внеочередные.

В случае предотвращения нарушения электроснабжения региона из-за обрыва провода ВЛЭП в результате образования на его поверхности ГИО осмотр также имеет важное значение. В осенне-зимний период при получении информации о высокой вероятности начала процесса формирования ГИО на участок ВЛЭП, попадающий в зону благоприятствующих появлению обледенения гидрометеорологических факторов, выезжает аварийная бригада для осмотра участка ВЛЭП и в случае обнаружения ГИО для его устранения.

В практике мониторинга за состоянием ВЛЭП широко развит пеший осмотр. В дополнение к нему целесообразно использовать оптические приборы, позволяющие наблюдать удаленные предметы, например, бинокль.

Проведение осмотров с использованием автовышек и БПЛА имеет свои особенности. Применение автовышек довольно эффективно в случаях необходимости непосредственного

контакта с ВЛЭП, но затруднено для участков, проложенных в труднопроходимой местности. БПЛА с каждым годом становятся все более популярны в сфере энергетики в связи с их высокой эффективностью применения в условиях бездорожья и труднопроходимых районах. Но есть две проблемы, значительно притормаживающие их широкое применение. Первая проблема заключается в необходимости получения разрешения на полет для проведения осмотра, вторая — подготовке специалистов с требуемым набором компетенций для возможности проведения осмотра с применением БПЛА.

На современных ВЛЭП устанавливаются датчики, фиксирующие определенные параметры, по которым можно определить неисправность или повреждение элементов ЭС.

В рамках текущего исследования стоит задача обеспечения безопасности электроснабжения региона в условиях образования обледенения на ВЛЭП. Поэтому главной целью разработанной ГИПУ ТС ОБЭР является либо предупредить появление ГИО, либо своевременно его устранить. Вышеназванные подходы к осмотру и мониторингу за состоянием ВЛЭП фиксируют уже образовавшиеся ГИО. Поэтому, предполагается, что анализ и обработка ПГД, полученных от Гидрометцентра, является первоочередным этапом реализации методики ГИПУ ТС ОБЭР.

Таким образом, в рамках ГИПУ ТС ОБЭР можно распределить техническое оснащение процесса идентификации угрозы нарушения электроснабжения региона следующим образом:

- пеший осмотр (отсутствие ТО);
- пеший осмотр с использованием бинокля;
- верховой осмотр с использованием автовышки;
- верховой осмотр с использованием БПЛА;
- применение датчиков, сигнализирующих о начале процесса гололёдообразования.

Очевидно, что применение конкретного инструмента для обнаружения ГИО также влияет и на показатель срыва идентификации угрозы, например, использование бинокля не на столько эффективно при визуальном осмотре, как использование автовышки.

Моделирование слагаемых среднего времени идентификации угрозы нарушения электроснабжения региона, представленного в виде (44), позволяет подбирать необходимое техническое оснащение (ТО) и людей в зависимости от их уровня образования (ВО – высшее образование) и стажа работы (то есть учитывается человеческий фактор (ЧФ)). Пример такого моделирования представлен в Таблице 8, где для каждого сочетания ТО и ЧФ определяется свое значение показателя эффективности ГИПУ ТС ОБЭР, выбирая из рассчитанных значений требуемое, ЛПР знает, какие средства необходимо использовать, и кто должен участвовать при решении поставленной задачи по идентификации угрозы.

Таблица 8 – Результаты расчета показателя безопасности электроснабжения региона при изменении времени идентификации угрозы

то чф	Пеший осмотр (отсутствие ТО)	Пеший осмотр + бинокль	Автовышка	БПЛА	Датчики
Стаж менее 1 года	$(P_2)_1$	$(P_2)_2$	$(P_2)_3$	$(P_2)_4$	$(P_2)_5$
Стаж менее 1 года + ВО	$(P_2)_6$	$(P_2)_7$	$(P_2)_8$	$(P_2)_9$	$(P_2)_{10}$
Стаж от 1 до 3 лет	$(P_2)_{11}$	$(P_2)_{12}$	$(P_2)_{13}$	$(P_2)_{14}$	$(P_2)_{15}$
Стаж от 1 до 3 лет + ВО	$(P_2)_{16}$	$(P_2)_{17}$	$(P_2)_{18}$	$(P_2)_{19}$	$(P_2)_{20}$
Стаж от 3 до 6 лет	$(P_2)_{21}$	$(P_2)_{22}$	$(P_2)_{23}$	$(P_2)_{24}$	$(P_2)_{25}$
Стаж от 3 до 6 лет + ВО	$(P_2)_{26}$	$(P_2)_{27}$	$(P_2)_{28}$	$(P_2)_{29}$	$(P_2)_{30}$

Методы по нейтрализации угрозы группируются, как это было уже сказано в п. 1.3., следующим образом:

- механические (использование шестов);
- электротермические (профилактический нагрев, плавка гололёда);
- физико-химические;
- электромеханические.

Наиболее распространенными являются первые два: механические и электротермические.

Моделирование слагаемых среднего времени нейтрализации угрозы нарушения электроснабжения региона, представленного в виде (45), позволяет подбирать необходимое ТО и людей в зависимости от их уровня образования и стажа работы (то есть учитывается ЧФ). Пример такого моделирования представлен в Таблице 9, где для каждого сочетания ТО и ЧФ определяется свое значение показателя эффективности ГИПУ ТС ОБЭР, выбирая из рассчитанных значений требуемое, ЛПР знает, какие средства необходимо использовать, и кто должен участвовать при решении поставленной задачи по нейтрализации угрозы.

Таблица 9 — Результаты расчета показателя безопасности электроснабжения региона при изменении времени нейтрализации угрозы

то чф	Стаж менее 1 года	Стаж менее 1 года + ВО	Стаж от 1 до 3 лет	Стаж от 1 до 3 лет + ВО	Стаж от 3 до 6 лет	Стаж от 3 до 6 лет + ВО
Использование шестов	$(P_2)_1$	$(P_2)_2$	$(P_2)_3$	$(P_2)_4$	$(P_2)_5$	$(P_2)_6$
Профилактический нагрев	$(P_2)_7$	$(P_2)_8$	(P <sub>2</sub> ) <sub>9</sub>	$(P_2)_{10}$	$(P_2)_{11}$	$(P_2)_{12}$
Плавка гололёда	$(P_2)_{13}$	$(P_2)_{14}$	$(P_2)_{15}$	$(P_2)_{16}$	$(P_2)_{17}$	$(P_2)_{18}$
Нанесение специальных веществ	$(P_2)_{19}$	$(P_2)_{20}$	$(P_2)_{21}$	$(P_2)_{22}$	$(P_2)_{23}$	$(P_2)_{24}$
Использование резервной линии	$(P_2)_{25}$	$(P_2)_{26}$	$(P_2)_{27}$	$(P_2)_{28}$	$(P_2)_{29}$	$(P_2)_{30}$

Обеспечение безопасности электроснабжения региона также может быть основано не только на предупреждении и устранении ГИО, но и на применении резервной линии электропередачи, при этом допуская обрыв основной линии электропередачи в особо сложных ГВС. Такой вариант развития событий также может быть рассмотрен при ГИПУ ТС ОБЭР для установления соответствия расчётного показателя безопасности требуемому.

Разумеется, что применение конкретного инструмента для устранения ГИО также влияет и на показатель срыва нейтрализации угрозы, например, использование шестов не на столько эффективно, как применение плавки гололёда.

## 4.3. Обоснование практических рекомендаций по совершенствованию кадрового обеспечения геоинформационной поддержки управления территориальной системой обеспечения безопасности электроснабжения региона

Тенденции развития систем управления объектом электроэнергетической отрасли таковы, что роль ЛПР все более сводится к контролю за функционированием оборудования и вмешательствам при возникновении нестандартных ситуаций [174], т.е. ситуаций, требующих формирования решения.

Следовательно, основное внимание должно быть уделено проблеме обучения персонала, задействованного в процессе управления, поиску, обоснованию и разработке новых, а также развитию хорошо зарекомендованных себя известных способов достижения приемлемого показателя эффективности управления системами, где ЛПР – их неотъемлемая часть.

Алгоритм подготовки кадрового обеспечения (ЛПР, работающего в быстроменяющихся условиях) ГИПУ ТС ОБЭР рекомендуется рассматривать в следующей концепции [181, 182]: ОПЕРАТИВНЫЕ ЗНАНИЯ → ОПЕРАТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ → ОПЕРАТИВНЫЕ НАВЫКИ

Для подготовки ЛПР необходимо организовать такой подход к обучению, который рассчитан на получение новой и необходимой информации через изучение и решение теоретических и практических проблем, рассматриваемых в срезе возможной проблемной ситуации. Поэтому для развития оперативного мышления требуется применять проблемное обучение, которое позволяет полноценно сосредоточиться на различии ситуаций, встречающихся в оперативной деятельности.

Статистика поведения персонала в условиях ГВС и натурные эксперименты не позволяют с необходимой определенностью прогнозировать ход и результаты ликвидации ГВС. Поэтому в

основу поведения персонала в сложных ГВС должна быть положена полученная ранее модель ГИПУ ТС ОБЭР.

Методика ГИПУ ТС ОБЭР подразумевает наличие заранее составленного перечня событий, которые могут возникнуть, протекать или завершаться с установленной частотой повторения в определенной последовательности под воздействием заранее известных условий ГВС. К исходным данным относятся имеющиеся ресурсы персонала, материалов и техники, используемые для борьбы с гололёдообразованием, а их возможности, ограничения и поведение описываются в цифровой форме. Эти данные совместно с выбранными значениями параметров и констант, устанавливающими общие ограничивающие условия (например, время до проявления угрозы нарушения электроснабжения региона, ветровые нагрузки, максимальный ток при плавке гололёда), фиксируются при ГИПУ ТС ОБЭР ЛПР.

Реальные ГВС охватывают большие территории. Предупреждение и ликвидация нарушений осуществляется многими бригадами (подразделениями), деятельность которых координируется диспетчерской службой. Переброска отдельных исполнителей из одной бригады в другую практически исключена.

В целях подготовки персонала к предупреждению и своевременной ликвидации ГИО на ВЛЭП необходимо, в первую очередь, изучить более подробно деятельность персонала. Её можно представить в следующем виде:

- исходя из условий обеспечения безопасности электроснабжения региона, задаётся критерий функциональной эффективности нейтрализации угрозы (предотвращение нарушения электроснабжения региона за время, меньшее среднего времени проявления угрозы нарушения электроснабжения региона без дополнительных людских и материальных ресурсов и нарушений правил техники безопасности и эксплуатации);
- организуется наблюдение за персоналом, решающим оперативную задачу в определенной контролируемой ситуации, с фиксацией в протоколах действий и словесных пояснений;
- анализируются протоколы, выявляются и описываются состав и последовательность производимых персоналом элементарных действий, направленных на решение оперативной задачи (используется феноменологический подход – в протоколах фиксируются только наблюдаемые факты поведения, непосредственно связанные с выполнением задания).

Получаемое удовлетворительное описание действий персонала имеет две важные особенности:

- неизбежно содержит некоторые произвольные и недостаточно обоснованные утверждения, т.е. имеет гипотетический характер (что обусловливает многократную статистически достоверную проверку гипотез, заложенных в описание действий персонала);
- указывает, не вскрывая причины, как и что было сделано (вследствие этого описание пригодно только для данной наблюдаемой ситуации).

Методика ГИПУ ТС ОБЭР основана на предположении, что последовательность действий персонала известна, и в пределах заданных ограничений он будет действовать согласно предписаниям.

Наряду с данными о технических компонентах системы, параметрами гидрометеорологических факторов, в модель ГИПУ ТС ОБЭР включаются такие переменные, как срывы процессов идентификации и нейтрализации угрозы, характеризующие квалификацию персонала.

Совокупность сведений как о технических компонентах электроэнергетической системы, так и об обслуживающем персонале позволяет оценить эффективность ГИПУ ТС ОБЭР в условиях конкретной ГВС.

Заранее в контуре ГИПУ ТС ОБЭР известны следующие данные:

- технические характеристики обслуживаемых ЭС;
- подробное описание имевших место ГВС;
- детальное описание действий персонала в аварийных ситуациях;
- подробные данные о каждом из обслуживающего персонала и технических средствах, которыми можно пользоваться.

Информационное обеспечение ГИПУ ТС ОБЭР позволяет получать данные о задании (предупреждение и ликвидация ГИО), оборудовании, персонале, прочих параметрах и константах.

При совершенствовании кадрового обеспечения первым шагом должен быть подбор минимального состава по специальностям – основной, дополнительной, и по разным уровням квалификации. Эта задача решается руководителем в соответствии с требованиями возможной ГВС к персоналу. Для этого на каждого работника должны быть разработаны показатели личности (начальные значения коэффициентов направленности и квалификации).

Для имитации поведения человека целесообразно использовать сетевое моделирование, которое позволяет рассмотреть действия ЛПР для каждого заранее заданного интервала времени по данным для элементарных операций, взятым из протоколов наблюдения за реальной

деятельностью персонала по ликвидации ГВС. Имитацию проявления угрозы нарушения электроснабжения региона также можно представить средствами сетевого моделирования в соответствии с установленными ранее вероятностями образования гололёда и отказами различных компонентов системы электроснабжения.

Необходимо осуществлять подбор членов бригады для выполнения каждой отдельной элементарной операции, так как может потребоваться персонал с различными психосоциальными данными и уровнем квалификации. Предусмотрены три подхода к подбору членов бригады:

- для обычной и простой элементарной операции предпочтение отдается лицам, которым предстоит работать по своей основной специальности;
- при необходимости обучения элементарной операции отбираются лица, у которых данная специальность – дополнительная;
- для сложной элементарной операции лица отбираются только по основной специальности.

Итак, бригада комплектуется из:

- квалифицированных специалистов, отработавших до настоящего момента наименьшее
   время (чтобы они могли принять на себя соответствующую нагрузку);
- младших специалистов (инженеры в бригаду включаются в последнюю очередь);
- лиц с наивысшей квалификацией, чтобы обеспечить высокую эффективность выполнения поставленной задачи.

Имитация каждой элементарной операции должна состоять из следующих процедур:

- расчет времени, затрачиваемого бригадой на выполнение элементарной операции (используются в качестве исходной информации данные из протоколов поведения наиболее опытных электромонтеров, учитываются квалификация членов бригады, а также число и качество недостающих для выполнения элементарной операции работников);
- вычисление эффективности деятельности бригады с учетом следующих факторов:
  - средства коммуникации, зависящие от числа укомплектованных персоналом подразделений системы электроснабжения, каналы связи и помехи;
  - квалификация, определяемая как среднее текущих значений индексов квалификации членов бригады (индексы задаются в исходных данных и

- пересматриваются в ходе выполнения задания по результатам каждой элементарной операции);
- определение качества выполнения имитируемой элементарной операции сопоставлением фактической эффективности работы бригады с ожидаемой, исходя из квалификации её членов (если качество выполнения неудовлетворительное, может понадобиться повторение элементарной операции или корректировка действий для удовлетворения минимальных требований стандарта).

Подобным образом можно смоделировать различные ГВС, причем для анализа записываются суммарные результаты ликвидации ГВС и условия, сложившиеся к моменту её окончания.

ЛПР при ГИПУ ТС ОБЭР анализирует формируемое решение, и, если решение удовлетворяет заданным значениям указанных критериев, оно рекомендуется к реализации.

Для уменьшения значения среднего времени идентификации угрозы нарушения электроснабжения региона  $(\Delta t_{HY})$  уместно организовать следующие мероприятия:

- расследование ранее произошедшей ГВС;
- расследование отказов элементов электроэнергетической системы;
- проведение инструктажей для персонала;
- обучение на рабочем месте, дублирование;
- проверка знаний;
- техническая учеба на полигонах и тренажерах;
- разработка и применение прогностических систем;
- внедрение информационной системы о гололёдообразовании.

Для уменьшения значения среднего времени нейтрализации угрозы нарушения электроснабжения региона  $(\Delta t_{HV})$  уместно организовать следующие мероприятия:

- расследование ГВС;
- расследование отказов элементов электроэнергетической системы;
- проведение инструктажей для персонала;
- обучение на рабочем месте, дублирование;
- проверка знаний;
- техническая учеба на полигонах и тренажерах;

- повышение эффективности коммуникаций между рабочими постами персонала.

На срыв идентификации и нейтрализации угрозы нарушения электроснабжения региона, кроме вышеперечисленных, в значительной степени влияют следующие факторы, которые можно заранее проработать и устранить нежелательные аспекты:

- время, затрачиваемое персоналом на отдельные операции;
- структура и состав персонала;
- влияние окружающей среды [183, 184];
- качество и количество исходных данных;
- ограничения, накладываемые ресурсами материальными, людскими и временными.

Процесс обучения на данный момент представляет собой накопление алгоритмов решения как можно большего числа оперативных задач (принцип программированного обучения). При этом наиболее ценно накопление не конкретных алгоритмов (их число необозримо), а обобщенных приемов, или стратегий, решения задач различных типов (принцип игрового обучения).

Категорически не рекомендуется при обучении сосредотачивать внимание главным образом на логических методах, как это принято сейчас из-за мнения, что большая часть работы оператора заключается в том, чтобы правильно, точно и надёжно выполнять известные из прошлого опыта алгоритмы. Подтверждением данного тезиса является то, что обучение в условиях жесткого исполнения указаний неминуемо развивает конвергентный тип мышления, характерный для людей, строго следующих инструкциям и хорошо справляющихся с задачей сделать то, что от них ожидают. Если оператор привыкает усваивать информацию готовыми и строго обязательными алгоритмами, то при необходимости охватить оперативную ситуацию в целом и сформировать адекватное обстановке решение у него может возникнуть затруднение.

Естественно, что существующий подход к обучению, заключающийся в развитии и укреплении дисциплины мышления и исполнения, не приносит ожидаемых результатов. Поэтому среди первоочередных рекомендаций следует выделить необходимость раскрытия и развития способностей обучаемого с целью научить его действовать в нестандартных ситуациях.

Возможны следующие рекомендации:

1. Уровень надёжности ЛПР не может быть надлежащим образом определен в обыденных условиях работы. Поэтому специалистами, занимающимися такими вопросами, рекомендуется в процессе обучения вводить обучаемый персонал в условия экстремальной непредвиденной ситуации.

Такое требование вызывает, по крайней мере, два следствия:

- а) изучение поведения ЛПР в экстремальных условиях можно систематически проводить только на специальных полигонах и тренажерах;
- б) для тренировки ЛПР необходимо применять игровое обучение, так как оно предполагает «клинические» методы, что несравненно ценнее для ЛПР, нежели лекции и учебники, с помощью которых трудно создать условия, побуждающие людей самостоятельно развивать и применять творческие способности.
- 2. Системный подход к проблеме обеспечения безопасности электроснабжения предполагает математическое моделирование системы «человек ЭС». Кратко суть примененного в работе имитационного моделирования представляется в следующем: предлагается ряд параметров, определяющих ГИПУ ТС ОБЭР, затем эти параметры моделируются, а результаты сравниваются с допустимым уровнем эффективности управления системой. Особенность имитационного моделирования в том, что не делается попытка моделировать истинные механизмы, действующие в мозговых структурах человека, а находится и конструктивно описывается удовлетворяющее нас объяснение поведения ЛПР на основе модели решения.

Это позволяет перейти к систематическому изучению особенностей деятельности ЛПР в условиях соревнования на полигоне. В результате такого изучения может быть внесена значительная ясность в организацию игрового обучения ЛПР, что представлено на Рисунке 40.

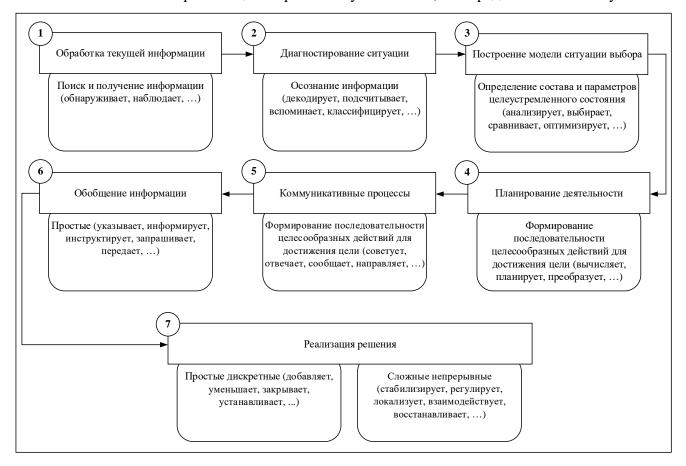


Рисунок 40 – Этапы организации игрового обучения ЛПР [185]

Целеустремленное состояние отличается от целенаправленного тем, что у ЛПР есть несколько альтернативных способов действий разной эффективности, с помощью которых он может попытаться достичь цель, т.е. имеется выбор. Однако при этом необходима оценка нескольких возможных результатов и способов действий различной эффективности, а также личного отношения к ним ЛПР. Ситуация выбора предъявляет к персоналу более разнообразные и сложные требования, чем просто дисциплина исполнения.

Подводя итог вышесказанному, мероприятия по совершенствованию кадрового обеспечения TC ОБЭР могут быть следующими:

- обучение персонала;
- подготовка, переподготовка;
- инструктаж, тренировки;
- проверка знаний;
- конкурсы;
- обмен передовым опытом.

Результатом внедрения данных мероприятий в электросетевой организации являются:

- рост квалификационного уровня персонала, ознакомление с новыми приемами, навыками работы;
- совмещение профессий, освобождение части рабочих от лишних операций, сокращение непроизводственных затрат времени.

Проявление данного результата представляется в реализации следующих мероприятий:

- улучшение использования основных фондов;
- снижение аварийного недоотпуска;
- уменьшение капиталовложений в средства организации эксплуатации;
- внедрение новых прогрессивных форм организации эксплуатации;
- улучшение социальных условий работающих;
- закрепление кадров.

#### 4.4. Выводы по Главе 4

- 1). Актуальна задача разработки инструментов, ускоряющих формирование решений ЛПР в процессе управления объектами электроэнергетической отрасли.
- 2). ГИС УБЭР при ГИПУ ТС ОБЭР может выполнять роль активного партнера ЛПР, участвующего в решении задачи выбора программы действий. Для этого необходимо разрабатывать специальные программы, в которых используется текущая информация, накапливаемая в оперативно-информационном комплексе.
- 3). ГИС УБЭР является тем необходимым инструментом, который может использоваться для определения конкретных действий со стороны ЛПР. При этом ЛПР должен, несомненно, являться профессионалом в конкретной предметной области.
- 4). Несомненно, что для формирования решения требуется достаточно много времени, особенно, если учитывать, что органы управления электроэнергетической системы должны стремиться к экономической эффективности предпринимаемых действий. Именно здесь следует искать резервы времени. Быстрая и точная информация о сложившейся ГВС, о действующих и резервных ВЛЭП, об источниках энергии и её потребителях, об оснащенности аварийных бригад, об их составе с учетом личностных характеристик, об их территориальном расположении и много другой оперативной и априорной информации необходимо ЛПР для формирования быстрого и адекватного складывающейся обстановке решения.
- 5). Идентификация и нейтрализация угрозы нарушения электроснабжения региона предполагают серию оперативных задач, которые охватывает все значимые стороны оперативной деятельности персонала. Любая из этих задач допускает несколько вариантов решения (способов действий) с различной эффективностью ГИПУ ТС ОБЭР.
- 6). Целеустремленная система, которой является ТС ОБЭР, позволяет моделировать продуктивную деятельность персонала, в то время как целенаправленное поведение основано только на актуализации уже имеющихся знаний.
- 7). Взаимодействие составляющих TC ОБЭР и их причинно-следственные связи проявляются под воздействием  $CO\Phi$  модели  $\Gamma$ ИПУ TC ОБЭР.
- 8). Заранее установив показатель эффективности ГИПУ ТС ОБЭР, можно подобрать требуемое техническое оснащение для осмотра и контроля состояния ВЛЭП, а также предотвращения и устранения ГИО.
- 9). Тенденции развития систем управления объектом электроэнергетической отрасли таковы, что роль ЛПР все более сводится к контролю за функционированием оборудования и

вмешательству при возникновении нестандартных ситуаций, т.е. ситуаций, требующих формирования решения.

- 10). Для развития оперативного мышления требуется применять игровое (проблемное) обучение, которое позволяет полноценно сосредоточиться на различии ситуаций, встречающихся в оперативной деятельности.
- 11). Статистика поведения персонала в условиях ГВС и натурные эксперименты не позволяют с необходимой определенностью прогнозировать ход и результаты ликвидации ГВС. Поэтому в основу поведения персонала в сложных ГВС должна быть положена полученная ранее модель ГИПУ ТС ОБЭР.
- 12). При совершенствовании кадрового обеспечения должен быть осуществлен подбор минимального состава по специальностям основной, дополнительной, и по разным уровням квалификации.
- 13). Необходимо осуществлять подбор членов бригады для выполнения каждой отдельной элементарной операции, так как может потребоваться персонал с различными психосоциальными данными и уровнем квалификации.
- 14). Человек остается важнейшим звеном как в ныне существующих, так и проектируемых системах управления. Это полностью относится и к системам электроснабжения. Частичное моделирование некоторых функций человека не может служить основанием для предположения о том, что человек будет вытеснен из сферы управления и обеспечения безопасности электроснабжения.

#### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Задача автора заключалась в представлении возможных путей системного решения проблемы геоинформационной поддержки обеспечения безопасности электроснабжения региона в условиях деструктивного воздействия гидрометеорологических факторов.

Основные выводы и итоги диссертации. Использование ПГД и ТТД на базе применения ГИС позволяет получать требуемые характеристики о процессах, протекающих на обширной территории при воздействии на объект управления различных факторов окружающей среды. Главным элементом ГИПУ ТС ОБЭР является ГИС, которая позволяет обрабатывать пространственно-временные характеристики за адекватное время. Кроме того, возможность интеграции в модель управления различных баз данных в облике единой ГИС способствует повышению показателя эффективности управления территориально-распределёнными объектами, что гарантирует удовлетворение потребностей населения страны.

На базе системной интеграции процессов геоинформационной поддержки обеспечения безопасности электроснабжения региона и показателя безопасности был разработан СОФ ГИПУ ТС ОБЭР в виде математической модели решения человека. Процесс формирования решения представляет собой выбор подходящей альтернативы из ряда возможных. Всегда ЛПР находится в ситуации выбора, он должен выработать планы действий и, сравнив их, сделать выбор. Но при наличии СОФ и при постановке конкретной цели (установлении показателя эффективности ГИПУ ТС ОБЭР) перед ЛПР есть только одно, адекватное сложившейся обстановке решение. Решение как выбор упорядоченных СОФ альтернатив позволяет гарантировать бесперебойное электроснабжение региона в условиях воздействия различных факторов окружающей среды, в том числе гидрометеорологических.

Сложность выявления законов синтеза ТС ОБЭР состоит в том, что её три субъекта управления должны быть едины и в то же время отражать их отличительные особенности.

Проводить натурные эксперименты c целью выявления связей между гидрометеорологическим факторами и критерием безопасности электроснабжения региона не представляется возможным не только в силу непрерывного характера электроснабжения, но также и потому еще, что любая содержательная гипотеза о поведении такой сложной системы требует специального и независимого исследования. Эту задачу можно решить только методами математического моделирования и численного экспериментирования.

Человек остается важнейшим звеном как в ныне существующих, так и проектируемых системах управления. Это полностью относится и к системам электроснабжения. Частичное моделирование некоторых функций человека не может служить основанием для предположения

о том, что человек будет вытеснен из сферы управления и обеспечения безопасности электроснабжения.

Особенность деятельности персонала, предотвращающего или ликвидирующего обледенение ВЛЭП, состоит в том, что на стадии формирования им решения персонал работает с информационной моделью системы электроснабжения.

Таким образом, математическая модель деятельности ЛПР в условиях ГВС, примененная в настоящей работе, лежит в основе ГИПУ ТС ОБЭР.

В целом, в исследовательской работе предложены основы построения методики ГИПУ ТС ОБЭР. Представленное геоинформационное моделирование процессов геоинформационной поддержки обеспечения безопасности электроснабжения региона предоставляет возможность внедрения в организациях гарантированного подхода к управлению процессами устойчивого и стабильного электроснабжения на базе применения ГИС.

Рекомендации. Предложенный в рамках диссертационного исследования подход на основе ЗСЦО позволяет гарантировать достижение требуемой цели деятельности в виде обеспечения безопасности электроснабжения региона в условиях деструктивного воздействия гидрометеорологических факторов. ГИПУ ТС ОБЭР на базе применения ГИС УБЭР с требуемым информационным обеспечением является тем необходимым инструментом для решения задачи по предотвращению нарушения электроснабжения, который позволит достигать требуемого показателя безопасности электроснабжения региона путём формирования процессов с наперёд заданными свойствами. В связи с этим, полученные результаты рекомендуются для внедрения в системы управления электроэнергетической отраслью.

Перспектива. Нахождение численных значений переменных модели ГИПУ ТС ОБЭР представляет собой чрезвычайно сложную и трудоёмкую задачу. Необходимо подчеркнуть, что единственным источником для определения численных значений является опыт либо натурный эксперимент, проведение которого чрезвычайно осложнено различными обоснованными факторами. Поэтому реальными являются два пути: обработка эксплуатационных данных, содержащихся в оперативных журналах, сводках, актах и других документах, и постановка численного эксперимента при помощи средств ЭВМ. Следовательно, следующие работы в области тематики исследования будут направлены на разработку методики установления численных значений переменных модели ГИПУ ТС ОБЭР.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90225.

### СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

 АРМ
 – автоматизированное рабочее место

 ВЛЭП
 – воздушные линии электропередачи

ГВС – гололёдно-ветровая ситуация

ГИО - гололёдно-изморозевое отложение

ГИПУ – геоинформационная поддержка управления

ГИПУ ТС ОБЭР – геоинформационная поддержка управления территориальной

системой обеспечения безопасности электроснабжения региона

ГИС УБЭР – геоинформационная система управления безопасностью

электроснабжения региона

ГИУ — геоинформационное управление ДУ — дифференциальные уравнения ЕНП — естественно-научный подход ЕЭС — Единая энергетическая система

ЗСЦО – Закон сохранения целостности объекта
 КНЯ – комплекс неблагоприятных явлений

ЛПР – лицо, принимающее решение

ЛС – линия связи

ЛЭП – линия электропередачи

НШП – научно-педагогическая школа ОВБ – оперативно-выездная бригада

ОЗП – осенне-зимний период

ОЯ – опасные природные явления

ПГД – пространственные географические данные

ПУЭ – Правила устройства электроустановок

СО ЕЭС – системный оператор Единой энергетической системы

СОФ – системообразующий фактор

ТО – техническое оснащение

ТС ОБЭР – территориальная система обеспечения безопасности

электроснабжения региона

ТТД – технико-технологические данные

УСПОБ – условие существования процесса обеспечения безопасности

ФАМ – формальный аксиоматический метод

ФШ – Федеральный штаб
 ЧФ – человеческий фактор
 ЭС – электрическая сеть

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Конюхова Е.А. Электроснабжение объектов: Учеб. пособие для студ. учреждений сред. проф. образования. М.: Издательство «Мастерство», 2002. 320 с.
- Колесников Д.Г. Единое управление электроэнергетической отраслью условие устойчивой работы энергосистем и надёжного электроснабжения потребителей // Вестник Адыгейского государственного университета. Серия 5: Экономика. 2018. №1 (215). С. 54-60.
- 3. Малафеев А.В. Оперативно-диспетчерское управление в электроэнергетике: Учеб. пособие. Магнитогорск: ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2020. 99 с.
- Матвеев В.Н., Микрюков А.М., Науменко С.Н., Романенко Т.Ю. Повышение безопасности и эффективности функционирования диспетчерской службы энергопредприятия // Вестник КузГТУ. – 2005. – №2. – С. 41-43.
- 5. Федеральный закон «Об электроэнергетике» от 26.03.2003 г. № 35-ФЗ.
- Проценко П.П., Лисовский В.В. Интеграция распределенной генерации в ЕЭС России в составе активных энергетических комплексов // Вестник Амурского государственного университета. Серия: Естественные и экономические науки. 2021. №93. С. 79-82.
- 7. Биденко С.И., Самотонин Д.Н., Яшин А.И. Геоинформационные модели и методы поддержки управления. СПб.: Изд-во ФВУ ПВО, 2003. 224 с.
- Афлетонов Р.А., Алаев Т.В. Комплексный подход к вопросу снижения аварийности эксплуатируемого электроэнергетического оборудования // Экспозиция Нефть Газ. 2015. №4 (43). С. 96-97.
- 9. Захаренко С.Г., Малахова Т.Ф., Захаров С.А., Бродт В.А., Вершинин Р.С. Анализ аварийности в электросетевом комплексе // Вестник КузГТУ. 2016. №4 (116) С. 94-99.
- 10. Герасименко А.А. Передача и распределение электрической энергии: учебное пособие / А.А. Герасименко, В.Т. Федин. 4-е изд., стер. М.: КНОРУС, 2014. 648 с.
- Гашо Е.Г., Гужов С.В., Кролин А.А., Началов А.В. Расчёт ущербов электротехнического комплекса московского мегаполиса от опасных климатических изменений // Известия ТулГУ. Технические науки. 2018. №4. С. 439-450.
- 12. Блохина В.И., Ворожцов В.И. Климатические факторы, воздействующие на системы электроснабжения на Дальнем Востоке России // Вестник ТГЭУ. 2005. №1. С. 109-115.

- 13. Бобылев П.М., Дыган М.М. Адаптация к изменениям климата: новый вызов развитию электроэнергетики России // ЭП. 2020. №3 (145). С. 80-94.
- 14. Соколов Ю.И. Риски экстремальных погодных явлений // Проблемы анализа риска. 2018. №3. С. 6-21.
- Григораш О.В., Чумак М.С., Кривошей А.А. Концепция построения систем бесперебойного электроснабжения // Научный журнал КубГАУ. 2016. №119. С. 1159-1179.
- Винников А.В., Усков А.Е., Хицкова А.О., Горбачёв В.А. Классификация и оценка эффективности систем бесперебойного электроснабжения // Научный журнал КубГАУ. 2015. №107. С. 1166-1179.
- 17. Сибикин Ю.Д. Электроснабжение: учебное пособие / Ю. Д. Сибикин. Москва: Директ-Медиа, 2014. 327 с.
- 18. Катеров Ф.В., Ремесник Д.В. Особенности работы электроэнергетических систем в нестационарном режиме // European research. 2016. №8 (19). С. 47-48.
- 19. Катеров Ф.В., Ремесник Д.В. Виды режимов энергетических систем // Научный журнал. -2016. №8 (9). -C. 22-23.
- Александрова Л.Э., Щедрин В.А. Особенности расчёта показателей режима при ограничении электропотребления для обеспечения функциональной надёжности // Вестник КГЭУ. 2019. №2 (42). С. 27-38.
- 21. Медведев Д. В. Методика построения моделей автоматизированных систем управления технологическими процессами // Перспективы развития информационных технологий. -2011.- N = 4.-C.84-88.
- 22. Даминов А.А., Атмирзаев Т.У., Махмудов Н.М., Шарипов Ф.Ф. Перспективные направления автоматизированного управления процесса производства, передачи и потребления электроэнергии // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2017. №2-3. С. 59-62.
- 23. Карагодин В.В., Рыбаков В.В., Рыбаков Д.В., Камчалов С.С. Направления развития систем электроснабжения специальных объектов в условиях реализации инновационного сценария развития электроэнергетики // Известия ТулГУ. Технические науки. 2022. №3. С. 168-173
- 24. Кузьменкова В.Д. Цифровизация электроэнергетической промышленности // ЕГИ. 2019. №26 (4). С. 115-119.
- 25. Бердников М.С. Современные средства автоматизации распределительных электрических сетей // Наука и образование сегодня. 2018. №6 (29). С. 32-33.

- 26. Головко С.В., Турпищев Ш.А., Рогов А.В., Аникеев А.В. Автоматизированное рабочее место диспетчера электрических сетей // Вестник АГТУ. 2019. №1 (67). С. 23-29.
- 27. Шайхутдинов А.М. Анализ перспективных технологий в области энергетики // Juvenis scientia. -2015. -№1. С. 37-39.
- 28. Лобова Т.А., Лобов Р.Б. О возможности использования модернизированного метода последовательного сужения исходного множества векторных оценок для построения алгоритмов автоматического управления системами электроснабжения // Сборник материалов XL сессии научного семинара по тематике «Диагностика энергооборудования». 2018. С. 46-52.
- Лещенко А.Ю. Повышение эффективности использования электроэнергии за счет оптимального распределения нагрузки потребителя // Вестник магистратуры. – 2020. – №1-1 (100) – С. 15-17.
- 30. Бялецкая Е.М., Дербасова Е.М., Луцев А.С. Система анализа балансов электроэнергии и нагрузок на электрических сетях // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. 2019. №1 (27). С. 115-123
- 31. Герасименко А.А., Федин В.Т. Передача и распределение электрической энергии / Герасименко А.А., Федин В.Т. Изд. 2-е. Ростов н/Д: Феникс, 2008. 715 с.
- 32. Постановление Правительства РФ от 16.02.2008 № 86 «О штабах по обеспечению безопасности электроснабжения».
- 33. Антропова В.Р., Сухачев И.С., Сушков В.В., Мартьянов А.С. Разработка вероятностной модели кратковременных нарушений электроснабжения // Электротехнические и информационные комплексы и системы. − 2021. − №2. − С. 76-85.
- 34. Лесных В.В., Тимофеева Т.Б. Классификация межсистемных аварий на инфраструктурно сложных территориях // Экономика региона. 2022. №2. С. 542-555.
- 35. Туляков Л.В. Пути снижения хозяйственных рисков в электроэнергетике // Вестник МГТУ. -2010. -№1. -C. 218-222.
- 36. Гончаров А. К. Повышение надёжности электроснабжения предприятий пищевой промышленности // Известия вузов. Пищевая технология. 2006. №6. С. 74-76.
- 37. Регламент взаимодействия федерального штаба и региональных штабов, утвержденный протоколом федерального штаба от 15.02.2015 г. №15.
- 38. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). 7-ое издание (утв. приказом Минэнерго РФ от 08.07.2002 №204.

- 39. Кузьмин П.С. Активные потребители электроэнергии: обзор инновационных моделей взаимодействия субъектов электроэнергетики и конечных потребителей // СРРМ. 2021. №4. С. 306-321.
- Смышляева Е. Г. Участие энергоемких промышленных потребителей в рынке электроэнергии в России // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук.

   2010. №12. С. 197-201.
- 41. Толкачев Я.М., Авакян М.К., Тютин Д.А., Толкачев В.М., Баталов П.В. Надёжность энергоснабжения крупных промышленных потребителей в Арктике // Известия ТулГУ. Технические науки. 2021. №9. С. 44-51.
- 42. Демидова Г.Л., Лукичев Д.В. Введение в специальность Электроэнергетика и электротехника СПб: Университет ИТМО, 2016. 108 с.
- 43. Мельник М.А., Волкова Е.С., Фузелла Т.Ш. ГИС-технологии как эффективный инструмент для оценки негативных природно-климатических факторов, лимитирующих развитие аграрного природопользования // Научный журнал КубГАУ. -2016.- N 124.- C.650-661.
- 44. Нетойлад Д.В., Копылов С.А. Междисциплинарный подход к прогнозированию опасных природных явлений // Наука-2020. 2021. №8 (53). С. 93-98.
- 45. Масляев А.В. Населенные пункты России не защищены от воздействия опасных природных явлений // Жилищное строительство. 2019. №5. С. 36-42.
- 46. Рычко О.К. Формирование комплекса неблагоприятных метеорологических явлений как факторов возникновения экологического риска и их мониторинг в аридных геосистемах // Известия ОГАУ. 2011. №29-1. С. 230-231.
- 47. ГОСТ Р 22.0.03-2020 Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Природные чрезвычайные ситуации. Термины и определения.
- 48. Костин В.Н. Системы электроснабжения. Конструкции и механический расчет: Учебное пособие. СПб.: СЗТУ, 93 с.
- 49. Снитко Л.В. Устойчивость опор линий электропередачи, расположенных на обводнённых и слабых грунтах // Вестник ИрГТУ. 2009. №4 (40). С. 179-182.
- 50. Рыбаков Л.М., Ласточкин С.В., Захватаева А.О. Совершенствование метода технического обслуживания и текущего ремонта для предотвращения развития дефектов у ослабленных элементов сельских распределительных сетей 10 кВ // Вестник ЧГУ. 2019. №1. С. 119-133.
- 51. Курский А.А. Математическое моделирование статистики отключений линий электропередач 110 кв по невыясненным причинам // International journal of professional science. -2019. N = 12. C. 66-70.

- 52. Кабашов В.Ю. Повышение эксплуатационной надёжности сельских ВЛ 6-10 кВ в условиях воздействия неблагоприятных климатических факторов // Символ науки. 2017. №3. С. 66-70.
- 53. Акбаров И.К. Проблема борьбы с гололёдоборазованием на воздушных линиях передач // Science Time. 2019. №7 (67). С. 46-51.
- 54. Хакимзянов Э.Ф., Минуллин Р.Г. Расчет влияния гололёдных образований на условия распространения импульсных сигналов по проводам линий электропередачи // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2011. №9-10. С. 167-172.
- 55. Короткевич М.А., Прокофьева Н.А. Проектирование больших переходов воздушных линий электропередачи // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2018. №5. С. 432-439.
- 56. Магомедов М.А. Выбор оптимальных конструкций при проектировании воздушных линий электропередачи в сложных инженерно-геологических условиях // Инновации и инвестиции. 2021. №7. С. 127-130.
- 57. Хамидуллин И.Н., Ильин В.К., Сабитов Л.С., Стрелков Ю.М. К вопросу о надёжности воздушных линий электропередачи // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2017. №1. С. 5-10.
- 58. Бучинский В.Е. Атлас обледенения проводов / Под ред. проф. А. Д. Заморского. Ленинград: Гидрометеоиздат, 1966. 114 с.
- 59. Фурсанов М.И., Фарино А.А., Горудко П.С. Гололёдные аварии на ЛЭП причины появления и способы предотвращения // ЭиМ. №2 (95). 2017. С. 25-29.
- 60. Лебедева Ю.В., Шевченко Н.Ю., Угаров Г.Г. Концепции развития воздушных линий электропередачи, подверженных экстремальным метеовоздействиям и их экономическая оценка // Вестник СГТУ. 2011. №3 (54). С. 90-94.
- 61. Коваленко И.В. Система мониторинга воздушных линий электропередач как средство для оценки состояния ЛЭП // Вестник магистратуры. 2021. №6-2 (117). С. 7-8.
- 62. Шелковников Д.Н. Перспективная система защиты линий электропередачи от гололёдных образований // ОНВ. 2016. №5 (149). С. 104-108.
- 63. Минуллин Р.Г., Губаев Д.Ф. Обнаружение гололёдных образований на линиях электропередачи локационным зондированием. Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2010. 208 с.
- 64. СТО 56947007-29.240.057-2010. Стандарт организации ОАО «ФСК ЕЭС». Методические указания по определению климатических нагрузок на ВЛ с учетом ее длины.

- 65. Губаев Д.Ф. Обнаружение гололёда на линиях электропередачи локационным методом: автореферат дис. ... кандидата технических наук: 05.11.13 / Губаев Дамир Фатыхович; [Место защиты: Казан. гос. энергет. ун-т]. Казань, 2009. 19 с.
- 66. Виноградов А.А., Данилин А.Н., Кузнецова Е.Л., Курдюмов Н.Н., Тарасов С.С. О гасителе пляски проводов воздушных ЛЭП // Известия ТулГУ. Технические науки. 2017. №7. С. 124-131.
- 67. Баранов А.П. Методы раннего предупреждения и борьбы с гололёдными отложениями на проводах ЛЭП // Актуальные вопросы современной науки. 2011. №18. С. 212-219.
- 68. Клинов Ф.Я. Изморозь и гололёд в нижнем 500-метровом слое атмосферы / Ф.Я. Клинов; Моск. центр по гидрометеорологии и наблюдению природ. среды. Л.: Гидрометеоиздат, 1990. 138 с.
- 69. Зайдуллина К.А., Потапчук Н.К. Гололёд и система измерения его нагрузки на провода воздушных линий электропередачи в Белорецком районе // Вестник УГАТУ = Vestnik UGATU. 2018. №3 (81). С. 86-97.
- 70. РД 34.20.184-91. Методические указания по районированию территорий энергосистем и трасс ВЛ по частоте повторяемости и интенсивности пляски проводов).
- 71. Елизарьев А.Ю. Обеспечение надёжности работы воздушных линий электропередачи в условиях гололёдных нагрузок: диссертация ... кандидата Технических наук: 05.14.02 / Елизарьев Артем Юрьевич; [Место защиты: ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»], 2017. 184 с.
- 72. Геркусов А.А. Влияние температуры проводов воздушной линии электропередачи на их сопротивление и потери электроэнергии // Известия Транссиба. 2020. №1 (41). С. 123-132.
- 73. Акшеев Р.К. Повышение надёжности воздушных линий при воздействии гололёдноветровых нагрузок // Фундаментальные и прикладные исследования: проблемы и результаты. 2014. №11. С. 119-123.
- 74. Диагностика, реконструкция и эксплуатация воздушных линий электропередачи в гололёдных районах/ И.И. Левченко, А.С. Засыпкин, А.А. Аллилуев, Е.И. Сацук. Учеб. пособие/М: Издательский дом МЭИ, 2007. 494 с.
- 75. Сергей И.И., Виноградов А.А., Данилин А.Н., Курдюмов Н.Н. О моделировании пляски проводов воздушных ЛЭП и параметрическом анализе эффективности маятниковых гасителей // Вестник ПНИПУ. Механика. 2018. №4. С. 256-265.

- 76. Пустыльников Л.Д., Шкапцов В.А. Аэродинамически неустойчивые колебания проводов воздушных линий электропередачи с гололёдными отложениями. Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 1991, № 2.
- 77. Сергей И.И., Пономаренко Е.Г., Потачиц Я.В., Юдина Н.А. Анализ крутильной стабильности расщепленных фаз // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2019. №6. С. 503-513.
- 78. Бочаров Ю.Н., Титков В.В., Абитаева Р.Ш., Бекбаев А.Б., Джаманбаев М.А. Свободное крутильное колебание расщепленного провода линий электропередач // Материаловедение. Энергетика. 2017. №1. С. 90-97.
- 79. Кольцов А.В., Ковтун Г.Н., Горюшин Ю.А., Жернаков Ю.В., Салихзянов Р.М., Лебедев И.А. Новые решения в системах плавки гололёда на воздушных линиях электропередачи высокого напряжения 220 и 330 кВ // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2016. №4. С. 21-27.
- 80. Дьяков А.Ф. Предотвращение и ликвидация гололёдных аварий в электрических сетях энергосистем: Систем. подход в электроэнергетике / А.Ф. Дьяков, А.С. Засыпкин, И.И. Левченко. Пятигорск: Изд-во РП «Южэнерготехнадзор», 2000. 284 с.
- 81. Короткевич М.А. Проектирование линий электропередачи. Механическая часть: учеб. пособие / М. А. Короткевич. Минск: Выш. шк., 2010. 574 с.
- 82. Ратушняк В.С., Ратушняк В.С., Ильин Е.С., Вахрушева О.Ю. Некоторые аспекты выбора средств борьбы с гололёдными отложениями на ЛЭП // Известия Транссиба. 2019. №1 (37). С. 102-111.
- 83. Иванова И.Х. Мероприятия по борьбе с гололёдом на линиях электропередач // Вестник магистратуры. 2018. №12-4 (87). С. 14-15.
- 84. Мясоедов Ю.В., Коржова О.Н. Плавка гололёда на линиях электропередачи: методы, инновации, эксплуатация // Вестник Амурского государственного университета. Серия: Естественные и экономические науки. 2019. №87. С. 65-66.
- 85. Елизарьев А.Ю., Валеев Азат Рустамович Плавка гололёда на воздушных линиях электропередачи без отключения потребителей // Вестник УГАТУ = Vestnik UGATU. 2015. №4 (70). С. 59-65.
- 86. Сазыкин В.Г., Кудряков А.Г., Багметов А.А. Влияние гололёдно-ветровых нагрузок на надёжность линий электропередачи Кубани // Инновационная наука. 2016. №6-2. С. 137-142.
- 87. Мясоедов Ю.В., Коржова О.Н. Плавка гололёда на линиях электропередачи: методы, инновации, эксплуатация // Вестник Амурского государственного университета. Серия: Естественные и экономические науки. − 2019. − №87. − С. 65-66.

- 88. Марков Н.Г. Геоинформационные системы предприятий нефтегазовой отрасли: функциональность, архитектура и перспективы развития // Известия ТПУ. 2017. №9.
   С. 16-32.
- 89. Бычков А.Г. Использование геоинформационных систем для решения прикладных задач // Проблемы Науки. 2017. №23 (105). С. 24-27.
- 90. Воронин А.В. Результаты исследования геоинформационных систем в контексте инновационных технологий как среды визуализации и аналитической обработки данных в алгоритмах дополненной реальности // Большая Евразия: развитие, безопасность, сотрудничество. − 2020. − №3-1. − С. 466-469.
- 91. Болдырев Б.Ю., Бухарицин П.И. Использование современных ГИС-технологий в решении задач гидрометеорологического обеспечения безопасности мореплавания // Южно-российский вестник геологии, географии и глобальной энергии. − 2007. − № 2. − С. 48-56.
- 92. Панамарева О.Н. Анализ уровня представления географических информационных платформ за рубежом и в России, перспективы их развития // Вестник МФЮА. 2021.
   №4. С. 183-206.
- 93. Калинин Н.А. Географические информационные системы в метеорологии: методическое пособие / Н. А. Калинин, А. А. Смирнова, А. Л. Ветров. Пермь: Пермский гос. ун-т, 2007. 367 с.
- 94. Грабчак Е.П. Надёжное электроснабжение это приоритет для всех энергетиков // ЭП.
   2021. №7 (161). С. 4-9.
- 95. Коротков В.А. Задачи взаимодействия субъектов электроэнергетики России в целях реализации стратегии развития ее электросетевого комплекса // ЭП. 2017. №6. С. 84-92.
- 96. Дементьев С.С. Интеллектуальная система мониторинга гололёдообразования на воздушных линиях электропередачи: диссертация ... кандидата технических наук: 05.11.16 / Дементьев Сергей Сергеевич; [Место защиты: Волгоградский государственный технический университет]. Волгоград, 2019. 142 с.
- 97. Минуллин Р.Г., Касимов В.А., Филимонова Т.К., Яруллин М.Р. Локационное обнаружение гололёда на воздушных линиях электропередачи. Часть 1. Способы обнаружения гололёда // Информатика, телекоммуникации и управление. 2014. №2 (193). С. 61-73.
- 98. Елизарьев А.Ю., Валеев А.Р., Громова Г.А. Совершенствование системы контроля гололёдно-ветровых нагрузок на воздушных линиях электропередачи // Вестник УГАТУ = Vestnik UGATU. 2016. №1 (71). С. 136-142.

- 99. Минуллин Р.Г., Абдуллазянов Э.Ю., Касимов В.А., Яруллин М.Р. Современные методы обнаружения гололёда на проводах воздушных линий электропередачи часть 1. Методы прогнозирования и взвешивания проводов // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2013. №7-8. С. 68-78.
- 100. Никитина И.Э., Абдрахманов Н.Х., Никитина С.А. Способы удаления льда с проводов линий электропередачи // Нефтегазовое дело. 2015. №3. С. 794-823.
- 101. Стрелецкий Н.Б. Способы борьбы с гололёдообразованием на проводах ВЛ // Вестник науки. -2020. -№2 (23). С. 156-158.
- 102. Иванова И.Х. Мероприятия по борьбе с гололёдом на линиях электропередач // Вестник магистратуры. -2018. -№12-4 (87). С. 14-15.
- 103. Молошная Е.С., Мельников И.В., Козоброд В.Н. Анализ методов плавки гололёда на воздушных линиях электропередачи в условиях Южного региона // Глобальная ядерная безопасность. – 2020. – №2 (35). – С. 92-99.
- 104. Мясоедов Ю.В., Коржова О.Н. Плавка гололёда на линиях электропередачи: методы, инновации, эксплуатация // Вестник Амурского государственного университета. Серия: Естественные и экономические науки. – 2019. – №87. – С. 65-66.
- 105. Базаров А.А., Данилушкин А.И., Осипов В.С. Система плавки гололёда на проводах линий электропередачи без отключения нагрузки // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2015. №3 (47). С. 109-117.
- 106. Молошная Е.С., Нечитайлов В.В., Мельников И.В., Баран С.А. Анализ возможности контроля интенсивности плавки гололёда постоянным током в высоковольтных электрических системах // Глобальная ядерная безопасность. 2021. №2 (39). С. 77-83.
- 107. Гомонай М.В., Кушляев В.Ф. Проблемы обеспечения безопасных условий эксплуатации ЛЭП на участках, проходящих через лесонасаждения // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. 2011. №4. С. 52-56.
- 108. Титов Д.Е., Щуров А.Н. Анализ статистических данных о результатах работы систем мониторинга гололёдообразования // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2014. №4. С. 12-17.
- 109. Соловьев В.А., Черный С.П., Сухоруков С.И. Об эффективности борьбы с гололёдными образованиями на проводах линий электропередачи // ЭС и К. 2014. №1 (22). С. 14-17.
- 110. Морозова Н.М. Методология науки как наука о методах познания / Н.М. Морозова // Вестник ВИ МВД России. 2014. №4. С. 120-122.

- 111. Социологический энциклопедический словарь: на рус., англ., нем., фр. и чеш. языках / Ред.-координатор Г.В. Осипов. Ин-т соц.-полит. исслед. Рос. акад. наук. Ин-т социологии Рос. акад. наук. М.: НОРМА-ИНФРА, 2000. 480 с.
- 112. Моисеев Н.Н. Математические задачи системного анализа / Н.Н. Моисеев. М.: Наука,  $1981.-468~\mathrm{c}.$
- 113. Анохин П.К. Принципиальные вопросы общей теории функциональных систем / П.К. Анохин. М.: Директ-Медиа, 2008. 131 с.
- 114. Бурлов В.Г., Грачев М.И., Васильев М.Н., Капицын С.Ю. Модель управления в социальных и экономических системах с учетом воздействия на информационные процессы в обществе // Т-СОММ: Телекоммуникации и транспорт. 2020. №5. С. 46-55.
- 115. Васильев Ю.С. Теории систем и системный анализ: истоки и перспективы / Ю.С. Васильев, В.Н. Волкова, В.Н. Козлов // SAEC. 2021. №1. С. 7-29.
- 116. Shirali G.A. A framework for quantitative assessment of socio-technical resilient systems using Multiple Criteria Decision Making (MCDM): a case study in an oil site / G.A. Shirali, Y.T. Birgani, D. Afshari, L.M. Salahi // Iran Occupational Health. − 2020. − №17(1).
- 117. Бурлов В.Г. Закон сохранения целостности объекта методологическая основа решения задач информационной войны и обеспечения безопасности / В.Г. Бурлов // В книге: Нейрокомпьютеры и их применение. Тезисы докладов. 2017. С. 261-263.
- 118. Wiedeman C. Modeling of moral decisions with deep learning / C. Wiedeman, G. Wang, U. Kruger // Visual Computing for Industry, Biomedicine, and Art. 2020. №3(1).
- 119. Мельников Ю.Б. Улучшение адекватности экономических моделей / Ю.Б. Мельников,
   Е.А. Онохина, С.А. Шитиков // Journal of new economy. 2018. №1. С. 94-106.
- 120. Шевчук В.П. Проверка адекватности математических моделей теплоэнергетических объектов / В.П. Шевчук, Е.Л. Еремина, Е.Ю. Силаева // ИВД. 2019. №6 (57). С. 10.
- 121. Орловский С.А. Проблемы принятия решений при нечёткой исходной информации / С.А. Орловский. М.: Наука, 1981. 206 с.
- 122. Бурков В.Н. Введение в теорию управления организационными системами / В.Н. Бурков, Н.А. Коргин, Д.А. Новиков. Под ред. чл.-корр. РАН Д.А. Новикова. 2-е изд. М.: Либроком, 2013. 261 с.
- 123. Дружинин В.В. Введение в теорию конфликта / В.В. Дружинин, Д.С. Конторов, М.Д. Конторов. М.: Радио и Связь, 1989. 288 с.
- 124. Burlov V.G. Mathematical models for solving the problems of information warfare / V.G. Burlov // Proceedings of the 16th International Conference on Cyber Warfare and Security

- ICCWS 2021. 25-26 February 2021. A virtual conference hosted by Tennessee Tech University and the Oak Ridge National Laboratory USA. 2021. P. 37-47.
- 125. Burlov V.G. Method of consecutive expert estimates in control problems for the development of large-scale potentially dangerous systems / V.G. Burlov, V.F. Volkov // Engineering Simulation. − 1994. − T. 12. − № 1. − C. 110-115.
- 126. Бурлов В.Г., Истомин Е.П. Подготовка специалистов по информационной безопасности ГИС // Региональная информатика и информационная безопасность. Сборник трудов. 2019. 2019. С. 297-302.
- 127. Воскобоев В.Ф. Об устойчивом функционировании объекта электроснабжения в условиях чрезвычайных ситуаций / В.Ф. Воскобоев, А.Ю. Лебедев // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. 2019. №4 (43). С. 106-111.
- 128. Антонов Ю.М. Методологические аспекты развития систем децентрализованного электроснабжения сельских потребителей, в том числе животноводческих объектов / Ю.М. Антонов // Техника и технологии в животноводстве. 2017. №3 (27). С. 65-68.
- 129. Karpachevskiy A.M. GIS-analysis of the Ural power grid vulnerability to the impact of sleet and wind / A.M. Karpachevskiy, O.G. Filippova, P.E. Kargashin // Geography, Environment, Sustainability. − 2022. − №15(1). − P. 14-25.
- 130. Ширшов В.Д. Современные технологии безопасности жизнедеятельности / В.Д. Ширшов // Sciences of Europe. 2019. №36-3 (36). С. 48-51.
- 131. Oubennaceur K. Flood risk communication using ArcGIS StoryMaps / K. Oubennaceur, K. Chokmani, A.E. Alem, Y. Gauthier // Hydrology. №20218(4). Hawash, E. Change detection and urban expansion of Port Sudan, Red Sea, using remote sensing and GIS / E. Hawash, A. El-Hassanin, W. Amer, A. El-Nahry, H. Effat // Environmental Monitoring and Assessment. 2021. №193(11).
- 132. Chukwuma E.C. A GIS based flood vulnerability modelling of Anambra State using an integrated Ivfrn-Dematel-Anp Model / E.C. Chukwuma, C.C. Okonkwo, J.O. Ojediran, D.C. Anizoba, J.I. Ubah, C.P. Nwachukwu // Heliyon. − 2021. − №7(9).
- 133. Li D. A city monitoring system based on real-time communication interaction module and intelligent visual information collection system / D. Li, B. Qin, W. Liu, L. Deng // Neural Processing Letters. 2021. №53(4). P. 2501-2517.
- 134. Urquizo J.A. A structured data flow system for photogrammetric mapping: the foundation of a citywide Cadastral works / J.A. Urquizo, C. Mugnier // Paper presented at the ACM International Conference Proceeding Series. 2020. Part F168981. P. 108-116.

- 135. Мыслыва Т.Н. Использование функциональных возможностей ГИС и данных дистанционного зондирования для мониторинга и картографирования мелиорированных земель / Т.Н. Мыслыва, Ю.Н. Дуброва, А.С. Кукреш, Т.Н. Ткачева, Д.М. Лейко // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. 2022. №1. С. 176-183.
- 136. Медведенко С.А. Визуальный анализ данных пассажиропотока железнодорожного транспорта / С.А. Медведенко, Д.Е. Намиот // International Journal of Open Information Technologies. 2021. №6. С. 51-60.
- 137. Борисов Д.А. Методика определения пространственно-временного состояния техногенных объектов / Д.А. Борисов // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2017. №7. С. 14-18.
- 138. Бурлов В.Г., Маньков В.Д., Полюхович М.А. Разработка модели управления процессами обеспечения безопасности эксплуатации электроустановки // ТТПС. 2018. №4 (46). С.33-38.
- 139. Бурлов В.Г., Маньков В.Д., Полюхович М.А. Разработка технологии управления безопасностью электрических сетей на основе применения геоинформационной системы // ТТПС. 2020. №2 (52). С. 40-47.
- 140. Burlov V., Polyukhovich M.A. System integration of processes of ensuring electric power networks safety under the conditions of impact of meteorological factors // E3S Web of Conferences Volume 289 (2021). International Conference of Young Scientists «Energy Systems Research 2021». 2021. P. 01015.
- 141. Бурлов В.Г., Грачев М.И. Модель управления транспортными системами, учитывающей возможности инноваций // ТТПС. -2017. -№ 4 (42). C. 34-38.
- 142. Бурлов В.Г., Попов Н.Н., Гарсия Эскалона Х.А. Управление процессом применения космической геоинформационной системы в интересах обеспечения экологической безопасности региона // Ученые записки РГГМУ. 2018. № 50. С. 118-129.
- 143. Бурлов В.Г., Маньков В.Д., Полюхович М.А. Управление процессами обеспечения безопасности электрических сетей // В сборнике: «Информационные управляющие системы и технологии» (ИУСТ-ОДЕССА-2019) 2019. С. 195-197.
- 144. Polyukhovich M., Burlov V., Mankov V., Bekbayev A. (2019). Electric power supply management of the construction site in the interests of facilitating electrical safety. Paper presented at the E3S Web of Conferences, 140 doi:10.1051/e3sconf/201914008006
- 145. Burlov V., Mankov V., Polyukhovich, M. (2020). Safety management of the electric power supply process of the construction site, taking into account the qualification of the manager.

- Paper presented at the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 890(1) doi:10.1088/1757-899X/890/1/012186
- 146. Бурлов В.Г., Маньков В.Д., Полюхович М.А. Основы технологии управления процессами обеспечения безопасности эксплуатации электроустановки // Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право. 2019. №1 (33). С. 173-181.
- 147. Burlov V., Mankov V., Tumanov A., Polyukhovich, M. (2021). Safety management technology of electric networks using geo information system doi:10.1007/978-3-030-57453-6\_5
- 148. Burlov V., Polyukhovich M., Mankov V., Logvinova Yu. Development of safety management technology of electric power networks in order to sustainable development // E3S Web of Conferences Volume 274 (2021). 2nd International Scientific Conference on Socio-Technical Construction and Civil Engineering (STCCE - 2021). France, 2021. P. 10004.
- 149. Бурлов В.Г., Полюхович М.А., Идрисова Д.И. Модель геоинформационного управления безопасностью электроснабжения региона / В.Г. Бурлов, М.А. Полюхович, Д.И. Идрисова // Международный научно-исследовательский журнал. 2023. №7 (133). DOI: 10.23670/IRJ.2023.133.16
- 150. Приказ Министерства энергетики РФ от 12 июля 2018 г. № 548 «Об утверждении требований к обеспечению надёжности электроэнергетических систем, надёжности и безопасности объектов электроэнергетики и энергопринимающих установок «Правила предотвращения развития и ликвидации нарушений нормального режима электрической части энергосистем и объектов электроэнергетики».
- 151. Бурлов В.Г., Полюхович М.А. Модель геоинформационного управления безопасностью электроснабжения региона в условиях обледенения воздушных линий электропередачи // Информация и космос. 2023. № 2. С. 84-94.
- 152. Анохин П.К. Системные механизмы высшей нервной деятельности // М.:Наука. 1979. 453 с.
- 153. Бурлов В.Г., Маньков В.Д., Полюхович М.А. Разработка технологии управления электробезопасностью // В книге: Современные проблемы гидрометеорологии и устойчивого развития Российской Федерации. Сборник тезисов Всероссийской научнопрактической конференции. 2019. С. 521-522.
- 154. Бородин Е.Л., Биденко С.И., Травин С.В. Геоинформационная поддержка управления морской транспортной активностью: аспект интеграции геоданных // Эксплуатация морского транспорта. 2017. № 4 (85). С. 82-89

- 155. Бурлов В.Г., Маньков В.Д., Полюхович М.А. Синтез модели управления безопасностью электрических сетей с использованием геоинформационной системы // В сборнике: Региональная информатика и информационная безопасность. Сборник трудов конференций: Санкт-Петербургской международной конференции и Санкт-Петербургской межрегиональной конференции. Санкт-Петербург, 2020. С. 191-195.
- 156. Полюхович М.А., Маньков В.Д. Разработка технологии безопасной эксплуатации электротехнических устройств // В книге: Гагаринские чтения 2019. Сборник тезисов докладов XLV Международной молодежной научной конференции. Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). 2019. С. 473-474.
- 157. W. I. Schmitz, M. Schmitz, L. N. Canha, V. J. Garcia, Proactive home energy storage management system to severe weather scenarios, Applied Energy 279 (2020).
- 158. A. A. Abdelsalam, A. Y. Abdelaziz, Minimizing the cost of wide area monitoring systems by optimal allocation of PMUs and their communication infrastructure, Arabian Journal for Science and Engineering 45(8) (2020) P. 6453-6466.
- 159. Бурлов В.Г., Маньков В.Д., Полюхович М.А. Подход к обеспечению безопасности электрических сетей // В сборнике: Неделя науки СПбПУ. материалы научной конференции с международным участием. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. 2020. С. 76-78.
- 160. Бурлов В.Г., Полюхович М.А. Синтез системы обеспечения безопасности электроснабжения региона // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2022. T. 11. № 3 (59). C. 32-38.
- 161. Goodwin E., Mozer J., Di Gioia A., Power B. Predicting ice and snow loads for transmission lines. In the Proceedings of the First IWAIS 1983; 1(1): P. 267–273.
- 162. Тимофеева М.В. Улучшенная аналитическая модель обледенения проводов ЛЭП // Надёжность и безопасность энергетики. 2018. № 3. С. 222-226.
- 163. Бурлов В.Г., Полюхович М.А. Разработка методики геоинформационного управления безопасностью электроснабжения региона в условиях деструктивного воздействия гидрометеорологических факторов // Гидрометеорология и экология. 2023. № 70. С. 100-122.
- 164. Бурлов В.Г., Маньков В.Д., Полюхович М.А. Технология управления безопасностью электрических сетей // В сборнике: Информационные управляющие системы и технологии. Материалы IX Международной научно-практической конференции. 2020. С. 301-303.

- 165. Полюхович М.А., Бурлов В.Г., Маньков В.Д. Управление процессом обеспечения безопасности электрических сетей с применением геоинформационной системы // В сборнике: Сборник статей Круглого стола «Безопасность в профессиональной деятельности». Сборник статей Круглого стола «Безопасность в профессиональной деятельности», в рамках ІІ Всероссийской научно-практической конференции «Инновационные технологии и вопросы обеспечения безопасности реальной экономики» ITES-2020. Санкт-Петербург, 2020. С. 131-139.
- 166. Полюхович М.А. О системной интеграции процессов обеспечения безопасности электрических сетей // В сборнике: Неделя науки ИСИ. сборник материалов всероссийской конференции. В 3 ч.. Санкт-Петербург, 2021. С. 203-205.
- 167. Полюхович М.А. О возможности разработки технологии управления процессом обеспечения безопасности электрических сетей на базе геоинформационной системы // В сборнике: Биотехнологии и безопасность в техносфере. Материалы Всероссийской конференции. СПбПУ Петра Великого. 2021. С. 208-210.
- 168. Полюхович М.А., Маньков В.Д. Разработка геоинформационной системы управления электроснабжением // В книге: XLVII Гагаринские чтения 2021. Сборник тезисов работ XLVII Международной молодёжной научной конференции. Москва, 2021. С. 507-508.
- 169. Полюхович М.А., Бурлов В.Г., Идрисова Д.И., Логвинова Ю.В. Геоинформационное управление безопасностью электроснабжения региона на основе модели допустимого риска нарушения электроснабжения / М.А. Полюхович, В.Г. Бурлов, Д.И. Идрисова [и др.] // Международный научно-исследовательский журнал. 2023. №4 (130). DOI: 10.23670/IRJ.2023.130.22
- 170. Биденко С.И., Храмов И.С., Бенгерт А.А., Мучкаева И.С. Геоинформационная процедура оценки региональной ситуации на основе оперативного ИНС-анализа гидрометеорологической и экологической информации (на примере Обской губы) // Гидрометеорология и экология. − 2022. − № 68. − С. 508-524.
- 171. Маньков В.Д., Полюхович М.А. Применение геоинформационной системы для устойчивого функционирования электрических сетей // В книге: XLVII Гагаринские чтения 2021. Сборник тезисов работ XLVII Международной молодёжной научной конференции. Москва, 2021. С. 503-504.
- 172. Полюхович М.А. Основы информационного обеспечения процесса передачи электроэнергии в условиях деструктивного воздействия гидрометеорологических факторов // В сборнике: Проблемы управления безопасностью сложных систем. Материалы XXIX международной научно-практической конференции. Москва, 2021. С. 347-350.

- 173. Полюхович М.А. Представление информационного обеспечения геоинформационной системы управления безопасностью электроснабжения Арктики на базе модели решения человека // Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право. − 2022. − № S2. − C. 51-54.
- 174. Полюхович М.А. Разработка процессно-функциональной модели геоинформационного управления безопасностью электроснабжения Арктики // Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право. 2022. № S2. С. 45-48.
- 175. Полюхович М.А. Разработка этапов получения требуемых географических пространственных данных из базы ГИС для обеспечения безопасности электрических сетей // В сборнике: Биотехнологии и безопасность в техносфере. Сборник материалов II Национальной научной конференции студентов и молодых ученых. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. 2022. С. 196-198.
- 176. Элементы теории испытаний и контроля технических систем / В.И. Городецкий, А.К. Дмитриев, В.М. Марков и др.; под ред. Р.М. Юсупова. Л.: Энергия, Ленингр. отд-ние, 1978. 192 с.
- 177. Бурлов В.Г., Полюхович М.А. Совершенствование информационного обеспечения геоинформационной системы управления безопасностью электроснабжения региона в условиях обледенения воздушных линий электропередачи // Информация и космос. 2023. № 1. С. 138-147.
- 178. Полюхович М.А. О роли геоинформационной системы в прогнозировании обледенения воздушных линий электропередач // В сборнике: Инновационное развитие информационных систем и технологий в гидрометеорологии. сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции. Санкт-Петербург, 2022. С. 58-62.
- 179. Полюхович М.А. Геоинформационная система как инструмент обеспечения безопасности электрических сетей на территории Арктики // Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право. 2022. № S1. С. 15-16.
- 180. Бурлов В.Г., Полюхович М.А., Маньков В.Д. Информационная система управления процессом передачи энергии в условиях деструктивного воздействия гидрометеорологических факторов // В сборнике: Информационные управляющие системы и технологии (ИУСТ-ОДЕССА-2021). Материалы X международной научнопрактической конференции. 2021. С. 164-166.
- 181. Вахнина А.С., Полюхович М.А., Бурлов В.Г. Управление безопасностью электромонтера при обслуживании линий электропередач // В сборнике: Безопасность

- в профессиональной деятельности. сборник научных статей. Санкт-Петербург, 2021. C. 54-70.
- 182. Дьяков А.Ф. Надёжная работа персонала в энергетике / А.Ф. Дьяков. М.: Изд-во МЭИ, 1991. 222 с.
- 183. Ефремов С.В., Логвинова Ю.В., Полюхович М.А. Метод оценки производственной среды нестационарных рабочих мест // Безопасность жизнедеятельности. 2020. № 6 (234). С. 8-12.
- 184. Efremov, S., Logvinova, Y., Russkova, I., Polyukhovich, M. (2020). A method for assessing climatic parameters working at low temperatures as an element of technological safety. Paper presented at the IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 539(1).
- 185. Дьяков А.Ф. Системный подход к проблеме предотвращения и ликвидации гололёдных аварий в энергосистемах / А. Ф. Дьяков. М.: Энергоатомиздат, 1987. 160 с.

# Приложение А. Список научных работ автора по теме диссертации

- а) Публикации в изданиях, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий ВАК РФ по специальности 1.6.20:
- 1. Бурлов В.Г., *Полюхович М.А.* Совершенствование информационного обеспечения геоинформационной системы управления безопасностью электроснабжения региона в условиях обледенения воздушных линий электропередачи // Информация и космос. − 2023. − № 1. − С. 138-147. **(К2)**
- 2. Бурлов В.Г., *Полюхович М.А.* Модель геоинформационного управления безопасностью электроснабжения региона в условиях обледенения воздушных линий электропередачи // Информация и космос. -2023. -№ 2. C. 84-94. (**К2**)
- б) Публикации с содержанием результатов, соответствующих специальности 1.6.20 Геоинформатика, картография, и опубликованных в изданиях, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий ВАК РФ по смежным научным специальностям:
- 1. Бурлов В.Г., Маньков В.Д., *Полюхович М.А.* Разработка модели управления процессами обеспечения безопасности эксплуатации электроустановки // Технико-технологические проблемы сервиса. -2018. -№4 (46). С. 33-38.
- 2. Бурлов В.Г., Маньков В.Д., *Полюхович М.А.* Разработка технологии управления безопасностью электрических сетей на основе применения геоинформационной системы // Технико-технологические проблемы сервиса. 2020. №2 (52). С. 40-47.
- 3. Бурлов В.Г., *Полюхович М.А.* Синтез системы обеспечения безопасности электроснабжения региона // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2022. Т. 11. № 3 (59). С. 32-38.
- 4. Бурлов В.Г., *Полюхович М.А.* Разработка методики геоинформационного управления безопасностью электроснабжения региона в условиях деструктивного воздействия гидрометеорологических факторов // Гидрометеорология и экология. − 2023. − № 70. − С. 100-122.
- 5. *Полюхович М.А.*, Бурлов В.Г., Идрисова Д.И., Логвинова Ю.В. Геоинформационное управление безопасностью электроснабжения региона на основе модели допустимого риска нарушения электроснабжения / М.А. Полюхович, В.Г. Бурлов, Д.И. Идрисова [и др.] // Международный научно-исследовательский журнал. 2023. №4 (130). DOI: 10.23670/IRJ.2023.130.22
- 6. Бурлов В.Г., *Полюхович М.А.*, Идрисова Д.И. Модель геоинформационного управления безопасностью электроснабжения региона / В.Г. Бурлов, М.А. Полюхович, Д.И. Идрисова // Международный научно-исследовательский журнал. 2023. №7 (133). DOI: 10.23670/IRJ.2023.133.16

- в) Публикации в изданиях, рецензируемых в Scopus / Web of Science:
- 1. *Polyukhovich*, *M.*, Burlov, V., Mankov, V., & Bekbayev, A. (2019). Electric power supply management of the construction site in the interests of facilitating electrical safety. Paper presented at the E3S Web of Conferences, , 140 doi:10.1051/e3sconf/201914008006 (*Scopus*)
- 2. Burlov, V., Mankov, V., & *Polyukhovich*, *M*. (2020). Safety management of the electric power supply process of the construction site, taking into account the qualification of the manager. Paper presented at the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, , 890(1) doi:10.1088/1757-899X/890/1/012186 (*Scopus*)
- 3. Burlov, V., Mankov, V., Tumanov, A., & *Polyukhovich, M.* (2021). Safety management technology of electric networks using geo information system doi:10.1007/978-3-030-57453-6\_5 (*Scopus*)
- 4. Burlov, V., *Polyukhovich, M.* (2021). System integration of processes of ensuring electric power networks safety under the conditions of impact of meteorological factors. Paper presented at E3S Web of Conferences Volume 289 (2021). International Conference of Young Scientists «Energy Systems Research 2021». 2021. P. 01015. 10.1051/e3sconf/202128901015 (*Scopus*)
- 5. Burlov, V., *Polyukhovich*, *M.*, Mankov, V., Logvinova, Yu. (2021). Development of safety management technology of electric power networks in order to sustainable development. Paper presented at the E3S Web of Conferences Volume 274 (2021). 2nd International Scientific Conference on Socio-Technical Construction and Civil Engineering (STCCE 2021). France, 2021. P. 10004. doi:10.1051/e3sconf/202127410004 (*Web of Science*)
  - г) Публикации в других изданиях:
- 1. Бурлов В.Г., Маньков В.Д., *Полюхович М.А.* Основы технологии управления процессами обеспечения безопасности эксплуатации электроустановки // Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право. 2019. № 1 (33). С. 173-181.
- 2. Бурлов В.Г., Маньков В.Д., *Полюхович М.А.* Разработка технологии управления электробезопасностью // В книге: Современные проблемы гидрометеорологии и устойчивого развития Российской Федерации. Сборник тезисов Всероссийской научно-практической конференции. 2019. С. 521-522.
- 3. **Полюхович М.А.**, Маньков В.Д. Разработка технологии безопасной эксплуатации электротехнических устройств // В книге: Гагаринские чтения 2019. Сборник тезисов докладов XLV Международной молодежной научной конференции. Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). 2019. С. 473-474.
- 4. Бурлов В.Г., Маньков В.Д., *Полюхович М.А.* Управление процессами обеспечения безопасности электрических сетей // В сборнике: Информационные управляющие системы и технологии (ИУСТ-ОДЕССА-2019). 2019. С. 195-197.

- 5. Бурлов В.Г., Маньков В.Д., *Полюхович М.А.* Подход к обеспечению безопасности электрических сетей // В сборнике: Неделя науки СПбПУ. материалы научной конференции с международным участием. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. 2020. С. 76-78.
- 6. Бурлов В.Г., Маньков В.Д., *Полюхович М.А.* Синтез модели управления безопасностью электрических сетей с использованием геоинформационной системы // В сборнике: Региональная информатика и информационная безопасность. Сборник трудов конференций: Санкт-Петербургской международной конференции и Санкт-Петербургской межрегиональной конференции. Санкт-Петербург, 2020. С. 191-195.
- 7. Бурлов В.Г., Маньков В.Д., *Полюхович М.А*. Разработка системы управления безопасностью электрических сетей на основе применения геоинформационных систем // В книге: Современные проблемы гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды на пространстве СНГ. Сборник тезисов Международной научно-практической конференции, посвященной 90-летию Российского государственного гидрометеорологического университета. 2020. С. 583-585.
- 8. Бурлов В.Г., Маньков В.Д., *Полюхович М.А.* Технология управления безопасностью электрических сетей // В сборнике: Информационные управляющие системы и технологии. Материалы IX Международной научно-практической конференции. 2020. С. 301-303.
- 9. *Полюхович М.А.*, Бурлов В.Г., Маньков В.Д. Управление процессом обеспечения безопасности электрических сетей с применением геоинформационной системы // В сборнике: Сборник статей Круглого стола «Безопасность в профессиональной деятельности». Сборник статей Круглого стола «Безопасность в профессиональной деятельности», в рамках ІІ Всероссийской научно-практической конференции «Инновационные технологии и вопросы обеспечения безопасности реальной экономики» ITES-2020. Санкт-Петербург, 2020. С. 131-139.
- 10. *Полюхович М.А.* О системной интеграции процессов обеспечения безопасности электрических сетей // В сборнике: Неделя науки ИСИ. сборник материалов всероссийской конференции. В 3 ч. Санкт-Петербург, 2021. С. 203-205.
- 11. *Полюхович М.А.* О возможности разработки технологии управления процессом обеспечения безопасности электрических сетей на базе геоинформационной системы // В сборнике: Биотехнологии и безопасность в техносфере. Материалы Всероссийской конференции. СПбПУ Петра Великого. 2021. С. 208-210.
- 12. Вахнина А.С., *Полюхович М.А.*, Бурлов В.Г. Управление безопасностью электромонтера при обслуживании линий электропередач // В сборнике: Безопасность в профессиональной деятельности. Сборник научных статей. Санкт-Петербург, 2021. С. 54-70.

- 13. *Полюхович М.А.*, Маньков В.Д. Разработка геоинформационной системы управления электроснабжением // В книге: XLVII Гагаринские чтения 2021. Сборник тезисов работ XLVII Международной молодёжной научной конференции. Москва, 2021. С. 507-508.
- 14. Маньков В.Д., *Полюхович М.А.* Применение геоинформационной системы для устойчивого функционирования электрических сетей // В книге: XLVII Гагаринские чтения 2021. Сборник тезисов работ XLVII Международной молодёжной научной конференции. Москва, 2021. С. 503-504.
- 15. *Полюхович М.А.* Основы информационного обеспечения процесса передачи электроэнергии в условиях деструктивного воздействия гидрометеорологических факторов // В сборнике: Проблемы управления безопасностью сложных систем. Материалы XXIX международной научно-практической конференции. Москва, 2021. С. 347-350.
- 16. Бурлов В.Г., *Полюхович М.А.*, Маньков В.Д. Информационная система управления процессом передачи энергии в условиях деструктивного воздействия гидрометеорологических факторов // В сборнике: Информационные управляющие системы и технологии (ИУСТ-ОДЕССА-2021). Материалы X международной научно-практической конференции. 2021. С. 164-166.
- 17. *Полюхович М.А.* Геоинформационная система как инструмент обеспечения безопасности электрических сетей на территории Арктики // Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право. − 2022. − № S1. − C. 15-16.
- 18. *Полюхович М.А.* Представление информационного обеспечения геоинформационной системы управления безопасностью электроснабжения Арктики на базе модели решения человека // Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право. -2022. № S2. -C. 51-54.
- 19. *Полюхович М.А.* Разработка процессно-функциональной модели геоинформационного управления безопасностью электроснабжения Арктики // Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право. − 2022. − № S2. − C. 45-48.
- 20. *Полюхович М.А.* Разработка этапов получения требуемых географических пространственных данных из базы ГИС для обеспечения безопасности электрических сетей // В сборнике: Биотехнологии и безопасность в техносфере. Сборник материалов II Национальной научной конференции студентов и молодых ученых. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. 2022. С. 196-198.
- 21. *Полюхович М.А.* О роли геоинформационной системы в прогнозировании обледенения воздушных линий электропередач // В сборнике: Инновационное развитие информационных систем и технологий в гидрометеорологии. сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции. Санкт-Петербург, 2022. С. 58-62.

- д) Список программ для ЭВМ:
- 1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2023619299 Российская Федерация. Программа для расчета показателя безопасности электроснабжения региона без учета целевой деятельности на базе применения ГИС / *М.А. Полюхович*, М.О. Авдеева, В.Г. Бурлов, Д.И. Идрисова; заявитель и правообладатель федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого». № 2023618011; заявл. 26.04.2023; опубл. 10.05.2023. 1 с.
- 2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2023618808 Российская Федерация. Программа для расчета показателя безопасности электроснабжения региона с учетом целевой деятельности на основе использования пространственных и метеорологических данных / *М.А. Полюхович*, М.О. Авдеева, В.Г. Бурлов, Ю.В. Логвинова; заявитель и правообладатель федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого». № 2023617990; заявл. 26.04.2023; опубл. 28.04.2023. 1 с.
- 3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2023619174 Российская Федерация. Программа для расчета показателя безопасности электроснабжения региона с учетом технического и кадрового обеспечения при прогнозировании и мониторинге угрозы нарушения электроснабжения региона на базе применения ГИС / *М.А. Полюхович*, М.О. Авдеева, А.В. Андреев, В.Г. Бурлов, И.В. Климова; заявитель и правообладатель федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого». № 2023617997; заявл. 26.04.2023; опубл. 04.05.2023. 1 с.
- 4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2023619160 Российская Федерация. Программа для расчета показателя безопасности электроснабжения региона с учетом технического и кадрового обеспечения при предотвращении нарушения электроснабжения региона на основе использования пространственных и метеорологических данных / *М.А. Полюхович*, М.О. Авдеева, А.В. Андреев, В.Г. Бурлов, Н.В. Румянцева; заявитель и правообладатель федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого». − № 2023618005; заявл. 26.04.2023; опубл. 04.05.2023. − 1 с.
- 5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2023619307 Российская Федерация. Программа для расчета толщины стенки гололёдно изморозевого отложения на базе применения ГИС / *М.А. Полюхович*, М.О. Авдеева, В.Г. Бурлов, И.Г. Русскова; заявитель и правообладатель федеральное государственное автономное образовательное учреждение

высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого». – № 2023618034; заявл. 26.04.2023; опубл. 10.05.2023. – 1 с.

6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2023619161 Российская Федерация. Программа для расчета суммарной нагрузки на провод воздушной линии электропередачи при гололёдно-ветровой ситуации на базе применения ГИС / *М.А. Полюхович*, М.О. Авдеева, В.Г. Бурлов, Т.Т. Каверзнева; заявитель и правообладатель федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого». — № 2023619161; заявл. 26.04.2023; опубл. 04.05.2023. — 1 с.

# Приложение Б. Статистические данные по аварийности на электрических сетях

По результатам заседаний Правительственной комиссии по обеспечению безопасности электроснабжения (федерального штаба) и штабов по обеспечению безопасности электроснабжения в открытом доступе на сайте Министерства Энергетики РФ публикуются протоколы. В результате анализа данных протоколов были получены следующие результаты.

1. В период с 31.12.2016 по 08.01.2017 на большей территории Российской Федерации наблюдалась аномально низкая температура наружного воздуха ниже климатической нормы на 7°С и более: в Центральном федеральном округе температура опускалась до минус 35°С (сильные морозы были во Владимирской – до минус 32°С, Ивановской – до минус 33°С, Костромской – до минус 41°С областях). Температура в Московской области опускалась до минус 36°С. Также сильные морозы и метель наблюдались в Северо-Западном федеральном округе (в Ленинградской области температура опускалась до минус 37°С, в Вологодской области – до минус 40°С, в Архангельской области – до минус 47°С, в Республике Карелия – до минус 39°С, в Республике Коми – до минус 50°С). В Сибирском федеральном округе температура ночью опускалась до минус 60°С (Республике Саха (Якутия)), в Уральском федеральном округе – до минус 45°С (Ханты-Мансийский АО). Особенностью рассматриваемых дней было резкое снижение температуры с переходом через нулевую отметку.

Функционирование электросетевых объектов проходило в условиях неблагоприятных погодных условий: снег, метель и частые переходы через «ноль», аномально низкая температура наружного воздуха, что приводило к повышенному гололёдно-изморозевому образованию на ВЛ. В результате отрицательных температур наружного воздуха и опасных явлений погоды (снег, метель, сильный ветер) на объектах электроэнергетики было зафиксировано 73 аварии, в том числе 26 аварий с нарушением электроснабжения бытовых потребителей суммарной численностью около 1103000 человек, 6 аварий с нарушением электроснабжения промышленных предприятий суммарно на 260 МВт, 8 аварий на генерирующем оборудовании электростанций (без последствий для потребителей), 1 смертельный несчастный случай.

Наиболее массовое отключение потребителей в связи с погодными условиями произошло в Оренбургской области: из-за гололёдно-изморозевых отложений трижды отключалась ВЛ 500 кВ Ириклинская ГРЭС — Газовая и один раз ВЛ 500 кВ Красноармейская — Газовая, что привело к отключению около 126,8 тыс. человек на 21 мин. Мощность отключенных потребителей — 98 МВт.

2. В период с 4 по 6 февраля 2018 года по причине неблагоприятных погодных явлений на территории 11 субъектов Российской Федерации (Смоленская, Московская, Калужская,

Владимирская, Брянская, Тульская области и в г. Москва Центрального федерального округа; Республики Татарстан, Саратовская и Пензенская области Приволжского федерального округа; Волгоградская область Южного федерального округа) происходили отключения в электрических сетях 35-110 кВ и массовые аварийные отключения в распределительных сетях 0,4-10 кВ.

Всего за период с 4 по 6 февраля максимально было отключено: 312 ВЛ 6-10 кВ, 4346 ТП мощностью 205 МВА и обесточено около 157 тысяч человек населения. Для проведения аварийно-восстановительных работ на объектах электроэнергетики было задействовано 639 бригад численностью 2252 человека и 689 единиц спецтехники.

ПАО «Россети» в целях ускорения производства аварийно-восстановительных работ (АВР) в пострадавших районах осуществлялась переброска сил и средства из соседних филиалов. С целью оптимизации АВР указанную работу целесообразно проводить с привлечением (информированием) Региональных штабов, исходя и анализа возможных сроков переброски бригад, а также с учетом анализа метеорологического прогноза.

- 3. В период с 18 ноября по 20 ноября 2020 года в Приморском крае по причине воздействия неблагоприятных погодных условий (гололёдно-изморозевые отложения, мокрый снег, ветер порывами до 30 м/с) происходили отключения объектов электрических сетей напряжением 0,4-220 кВ. Постановлением Губернатора Приморского края был введен режим чрезвычайной ситуации регионального характера. Обледенение и сильный ветер привели к многочисленным авариям: в сетях электроснабжения Приморского края зафиксировано 152 отключения ЛЭП разного класса напряжения, отключено 1684 трансформаторных подстанций мощностью 243 МВт. Без электроснабжения оставались порядка 181 тыс. человек. В локализации и ликвидации аварийных ситуаций субъектами энергетики было задействовано 124 бригады численностью 493 человек и 173 единицы техники, порядка 70 резервных источников снабжения электроэнергией. Для разбора завалов деревьев и расчистки пострадавших территорий существенную помощь оказали формирования МЧС России, ведомства которых выделили 485 человек и 90 единиц техники, из которых 112 человек и 14 единиц техники из других регионов. Также были выделены сотрудники Минобороны России в количестве 550 человек.
- 4. С 19 января 2021 года на территории Тверской области были зафиксированы массовые нарушения электроснабжения в связи с прохождением неблагоприятного комплекса погодных явлений, сопровождающихся сильным снегом. В результате массовых аварийных отключений в распределительных сетях 6-10 кВ (ВЛ 6-10 кВ 42, ТП 6-10 кВ 352) без электроснабжения оставались бытовые потребители в 311 населенных пунктах с максимальной численностью около 4970 человек. Восстановление электроснабжения отключенных потребителей в ряде случаев занимает более 3 суток.

5. В период с 29.11.2021 по 01.12.2021 из-за неблагоприятных погодных условий (снег, сильный порывистый ветер) в связи с аварийными отключениями в распределительных сетях 6-20 кВ и отключениями в электрических сетях 35-110 кВ происходили массовые нарушения электроснабжения потребителей на территориях 13 субъектов Российской Федерации: Тульской, Московской, Орловской, Рязанской и Владимировской областей (Центральный федеральный округ), Республики Крым, Республики Калмыкия, Краснодарского края и Ростовской области (Южный федеральный округ), Псковской и Новгородской областей (Северо-Западный федеральный округ), Пензенской области (приволжский федеральный округ), Республики Дагестан (Северо-Кавказский федеральный округ). Было суммарно отключено: ВЛ 110 кВ – 4, ПС 110 кВ – 1; ВЛ 35 кВ – 4; ВЛ 6-20 кВ – 227, ТП 6-10 кВ – 2235; ЛЭП 0,4 кВ – 159. Численность отключенных потребителей составляло 113,9 тыс. чел., мощность отключенного оборудования – 70,3 МВт. Для проведения аварийно-восстановительных работ суммарно было задействовано 714 аварийно-восстановительных бригад численностью 2351 чел., 798 единиц спецтехники.

По результатам анализа открытых данных Министерства энергетики РФ 2021-2022 годов были получены следующие результаты.

1. Сибирский федеральный округ. Основными причинами аварий (уменьшение на 11% по сравнению с прошлым отчетным периодом) на объектах электроэнергетики (электросетевое оборудование 110 кВ и выше, электростанции 25 МВт и выше) являются: погодные воздействия, износ оборудования, ложная работа релейной защиты и противоаварийной автоматики. Среди причин роста последствий массовых нарушений электроснабжения потребителей названы: высокий износ объектов электросетевого хозяйства; ненадлежащее техническое обслуживание объектов электросетевого хозяйства; низкий уровень организации аварийно-восстановительных работ; воздействие экстремальных погодных явлений (сильные снегопады и ветровые нагрузки). Было осуществлено 18 отключений ЛЭП 220 кВ транзита Мамакан – Сухой Лог – Пеледуй при воздействии неблагоприятных погодных условий. Среди факторов, влияющих на показатели надёжности выделяют: негативная динамика старения оборудования в распределительной сети, являющаяся следствием недофинансирования мероприятий по замене и реконструкции; основная часть ВЛ 6-10 кВ, проходящая по лесным массивам (28,5% от общей протяженности), выполнена «голым» проводом (98% от проходящих по лесным массивам); рост числа воздействий опасных метеорологических явлений (для ВЛ 6-20 кВ 37% причин технологических нарушений отнесены к группе природного воздействия). Распределение потребителей, у которых происходил перерыв электроснабжения, выглядит следующим образом: 10,3% – при отключениях в сети 0,4 кВ; 70,8% – при отключениях в сети 6-20 кВ; 18,9% – при отключениях в сети 35 кВ и выше. Среди программ повышения надёжности названо повышение надёжности и управления рисками аварий на воздушных линиях электропередачи. Отмечается увеличение аварийности на ЛЭП 110 кВ и выше в 2020 году (1320) по сравнению с 2019 годом (1262).

- 2. Приволжский федеральный округ. Основными причинами аварий (увеличение на 7% по сравнению с прошлым отчетным периодом) на объектах электроэнергетики (электросетевое оборудование 110 кВ и выше, электростанции 25 МВт и выше) являются: погодные воздействия, износ оборудования, ложная работа релейной защиты и противоаварийной автоматики. Среди причин роста последствий массовых нарушений электроснабжения потребителей названы: высокий износ объектов электросетевого хозяйства; ненадлежащее техническое обслуживание объектов электросетевого хозяйства; низкий уровень организации аварийно-восстановительных работ; воздействие экстремальных погодных явлений (грозы, ливневые дожди и ветровые нагрузки). Отмечено увеличение времени восстановления при меньших масштабах обесточения (Республика Татарстан, Пермский край). Среди факторов, влияющих на показатели надёжности выделяют: негативная динамика старения оборудования в распределительной сети, являющаяся следствием недофинансирования мероприятий по замене и реконструкции; основная часть ВЛ 6-10 кВ, проходящая по лесным массивам (18,6% от общей протяженности), выполнена «голым» проводом (95% от проходящих по лесным массивам); рост числа воздействий опасных метеорологических явлений (для ВЛ 6-20 кВ 20% причин технологических нарушений отнесены к группе природного воздействия). Распределение потребителей, у которых происходил перерыв электроснабжения, выглядит следующим образом: 21% – при отключениях в сети 0,4 кВ; 65% – при отключениях в сети 6-20 кВ; 14% – при отключениях в сети 35 кВ и выше.
- 3. Центральный федеральный округ. Основными причинами аварий (увеличение на 19% по сравнению с прошлым отчетным периодом) на объектах электроэнергетики (электросетевое оборудование 110 кВ и выше, электростанции 25 МВт и выше) являются: погодные воздействия, износ оборудования, ложная работа релейной защиты и противоаварийной автоматики. Среди причин роста последствий массовых нарушений электроснабжения потребителей названы: высокий износ объектов электросетевого хозяйства; ненадлежащее техническое обслуживание объектов электросетевого хозяйства; низкий уровень организации аварийно-восстановительных работ; воздействие экстремальных погодных явлений (ледяной дождь, сильные снегопады, грозы и ветровые нагрузки). Отмечено увеличение времени восстановления при меньших масштабах обесточения в Тверской области, при этом с 2019 года половина случаев массовых нарушений произошли на территории региона. На 2021 год (с 01.01.2021 по 23.08.2021) количество массовых нарушений составило 7 шт., среднее количество обесточенных потребителей 16,2 тыс. чел., средняя обесточенная мощность потребителей 10,7 МВт, средняя длительность обесточения потребителей 33 ч. Среди факторов, влияющих на показатели надёжности выделяют: негативная динамика старения оборудования в распределительной сети, являющаяся следствием

недофинансирования мероприятий по замене и реконструкции; основная часть ВЛ 6-10 кВ, проходящая по лесным массивам (18% от общей протяженности), выполнена неизолированным проводом (91% от проходящих по лесным массивам); рост числа воздействий опасных метеорологических явлений (для ВЛ 6-20 кВ 47% причин технологических нарушений отнесены к группе природного воздействия). Распределение потребителей, у которых происходил перерыв электроснабжения, выглядит следующим образом: 44% — при отключениях в сети 0,4 кВ; 55% — при отключениях в сети 6-20 кВ; 1% — при отключениях в сети 35 кВ и выше.

- 4. Дальневосточный федеральный округ. Основными причинами аварий (уменьшение на 14% по сравнению с прошлым отчетным периодом) на объектах электроэнергетики (электросетевое оборудование 110 кВ и выше, электростанции 25 МВт и выше) являются: оборудования, ложная погодные воздействия, износ работа релейной защиты противоаварийной автоматики. Отмечен рост аварийности в сетях 110 кВ (42%). Среди причин роста последствий массовых нарушений электроснабжения потребителей названы: высокий износ объектов электросетевого хозяйства; ненадлежащее техническое обслуживание объектов электросетевого хозяйства; низкий уровень организации аварийно-восстановительных работ; воздействие экстремальных погодных явлений (ледяной дождь, сильные снегопады, тайфуны и ветровые нагрузки). На 2021 год (с 01.01.2021 по 23.08.2021) количество массовых нарушений составило 5 шт., среднее количество обесточенных потребителей – 15,1 тыс. чел., средняя обесточенная мощность потребителей – 16,2 МВт, средняя длительность обесточения потребителей – 41 ч. В Сахалинской области и Приморском крае выявлен ежегодный рост средней длительности устранения последствий массовых нарушений. В дополнение в Приморском крае количество потребителей, обесточенных при массовых нарушениях выше средних показателей по Дальневосточному федеральному округу. Среди факторов, влияющих на показатели надёжности выделяют: негативная динамика старения оборудования распределительной сети, являющаяся следствием недофинансирования мероприятий по замене и реконструкции; рост числа воздействий опасных метеорологических явлений (для ВЛ 6-20 кВ 15% причин технологических нарушений отнесены к группе природного воздействия). Распределение потребителей, у которых происходил перерыв электроснабжения, выглядит следующим образом: 18% – при отключениях в сети 0,4 кВ; 53% – при отключениях в сети 6-20 кВ; 29% – при отключениях в сети 35 кВ и выше. Обесточивание наибольшего количества потребителей происходит при повреждениях в сети 6-20 кВ.
- 5. Уральский федеральный округ. Основными причинами аварий (увеличение на 5% по сравнению с прошлым отчетным периодом) на объектах электроэнергетики (электросетевое оборудование 110 кВ и выше, электростанции 25 МВт и выше) являются: погодные воздействия, износ оборудования, воздействие сторонних лиц. Среди причин роста последствий массовых

нарушений электроснабжения потребителей названы: высокий износ объектов электросетевого хозяйства; ненадлежащее техническое обслуживание объектов электросетевого хозяйства; низкий уровень организации аварийно-восстановительных работ; воздействие экстремальных погодных явлений (ветровые нагрузки, грозы, ливневые дожди и сильные снегопады). На 2021 год (с 01.01.2021 по 23.08.2021) количество массовых нарушений составило 2 шт., среднее количество обесточенных потребителей – 43,0 тыс. чел., средняя обесточенная мощность потребителей – 24,5 МВт, средняя длительность обесточения потребителей – 29 ч. Отмечен ежегодный рост времени ликвидации последствий массовых нарушений в Свердловской, Челябинской и Курганской областях, при этом более половины случаев массовых нарушений зафиксировано на территории Свердловской области. Среди факторов, влияющих на показатели надёжности выделяют: негативная динамика старения оборудования в распределительной сети, являющаяся следствием недофинансирования мероприятий по замене и реконструкции; основная часть ВЛ 6-10 кВ, проходящая по лесным массивам (16% от общей протяженности), выполнена «голым» проводом (92% от проходящих по лесным массивам); рост числа воздействий опасных метеорологических явлений (для ВЛ 6-10 кВ 23% причин технологических нарушений отнесены к группе природного воздействия). Распределение потребителей, у которых происходил перерыв электроснабжения, выглядит следующим образом: 10% – при отключениях в сети 0,4 кВ; 77% – при отключениях в сети 6-10 кВ; 13% – при отключениях в сети 35 кВ и выше. Обесточивание наибольшего количества потребителей происходит при повреждениях в сети 6-10 кВ. Среди основных причин падения опор ВЛ 35 кВ и выше названо воздействие природных явлений – 48 %.

6. Южный федеральный округ. Основными причинами аварий (уменьшение на 5% по сравнению с прошлым отчетным периодом) на объектах электроэнергетики (электросетевое оборудование 110 кВ и выше, электростанции 25 МВт и выше) являются: погодные воздействия, износ оборудования, воздействие сторонних лиц. Среди причин роста последствий массовых нарушений электроснабжения потребителей названы: высокий износ объектов электросетевого хозяйства; ненадлежащее техническое обслуживание объектов электросетевого хозяйства; низкий уровень организации аварийно-восстановительных работ; воздействие экстремальных погодных явлений (дождевые паводки, грозы, ливневые дожди, сильные снегопады). На 2021 год (с 01.01.2021 по 13.09.2021) количество массовых нарушений электроснабжения составило 9 шт. Более 50 % случаев массовых нарушений, зафиксированных за данный отчетный период в Южном федеральном округе, произошли на территории Краснодарского края. При этом средние показатели отключенных потребителей и обесточенной мощности в Краснодарском крае при массовых нарушениях в 1,5 раза выше показателей в других регионах Южного федерального округа. Отмечен рост продолжительности ликвидации последствий неблагоприятных погодных

- явлений в АО «НЭСК-электросети» из-за низкого уровня организации аварийновосстановительных работ. Среди факторов, влияющих на показатели надёжности выделяют: негативная динамика старения оборудования в распределительной сети, являющаяся следствием недофинансирования мероприятий по замене и реконструкции; рост числа воздействий опасных метеорологических явлений (для ВЛ 6-10 кВ 37% причин технологических нарушений отнесены к группе природного воздействия). Распределение потребителей, у которых происходил перерыв электроснабжения, выглядит следующим образом: 20% при отключениях в сети 0,4 кВ; 71% при отключениях в сети 6-20 кВ; 9% при отключениях в сети 35 кВ и выше. Обесточивание наибольшего количества потребителей происходит при повреждениях в сети 6-20 кВ.
- 7. Северо-Кавказский федеральный округ. Среди причин роста последствий массовых нарушений электроснабжения потребителей названы: высокий износ объектов электросетевого хозяйства; ненадлежащее техническое обслуживание объектов электросетевого хозяйства; низкий уровень организации аварийно-восстановительных работ; воздействие экстремальных погодных явлений (грозы, ливневые дожди, сильные снегопады). На 2021 год (с 01.01.2021 по 24.09.2021) количество массовых нарушений электроснабжения составило 10 шт., среднее количество обесточенных потребителей – 103,5 тыс. чел., средняя обесточенная мощность потребителей – 39,1 МВт, средняя длительность обесточения потребителей –9 ч. В 2021 году массовые нарушения произошли только в Республике Дагестан. Среди факторов, влияющих на показатели надёжности выделяют: негативная динамика старения оборудования в распределительной сети, являющаяся следствием недофинансирования мероприятий по замене и реконструкции; рост числа воздействий опасных метеорологических явлений (для ВЛ 6-10 кВ 19% причин технологических нарушений отнесены к группе природного воздействия). Распределение потребителей, у которых происходил перерыв электроснабжения, выглядит следующим образом: 1% – при отключениях в сети 0,4 кВ; 55% – при отключениях в сети 6-10 кВ; 44% – при отключениях в сети 35 кВ и выше. Обесточивание наибольшего количества потребителей происходит при повреждениях в сети 6-10 кВ.
- 8. Северо-Западный федеральный округ. Среди причин роста последствий массовых нарушений электроснабжения потребителей названы: высокий износ объектов электросетевого хозяйства; ненадлежащее техническое обслуживание объектов электросетевого хозяйства; низкий уровень организации аварийно-восстановительных работ; воздействие экстремальных погодных явлений (ледяной дождь, сильные снегопады, ветровые нагрузки). На 2021 год (с 01.01.2021 по 20.10.2021) количество массовых нарушений электроснабжения составило 6 шт. 60% случаев массовых нарушений были зарегистрированы в период прохождения отопительного сезона. Среди факторов, влияющих на показатели надёжности выделяют: негативная динамика старения оборудования в распределительной сети, являющаяся следствием недофинансирования

мероприятий по замене и реконструкции; рост числа воздействий опасных метеорологических явлений (для ВЛ 6-20 кВ 66% причин технологических нарушений отнесены к группе природного воздействия). Распределение потребителей, у которых происходил перерыв электроснабжения, выглядит следующим образом: 14% — при отключениях в сети 0,4 кВ; 80% — при отключениях в сети 6-20 кВ; 6% — при отключениях в сети 35 кВ и выше. Обесточивание наибольшего количества потребителей происходит при повреждениях в сети 6-20 кВ.

В Таблице Б.1 указана сводная информация по административно-территориальным единицам Российской Федерации с указанием причин массовых нарушений электроснабжения за период 2021-2022 гг.

Таблица Б.1 – Причины массовых нарушений электроснабжения на территории Российской Федерации за период 2021-2022 гг.

Административно- территориальная единица	Причины массовых нарушений электроснабжения (2021-2022 гг.)	Примечание
Сибирский федеральный округ	<ul> <li>высокий износ объектов электросетевого хозяйства;</li> <li>ненадлежащее техническое обслуживание объектов электросетевого хозяйства;</li> <li>низкий уровень организации аварийно-восстановительных работ;</li> <li>воздействие экстремальных погодных явлений (сильные снегопады и ветровые нагрузки).</li> </ul>	Осуществлено 18 отключений ЛЭП 220 кВ транзита Мамакан — Сухой Лог — Пеледуй при воздействии неблагоприятных погодных условий.  Низкий уровень организации аварийно-восстановительных работ.
Приволжский федеральный округ	<ul> <li>высокий износ объектов электросетевого хозяйства;</li> <li>ненадлежащее техническое обслуживание объектов электросетевого хозяйства;</li> <li>низкий уровень организации аварийно-восстановительных работ;</li> <li>воздействие экстремальных погодных явлений (грозы, ливневые дожди и ветровые нагрузки).</li> </ul>	Отмечено увеличение времени восстановления при меньших масштабах обесточения. Низкий уровень организации аварийно-восстановительных работ.
Центральный федеральный округ	<ul> <li>высокий износ объектов электросетевого хозяйства;</li> <li>ненадлежащее техническое обслуживание объектов электросетевого хозяйства;</li> <li>низкий уровень организации аварийно-восстановительных работ;</li> <li>воздействие экстремальных погодных явлений (ледяной дождь, сильные снегопады, грозы и ветровые нагрузки)</li> </ul>	Отмечено увеличение времени восстановления при меньших масштабах обесточения. Низкий уровень организации аварийно-восстановительных работ.
Дальневосточный федеральный округ	<ul> <li>высокий износ объектов электросетевого хозяйства;</li> <li>ненадлежащее техническое обслуживание объектов электросетевого хозяйства;</li> </ul>	Выявлен ежегодный рост средней длительности устранения последствий массовых нарушений. Низкий уровень организации аварийно-восстановительных работ.

Административно- территориальная единица	Причины массовых нарушений электроснабжения (2021-2022 гг.)	Примечание
	<ul> <li>низкий уровень организации аварийно-восстановительных работ;</li> <li>воздействие экстремальных погодных явлений (ледяной дождь, сильные снегопады, тайфуны и ветровые нагрузки).</li> </ul>	
Уральский федеральный округ	<ul> <li>высокий износ объектов электросетевого хозяйства;</li> <li>ненадлежащее техническое обслуживание объектов электросетевого хозяйства;</li> <li>низкий уровень организации аварийно-восстановительных работ; воздействие экстремальных погодных явлений (ветровые нагрузки, грозы, ливневые дожди и сильные снегопады).</li> </ul>	Отмечен ежегодный рост времени ликвидации последствий массовых нарушений. Низкий уровень организации аварийно-восстановительных работ.
Южный федеральный округ	<ul> <li>высокий износ объектов электросетевого хозяйства;</li> <li>ненадлежащее техническое обслуживание объектов электросетевого хозяйства;</li> <li>низкий уровень организации аварийно-восстановительных работ; воздействие экстремальных погодных явлений (дождевые паводки, грозы, ливневые дожди, сильные снегопады).</li> </ul>	Отмечен рост продолжительности ликвидации последствий неблагоприятных погодных явлений из-за низкого уровня организации аварийновосстановительных работ. Низкий уровень организации аварийно-восстановительных работ.
Северо-Кавказский федеральный округ	<ul> <li>высокий износ объектов электросетевого хозяйства;</li> <li>ненадлежащее техническое обслуживание объектов электросетевого хозяйства;</li> <li>низкий уровень организации аварийно-восстановительных работ;</li> <li>воздействие экстремальных погодных явлений (грозы, ливневые дожди, сильные снегопады).</li> </ul>	На 2021 год (с 01.01.2021 по 24.09.2021) количество массовых нарушений электроснабжения составило 10 шт., среднее количество обесточенных потребителей — 103,5 тыс. чел., средняя обесточенная мощность потребителей — 39,1 МВт, средняя длительность обесточения потребителей — 9 ч. Низкий уровень организации аварийно-восстановительных работ.
Северо-Западный федеральный округ	<ul> <li>высокий износ объектов электросетевого хозяйства;</li> <li>ненадлежащее техническое обслуживание объектов электросетевого хозяйства;</li> <li>низкий уровень организации аварийно-восстановительных работ;</li> <li>воздействие экстремальных погодных явлений (ледяной дождь, сильные снегопады, ветровые нагрузки).</li> </ul>	На 2021 год (с 01.01.2021 по 20.10.2021) количество массовых нарушений электроснабжения составило 6 шт. 60% случаев массовых нарушений были зарегистрированы в период прохождения отопительного сезона.  Низкий уровень организации аварийно-восстановительных работ.

В Таблице Б.2 представлена аварийность в сетях  $110~\mathrm{kB}$  и выше и в распределительном комплексе  $6\text{-}110~\mathrm{kB}$ .

Таблица Б.2 – Количество аварий на объектах электроэнергетической отрасли за период с 2018 по 2021 гг.

Объект/Период	2018	2019	2020	10 мес. 2020	10 мес. 2021
Сети 110 кВ и выше	14349	13337	13341	12061	11638
Распределительный комплекс 6-110 кВ	97456	98168	95169	83283	93273

В Таблице Б.3 представлена аварийность на объектах электроэнергетики за период с 2013 по 2018 гг.

Таблица Б.3 — Аварийность на объектах электроэнергетики, в том числе по причине гололёдообразования

ОЗП	Количество аварийных отключений по причине гололёдообразования, шт.	Общее количество аварий, шт.	Доля аварий по причине гололёда от общего количество аварий, %
2013-2014	420	4841	8,68
2014-2015	481	3983	12,08
2015-2016	310	3755	8,26
2016-2017	269	3439	7,82
2017-2018	503	3404	14,78

В Таблице Б.4 представлена аварийность по причине гололёдообразования и методы борьбы с обледенением за период с 2013 по 2018 гг.

Таблица Б.4 – Аварии по причине гололёдообразования и методы борьбы с обледенением

ОЗП	Количество аварийных отключений по причине гололёдообразования, шт.	Количество плавок гололёда, шт.	Механические удаления гололёда, шт.
2013-2014	420	538	56
2014-2015	481 (+15%)	919	47
2015-2016	310 (-36%)	398	78
2016-2017	269 (-13%)	655	66
2017-2018	503 (+87%)	692	95

# Приложение В. Определение возможности обрыва провода

Алгоритмы определения возможности обрыва провода в результате деструктивного воздействия гидрометеорологических факторов, выражающегося в образовании на поверхности провода ВЛЭП ГИО и появления пляски проводов, представлены на Рисунках В.1-В.6.

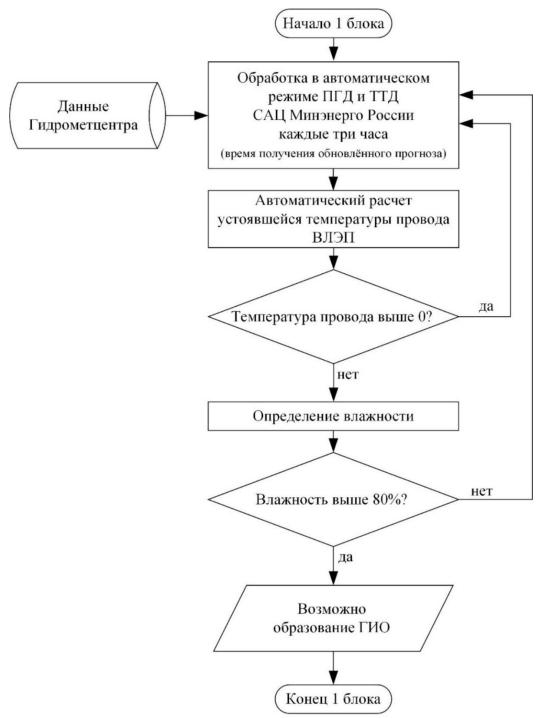


Рисунок В.1 – Алгоритм определения проявления угрозы нарушения электроснабжения региона

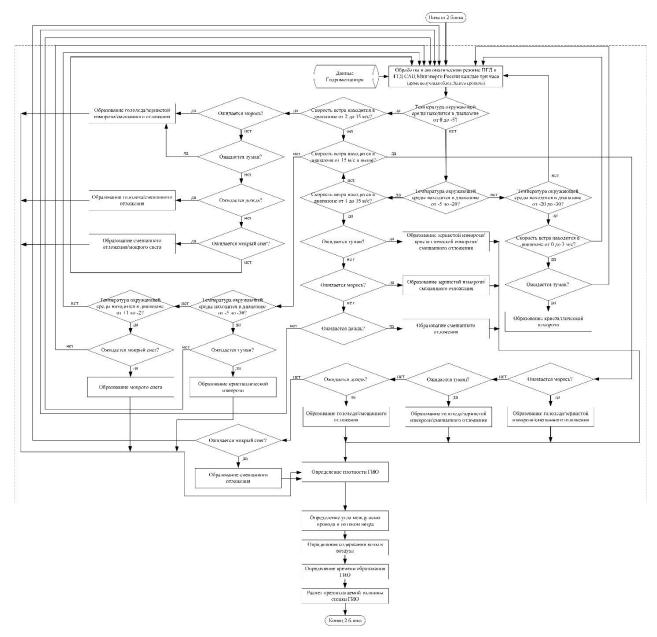


Рисунок В.2 – Алгоритм определения предполагаемой толщины стенки ГИО

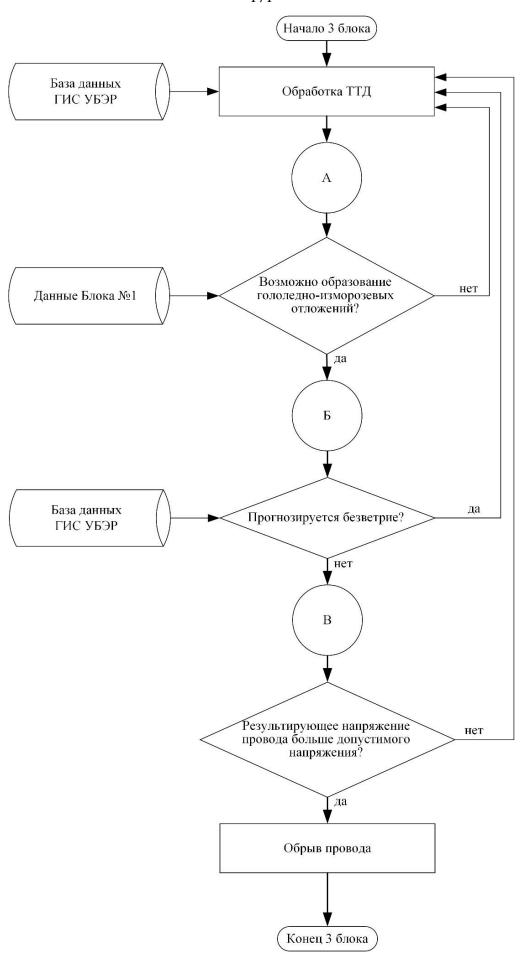


Рисунок В.3 – Алгоритм определения возможности обрыва провода

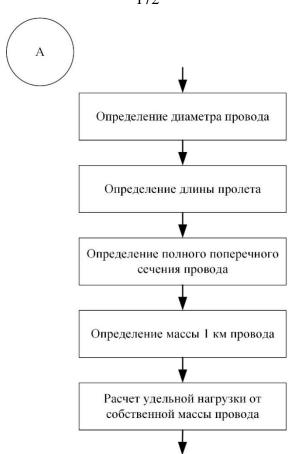


Рисунок В.4. Блок «А» алгоритма на Рисунке В.3

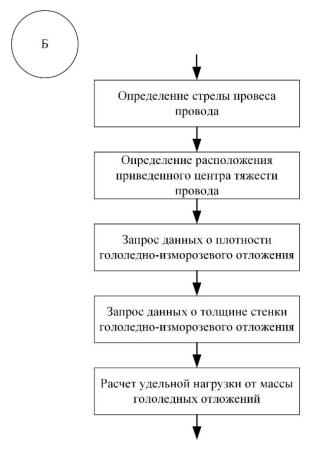


Рисунок В.5. Блок «Б» алгоритма на Рисунке В.3



Рисунок В.6. Блок «В» алгоритма на Рисунке В.3

# Приложение Г. Расчет параметров сетевого графика

Для определения показателя эффективности функционирования системы управления безопасностью электроснабжения региона необходимо провести анализ сетевых графиков трех процессов: проявления угрозы нарушения электроснабжения региона, идентификация угрозы нарушения электроснабжения региона.

Анализ сетевого графика необходим для того, чтобы выявить резервы времени работ, которые лежат на ненапряженных путях. Выявленные резервы направляются на работы, которые лежат на критическом пути, а тот, в свою очередь, лимитирует срок завершения работы в целом. Таким подходом можно достичь сокращения времени выполнения критических работ, а значит, и всей операции.

Основными параметрами сетевого графика являются сроки свершения события и их временные резервы, среди которых:

1) Наиболее раннее возможное время наступления ј-го события Тр(j):

$$T_{p}(j) = \max_{i \subset j} (T_{p}(i) + t_{ij}), \qquad (\Gamma.1)$$

где символами і и ј обозначаются номера предшествующего и последующего событий, соответственно;  $t_{ii}$  – продолжительность (i,j) -й работы.

Обозначение  $i \subset j$  показывает, что событие i предшествует событию j.

2) Самое позднее допустимое время наступления j-ого события  $T_{II}(j)$  вычисляется по формуле:

$$T_{\Pi}(j) = \min_{i \supset j} (T_{\Pi}(i) + t_{ij})$$
 (\(\Gamma.2\)

3) Резерв времени данного события  $R_{i}$  вычисляется по формуле:

$$R_i = T_{II}(i) - T_{P}(i) {(\Gamma.3)}$$

4) Полный резерв времени работы:

$$r_{ij}^{\Pi} = T_{\Pi}(j) - T_{P}(i) - t_{ij}$$
 (\Gamma.4)

Смысл полного резерва времени работы заключается в том, что задержка в выполнении работы (i,j) на величину  $\Delta t_{ij} > r_{ij}^{II}$  приводит к задержке в наступлении завершающего события на величину  $[\Delta t_{ij} - r_{ij}^{II}]$ .

5) Свободный резерв времени работы:

$$r_{ij}^{C} = T_{P}(j) - T_{II}(i) - t_{ij}$$
 (Γ.5)

6) Длительность критического пути процесса рассчитывается как сумма продолжительностей работ, у которых полные резервы времени нулевые.

# Приложение Д. Сетевое моделирование процессов геоинформационной поддержки обеспечения безопасности электроснабжения региона в условиях деструктивного воздействия гидрометеорологических факторов

В данном приложении представлены примеры сетевых графиков при ГИПУ ТС ОБЭР на базе применения ГИС УБЭР. Разработанные шаблоны могут быть использованы в рамках обеспечения безопасности электроснабжения региона или переработаны для других областей деятельности человека.

На Рисунке Д.1 представлен сетевой график целевого процесса (с нанесением поверх линии наименования перехода, внизу линии указана продолжительность перехода в мин.).

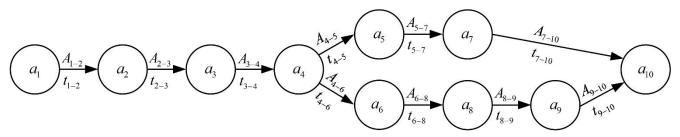


Рисунок Д.1 – Сетевой график целевого процесса электроснабжения региона

В Таблице Д.1 представлен перечень событий целевого процесса электроснабжения региона.

Таблица Д.1 – Перечень событий целевого процесса электроснабжения региона

Обозначение	Наименование событий		
$a_1$	Производство электрической энергии на электростанции		
$a_2$	Запуск подстанции, повышающей напряжение		
$a_3$	Запуск подстанции с понижающими функциями (на выходе 6,0-10,0 кВ)		
a <sub>4</sub>	Включение пункта распределения электроэнергии		
a <sub>5</sub>	Запуск центральной подстанции на промышленном объекте для понижения напряжения до 0,40 кВ		
$a_6$	Запуск районной распределительной подстанции		
a <sub>7</sub>	Включение вводного щита в цеховом помещении		
$a_8$	Запуск подстанции, понижающей напряжение до 0,40 кВ		
a <sub>9</sub>	Включение вводного щита жилого дома для подключения внутренней электрической сети		
a <sub>10</sub>	Электроснабжение потребителей региона		

В Таблице Д.2 приведен перечень работ целевого процесса электроснабжения региона с указанием времени выполнения работы, предшествующих и последующих работ.

Таблица Д.2 – Перечень работ целевого процесса электроснабжения региона

Обозначение работ	Наименование работ	Время выполнения работы (ч)	Предшествующие работы	Последующие работы
$A_{1-2}$	Передача электрической энергии на подстанцию, повышающую напряжение, чтобы обеспечить высокую эффективность передачи электроэнергии на значительные расстояния	t <sub>1-2</sub>	-	$A_{2-3}$
A <sub>2-3</sub>	Передача электроэнергии ЛЭП с высоким напряжением (35,0-750,0 кВ) на пункт распределения электроэнергии	t <sub>2-3</sub>	A <sub>1-2</sub>	A <sub>3-4</sub>
A <sub>3-4</sub>	Передача электрической энергии через питающие кабельные линии	t <sub>3-4</sub>	$A_{2-3}$	$A_{4-5} \ A_{4-6}$
$A_{4-5}$	Передача электрической энергии через радиальные или магистральные кабельные линии	t <sub>4-5</sub>	$A_{3-4}$	A <sub>5-7</sub>
$A_{4-6}$	Передача электрической энергии через кабельную радиальную или магистральную линию	t <sub>4-6</sub>	A <sub>3-4</sub>	$A_{6-8}$
A <sub>5-7</sub>	Передача электрической энергии в вводный щит в цеховом помещении	t <sub>5-7</sub>	A <sub>4-5</sub>	A <sub>7-10</sub>
$A_{6-8}$	Передача электрической энергии на подстанцию, понижающую напряжение до 0,40 кВ	t <sub>6-8</sub>	A <sub>4-6</sub>	$A_{8-9}$
A <sub>7-10</sub>	Передача электрической энергии электроприёмникам промышленного объекта	t <sub>7-10</sub>	A5-7	_
$A_{8-9}$	Передача электрической энергии от понижающей подстанции до вводного щита жилого дома	t <sub>8-9</sub>	$A_{6-8}$	$A_{8-9}$
A <sub>9-10</sub>	Передача электрической энергии электроприёмникам жилого дома	t <sub>9-10</sub>	A <sub>8-9</sub>	_

На Рисунке Д.2 представлен сетевой график процесса проявления угрозы нарушения электроснабжения региона, вызванной воздействием гидрометеорологических факторов на ВЛЭП (с нанесением поверх линии наименования перехода, внизу линии указана продолжительность перехода в мин.).

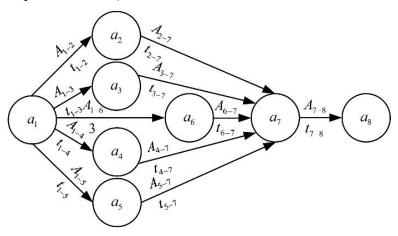


Рисунок Д.2 — Сетевой график процесса проявления угрозы нарушения электроснабжения региона

В Таблице Д.3 представлен перечень событий процесса проявления угрозы нарушения электроснабжения региона.

Таблица Д.3 – Перечень событий процесса проявления угрозы нарушения электроснабжения региона

Обозначение	Наименование событий
$a_1$	Образование фактора угрозы (воздействие гидрометеорологических факторов)
$a_2$	Формирование совокупности гидрометеорологических факторов: температура окружающего воздуха от 0 до минус 5, скорость ветра от 2 до 4 м/с, наблюдаются морось/дождь/туман
$a_3$	Формирование совокупности гидрометеорологических факторов: температура окружающего воздуха от минус 3 до минус 20, скорость ветра от 1 до 15 м/с, наблюдаются морось/туман
a <sub>4</sub>	Формирование совокупности гидрометеорологических факторов: температура окружающего воздуха от минус 5 до минус 30, скорость ветра от 0 до 3 м/с, наблюдаются дымка/туман
a <sub>5</sub>	Формирование совокупности гидрометеорологических факторов: температура окружающего воздуха от 0 до минус 20, скорость ветра от 2 до 4 м/с, наблюдаются морось/дождь/мокрый снег/туман
$a_6$	Формирование совокупности гидрометеорологических факторов: температура окружающего воздуха от плюс 1 до минус 2, скорость ветра от 0 до 10 м/с, наблюдается мокрый снег
a <sub>7</sub>	Образование ГИО с радиусом, превышающим допустимое значение
$a_8$	Падение опоры/обрыв провода вследствие ослабления и/или нарушения механической прочности опор, проводов, изоляторов — выход из строя ВЛЭП (прекращение снабжения потребителей электроэнергией, появление опасной зоны для человека)

В Таблице Д.4 приведен перечень работ процесса проявления угрозы нарушения электроснабжения региона с указанием времени выполнения работы, предшествующих и последующих работ.

Таблица Д.4 – Перечень работ процесса проявления угрозы нарушения электроснабжения региона

Обозначение работ	Наименование работ	Время выполнения работы (ч)	Предшествующие работы	Последующие работы
$A_{1-2}$	CHANGANIA TOMBODOTUDA	t <sub>1-2</sub>	-	A <sub>2-7</sub>
$A_{1-3}$	Снижение температуры	t <sub>1-3</sub>	_	A <sub>3-7</sub>
$A_{1-4}$	провода ниже нуля градусов, повышение влажности воздуха	t <sub>1-4</sub>	_	A <sub>4-7</sub>
$A_{1-5}$	выше 80%	t <sub>1-5</sub>	1	A <sub>5-7</sub>
$A_{1-6}$	выше 8070	t <sub>1-6</sub>	ı	A <sub>6-7</sub>
$A_{2-7}$	H EHO	t <sub>2-7</sub>	$A_{1-2}$	
A <sub>3-7</sub>		t <sub>3-7</sub>	$A_{1-3}$	
$A_{4-7}$	Нарастание ГИО на проводах ВЛЭП	t <sub>4-7</sub>	$A_{1-4}$	$A_{7-8}$
A <sub>5-7</sub>	B)1311	t <sub>5-7</sub>	$A_{1-5}$	
A <sub>6-7</sub>		t <sub>6-7</sub>	$A_{1-6}$	
	Ослабление и/или нарушение		$A_{2-7}$	
	механической прочности опор,		$A_{3-7}$	
$A_{7-8}$	проводов, изоляторов	t <sub>7-8</sub>	$A_{4-7}$	
Λ/-8	вследствие воздействия гидрометеорологического фактора	ι/-8	A <sub>5-7</sub>	_
			A <sub>6-7</sub>	

На Рисунке Д.3 представлен сетевой график процесса идентификации угрозы нарушения электроснабжения региона, вызванной воздействием гидрометеорологических факторов (с

нанесением поверх линии наименования перехода, внизу линии указана продолжительность перехода в мин.).

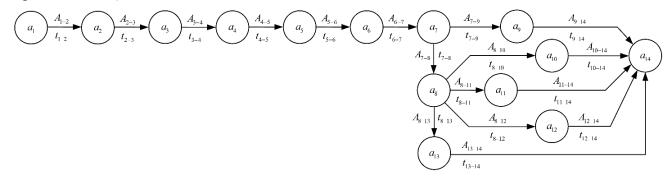


Рисунок Д.3 – Сетевой график процесса идентификации угрозы нарушения электроснабжения региона

В Таблице Д.5 представлен перечень событий процесса идентификации угрозы нарушения электроснабжения региона.

Таблица Д.5 – Перечень событий процесса идентификации угрозы нарушения электроснабжения региона

Обозначение	Наименование событий		
$a_1$	Начало процесса идентификации угрозы нарушения электроснабжения региона		
$a_2$	Обработка в автоматическом режиме пространственных географических и технико- технологических данных Ситуационно-аналитическим центром Минэнерго России каждые три часа		
$a_3$	Вывод о формировании погодных условий, благоприятствующих образованию гололёдно-изморозевого отложения		
$a_4$	Определение толщины стенки гололёдно-изморозевого отложения		
a <sub>5</sub>	Определение суммарной нагрузки на провод воздушной линии электропередачи при гололёдно-ветровой ситуации		
$a_6$	Определение среднего времени проявления угрозы нарушения электроснабжения региона		
a <sub>7</sub>	Определение ограничений на ресурсы по идентификации угрозы нарушения электроснабжения региона		
$a_8$	Выезд оперативно-выездной бригады на участок ВЛЭП		
<b>a</b> 9	Фиксация нарастания ГИО при помощи датчиков		
a <sub>10</sub>	Применение бинокля для оценки нарастания ГИО		
$a_{11}$	Запуск дронов для оценки нарастания ГИО		
$a_{12}$	Пеший визуальный осмотр участка ВЛЭП		
a <sub>13</sub>	Использование автовышки		
a <sub>14</sub>	Угроза нарушения электроснабжения региона идентифицирована		

В Таблице Д.6 приведен перечень работ процесса идентификации угрозы нарушения электроснабжения региона с указанием времени выполнения работы, предшествующих и последующих работ.

Таблица Д.6 – Перечень работ процесса идентификации угрозы нарушения электроснабжения региона

Обозначение работ	Наименование работ	Время выполнения работы (ч)	Предшествующие работы	Последующие работы
A <sub>1-2</sub>	Загрузка данных Гидрометцентра в базу данных ГИС УБЭР	t <sub>1-2</sub>	-	A <sub>2-3</sub>
$A_{2-3}$	Обработка пространственных географических и технико-технологических данных с целью выявления возможности образования гололёдно-изморозевого отложения на воздушных линиях электропередачи	$t_{2-3}$	A <sub>1-2</sub>	A <sub>3-4</sub>
A <sub>3-4</sub>	Автоматический расчет толщины стенки гололёдно-изморозевого отложения	t <sub>3-4</sub>	A <sub>2-3</sub>	A <sub>4-5</sub>
A <sub>4-5</sub>	Автоматический расчет суммарной нагрузки на провод воздушной линии электропередачи при гололёдно-ветровой ситуации	t <sub>4-5</sub>	A <sub>3-4</sub>	A <sub>5-6</sub>
$A_{5-6}$	Автоматический расчет значения среднего времени проявления угрозы нарушения электроснабжения региона	t <sub>5-6</sub>	A <sub>4-5</sub>	A <sub>6-7</sub>
A <sub>6-7</sub>	Разработка требуемого перечня технического оснащения и кадрового обеспечения для идентификации угрозы нарушения электроснабжения региона	t <sub>6-7</sub>	A <sub>5-6</sub>	A <sub>7-8</sub> A <sub>7-9</sub>
A <sub>7-8</sub>	Запрос на выезд оперативновыездной бригады на участок ВЛЭП (обращение к электросетевой организации)	t <sub>7-8</sub>	A <sub>6-7</sub>	$\begin{array}{c} A_{8\text{-}10} \\ A_{8\text{-}11} \\ A_{8\text{-}12} \\ A_{8\text{-}13} \end{array}$
A <sub>7-9</sub>	Контроль показателей датчиков	t <sub>7-9</sub>	A <sub>6-7</sub>	A <sub>9-14</sub>
$A_{8-10}$	Пеший осмотр с использованием бинокля	t <sub>8-10</sub>	A <sub>7-8</sub>	A <sub>10-14</sub>
$A_{8-11}$	Применение дронов для оценки нарастания ГИО	t <sub>8-11</sub>	A <sub>7-8</sub>	A <sub>11-14</sub>
$A_{8-12}$	Обход участка ВЛЭП (пеший осмотр)	t <sub>8-12</sub>	A <sub>7-8</sub>	A <sub>12-14</sub>
$A_{8-13}$	Визуальный осмотр участка ВЛЭП (верховой осмотр с использованием автовышки)	t <sub>8-13</sub>	A <sub>7-8</sub>	A <sub>13-14</sub>
A <sub>9-14</sub>	Определение возможности обрыва провода. Передача сведений	t <sub>9-14</sub>	A <sub>7-9</sub>	
A <sub>10-14</sub>	Региональному штабу по обеспечению безопасности	t <sub>10-14</sub>	A <sub>8-10</sub>	
A <sub>11-14</sub>	электроснабжения.	t <sub>11-14</sub>	A <sub>8-11</sub>	_
A <sub>12-14</sub>		t <sub>12-14</sub>	A <sub>8-12</sub>	-
$A_{13-14}$		$t_{13-14}$	$A_{8-13}$	

На Рисунке Д.4 представлен сетевой график процесса нейтрализации угрозы нарушения электроснабжения региона, вызванной воздействием гидрометеорологических факторов (с нанесением поверх линии наименования перехода, внизу линии указана продолжительность перехода в мин.).

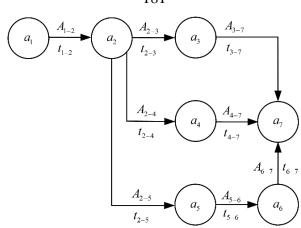


Рисунок Д.4 – Сетевой график процесса нейтрализации угрозы нарушения электроснабжения региона

В Таблице Д.7 представлен перечень событий процесса нейтрализации угрозы нарушения электроснабжения региона.

Таблица Д.7 – Перечень событий процесса нейтрализации угрозы нарушения электроснабжения региона

Обозначение	Наименование событий
$a_1$	Установлены угрозы нарушения электроснабжения региона
$a_2$	Начало действий по устранению угрозы нарушения электроснабжения
$a_3$	Плавка гололёда
$a_4$	Профилактический нагрев участка ВЛЭП
$a_5$	Выезд мобильной бригады на участок ВЛЭП
$a_6$	Механическое сбивание ГИО
$a_7$	Угроза нарушения электроснабжения региона устранена

В Таблице Д.8 приведен перечень работ процесса нейтрализации угрозы нарушения электроснабжения региона с указанием времени выполнения работы, предшествующих и последующих работ.

Таблица Д.8 – Перечень работ процесса нейтрализации угрозы нарушения электроснабжения региона

Обозначение работ	Наименование работ	Время выполнения работы (ч)	Предшествующие работы	Последующие работы
A <sub>1-2</sub>	Постановка задач региональным штабом по обеспечению безопасности электроснабжения электросетевой организации, ответственному персоналу	t <sub>1-2</sub>	-	$\begin{array}{c} A_{2\text{-}3} \\ A_{2\text{-}4} \\ A_{2\text{-}5} \end{array}$
A <sub>2-3</sub>	Подготовка к плавке гололёда	t <sub>2-3</sub>	A <sub>1-2</sub>	A <sub>3-7</sub>
A <sub>2-4</sub>	Увеличение нагрузки на участке для повышения температуры провода	t <sub>2-4</sub>	A <sub>1-2</sub>	A <sub>4-7</sub>
A <sub>2-5</sub>	А <sub>2-5</sub> Запрос на выезд оперативно-выездной бригады на участок ВЛЭП		A <sub>1-2</sub>	A <sub>5-6</sub>
A <sub>3-7</sub>	Плавление ГИО	t <sub>3-7</sub>	A <sub>2-3</sub>	_

Обозначение работ	Наименование работ	Время выполнения работы (ч)	Предшествующие работы	Последующие работы
A <sub>4-7</sub>	Предупреждение образования ГИО	t <sub>4-7</sub>	$A_{2-4}$	_
A <sub>5-6</sub>	Использование шестов для устранения ГИО	t <sub>5-6</sub>	$A_{2-5}$	$A_{6-7}$
A <sub>6-7</sub>	Устранение ГИО в результате механических ударов	t <sub>6-7</sub>	$A_{5-6}$	_

# Приложение Е. Сетевое моделирование процессов обеспечения безопасности электроснабжения региона в условиях деструктивного воздействия гидрометеорологических факторов

В данном приложении разработаны сетевые графики процессов обеспечения безопасности электроснабжения региона в условиях деструктивного воздействия гидрометеорологических факторов. В данной рассматриваемой ситуации не реализовано ГИПУ ТС ОБЭР с целью сравнения полученных результатов с результатами моделирования ГИПУ ТС ОБЭР, представленного в основном тексте работы.

Приложение содержит результаты расчёта основных параметров сетевых графиков и показателя безопасности электроснабжения региона.

На Рисунке Е.1 представлен сетевой график процесса проявления угрозы нарушения электроснабжения региона, вызванной воздействием гидрометеорологических факторов на ВЛЭП (с нанесением поверх линии наименования перехода, внизу линии указана продолжительность перехода в мин.).

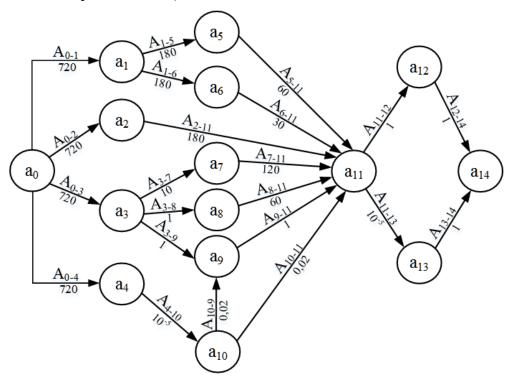


Рисунок Е.1 – Сетевой график процесса проявления угрозы нарушения электроснабжения региона, вызванной воздействием гидрометеорологических факторов

В Таблице Е.1 приведен перечень событий сетевого графика процесса проявления угрозы нарушения электроснабжения региона с указанием их наиболее раннего возможного времени, самого позднего допустимого времени и резерва времени.

Таблица Е.1 – Перечень событий процесса проявления угрозы нарушения электроснабжения региона, вызванной воздействием гидрометеорологических факторов на ВЛЭП

Обозначение работ	Наименование <i>i-</i> го события процесса проявления угрозы	$T_P(j)$	$T_{II}(i)$	$R_i$
$a_0$	Образование фактора угрозы (воздействие гидрометеорологического фактора)	0	0	0
$a_1$	Снижение температуры окружающей среды, появление снегопада, ледяного дождя	44640	44640	0
$a_2$	Повышение температуры окружающей среды	44640	44700	60
$a_3$	Появление сильного ветра	44640	44750	110
$a_4$	Образование грозы	44640	44879	239
$a_5$	Образование гололёда на проводах ВЛЭП вследствие резкого снижения температуры окружающей среды	44820	44820	0
$a_6$	Налипание мокрого снега на проводах ВЛЭП вследствие продолжительного снегопада	44820	44850	30
$a_7$	Вибрация и «пляска» проводов вследствие воздействия сильного ветра	44650	44760	110
$a_8$	Нахлест проводов ВЛЭП на окружающие предметы вследствие воздействия сильного ветра	44641	44820	179
<b>a</b> 9	Падение дерева, отломлены ветки вследствие воздействия сильного ветра	44641	44879	238
a <sub>10</sub>	Возникновение грозового разряда, атмосферного перенапряжения вследствие появления грозы	44640	44879	239
a <sub>11</sub>	Ослабление и/или нарушение механической прочности опор, проводов, изоляторов вследствие воздействия гидрометеорологического фактора	44880	44880	0
$\mathbf{a}_{12}$	Падение опоры/обрыв провода вследствие ослабления и/или нарушения механической прочности опор, проводов, изоляторов	44881	44881	0
a <sub>13</sub>	Возникновение короткого замыкания вследствие ослабления и/или нарушения механической прочности опор, проводов, изоляторов	44880	44881	1
a <sub>14</sub>	Выход из строя ВЛЭП (прекращение снабжения потребителей электроэнергией, появление опасной зоны для человека)	44882	44882	0

Для процесса проявления угрозы нарушения электроснабжения региона, вызванной воздействием гидрометеорологических факторов, критический путь проявления угрозы нарушения электроснабжения региона, проходящий через цепь событий  $a_0 \rightarrow a_1 \rightarrow a_5 \rightarrow a_{11} \rightarrow a_{12} \rightarrow a_{14}$ , составляет  $\Delta t_{rrv} = 44882$  мин. = 31,2 сут. Таким образом,  $\lambda = 0.03$  угрозы за сутки.

Для идентификации вышеперечисленных угроз ЛПР использует ГИС. На основании полученных результатов необходимо спрогнозировать наступление нежелательного события (повышение/снижение температуры, образование грозовых облаков и т.д.).

На Рисунке Е.2 представлен сетевой график процесса идентификации угрозы нарушения электроснабжения региона, вызванной воздействием гидрометеорологических факторов (с нанесением поверх линии наименования перехода, внизу линии указана продолжительность перехода в мин.).

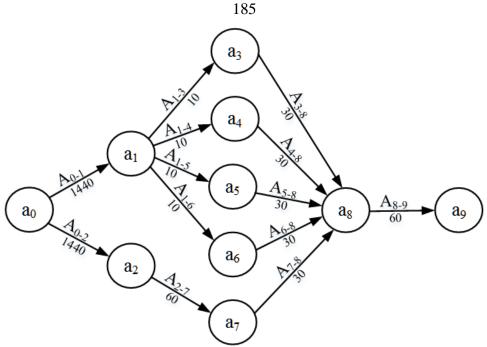


Рисунок Е.2 – Сетевой график процесса идентификации угрозы нарушения электроснабжения региона, вызванной воздействием гидрометеорологических факторов

В Таблице Е.2 приведен перечень событий сетевого графика процесса идентификации угрозы с указанием их наиболее раннего возможного времени, самого позднего допустимого времени и резерва времени.

Таблица Е.2 – Перечень событий процесса идентификации угрозы нарушения электроснабжения региона, вызванной воздействием гидрометеорологических факторов

Обозначение работ	Наименование <i>i-</i> го события процесса идентификации угрозы		$T_{II}(i)$	$R_{i}$
$a_0$	Начало мониторинга гидрометеорологических условий	0	0	0
$a_1$	Мониторинг (прогноз) гидрометеорологических условий (температуры, скорости движения ветра)	1440	1490	50
$a_2$	Мониторинг прилегающей территории (на наличие разросшихся кустарников и деревьев в охранной зоне ВЛЭП) при помощи ГИС	1440	1440	0
$a_3$	Выявление повышения температуры окружающей среды	1450	1500	50
$a_4$	Выявление понижения температуры окружающей среды	1450	1500	50
$a_5$	Выявление увеличения скорости движения ветра	1450	1500	50
$a_6$	Выявление образования грозовых облаков	1450	1500	50
a <sub>7</sub>	Зафиксировано нарушение охранной зоны ВЛЭП (наличие лесного массива)	1500	1500	0
a <sub>8</sub>	Анализ полученных результатов	1530	1530	0
a <sub>9</sub>	Составление отчета с указанием наиболее вероятных угроз	1590	1590	0

Для процесса идентификации угрозы нарушения электроснабжения региона, вызванной воздействием гидрометеорологических факторов, критический путь идентификации угрозы нарушения электроснабжения региона, проходящий через цепь событий  $a_0 \to a_2 \to a_7 \to a_8 \to a_9$ , составляет  $\Delta t_{_{HY}} = 1590$  мин. = 1,1 сут. Таким образом,  $_{V_1} = 0,91$  идентификаций за сутки.

После идентификации угрозы нарушения электроснабжения природного характера ЛПР принимает соответствующие превентивные меры, позволяющие нейтрализовать угрозу.

На Рисунке Е.З представлен сетевой график процесса нейтрализации угрозы нарушения электроснабжения региона, вызванной воздействием гидрометеорологических факторов (с нанесением поверх линии наименования перехода, внизу линии указана продолжительность перехода в мин.).

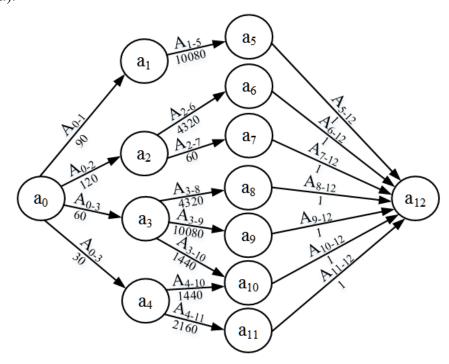


Рисунок Е.3 – Сетевой график процесса нейтрализации угрозы нарушения электроснабжения региона, вызванной воздействием гидрометеорологических факторов

В Таблице Е.3 приведен перечень событий сетевого графика процесса нейтрализации угрозы с указанием их наиболее раннего возможного времени, самого позднего допустимого времени и резерва времени.

Таблица Е.3 – Перечень событий процесса нейтрализации угрозы нарушения электроснабжения региона, вызванной воздействием гидрометеорологических факторов

Обозначение работ	Наименование <i>i</i> -го события процесса нейтрализации угрозы		Tπ(i)	Ri
$a_0$	Установлены с применением ГИС возможные угрозы	0	0	0
$a_1$	Определены решения по устранению угроз, связанных с повышением температуры окружающей среды	90	90	0
$a_2$	Определены решения по устранению угроз, связанных с понижением температуры окружающей среды	120	5850	5730
$a_3$	Определены решения по устранению угроз, связанных с воздействием ветра	60	90	30
a <sub>4</sub>	Определены решения по устранению угроз, связанных с воздействием грозы	30	8010	7980
a <sub>5</sub>	Заменен стандартный провод высокотемпературным проводом	10170	10170	0
$a_6$	Установлены ограничители гололёдообразования	4440	10170	5730

Обозначение работ	Наименование <i>i</i> -го события процесса нейтрализации угрозы		T <sub>Π</sub> (i)	Ri
$a_7$	Осуществляется профилактический разогрев линий электропередачи токами высокой частоты	180	10170	9990
$a_8$	Установлены гасители вибрации (демпферы)/межфазные изолирующие распорки	4380	10170	5790
<b>a</b> 9	Установлены опоры с большим разносом проводов по вертикали, с увеличенным горизонтальным смещением проводов разных ярусов	10140	10170	30
a <sub>10</sub>	Осуществлена вырубка кустарников и деревьев в охранной зоне ВЛЭП		10170	8670
a <sub>11</sub>	Установлены тросовые молниеотводы	2190	10170	7980
$a_{12}$	Нейтрализация угрозы	10171	10171	0

Для процесса нейтрализации угрозы нарушения электроснабжения региона, вызванной воздействием гидрометеорологических факторов, критический путь нейтрализации угрозы, проходящий через цепь событий  $a_0 \to a_1 \to a_5 \to a_{12}$ , составляет  $\Delta t_{HV} = 10171$  мин. = 7,1 сут. Таким образом,  $\nu_2 = 0,14$  нейтрализаций за сутки.

При подробном изучении событий процесса нейтрализации угрозы, вызванной воздействием гидрометеорологических факторов, можно отметить, что их осуществление носит периодический характер, и при последующих появлениях подобных проблем превентивные действия временно не требуются. Например, вырубка кустарников и деревьев в охранной зоне ЛЭП необходима только по мере разрастания лесного массива.

Таким образом, получены следующие значения:  $\lambda=0{,}03;~_{\boldsymbol{\mathcal{V}}_1}=0{,}91;~_{\boldsymbol{\mathcal{V}}_2}=0{,}14;~\zeta^+=1/31$  = 0,03;  $\zeta^-=0{,}1\zeta^+=0{,}027$ . Значения  $\boldsymbol{\mathcal{V}}_1^-,\boldsymbol{\mathcal{V}}_2^-$  примем равными  $1/1000=0{,}001$  – квалификация ЛПР. Показатель эффективности  $\boldsymbol{P}_2$  для рассматриваемого случая равен 0,64.

### Приложение Ё. Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ



Рисунок Ё.1 — Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Программа для расчета показателя безопасности электроснабжения региона без учета целевой деятельности на базе применения ГИС»



Рисунок Ё.2 — Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Программа для расчета показателя безопасности электроснабжения региона с учетом целевой деятельности на основе использования пространственных и метеорологических данных»



Рисунок Ё.3 — Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Программа для расчета показателя безопасности электроснабжения региона с учетом технического и кадрового обеспечения при прогнозировании и мониторинге угрозы нарушения электроснабжения региона на базе применения ГИС»



Рисунок Ё.4 — Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Программа для расчета показателя безопасности электроснабжения региона с учетом технического и кадрового обеспечения при предотвращении нарушения электроснабжения региона на основе использования пространственных и метеорологических данных»



Рисунок Ё.5 — Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Программа для расчета толщины стенки гололёдно-изморозевого отложения на базе применения ГИС»



Рисунок Ё.6 — Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Программа для расчета суммарной нагрузки на провод воздушной линии электропередачи при гололёдноветровой ситуации на базе применения ГИС»

### Приложение Ж. Проверка гипотезы о распределении событий процессов геоинформационной поддержки обеспечения безопасности электроснабжения региона по закону Пуассона

# Проверка гипотезы о распределении событий процессов геоинформационной поддержки обеспечения безопасности электроснабжения региона по закону Пуассона

Постановка задачи:

В качестве проверки гипотезы о распределении событий процесса проявления угрозы нарушения электроснабжения региона по причине гололёдообразования использовались данные Таблицы А.3, продублированные в Таблице Ж.1. Данная таблица представлена в научной работе [Ж.1] с указанием доли аварий по причине гололёда от общего количества аварий на проводах ЛЭП на территории Российской Федерации за ОЗП с 2013 г. по 2018 г.

Таблица Ж.1 – Исходные данные для расчёта

O3П ( $X_i$ )	Доля аварий по причине гололёда от общего количество аварий, $\%  (f_i)$
1	8,68
2	12,08
3	8,26
4	7,82
5	14,78
Сумма ( $f$ )	51,62

Решение:

Найдём выборочную среднюю х:

$$\bar{x} = \frac{1}{f} \sum x_i f_i = \frac{1}{51,62} 162, 8 = 3,15$$
 (E.1)

Процесс вычисления проиллюстрирован в Таблице Ж.2.

Таблица Ж.2 – Результаты промежуточных расчётов для (Ë.1)

$x_i$	$f_i$	$x_i f_i$
1	8,68	8,68
2	12,08	24,16
3	8,26	24,78
4	7,82	31,28
5	14,78	73,9
Сумма	51,62	162,8

Примем в качестве оценки  $\lambda = x = 3,15$ .

Проверим нулевую гипотезу  $H_0 = ($ события процесса проявления угрозы нарушения электроснабжения региона образуют поток во времени, близкий к потоку Пуассона), то есть

$$p_k = P(X = k) = \frac{\lambda^k}{k!} e^{-\lambda} = \frac{3.15^k}{k!} e^{-3.15}$$
  $k = 1, 2, ...,$  при уровне значимости  $\alpha = 0.001$ .

Найдем теоретические вероятности  $p_k = \frac{3,15^k}{k!} e^{-3,15}$  и теоретические частоты  $f_k^{'} = f \cdot p_k = 51,62 \cdot p_k$  .

Результаты расчёта представлены в Таблице Ж.3.

Таблица Ж.3 – Результаты расчёта

k	$f_k$	$p_k$	$f_{k}^{'}$	$\left(f_{k}-f_{k}^{'}\right)^{2}$	$\frac{\left(f_{k}-f_{k}^{'}\right)^{2}}{f_{k}^{'}}$
1	8,68	0,13	6,95	2,99	0,43
2	12,08	0,21	10,96	1,26	0,11
3	8,26	0,22	11,52	10,63	0,92
4	7,82	0,18	9,08	1,60	0,18
5	14,78	0,11	5,73	81,91	14,30

Из расчетной таблицы находим наблюдаемое значение критерия Пирсона  $\chi^2 \approx 15,94$ .

Критическая точка для уровня значимости 0,001 при количестве степеней свободы k=5-2=3 (число групп минус два) равна 16,3. Так как наблюдаемое значение критерия 15,94 меньше критического значения 16,3, следует принять нулевую гипотезу о распределении генеральной совокупности по закону Пуассона.

В 2009 г. в СПбПУ проводилась научно-исследовательская работа по теме «Разработка и внедрение пилотных проектов по применению современных средств спасения при пожарах на объектах сферы науки и образования, в том числе исследование возможности применения пневматических многоконтурных спасательных матов при пожаре в образовательном (научном) учреждении в условиях дефицита времени и пространства, а также иных современных средств спасения при пожарах на объектах сферы науки и образования».

В отчёте о НИР представлена разработка и реализация аналитической динамической модели управления безопасностью как спасателя, так и рядовых членов организации, в которой рассматриваются процессы обеспечения безопасности. Данные результаты утверждены в 2009 членом-корреспондентом РАН Рудским А.И.

В данном отчёте НИР была осуществлена проверка распределения средних времен эвакуации экспоненциальному (пуассоновскому) распределению. Для проверки формы распределения использовался тест Колмогорова-Смирнова. В результате проведённых расчётов был сделан вывод о показательном законе распределения времени, затрачиваемом ЛПР на выбор спасаемого во время проведения эвакуации при пожаре, времени эвакуации людей во время пожара, длительности прихода сигнала о пожаре на пульт ЛПР, длительности осмысления ситуации ЛПР, времени доведения сигнала ЛПР «Пожарная опасность!» до заинтересованных

ЛПР.

Таким образом, можно сделать вывод, что события процессов обеспечения безопасности образуют поток во времени, близкий к потоку Пуассона.

Источник литературы [Ж.1]: Ратушняк В.С. Статистический анализ аварийных отключений электроэнергии из-за гололёдообразования на проводах ЛЭП на территории РФ [Электронный ресурс] / В.С. Ратушняк, В.С. Ратушняк, Е.С. Ильин, О.Ю. Вахрушева // Молодая наука Сибири: электрон. науч. журн. − 2018. − №1. − Режим доступа: http://mnv.irgups.ru/toma/11-2018, свободный. − Загл. с экрана. — Яз. рус., англ. (дата обращения: 22.03.2022).

## Приложение 3. Акт внедрения результатов диссертационного исследования в учебный процесс



#### МИНОБРНАУКИ РОССИИ

федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (ФГАОУ ВО «СПбПУ»)

ИНН 7804040077, ОГРН 1027802505279, ОКПО 02068574

Политехническая ул., 29, Санкт-Петербург, 195251 тел.: +7(812)297 2095, факс: +7(812)552 6080 office@spbstu.ru

### **УТВЕРЖДАЮ**

Проректор по образовательной

деятельности



### АКТ ВНЕДРЕНИЯ

в деятельность федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» результатов диссертационного исследования «Модели и методика геоинформационной поддержки управления территориальной системой обеспечения безопасности электроснабжения региона» ассистента Высшей школы техносферной безопасности Полюховича Максима Алексеевича.

Комиссия экспертов Высшей школы техносферной безопасности СПбПУ провела анализ полученных лично Полюховичем Максимом Алексеевичем научных результатов.

Комиссия установила, что результаты диссертационного исследования **Полюховича Максима Алексеевича** внедрены в учебный процесс университета:

- 1. Модель геоинформационной поддержки управления территориальной системой обеспечения безопасности электроснабжения региона опубликована в научных статьях:
- 1. Бурлов В.Г., Полюхович М.А. Модель геоинформационного управления безопасностью электроснабжения региона в условиях обледенения воздушных линий электропередачи // Информация и космос. 2023. № 2. С. 84-94.
- 2. Бурлов В.Г., Полюхович М.А., Идрисова Д.И. Модель геоинформационного управления безопасностью электроснабжения региона / В.Г. Бурлов, М.А. Полюхович, Д.И. Идрисова // Международный научно-исследовательский журнал. 2023. №7 (133). DOI: 10.23670/IRJ.2023.133.16
- 3. Burlov, V., Polyukhovich, M. (2021). System integration of processes of ensuring electric power networks safety under the conditions of impact of meteorological factors. Paper presented at E3S Web of Conferences Volume 289 (2021). International Conference of Young Scientists «Energy Systems Research 2021». 2021. P. 01015. 10.1051/e3sconf/202128901015.
- и реализована при разработке лекций дисциплины «Мониторинг и экспертиза безопасности» (направление подготовки 20.04.01 Техносферная безопасность).
- 2. Методика геоинформационной поддержки управления территориальной системой обеспечения безопасности электроснабжения региона опубликована в научных статьях:
- 1. Бурлов В.Г., Полюхович М.А. Разработка методики геоинформационного управления безопасностью электроснабжения региона в условиях деструктивного воздействия гидрометеорологических факторов // Гидрометеорология и экология. -2023. -№ 70. -C. 100-122.

- 2. Полюхович М.А., Бурлов В.Г., Идрисова Д.И., Логвинова Ю.В. Геоинформационное управление безопасностью электроснабжения региона на основе модели допустимого риска нарушения электроснабжения / М.А. Полюхович, В.Г. Бурлов, Д.И. Идрисова [и др.] // Международный научно-исследовательский журнал. 2023. №4 (130). DOI: 10.23670/IRJ.2023.130.22
- и реализована в дисциплине «Safety monitoring and expertise» (направленность подготовки 20.04.01\_12 Аварийная готовность и реагирование (международная образовательная программа) / Emergency Preparedness and Response (International Educational Program)) при проведении практических занятий по разработке систем обеспечения безопасности радиационно-опасных объектов.
- 3. На основе научно-практического результата: «Научно обоснованные практические рекомендации по совершенствованию геоинформационной поддержки управления территориальной системой обеспечения безопасности электроснабжения региона» разработано учебное пособие:

Бурлов, В.Г. Safety monitoring and expertise: учебное пособие. Part 2. Methodology of ensuring the safety of the object / В. Г. Бурлов, **М. А. Полюхович**, Ю. В. Логвинова; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Высшая школа техносферной безопасности. Санкт-Петербург, 2022. — 121 с.

для обеспечения учебного процесса в рамках международной образовательной программы Emergency Preparedness and Response, реализуемой в сотрудничестве с Международным агентством по атомной энергии (International Atomic Energy Agency).

Председатель комиссии:

Директор ВШТБ

канд. воен. наук, доцент

Члены комиссии

Доцент ВШТБ канд. техн. наук, доцент

Доцент ВШТБ

канд. техн. наук, доцент

Андреев А.В.

Румянцева Н.В.

Каверзнева Т.Т.