

УДК 620.9

НАДЕЖНЫЕ И ОТКАЗОУСТОЙЧИВЫЕ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ И РЕШЕНИЯ БУДУЩЕГО

Иванов М.А. (Филиал АО «СО ЕЭС» ОДУ Центра) начальник отдела Службы технического контроллинга,

Белова М.Ф. (Филиал АО «СО ЕЭС» ОДУ Северо-Запада) главный специалист Службы релейной защиты и автоматики
АО «СО ЕЭС»
г. Москва

Аннотация: В соответствии с данными Схемы и программы развития на 2024-2029 годы планируется развитие ЕЭС России, в связи с чем повышение надежности и отказоустойчивости являются определяющими факторами для функционирования энергосистемы. В данной работе были рассмотрены шесть основных проблемных направлений в части обеспечения надежности энергосистем России, а именно проблемы с топливообеспечением, недостаточного импортозамещения, физического и морального износа оборудования, конфигурации сетей, поддержания параметров электроэнергетического режима и квалификации персонала. Исследован опыт успешных компаний в части повышения надежности энергосистем, а именно использование реклоузеров в распределительных сетях, внедрение предиктивной аналитики и другие. Спрогнозированы три сценария (негативный, базовый и позитивный), приведены результаты прогноза и рекомендации для наиболее вероятного базового сценария.

Ключевые слова: энергосистема, надежность, отказоустойчивость, сценарии развития, реклоузеры, частота аварийных отключений, длительность аварийных отключений.

Введение

Электроэнергетическая система – совокупность объектов электроэнергетики и энергопринимающих установок потребителей электрической энергии, связанных общим режимом работы в едином технологическом процессе производства, передачи и потребления электрической энергии в условиях централизованного оперативно-диспетчерского управления в электроэнергетике [1].

Развитие экономики государства, освоение месторождений полезных ископаемых, строительство новых производств, модернизация и расширение существующих, рост крупных городов, все это является причинами развития, укрупнения и, при наличии возможности, объединения энергосистем. Отдельными стимулами для объединения отдельных энергорайонов в общую энергосистему являются:

- Снижение величины резерва мощности.
- Повышение экономичности работы единиц генерирующего оборудования.
- Снижение суммарного максимума из-за смещения времени потребления.
- Увеличение надёжности электроснабжения за счёт резервирования.

Актуальность выбранной темы

От надежного и бесперебойного снабжения потребителей зависят показатели экономики государства, комфорт и качество жизни населения, безопасность на производствах. Чем больше энергосистема, тем тяжелее и опаснее последствия от системных аварий. На основании данных СиПР на 2024 – 2029 годы [2] прогнозируется увеличение потребления электрической энергии по ЕЭС России на 13,6 % к 2029 году. Таким образом, планируется дальнейшее развитие ЕЭС России, и повышение надежности и отказоустойчивости являются определяющими факторами для ее функционирования.

Для эффективной работы энергосистем предъявляются особые требования к их надежности и отказоустойчивости.

Надежность энергосистемы – способность энергосистемы осуществлять производство, передачу электрической энергии (мощности) и снабжение потребителей электрической энергией в едином технологическом процессе и возобновлять их после нарушений. Отказоустойчивость энергосистемы – свойство энергосистемы сохранять свою работоспособность после отказа одной или нескольких её составных частей.

Снабжение топливно-энергетическими ресурсами

Основными проблемами в части снабжения топливно-энергетическими ресурсами являются:

- Сложности и дороговизна доставки топлива в отдельные регионы страны, отсутствие или недостаточная добыча ресурсов региона для нужд энергетики (к примеру, стоимость доставки дизельного топлива в Чукотский автономный округ составляет около 70% стоимости самого топлива [3]. Общая установленная мощность дизельных электростанций Чукотского автономного округа составляет более 50 МВт).
- Снижение выработки электроэнергии в зимний период (для ГЭС).
- Зависимость от погодных условий (для СЭС, ВЭС).

В соответствии с Генеральной схемой размещения объектов электроэнергетики до 2035 года (Генеральная схема) потребность в основных видах топлива (газ и уголь) электрических станций будет расти в период 2025-2035 года, что говорит о необходимости развития газодобывающей и угольной промышленности, включая развитие транспортной инфраструктуры. Для сдерживания роста тарифа на электроэнергию необходимо рассматривать технологии, позволяющие повышать КПД и эффективность использования топлива. Перспективным направлением в электроэнергетики будет оставаться развитие атомных электростанций на основе реакторов ВВЭР-ТОИ, внедрение инновационных реакторов. Одним из применяемых решений является создание атомных станций малой мощности для энергоснабжения труднодоступных регионов. Атомная энергетика потребует стабильной добычи и переработки урановой руды.

Для решения вопроса надежности энергоснабжения удаленных территорий и территорий с неразвитой сетевой инфраструктурой госкорпорация «Росатом» предлагает использование атомных станций малой мощности (АСММ). АСММ обладает возможностью производства тепловой энергии, что важно для районов с холодным климатом. В настоящее время Росатом эксплуатирует единственную в мире действующую плавучую атомную теплоэлектростанцию (ПАТЭС), размещенную на базе плавучего энергоблока «Академик Ломоносов» с двумя реакторами КЛТ-40С. Станция базируется в городе Певек Чукотского автономного округа (ЧАО). Строительство ПАТЭС осуществлялось в ОАО «ПО «Севмаш» и в ОАО «Балтийский завод» в Санкт-Петербурге. В декабре 2019 года ПАТЭС выдала первую электроэнергию в изолированную сеть Чаун-Билибинского узла ЧАО. В мае 2020 года состоялся ввод станции в промышленную эксплуатацию.

Также в настоящий момент «Росатом» реализует проект сооружения первой в мире наземной АСММ в Усть-Янском районе Якутии на базе новой реакторной установки РИТМ-200Н. Кроме того, реализуется проект сооружения АСММ на базе РУ «Шельф-М» на Чукотке. Срок службы станции – 60 лет, на одной загрузке топлива реактор работает около восьми лет. Тепловая мощность реактора в 35 МВт позволит обеспечить генерацию до 10 МВт электрической энергии [4].

Надежность оборудования

В настоящее время основными проблемами в части обеспечения надежности и отказоустойчивости энергосистем для отдельного оборудования являются:

• Износ (устаревание) оборудования (19% аварий за 2022 год произошли по причине устаревания оборудования [5], 8,78% случаев неправильной работы устройств РЗА за 2023 год произошли из-за физического и морального устаревания устройств [5]).

• Отсутствие комплектующих для импортного оборудования при ремонте (недостаточное импортозамещение).

Стоит отметить низкую наблюдаемость отдельных элементов энергосистемы, 6 % аварий за 2022 год произошло из-за несвоевременного выявления дефектов, а около 36 % неправильной работы устройств РЗА за 2023 год связано с невыявленными дефектами электромеханической аппаратуры и вторичными цепями устройств РЗА [6].

Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года предусматривает [7]:

- Снижение среднего значения длительности аварийных отключений (индекс SAIDI). В 2024 году планируется достичь значения 3,53 часа со снижением до 2,23 часа к 2035 году;

- Снижение среднего значения частоты аварийных отключений (индекс SAIFI). 2024 год планируется завершить с индексом 1,17 единицы и снижением к 2035 году до 0,85 единиц.

- Ежегодное 5 % уменьшение числа аварий в ТЭК.

Структура построения электроэнергетических систем, принципы и уровень резервирования и запасов всех видов, надежность функционирования ЭЭС и электроснабжения потребителей

Отсутствие резервирования в распределительных сетях и слабые схемы выдачи мощности напрямую влияют на отказоустойчивость энергосистемы и надежное электроснабжение потребителей.

Ярким примером является авария в ОЭС Востока 01.08.2017 года [8], в результате которой без электричества осталось 1,7 миллиона человек (на территории России и в приграничных районах Китайской Народной Республики). Схема ОЭС Востока является относительно слабой (сеть на напряжениях 220 – 500 кВ выполнена в основном одноцепными воздушными линиями), отсутствует распределенная генерация. Таким образом, неправильное действие релейной защиты в ремонтной схеме, привело к масштабным последствиям для всего энергорайона.

Другим примером слабой схемы выдачи мощности является Воркутинский энергорайон Республики Коми [9], в котором находится только одна электростанция (примечание – Воркутинская ТЭЦ-1 выведена из эксплуатации в 2022 году). Связь энергорайона с ЕЭС России осуществляется через одноцепную ВЛ 220 кВ Инта – Воркута длиной 424 км, проходящую по болотистой местности, в связи с чем ремонт возможен только зимой. Для проведения ремонта линии в 2018 году Субъектами электроэнергетики была проведена масштабная двухлетняя работа по капитальному ремонту Воркутинской ТЭЦ-2, монтажу дизельных электростанций на Воркутинской ТЭЦ-1. Надежность снабжения потребителей энергорайона в первую очередь необходима для безопасности персонала, занятых на шахтах, и комфортной жизни населения в условиях отрицательных температур региона.

Сбалансированное перспективное развитие энергосистемы, использование распределенной генерации позволит усилить слабые схемы выдачи мощности.

Надежность и качество профессиональной подготовки персонала объектов электроэнергетики

Подготовка и поддержание квалификации персонала является одной из важнейших задач для функционирования энергосистемы. При проведении анализа раздела «Вакансии» на сайтах ведущих энергетических компаний можно сделать вывод, что отдельные регионы

страны испытывают «кадровый» голод в связи с отсутствием людей с высшим образованием по специальности «Электроэнергетика» или их нежеланием работать в сфере по причине низких зарплат.

В электроэнергетике существует проблема с дефицитом кадров. Выпускники учебных заведений не особо заинтересованы в получении работы в сфере электроэнергетики. Одним из приоритетов выбора данного направления для обучения являются низкий проходной балл по результатам ЕГЭ и более низкая стоимость обучения.

С 2021 в рамках федерального проекта «Содействие занятости» реализуется комплекс мероприятий национального проекта «Демография». По статистическим данным Минтруда в настоящее время около 64 000 человек воспользовались возможностью пройти обучение в ВУЗах за счет бюджетных средств. Стоит отметить, что только 2 % (около 1500 человек) прошли обучение по программам, связанным с ТЭК, а трудоустроились по специальности чуть более 1000 человек [10].

С целью повышения качества подготовки кадров и привлечения молодежи к освоению электроэнергетических специальностей. Системный оператор и Благотворительный фонд «Надежная смена» начиная с 2007 году успешно реализуют проект «Школа – вуз – предприятие». Данный проект направлен на привлечение к обучению в профильных старших классах с «энергетическим» уклоном наиболее мотивированных одаренных учеников. Специалисты Системного оператора и преподаватели вузов, включенных в проект, принимают непосредственное участие в обучение учеников профильных классов. Ежегодно в рамках проекта обучение проходит более 350 старшеклассников. В рамках развития программы в 2022 году АО «СО ЕЭС» и Сибирский федеральный университет (СФУ) подписали Соглашение о долгосрочном сотрудничестве по подготовке, повышению квалификации и профессиональной переподготовке кадров, а также учебно-методической деятельности [11].

С 2022 года работа по внедрению модели «Школа – вуз - предприятие» организована филиалом ПАО «Россети Сибирь» - «Красноярскэнерго». Так на территории производственного отделения Западные электрические сети (ПО ЗЭС) в городе Ачинск на базе ФГБОУ ВО «Государственный аграрный университет» (КрасГАУ) функционирует первый в Сибирском федеральном округе энергокласс. В рамках проекта школьники участвуют в энерговикторинах, посещают учебный полигон КрасГАУ, работают в электролаборатории и знакомятся с особенностями работы диспетчерской службы ПО ЗЭС [12].

ПАО «Т Плюс» реализует последовательную стратегию подготовки кадров. В 2023 году Самарским филиалом ПАО «Т Плюс» совместно с Самарским государственным техническим университетом (СамГТУ) реализован проект «Энергия будущего». С целью создания условий для молодых ученых в сфере энергетики при поддержке энергокомпании открыта оборудованная аудитория, в которой специалисты компании регулярно проводят тематические встречи, дискуссии и презентации. Также в рамках программы сотрудничества в университете работает проект «Школа молодого энергетика», который призван помочь старшеклассникам и выпускникам школ определиться с выбором профессии [13].

Крупные энергосистемы предъявляют особые требования к эксплуатации от всех Субъектов электроэнергетики, задействованных в процессе производства, передачи, распределения электроэнергии, в противном случае последствия от нарушений, ошибок, могут быть очень тяжелыми. В качестве примера рассматривается авария 25 мая 2005 года на ПС «Чагино» в Москве [14], в результате которой без электроснабжения остались около 2 миллионов человек, а экономический ущерб оценивается порядка 5 млрд рублей (в ценах на 2005 год). Таким образом, чем больше энергосистема, тем тяжелее и опаснее последствия от системных аварий.

Тенденции развития будущего

Для повышения надежности работы оборудования необходимо обеспечить достаточный уровень технического обслуживания. Внедрение предиктивной аналитики и интеллектуальных внесет свой вклад в повышение надежности и отказоустойчивости энергосистем. Отечественным примером использования предиктивной аналитики является внедрение на Магнитогорском металлургическом комбинате контроля состояния электродвигателей [15], что позволило отказаться от еженедельной диагностики оборудования и перейти от плановых предупредительных ремонтов к обслуживанию по состоянию. С помощью беспроводных датчиков в режиме реального времени проводится измерение параметров оборудования. Статистические данные обрабатываются программным комплексом, который определяет возможные типы развивающихся неисправностей. При сокращении затрат на ремонт и содержание обслуживающего персонала производительность увеличилась на 2 %. На электрических станциях установлено большое количество электродвигателей, используемых на насосном и тягодутьевом оборудовании, для которых можно применять аналогичную предиктивную диагностику. На десяти ТЭС [16] (ПАО «Мосэнерго», ПАО «Т Плюс» и ПАО «Татэнерго») на основном и вспомогательном оборудовании внедрена система предиктивной аналитики «ПРАНА» (АО «РОТЕК»). По отзывам руководителей данных генерирующих компаний, система позволила повысить надежность работы оборудования, что приводит к сокращению внеплановых простоев генерирующего оборудования, а, следовательно, к снижению штрафных санкций. Система позволяет обрабатывать до 2500 сигналов в секунду. За время работы системы было предотвращено 238 инцидента. Положительный опыт применения предиктивной аналитики отмечается в электроэнергетической компании Duke Energy (США) [17]. После серьезной аварии, связанной с повреждением силового трансформатора, ущерб от которой составил порядка 10 млн долларов, компания начала поэтапно внедрять систему PRISM, позволяющую проводить в режиме реального времени оценку состоянию оборудования. Одним из ярких примеров использования данной системы служит выявление незначительных вибраций ротора турбины, которое позволило своевременно остановить турбину в ремонт и не допустить ее повреждения, что по оценкам специалистов сэкономило порядка 4,1 млн долларов для компании. За три года применения системы было выявлено 384 дефекта, ранее выявленных которых снизило затраты компании на 31,5 млн. долларов.

Для сокращения времени перерыва электроснабжения потребителей в распределительных сетях 6-10 кВ стоит рассматривается установка реклоузеров. Для обеспечения возможности повсеместного использования реклоузеров в распределительных сетях необходимо обеспечить достаточные объемы их отечественного производства в условиях санкционного давления и затрудненного параллельного импорта. Проведя анализ российского рынка реклоузеров, можно сделать вывод, что производство этих устройств представлена рядом крупных компаний, что свидетельствует о конкурентоспособности отрасли. Заказчик может выбирать для себя оборудование, соответствующее его запросом, в том числе выбрать производителя по критерию обеспечения наиболее оптимальной логистики. Применение реклоузеров в Карелэнерго уже в 2008 году позволило добиться экономический эффект вследствие снижения эксплуатационных расходов и недоотпуска электроэнергии. Годовой недоотпуск электрической энергии снизился на 45 % при среднем сроке окупаемости реклоузера – 7,5 лет [18]. Применение реклоузеров в 2015 году Янтарьэнерго снизило среднее время нарушения электроснабжения потребителей в Багратионовском РЭС с 6 часов 30 мин. до 49 мин. и в Мамоновском РЭС с 2 часов 30 мин [19]. Энергетическая компания Детройт-Эдиссон (США) оценивает экономический эффект порядка 1 миллиона долларов ежегодно за счет внедрения в распределительных сетях реклоузеров вследствие снижения затрат на эксплуатационное обслуживание. Энергокомпания ESKOM (Южная Африка) заявляет, что внедрение реклоузеров на базе

микропроцессорных устройств РЗА с возможностью интеграции в систему SCADA значительно повысило надежность электроснабжения и практически полностью исключило возможность отключения потребителей при неустойчивых повреждениях [20].

Одной из основных задач оперативно-диспетчерского управления является обеспечение режимной надежности, то есть способности энергосистемы при определенных условиях противостоять внезапным возмущениям. Обеспечение режимной надежности требует постоянного поддержания допустимых значений всех параметров режима. Правилами технологического функционирования электроэнергетических систем определены четыре параметра электроэнергетического режима энергосистемы [21]:

- Частота электрического тока. Для поддержания этого параметра требуется обеспечение наиболее точного расчета при краткосрочном планировании режимов, в том числе развитие технологий нормированного первичного регулирования частоты и технологий автоматического вторичного регулирования частоты и перетоков активной мощности. При значительном росте внедрения ВИЭ необходимо рассмотреть внедрения синтетической инерции для снижения скорости снижения частоты при аварийных возмущениях.

- Перетоки активной мощности в электрической сети, в том числе в контролируемых сечениях. Для увеличения пропускной способности без дополнительного строительства объектов электроэнергетики необходимо создание и развитие СМЗУ и внедрение ЦСПА. Повышение пропускной способности за счет использования СМЗУ составляет в среднем 10–20 % [22]. На май 2023 года СМЗУ использовалось для 281 сечения ЕЭС России – это около 18 % от их общего числа (1560 сечений). В среднем за период 2013–2023 было внедрено по 28 СМЗУ в год. СМЗУ представляет из себя аппаратно-программный комплекс, способный производить в режиме реального времени расчет максимально допустимых перетоков. Для этого проводится оценка текущей схемы и режима работы энергосистемы. За счет применения СМЗУ достигается возможность увеличения пропускной способности сети и дополнительной загрузки экономически эффективного генерирующего оборудования. В 2024 году технология СМЗУ была впервые внедрена в технологически изолированной Норильско-Таймырской энергосистеме, обеспечив увеличение пропускной способности сечений на 10-15% [23]. Развитие технологий СМЗУ является отечественной разработкой АО «НТЦ ЕЭС». Развитие технологии и ее финансирование предусмотрены Перечнем направлений инновационного развития АО «СО ЕЭС» и инновационных проектов Программы инновационного развития АО «СО ЕЭС» на 2022-2026 годы и на перспективу до 2031 года [24]. ЦСПА – это двухуровневый программно-аппаратный комплекс, производящий на «верхнем» уровне циклический сбор информации и расчет управляющих воздействий с последующей передачей таблицы управляющих воздействий в «низовые» устройства, расположенные на объектах электроэнергетики. В настоящее время ЦСПА введены в эксплуатацию в 7 филиалах Системного оператора. Эффективность я ЦСПА заключается в снижении объема мощности потребителей, отключаемой действием противоаварийной автоматики. В 2021 году Системный оператор совместно с АО «KEGOC» (Казахстан) обеспечили возможность использования в ЦСПА ОЭС Урала возможность использования пусковых органов, которые срабатывают по факту отключения ряда ЛЭП 500 кВ и ВЛ 1150 кВ Костанайская – Кокшетауская, расположенных на территории Казахстана. В ремонтных схемах это позволяет снизить нагрузку менее экономически выгодных Ириклинской ГРЭС, Троицкой ГРЭС и ТЭЦ Центрального энергорайона Оренбургской энергосистем на величину порядка 600 МВт и повысить эффективность проведения совместной ремонтной кампании в ЕЭС России и ЕЭС Казахстана [25].

- Токовая нагрузка линий электропередачи и электросетевого оборудования напряжением 110 кВ и выше.

- Напряжение на шинах с номинальным напряжением 110 кВ и выше электрических станций и подстанций.

Для поддержания допустимой токовой нагрузки ЛЭП и оборудования и напряжения на шинах объектов электроэнергетики следует:

- Обеспечить снижение перетоков реактивной мощности путем установки СКРМ.
- Устанавливать дополнительные устройства ПА (к примеру, АОПО).

Сценарный анализ. Основные результаты исследования

В рамках работы были рассмотрены три сценария (негативный, базовый и позитивный) развития электроэнергетической отрасли. В базовом сценарии, как и наиболее вероятном, количество СМЗУ составит 630 (в 40 % контролируемых сечений). Прирост потребления к 2035 составит 28,3 ГВт при внедрении СМЗУ, с возможностью увеличения пропускной способности на 15 %, порядка 1700 МВт увеличения пропускной способности даст применение СМЗУ. В связи с низкой привлекательностью отдельных регионов страны и недостаточным опытом эксплуатации новых внедряемых технологий отрасль электроэнергетики испытывает кризис кадров. Ведется разработка нормативной документации по эксплуатации новых внедряемых технологий, по результатам анализа аварийных отключений разрабатываются мероприятия по исключению аналогичных организационных причин аварий (ошибки персонала, невыявленные дефекты первичного оборудования и устройств РЗА и др.). В результате проведения организационных мероприятий, частичной заменой устаревшего оборудования, прогнозируется снижение индексов SAIDI и SAIFI до 2,12 – 2,34 ч/год и 0,81 – 0,89 откл/год соответственно к 2035 году.

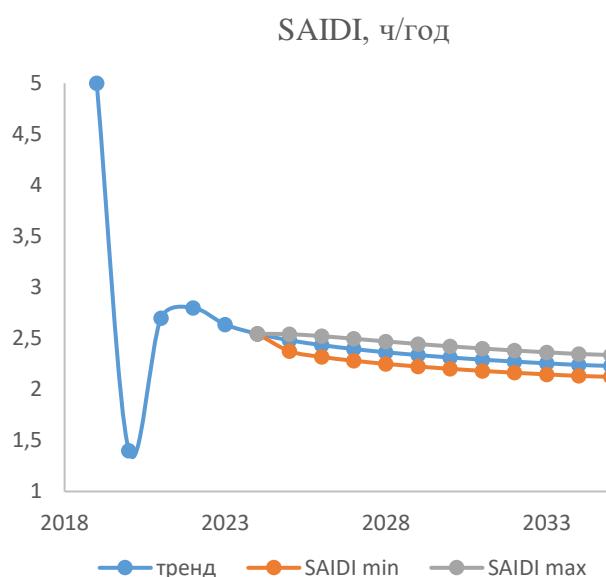


Рисунок 1. Прогноз SAIDI

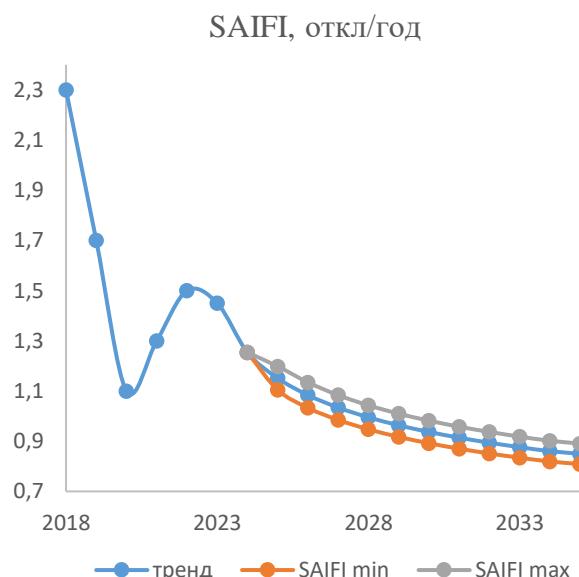


Рисунок 2. Прогноз SAIFI

Количество аварий в сетях 110 кВ и выше составит порядка 8157 шт., а процент неправильной работы устройств РЗА – 2,6 % к 2035 году (нижняя граница коридора показателей надежности на 2,5-5% ниже линии тренда 2035 года).



Рисунок 3.
Количество аварий в сети 110 кВ и выше



Рисунок 4.
Неправильные случаи работы РЗА

Для последующего обеспечения снижения числа аварий необходимо в каждой компании реализовать пилотный запуск систем предиктивной аналитики на разных видах оборудования с целью получения статистических данных и определения менее отказоустойчивых видов оборудования. На текущем этапе анализ полученных данных проводится специалистами энергокомпаний с привлечением сторонних экспертов.

Выводы и рекомендации

Для максимального эффекта по результатам разработанных рекомендаций государственной политики и политики компаний для базового сценария развития требуется единовременное вложение 46 млрд рублей в реализацию программ по подготовке персонала (строительство 3 центров подготовки для сетевых компаний) и ежегодные вложения порядка 410 млрд рублей. При этом наиболее эффективными рекомендациями для базового сценария развития являются льготная поддержка инвесторов, НИИ и бизнеса оценочной стоимостью порядка 200 млрд рублей в год. Для повышения надежности электростанций, снижения затрат на проведение аварийно-восстановительных работ и снижения штрафов за аварийный простой генерирующего оборудования необходимо внедрять системы предиктивной аналитики на энергоблоках установленной мощностью 250 МВт и более (350 шт.), что потребует финансирования порядка 35 млрд рублей.

По результатам проведенных сценарных анализов с уверенностью можно сказать, что приоритетным направлением для Российской Федерации в части надежности и отказоустойчивости энергосистем является развитие науки и технологий для обеспечения импортозамещения и технологической независимости.

Список литературы

1. ГОСТ Р 57114-2022 Национальный стандарт Российской Федерации. Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Электроэнергетические системы. Оперативно-диспетчерское управление в электроэнергетике и оперативно-технологическое управление. Термины и определения.
2. Схема и программа развития электроэнергетических систем России на 2024-2029 годы.
3. Стратегия социально-экономического развития Чукотского автономного округа до 2030 года.
4. Атомные станции малой мощности [Электронный ресурс]: URL: <https://www.rosatom.ru/production/atomnye-stantsii-maloy-moshchnosti/> / (дата обращения 12.04.2024).

5. 22 Отчет о социальной ответственности и корпоративном устойчивом развитии. [Электронный ресурс]: URL: <https://rosseti.ru/shareholders-and-investors/disclosure-of-information/annual-reports/>. (дата обращения: 02.04.2024).
6. Информация о результатах функционирования устройств РЗА в ЕЭС России в 2023 году. [Электронный ресурс]: URL: <https://www.so-ups.ru/functioning/tech-base/rza/rza-account-analys/rza-results-info/2023/>. (дата обращения 12.05.2024).
7. Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года.
8. Чулюкова М.В. Системная авария в ОЭС Востока 1 августа 2017: хронология и анализ событий. Вестник АмГУ. Выпуск 81, 2018. 4 с.
9. Для ремонта ВЛ 220 кВ Инта-Воркута потребовалось выделить Воркутинский энергорайон на изолированную работу от ЕЭС [Электронный ресурс]: URL: <https://energyland.info/analytic-show-167217> (дата обращения 15.04.2024).
10. Бондаренко А.Б. Проблемы кадрового обеспечения отраслей ТЭК//Энергетическая политика. – 14.11.2022.
11. Проект «Школа — вуз — предприятие» АО «СО ЕЭС» получил награду V Международного форума по энергоэффективности и развитию энергетики ENES 2016 [Электронный ресурс]: URL: <https://www.so-ups.ru/news/press-release/press-release-view/news/14609/> (дата обращения 22.06.2024).
12. Системный оператор и Сибирский федеральный университет подписали Соглашение о долгосрочном сотрудничестве [Электронный ресурс]: URL: <https://eepir.ru/new/sistemnyj-operator-i-nbsp-sibirskij-federalnyj-universitet-podpisali-soglashenie-o-nbsp-dolgosrochnom-sotrudnichestve/> (дата обращения 22.06.2024)
13. В Самаре будут готовить кадры для крупной теплоэнергетической компании [Электронный ресурс]: URL: <https://www.samara.kp.ru/daily/27533/4798544/> (дата обращения 15.06.2024)
14. Авария в энергосистеме в Москве (2005) [Электронный ресурс]: URL: <https://ru.wikipedia.org> (дата обращения 20.03.2024).
15. Диагностика оборудования и прогнозирование неисправностей [Электронный ресурс]: URL: <https://ai-russia.ru/library/mmk-diagnostica/> (дата обращения 27.07.2024)
16. Перечень внедрений [Электронный ресурс]: URL: <https://prana-system.com/perechen-vnedrenij/> (дата обращения 27.07.2024)
17. Duke Energy Avoids Unplanned Downtime and Improves Reliability with IIoT and Predictive Maintenance [Электронный ресурс]: URL: <https://www.arcweb.com/blog/duke-energy-avoids-unplanned-downtime-and-improves-reliability-iiot-and-predictive-maintenance> (дата обращения 27.07.2024)
18. Экономический эффект в результате применения реклоузеров за 2008 год в «Карелэнерго» составил почти 1,5 млн руб [Электронный ресурс]: URL: <https://www.elec.ru/news/2009/04/10/ekonomicheskij-effekt-v-rezultate-primeneniya-rekl.html> (дата обращения 12.04.2024)
19. Никишин А.Ю., Беклемешев И.С. Применение реклоузеров в сетях ОАО «Янтарьэнерго» для решения проблем в распределительных сетях среднего напряжения//Известия КГТУ №44, 2017. – 8 с.
20. Надежность распределительных электрических сетей 6 (10) кВ автоматизация с применением реклоузеров// Новости электротехники, журнал №5(17), 2002.
21. Правила технологического функционирования электроэнергетических систем (Постановление Правительства Российской Федерации от 13.08.2018 №937)
22. Соколова А. Что такое СМЗУ?// Энергия без границ. – 2023. - №5 (82) – с.28-31.
23. Системный оператор впервые внедрил в изолированной энергосистеме цифровую технологию расчета максимально допустимых перетоков [Электронный ресурс]: URL: <https://www.so-ups.ru/news/press-release/press-release-view/news/24671/> (дата обращения 12.04.2024)

24. Инновационное развитие [Электронный ресурс]: URL: <https://www.so-ups.ru/about/innovative/> (дата обращения 15.06.2024)
25. Расширенная функциональность Централизованной системы противоаварийной автоматики ОЭС Урала повысила эффективность работы ЕЭС России [Электронный ресурс]: URL: <https://www.so-ups.ru/news/press-release/press-release-view/news/16655/> (дата обращения 12.04.2024).