

На правах рукописи



СОКОЛОВА Ольга Николаевна

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕЙСТВИЙ ГЕОМАГНИТНЫХ ТОКОВ НА
ЭНЕРГОСИСТЕМЫ И МЕРОПРИЯТИЙ ПО ПРЕДОТВРАЩЕНИЮ
СИСТЕМНЫХ АВАРИЙ

Специальность 05.09.05 – Теоретическая электротехника

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»


- Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Коровкин Николай Владимирович
- Официальные оппоненты: Соловьева Елена Борисовна
доктор технических наук, профессор,
заведующая кафедрой «Теоретические основы электротехники», Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им В.И.Ульянова (Ленина)»
- Сахаров Ярослав Алексеевич
кандидат физико-математических наук,
заведующий лабораторией, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Полярный геофизический институт»
- Ведущая организация: «23 Государственный морской проектный институт – филиал акционерного общества «31 Государственный проектный институт специального строительства»

Защита состоится « _____ » _____ г. в _____ на заседании диссертационного совета Д212.229.16 при Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул. Д. 29

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «СПбПУ» www.spbstu.ru

Автореферат разослан « _____ » _____ г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета Д212.229.16
к.т.н., доцент

 Журавлева Наталия Михайловна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень проработанности Развитие технических систем, в частности электроэнергетических систем (ЭЭС), а также усложнение технических процессов и алгоритмов контроля усиливает влияние на них тех факторов функционирования, которыми раньше можно было пренебречь. Одним из таких факторов являются геомагнитные бури (ГМБ). ГМБ, связанные с изменением магнитосферно-ионосферной токовой системы, оказывают воздействие на протяженные электротехнические системы путем создания кондуктивной помехи ультранизкой частоты, так называемых геомагнитно индуцированных токов (ГИТ). ГИТ, протекая по сетевым элементам, приводят к нарушению симметрии передачи энергии по фазам, появлению ненормированного распределения тока высших гармоник и, соответственно, дополнительному термическому нагреву оборудования.

Вехой в исследованиях влияния ГМБ на ЭЭС стала энергоавария в ЭЭС Квебека 13-14 марта 1989 г. (Hydro-Quebec blackout). Авария изменила статус проблемы с фундаментального на фундаментально-прикладной. В США и Канаде начали выполняться целевые программы, а проблема получила статус критической. Меньшее по силе возмущение магнитосферно-ионосферной токовой системы 29-30 октября 2003 г. послужило причиной множественного отказа разнообразных технологических систем не только в так называемых зонах высокого риска, но и на территориях умеренного риска (Россия, ЮАР, страны Скандинавии, Северной Америки). ГМБ в ноябре 2004 г. являлись причиной недопустимых режимов работы силовых трансформаторов в ЭЭС Китая. На основании анализа последствий можно сделать вывод о том, что применяемые меры по повышению качества и надежности электроснабжения в нормальных и более изученных аварийных режимах повышают уязвимость ЭЭС к ГМБ – менее изученному аварийному возмущению и приводят к расширению карты зон «высокого риска». В свою очередь, совершенствование теоретической базы о физических процессах на поверхности Солнца и магнитосфере-ионосфере позволяет получить более точные прогнозы о времени появления и районах воздействия ГМБ. Прямым следствием этого является повышение общественной осведомленности об эффектах ГМБ на ЭЭС и возможность проведения пост-реконструирующих анализов. Несмотря на полученные результаты исследований по данной проблеме, практике ЭЭС не удалось предотвратить межсистемные аварии, вызванные ГМБ.

ЦФПТЭС и ПГИ КНЦ РАН была разработана и установлена в ЭЭС Кольского полуострова система регистрации ГИТ в нейтралях трансформаторов магистральной линии. Тем не менее, в масштабах страны не ведется регулярный контроль воздействий ГМБ на объекты ЭЭС. Влияние ГМБ на оборудование ЭЭС России не подкреплено целенаправленно собранными массивами экспериментальных данных, ориентированных на анализ и выявление закономерностей. Дополнительной сложностью является малый опыт эксплуатации ЭЭС при появлении ГМБ у современной электроэнергетики.

Приведенные соображения показывают **актуальность** данной работы, направленной на систематизацию групп факторов различной природы, определяющих уязвимость ЭЭС к ГМБ. Значительный вклад в изучение данного вопроса внесли такие отечественные и мировые ученые, как: Демирчян К.С., Бутырин П.А., Остафийчук Р.М., Ефимов Б.В., Куприенко В.М., Сахаров Я.А., Попов В.В., Богуславский И.Я., Данилевич

Я.Б., Коцеев Л.А., Строев В.А., Вахнина В.В., Сивоконь В.П., С. Т. Gaunt, A. Viljanen, R. Piirjola, W. Radasky, J. Kappenman, D. Boteler, V. Bothmer, N. Mitchinson, A. Thomson, A. Pulkkinen, J. Elovaara.

Целью настоящей диссертационной работы является совершенствование методики анализа негативных эффектов ГМБ на ЭЭС для предупреждения крупных межсистемных аварий.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Сбор, систематизация и обобщение данных о ГМБ и их воздействии на ЭЭС России и мира.
2. Составление и обоснование методики расчета квазипостоянных токов, индуцированных ГМБ, в протяженных электротехнических системах и разработка алгоритма численных исследований.
3. Анализ надежности действующего силового и измерительного оборудования ЭЭС к геомагнитным воздействиям.
4. Оценка и ранжирование критических факторов по степени влияния на режим и оборудование ЭЭС.
5. Разработка критериев и алгоритмов оценки воздействия ГМБ.
6. Разработка рекомендаций и мероприятий по прогнозированию сценариев межсистемных аварий и координации действий технических служб с целью их недопущения.

Научная новизна работы соискателя заключается в том, что:

1. Впервые выполнено ранжирование критических факторов разной природы, влияющих на устойчивость ЭЭС к негативным электромагнитным эффектам ГМБ.
2. Предложен и обоснован качественно новый метод анализа устойчивости ЭЭС к ГМБ, учитывающий многофакторный характер их влияния.
3. Разработана модель анализа межинфраструктурных аварий вследствие потери электроснабжения при появлении ГМБ.
4. Разработана модель межинституциональных взаимодействий с целью предотвращения межсистемных аварий, вызванных геомагнитными возмущениями.

Теоретическая значимость работы заключается в обосновании составленной методики оценки устойчивости ЭЭС к геомагнитным воздействиям, учитывающей совокупность факторов разной природы, а также в разработке модели анализа межсистемных аварий, вызванных ГМБ. **Практической значимостью** работы является выявление географических районов в ЕЭС России, в которых, с учетом актуальных схем энергорайонов, влияние ГМБ значительно. Результаты проведенных исследований могут быть использованы для уменьшения негативных электромагнитных эффектов ГМБ на режимы и оборудование ЭЭС.

Методология и методы диссертационного исследования Исследование базируется на методах математического моделирования элементов и режимов ЭЭС, методах обработки экспериментальных данных, методах работы с базами данных, методами анализа сложных систем и методах коммуникационных взаимодействий между организациями, работающими в разных предметных технических областях. Расчеты производились с использованием разработанных алгоритмов и программ, реализованных в программных продуктах Matlab и ArcGIS.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту

1. Систематизация и анализ сценариев воздействий зарегистрированных ГМБ на режим и оборудование ЭЭС.
2. Численные методы исследования электрофизических и тепловых процессов в элементах электрических цепей при действии ГМБ. Оценка устойчивости ЭЭС к эффектам ГМБ, позволившая установить относительную уязвимость силового и измерительного оборудования ЭЭС и системный эффект от потери $N-I$ элемента одного типа.
3. Ранжирование критических факторов различной природы, определяющих устойчивость ЭЭС к ГМБ, дающих комплексную оценку робастности цепи. На основании полученных данных разработаны методы выявления географических районов со значительным влиянием ГМБ.
4. Алгоритм графической визуализации рисков ГМБ для ЭЭС России, дающий возможность адаптации схем перспективного развития ЭЭС с учетом воздействий ГМБ. Предлагаемые мероприятия по предотвращению межсистемных аварий, обеспечивающих равноправное участие 5 участников рынка.

Степень достоверности и апробация результатов Основные результаты работы докладывались и обсуждались на IV Всероссийском форуме студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и инновация в технических университетах» (Санкт-Петербург, 2010), 1-ой Международной научно-практической конференции «Научные и технические средства обеспечения энергоэффективности и энергосбережения в экономике РФ» (Санкт-Петербург, 2011 г.), 3rd International and scientific conference «Actual trends in development of power system protection and optimization» (Санкт-Петербург, 2011 г.), 17th SDPC (Берлин, Германия, 2012 г.), IEEE 7th DEMSEE conference (Бухарест, Румыния, 2012 г.), Workshop on Geomagnetically induced currents in power systems with emphasis on mid- and low-latitude regions (Кейп-Таун, ЮАР, 2014 г.), European Safety and Reliability Conference (Вроцлав, Польша, 2014 г.), 12th ESWW (Оостенде, Бельгия, 2015 г.), 2015 Annual SCEER-FURIES conference (Лозанна, Швейцария, 2015 г.), 2016 IEEE COMPENG (Катания, Сицилия, 2016 г.).

Результаты работы внедрены в АО «НПЦ ЭЭС» и в страховой компании Swiss Re.

Основные теоретические и практические результаты диссертации отражены в 12 печатных работах, в том числе 3 статьи в изданиях, входящих в список рекомендуемых в перечне ВАК РФ, 2 статьи в базе Scopus и одна статья в базе Web of Science.

Работа выполнялась при поддержке Стипендии Правительства Швейцарии в 2011-2012 учебному году (Swiss Government Excellence Scholarships for Foreign Scholars and Academic Artists for the Academic Year 2011-2012), Гранта Президента Российской Федерации для обучения за рубежом студентов и аспирантов российских вузов в 2012/2013 учебном году (приказ Минобрнауки России №539 от 17.07.2012 г.), Стипендии Президента Российской Федерации молодым ученым и аспирантам, осуществляющим перспективные исследования и разработки по приоритетным направлениям модернизации российской экономики на 2015/2017 годы (приказ Минобрнауки России о назначении стипендии №184 от 10.03.2015 г.).

Структура и объем работы Диссертация состоит из введения, пяти глав с выводами, заключения, библиографического списка, включающего 151 наименование, и 8 приложений. Основная часть работы изложена на 135 страницах машинописного текста. Работа содержит 61 рисунок и 17 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы основные задачи диссертационного исследования, отражена новизна диссертационной работы, её научная и практическая значимость.

В первой главе на базе обобщенных разрозненных сведений автором проанализированы сценарии воздействия ГМБ на ЭЭС и даны характеристики ГМБ как специфического возмущения режима ЭЭС.

Автором получены графики, отражающие тенденцию роста числа аварий (рис. 1) и связанного с ними ущерба от недоотпуска электроэнергии (рис. 2). Учитывались сбои в электроснабжении, которые не были запланированы системным оператором. От перерыва в электроснабжении длительностью более часа пострадали

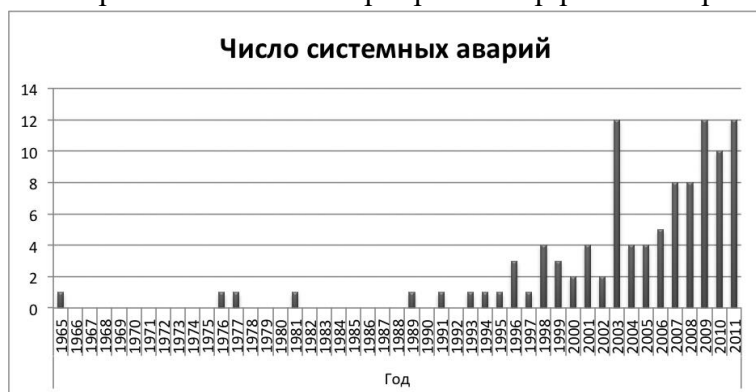


Рисунок 1. Статистика числа системных аварий в ЭЭС мира за последние 50 лет

не менее 1000 потребителей. ГМБ, инициированные изменением магнитосферно-ионосферной токовой системы, являются одним из возмущений природного характера, приводящих к крупным авариям. Увеличение стоимости ущерба при блэкаутах, вызванных ГМБ, усугублено ошибкой персонала вследствие отсутствия

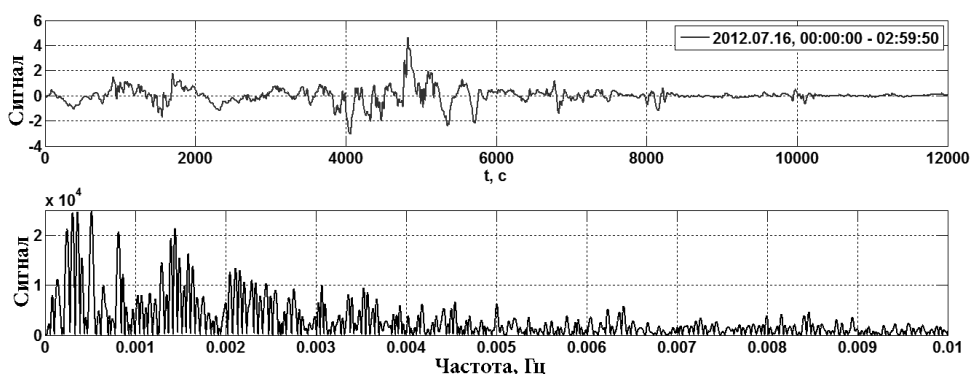


Рисунок 2. Число людей (в миллионах человек), пострадавших от недоотпуска электроэнергии

разработанных и внедренных методик. К отличительным чертам ГМБ можно отнести следующие характеристики. ГМБ оказывают воздействие на ЭЭС на больших расстояниях, меняя параметры геомагнитного поля Земли на больших площадях (сотни километров), что приводит к одновременному отключению нескольких сетевых элементов. ГМБ не могут быть визуализированы без применения специальных технических средств. Непосредственным сигналом о начале ГМБ являются показания датчиков геомагнитных обсерваторий. Превентивным сигналом являются данные о параметрах солнечного ветра, зарегистрированные спутниками, расположенными в первой точке либрации (L1). Частота возникновения ГМБ зависит от периода солнечного цикла. В районе солнечного максимума может следовать ряд бурь раз в несколько дней силой $K_p=5$. Супер ГМБ силой $K_p=9$ возникают несколько раз за солнечный цикл. Временной промежуток между моментом изменения геомагнитного поля и началом развития системной аварии недостаточен для применения осмысленных управляющих воздействий диспетчерами ЭЭС. Частота ГИТ мала по сравнению с номинальной частотой ЭЭС

(50 Гц), что позволяет рассматривать их как квазипостоянные токи. Автором выполнен анализ гармонического состава ГИТ, зарегистрированных в ЭЭС Кольского полуострова, на ПС 330 кВ Кондопога, ПС 330 кВ Лоухи и ПС 330 кВ Выходной. Было использовано оконное преобразование Фурье, а именно окно Кайзера. Значение константы β принято равным 20. Частота ГИТ соответствует 10^4 Гц. На рис. 3 показан оригинал сигнала и гармонический спектр тока. Главное отличие ГИТ от постоянной составляющей тока короткого замыкания заключается в длительности протекания. ГМБ могут продолжаться в интервале от нескольких минут до нескольких дней с постоянно изменяющейся амплитудой. Обычно умеренные ГИТ (единицы Ампер) протекают от нескольких минут до нескольких часов. Всплески ГИТ большой амплитуды (десятки Ампер) регистрируются на промежутках в несколько минут во время периодов протекания умеренных токов.

ГМБ могут приводить как к системной аварии, связанной с повреждением высоковольтного оборудования, так и к системной аварии без потери высоковольтного



оборудования. Третьим сценарием является потеря силового оборудования, не связанная по времени с системной аварией. Автор показал, что исследование устойчивости ЭЭС к негативным электромагнитным эффектам ГМБ возможно только при комплексном анализе совокупности факторов природного и техногенного характера, что и выполнено в последующих главах.

Вторая глава посвящена составлению и обоснованию алгоритма численных исследований электромагнитных эффектов ГМБ на элементы ЭЭС. Алгоритм состоит из трёх этапов: геофизического, электротехнического и системного. На первом этапе, геофизическом, производится расчет геофизического поля, вызванного ГМБ, с заданными характеристиками на заданной географии. Второй этап, электротехнический, посвящен расчету ГИТ, индуцированных геоэлектрическим полем в заданной системе проводников. В рамках третьего этапа, системного, оценивается влияние негативных электромагнитных эффектов ГИТ на режим и оборудование ЭЭС.

Фактически вариации геомагнитного поля, измеряемые наземными магнитометрами, являются суммой магнитного поля магнитосферно-ионосферной токовой системы и магнитного поля теллурических токов, индуцированных в поверхностных слоях Земли. Большинство ГМБ можно характеризовать как региональное явление,

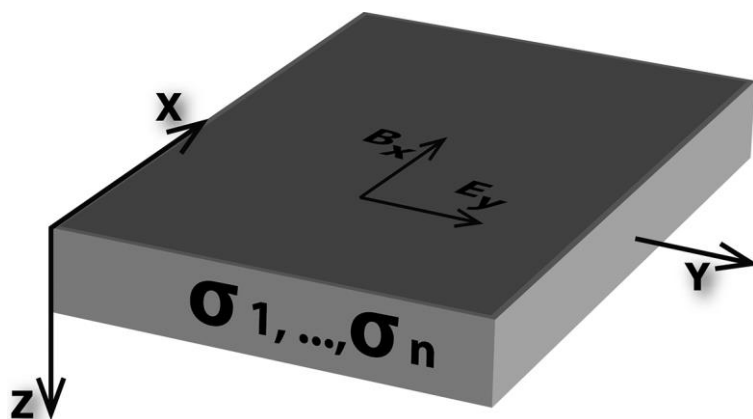


Рисунок 4. Геометрическая модель задачи расчета геоэлектрического поля

что позволяет принять допущение о плоскости Земли. Принят случай вертикального распространения

магнитного поля в декартовой системе координат, где ось **X** направлена на север, **Y** – на восток и **Z** – к центру Земли. Решение задачи по расчету геоэлектрического поля производится на основе метода комплексных изображений. Для адекватного моделирования проникновения электромагнитной волны ультранизкой частоты в работе выбрана блочная 1-D модель проводимости, учитывающая изменение проводимости в вертикальном измерении. Эквивалентная глубина проникновения электромагнитной волны определяется как $\delta_e = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu_0\sigma}}$.

Геометрическая модель задачи показана на рис. 4. Метод расчета ГИТ в сетевых элементах основан на законах электрических цепей. Важным отличием схемы электрической цепи для расчета ГИТ является привязка узлов цепи к географическим координатам с целью учета величины геоэлектрического поля, зависящего от геомагнитной широты и проводимости подстилающей породы.

Анализ вторичных эффектов ГМБ основан на оценке электромагнитных и тепловых нагрузок на оборудование ЭЭС и на оценке влияния внешпатной работы оборудования на режим ЭЭС. Производится сравнение набора **M'** величин с допустимым набором **M** параметров, определяемых нормативными стандартами. Выведенная в данной главе методика используется в следующих главах.

В третьей главе осуществлен анализ воздействий ГМБ на режим и оборудование ЭЭС по критериям недопустимых электромагнитных и термических воздействий. Проектирование оборудования выполняется с учётом нормированного уровня надежности, определяющего объем затрат на проектирование и производство с учетом издержек от недоопуска электроэнергии в случае потери оборудования при аварийных воздействиях, имеющих низкую вероятность (раз в десятки лет). Нормативный срок службы основного силового оборудования в России равен 25 годам. ГМБ не учитываются в действующих нормах проектирования и эксплуатации. Как правило, ГИТ не являются самостоятельным фактором, способным вызвать заметные нарушения. Основная опасность заключается в том, что под воздействием ГИТ изменяются характеристики оборудования, содержащего ферромагнитные элементы, что приводит к количественному и качественному изменению режима.

Наиболее уязвимы к воздействиям ГИТ силовые трансформаторы. Устойчивость силовых трансформаторов к ГМБ определяется схемой магнитной цепи, схемой соединения обмоток и изоляцией трансформаторов. Наибольшей уязвимостью обладают однофазные стержневые трансформаторы. Пути протекания потоков нулевой и прямой последовательности совпадают. Магнитный поток полностью замыкается в сердечнике по пути основного магнитного потока. Трёхфазные трёхстержневые трансформаторы характеризуются наибольшей устойчивостью. Постоянные магнитные потоки, индуцируемые ГИТ, компенсируют друг друга в стержнях и прилегающих ярмах, что соответствует разным путям протекания потоков прямой и нулевой последовательности. Поток нулевой последовательности замыкается через воздушный зазор, имеющий высокое магнитное сопротивление. Трёхфазный пятистержневой трансформатор занимает промежуточное положение. Хотя токи трёх фаз компенсируются в основных стержнях и прилегающих ярмах, они увеличивают друг друга в обратных стержнях, что приводит к насыщению сердечника. Связь между током возбуждения однофазного стержневого трансформатора и током ГИТ выражается следующим образом $I_B = L_k^{-1} B_m [1 - \cos\alpha] = \frac{\pi(1 - \cos\alpha)}{\sin\alpha - \cos\alpha} I_{\text{ГИТ}}$,

где α – угол насыщения. Анализ схем соединения показал, что соединение одной из обмоток трансформатора в треугольник является эффективной мерой по уменьшению негативных эффектов ГИТ.

ГМБ в виде ГИТ оказывают как непосредственное влияние на синхронные машины (СМ), так и косвенное за счет изменения параметров режима ЭЭС. Прямое воздействие ГИТ на СМ мало. Значение магнитной индукции от ГИТ, равному 210 А, составляет 7,4 мТл. в сравнении с рабочим значением ~1 Тл. С другой стороны, нелинейное искажение гармонического состава переменного тока приводит к уменьшению

допустимой мощности СМ. Оценка дополнительных потерь $P_{\text{доп}} = \sqrt{\frac{K_{F1}}{\sum Q_{\text{осн},n} + \sum Q_{\text{осн},n}^*}}$ для турбогенераторов моделей ТВВ-500 дает значения 1341 кВт. Поэтому при насыщении однофазного стержневого трансформатора мощность СМ следует ограничить на 50% , исходя из потерь в обмотке статора и её перегрева. В случае однополупериодного насыщения трёхфазного пятистержневого трансформатора допустимую мощность СМ следует ограничить на 25%.

Уязвимость измерительных трансформаторов определяется их функциональным назначением, что предопределяет выбор материала сердечника магнитопровода. Анализ кривых намагничивания используемых сплавов показал, что насыщение трансформатора тока, используемого для коммерческого учета электроэнергии, наступает при величине фазного ГИТ 10 А. Насыщение измерительных трансформаторов может привести к нештатной работе максимальной токовой защиты, дистанционной и дифференциальной токовых защит.

Меньшее воздействие ГМБ в виде ГИТ оказывают на прочее оборудование ЭЭС. В Табл. 1 приведена сводная характеристика устойчивости оборудования ЭЭС к первичным и вторичным эффектам ГМБ. Под системным эффектом понимается кумулятивный эффект на режим ЭЭС от потери более, чем $N-1$ элемента одного типа. Параметр «стоимость» учитывает стоимость ремонта/замены поврежденного оборудования.

Таблица 1. Устойчивость оборудования энергосистемы к эффектам геомагнитных бурь

Наименование оборудования	Устойчивость к ГМБ	Системный эффект	Стоимость
Силовой тр-р	Низкая	Большой	Высокая
Измерительн. тр-р	Низкая	Большой	Низкая
СМ	Средняя	Большой	Высокая
Шунтир. реактор	Высокая	Большой	Высокая
Выключатель	Высокая	Средний	Средняя
Батарея конд.	Высокая	Большой	Высокая
Вставка пост.тока	Высокая	Большой	Высокая
ЛЭП	Высокая	Большой	Средняя

Возбуждение силовых трансформаторов во время ГМБ приводит к росту дефицита реактивной мощности в сети и ненормированному распределению высших гармоник. Оба этих аспекта следует учитывать при расчете режима ЭЭС при появлении ГМБ. Связь между ГИТ и реактивной мощностью, потребляемой силовым трансформатором определяется соотношением $Q_{\text{ГИТ}} = U_{\text{НОМ}} K I_{\text{ГИТ}}$, где K – коэффициент пропорциональности, зависящий от конструктивных параметров и магнитных свойств трансформатора. С учетом наличия высших гармоник выражение преобразуется в $Q_{\text{ГИТ}} = U_{\text{НОМ}} K (\sum_{i=1}^n I_i^2)^{1/2}$.

Выполненный анализ эффективности алгоритмов управления ЭЭС при появлении ГМБ показал, что алгоритмы управления, используемые в ЕЭС России, являются более гибкими по сравнению с алгоритмами управления, применяемыми в Объединенной энергосистеме Европы (ENTSO-E). Автор рекомендует введения в практику ENTSO-E управляющего воздействия деление сети, обеспечивающего выделение электростанции на сбалансированную нагрузку, что позволяет локализовать лавину напряжения и снизить экономический ущерб от недоотпуска электроэнергии. Результаты третьей главы использованы в разделе четвертой главы при анализе параметров оборудования ЭЭС как фактора, определяющего устойчивость ЭЭС к ГМБ.

В четвертой главе выполнен анализ критических факторов различной природы, определяющих ЭЭС к ГМБ и выполнено их ранжирование по степени влияния. По результатам анализа разработан качественно новый алгоритм поиска «узких мест» в ЭЭС к электромагнитным эффектам полей ультранизкой частоты и исполнена апробация алгоритма на актуальной схеме ЕЭС России.



В работе автор предлагает исследовать устойчивость ЭЭС к негативным электромагнитным эффектам при комплексном анализе совокупности факторов разной природы. Критические факторы удобно разделить на 4 группы: параметры ГМБ, параметры ЭЭС, параметры оборудования и информированность (рис. 5).

Каждая ГМБ носит индивидуальный характер. Современное состояние прикладной гелиофизики не позволяет дать точные морфологические характеристики разным видам ГМБ. Дополнительной сложностью является отсутствие корреляции между

Рисунок 5. Группы факторов, определяющих устойчивость энергосистемы к геомагнитным бурям

данными измерений в текущем и предыдущих солнечных циклах. Считается, что сильные ГМБ вызваны западными электроджетами. Проводимость подстилающей породы в зоне развития ионосферных токов влияет на распределение геоэлектрического поля. Технологические системы, расположенные в высоких геомагнитных широтах, подвергаются воздействию ГМБ чаще, но при высоком уровне геомагнитной активности центр электроджета смещается в более низкие широты. В настоящее время северный магнитный полюс находится в Канаде, вблизи полярного круга, но при сохранении существующего тренда к 2050 году северный магнитный полюс будет располагаться около архипелага Северная Земля, что увеличивает уязвимость ЕЭС России к ГМБ.

К параметрам электрической цепи, определяющим устойчивость ЭЭС к ГМБ следует отнести: длину системообразующих связей, их класс напряжения и географическое расположение. Характер их влияния рассмотрен на примере тестовой схемы ЭЭС Скандинавии (рис. 8). Расчетная модель была составлена автором на базе модели ENTSO-E 2014 года и имеет реалистичное число узлов. В модели учтены все системообразующие связи ВЛ 400 кВ, заполярный транзит 150-220 кВ и все электростанции. При отсутствии точной информации координаты узлов даны с погрешностью ± 20 км, трассы ВЛ являются прямыми. Подстанции, располагающиеся в радиусе 20 км рассматривались как обобщенные узлы. Анализ результатов расчета ГИТ показал, что распределение ГИТ в большей степени определяется топологией сети, чем геомагнитной широтой. Наибольшие величины ГИТ получены в узлах, имеющих большое число связей, к которым присоединены длинные линии ($l > 100$ км), а именно в узле №46 – ГЭС Midskog и узле №47 ПС 400 кВ Hallsberg. Другими словами, чем выше концентрация протяженных ВЛ в ЭЭС, тем выше уязвимость ЭЭС к ГМБ. Также было показано, что выбор расчетной модели должен учитывать топологию соседних ЭЭС с целью адекватного моделирования граничных условий.

Таблица 2. Эффективность схемы сети центрального энергорайона ЭЭС Якутии

Схема	ЗМН	ЛМН
Нормальная схема	0.20245	0.19362
Потеря 2о узла	0.16496	0.18370
Потеря 3о узла	0.162016	0.15869
Потеря 6о узла	0.162037	0.149867

Схема соединения электрической цепи напрямую определяется её режимом работы. В работе приведена сравнительная характеристика режимов зимнего максимума (ЗМН) и летнего минимума нагрузки (ЛМН) Центрального энергорайона ЭЭС Якутии. Графы схем показаны на рис. 6, 7 соответственно. Анализ выполнен с

применением методов анализа сложных систем (теории графов). Эффективность сети оценена в соответствии с выражением $E = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j} \frac{1}{d_{ij}}$. Принято допущение о одновременной потере двух единиц трансформаторного оборудования на ключевых межсистемных подстанциях: узлы 1,3 и 6. Результаты представлены в Табл. 2.

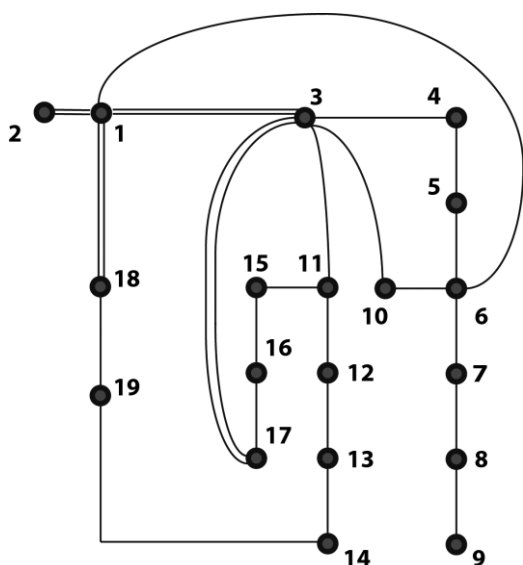


Рисунок 6. Граф схемы центрального энергорайона ЭЭС Якутии в режиме ЗМН в 2014 году

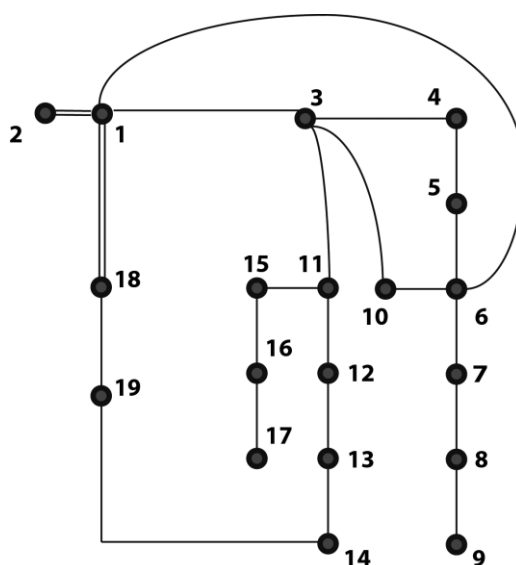


Рисунок 7. Граф схемы центрального энергорайона ЭЭС Якутии в режиме ЛМН в 2014 году

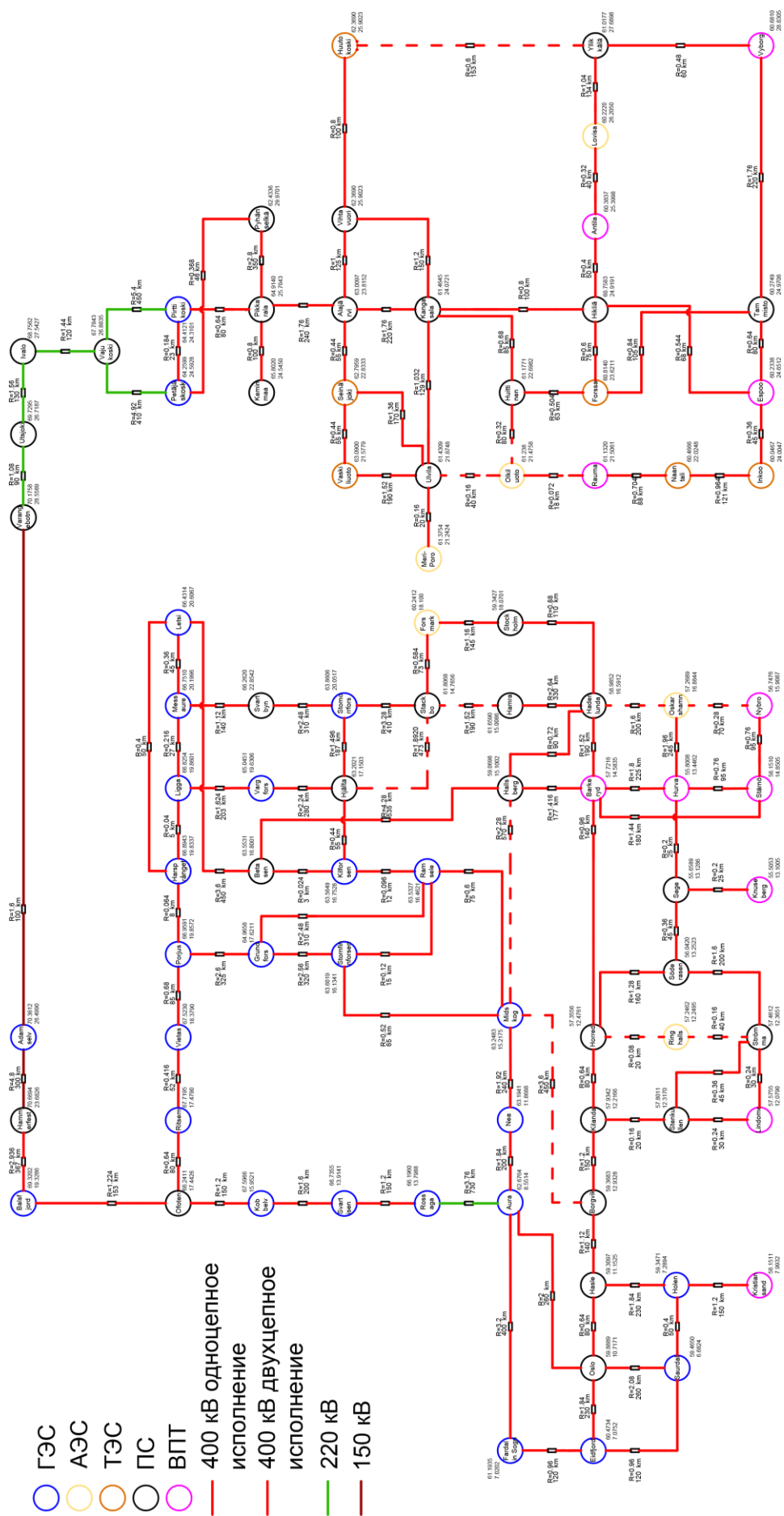


Рисунок 8. Эквивалентная схема ЭЭС Скандинавии

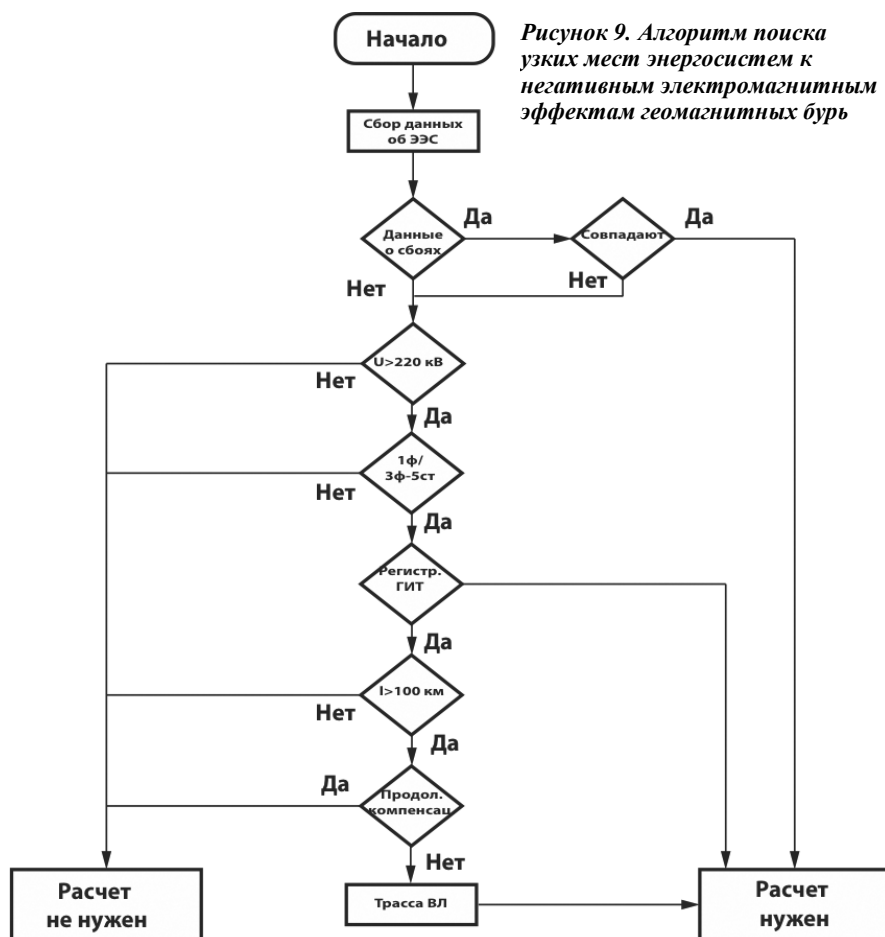
В режиме ЛМН в эксплуатации находятся системообразующие линии в связи со сниженными перепадами мощности. Таким образом, потеря трансформаторного оборудования на подстанции приводит к большому ослаблению сети. Например, при потере оборудования на ПС 220 кВ Сунтар (узел б) эффективность сети снижается с 0.19362 до 0.149867, а величина уязвимости электрической цепи $V_E(l) = \frac{E-E_l}{E}$ равна 0.225. Величина уязвимости при аналогичном возмущении в схеме зимнего максимума нагрузки составляет 0.199. Другими словами, ГМБ в период летнего минимума нагрузки приводит к большим прямым и отложенным потерям от недоотпуска электроэнергии. Ремонт силового трансформатора не может быть произведен на месте. Согласно референтным данным ведущих мировых страховых компаний, суммарная длительность производства новой трансформаторной единицы с учетом транспортировки составляет 18 месяцев, а стоимость 10-12 млн. долларов США.

Применение токоограничивающих реакторов в нейтральных силовых трансформаторах является мерой по повышению устойчивости ЭЭС к ГМБ. Тем не менее, анализ показал, что выбор мест установки их должен выполняться с учетом анализа N характерных режимов ЭЭС и M характерных сценариев ГМБ. Поиск оптимального расположения выполняется с помощью аналитических зависимостей параметров режима (y) от параметров управления (x).

Информированность практики ЭЭС о процессах солнечно-земной физики включает в себя два аспекта: информированность как общественная осведомленность и информированность как прогнозирование изменения магнитосферно-ионосферной токовой системы. По данным о состоянии космической погоды, предоставляемой центрами прогнозирования, можно рассчитать планируемый режим ЭЭС по алгоритмам, описанным в данной диссертации. В настоящее время информация о надвигающихся магнитосферно-ионосферных возмущениях может быть получена за 40-60 минут до их возникновения на Земле. Этот факт предопределяет актуальность разработки методики заблаговременного определения «узких мест» в ЭЭС к воздействиям ГМБ с целью разработки комплекса мер по уменьшению негативных эффектов ГМБ.

Разработанный алгоритм поиска «узких мест» представлен на рис. 9. Преимуществом предложенного метода

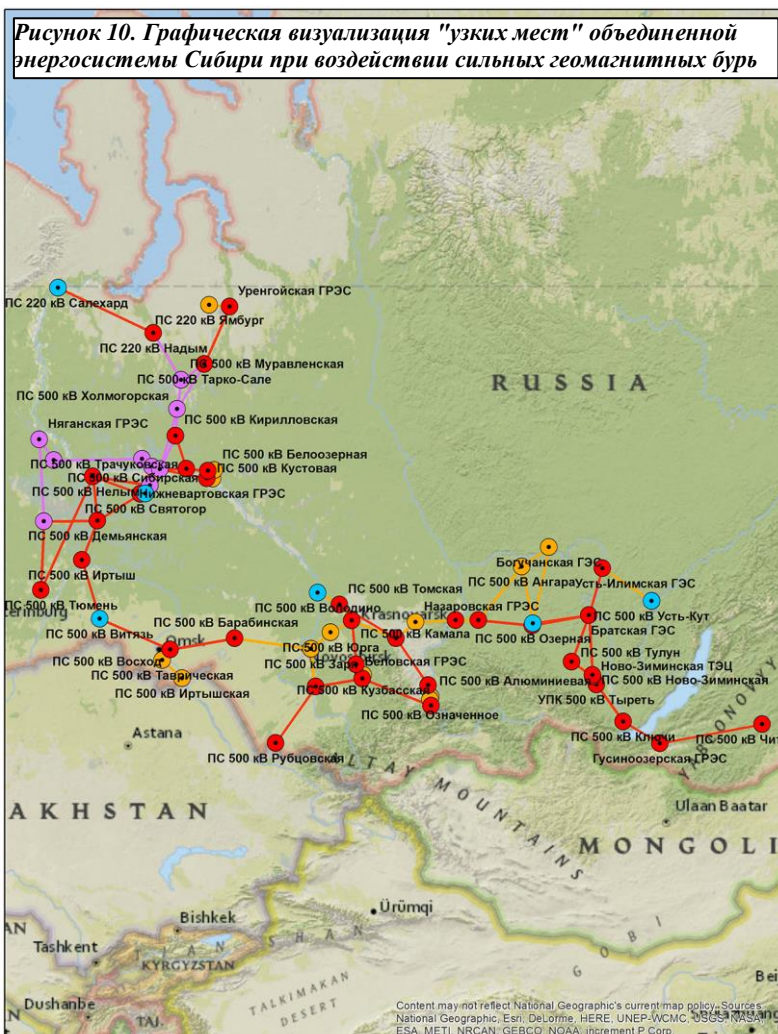
представлен на рис. 9. Преимуществом предложенного метода



над классическими методами анализа режима ЭЭС на базе параметров режима является учет факторов различной природы. В данном случае по факту определения уязвимых районов может быть выполнен расчет режима ЭЭС классическими методами для заданного распределения ГИТ.

С целью определения энергорайона в ЭЭС России, в котором влияние ГМБ значительно, автор сравнил параметры 6 объединенных ЭЭС, образующих ЭЭС России. Параметры для сравнения выбраны в соответствии с приведенными выше критическими факторами, а именно: состав и степень износа оборудования, класс напряжения и протяженность линий, архитектура сети и режимы работы, географическое расположение систем, проводимость подстилающей породы, трасса линии, данные о сбоях в функционировании технических систем по неопределенной причине. По результатам анализа объединенная энергосистема Сибири была характеризуема как ЭЭС, в которой влияние ГМБ значительно.

Графическая визуализация выполнена в географической информационной системе ArcGIS Map. Создание подобных моделей позволяет снизить затраты на проектирование и эксплуатацию устойчивой к ГМБ ЭЭС за счет рассмотрения энергорайона не только с позиции обеспечения устойчивости режима, но и с позиции изменения состояния экономических показателей узлов нагрузки и генерации, физических параметров трассы ВЛ, узлов нагрузки и генерации. В рассматриваемой задаче учтены такие слои, как физическая карта рассматриваемого региона, схема соединений энергорайона, расположение и параметры узлов нагрузки, рас-



положение и параметры узлов генерации, карта проводимости подстилающей породы. Результат визуализации представлен на рис. 10. Градация цвета от красного до оранжевого соответствует уменьшению риска негативного воздействия ГМБ на оборудование узлов. Голубым цветом отмечены проектируемые узлы. Узлы с оборудованием, введенным в эксплуатацию в течение последних 5 лет, или реконструированные узлы выделены розовым цветом.

По результатам анализа предложен комплекс мер и рекомендаций по снижению уровня системных аварий, вызванных ГМБ, которые целесообразно разделить на три группы в соответствии с предлагаемыми автором пропорциями «риск-инвестиции». К первой группе - «Предупреждение» относятся меры,

включающие выбор конструкции, монтажной схемы и технологии изготовления элементов сети и выбор архитектуры сети, при которой достигается максимальная устойчивость ЭЭС в целом и оборудования в частности к электромагнитным эффектам ГМБ. Внедрение этих мер сводит риск ГМБ к минимально возможному, но требует максимальный уровень инвестиций. Важно отметить, что существует точка насыщения, при достижении которой увеличение уровня инвестиций не уменьшает риск. Ко второй группе – «Принятие» относятся пассивные и активные технические решения, связанные с внедрением специальных изменений в традиционных принципиальных схемах отдельных узлов сети. В третью группу - «Ликвидация», требующую минимальный уровень инвестиций, но сохраняющую высокий риск негативного воздействия ГМБ на режим ЭС, входят меры, направленные на адаптацию алгоритмов управления функциональных узлов и электрооборудования для уменьшения негативных электромагнитных эффектов ГМБ.

В пятой главе приводится анализ аварии, вызванной ГМБ, как межинфраструктурной и разрабатывается комплекс мер и рекомендаций по межорганизационному взаимодействию для уменьшения негативного влияния ГМБ.

Современные инфраструктуры характеризуются сильными межсистемными связями. Автором выполнен анализ последствий двух крупнейших энергоаварий в ЭЭС России за последние 10 лет: авария на ПС 500 кВ Чагино 25.05.2005г. и ПС 330 кВ Восточная 20.08.2009г. На базе Стратегии Национальной безопасности, Указа об утверждении приоритетных направлений развития науки, техники и технологии в Российской Федерации и перечня критических технологий автором разработан перечень критических инфраструктур России. Также автор приводит своё определение: критическая инфраструктура – набор взаимодействующих элементов, поддерживающих национальную экономику и общественную безопасность, частичная или полная деградация которых способна повлиять на состояние национальной безопасности, привести к чрезвычайным ситуациям определенного уровня и масштаба. В соответствии с отраслевыми нормативными стандартами разработана модель межинфраструктурной аварии, вызванной потерей электроснабжения вследствие

ГМБ при отключении более чем *N-1* элемента (рис. 11). Рассмотр-

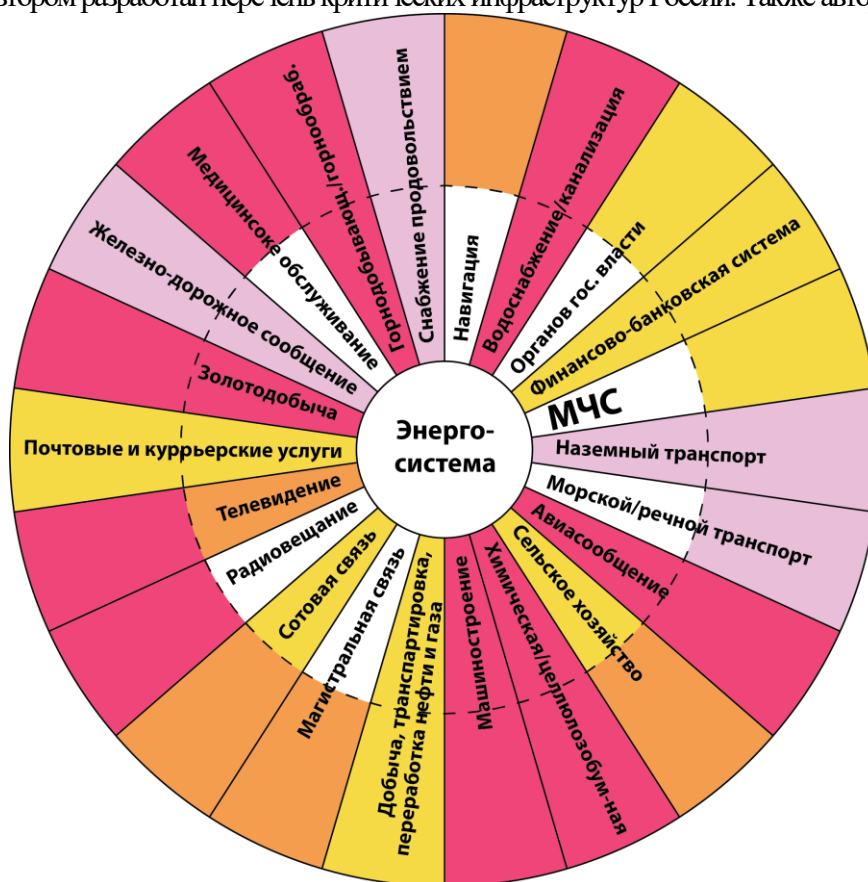


Рисунок 11. Характер и степень косвенного воздействия геомагнитных бурь на критические инфраструктуры

но мгновенное состояние инфраструктур и спустя 24 часа после аварии. Малиновый цвет соответствует повсеместному отказу, розовый – локализованному отказу, оранжевый – повсеместной деградации функций, желтый – локальной деградации.

Тяжесть энергоаварии, вызванной электромагнитными полями ультранизкой частоты, определена в первую очередь низкой информированностью общества и практики ЭЭС. В существующих правовых нормах отсутствуют требования по учету эффектов ГМБ при планировании и диспетчеризации режимов ЭЭС. Тем не менее, ГМБ могут приводить к авариям, прямой и косвенный ущерб от которых соизмерим с ущербом от прочих природных катастроф, учет которых предусмотрен существующими нормами. В главе определены меры межорганизационного взаимодействия с учетом эффектов на взаимосвязанные критические инфраструктуры. Специфическим свойством данных мер является их равноправная координация между пятью участниками рынка как в горизонтальном, так и в вертикальном направлениях: практика ЭЭС, промышленность, потребители, нормативные акты и центры космической погоды.

Силовые трансформаторы являются ключевым элементом, обеспечивающим качественное и надежное электроснабжение. Особенно жесткие требования предъявляются к надежности повышающим и межсистемным трансформаторам большой мощности. Таким образом, меры защиты протяженных электротехнических систем от негативных эффектов ГМБ должны быть направлены в первую очередь на защиту парка трансформаторов с учетом эффектов на взаимосвязанные критические инфраструктуры.

Алгоритмы планирования и управления ЭЭС во время ГМБ различной интенсивности должны быть прописаны в руководствах по эксплуатации электротехнических систем. Дополнительно требуется организация и проведение испытаний электрооборудования на устойчивость к воздействиям ГИТ. На базе результатов испытаний составляются руководства по эксплуатации агрегатов ЭЭС во время ГМБ разной интенсивности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе исследованы негативные электромагнитные эффекты ГМБ на режим и оборудование ЭЭС, по результатам которых разработаны мероприятия по предотвращению системных аварий от ГМБ. ГМБ, обусловленные изменением магнитосферно-ионосферной токовой системы, оказывают воздействие на протяженные электротехнические системы путем создания кондуктивной помехи ультранизкой частоты. В работе рассмотрены три сценария воздействий: ГМБ, приводящие к системным авариям и повреждению высоковольтного оборудования ЭЭС (Hydro Quebec blackout, 1989 г.); ГМБ, приводящие к системным авариям, но не приводящие к повреждению высоковольтного оборудования ЭЭС (Halloween storm, 2003 г.); ГМБ, не приводящие к системным авариям, но приводящие к повреждению высоковольтного оборудования ЭЭС (деградация силового трансформатора в ЮАР, 2003-2004 г.).

Анализ и обобщение разрозненных сведений о сбоях в работе ЭЭС показал, что имеет место расширение карты зон риска негативного воздействия ГМБ на ЭЭС. Эта тенденция обусловлена: развитием ЭЭС (усложнением архитектуры, применением нового оборудования, адаптацией принципов управления к условиям либерального рынка); совершенствованием теоретической базы о физических процессах на поверхности Солнца

и в магнитосфере-ионосфере; повышением общественной осведомленности о влиянии ГМБ на токопроводящие системы.

Автором определена совокупность критических факторов различной природы, определяющих устойчивость ЭЭС к воздействиям ГМБ. Факторы целесообразно разделить на четыре группы: параметры ГМБ, параметры ЭЭС, параметры оборудования, информированность. По результатам комплексной оценки критических факторов выполнено их ранжирование. Показано, что факторы техногенной природы (параметры ЭЭС и параметры оборудования) имеют доминирующее значение при оценке уязвимости ЭЭС.

На основании данных анализа предложен качественно новый метод анализа устойчивости ЭЭС к ГМБ. Метод позволяет выполнить поиск «узких мест» в ЭЭС с позиции трёх возможных сценариев воздействия ГМБ на ЭЭС. Метод был апробирован на актуальной схеме ЕЭС России. Были выявлены географические области, в которых влияние ГМБ значительно, и выполнена графическая визуализация рисков в ОЭС Сибири.

По результатам проведенных исследований разработан комплекс мер и рекомендаций по уменьшению негативных эффектов ГМБ. Комплекс мер направлен на решение трёх уровней проблемы, обусловленной ГМБ:

- внешний – меры, связанные с коррекцией архитектуры ЭЭС и заменой силового оборудования ЭЭС на модели, обладающие большей устойчивостью к ГМБ,
- внутренний – меры, направленные на повышение общественной осведомленности,
- эксплуатационный – рекомендации по адаптации алгоритмов управления с нормированными методами контроля режима ЭЭС.

Отличительной особенностью предложенных мер и рекомендаций является межорганизационный характер их применения. В работе предложены методы коммуникационных взаимодействий между организациями, работающими в разных предметных технических областях при решении проблем ГМБ. Результаты выполненного исследования являются хорошей базой для практики при планировании, расчете и диспетчеризации ЭЭС во время мировых ГМБ.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи, опубликованные в изданиях, рекомендованных в перечне ВАК РФ:

1. Методика оптимизации управляющих воздействий в послеаварийных режимах энергосистемы мегаполиса / Волков А.И., Коровкин Н.В., Соколова О.Н., Сорокин Е.В., Фролов О.В. // *Электрические станции : ежемесячный производственно-технический журнал* / Министерство промышленности и энергетики РФ [и др.] .— М., 2010 .— №11 .— С. 33-36.
2. *Method for Optimizing Control Actions Following Emergencies in Large-city Electric Power Systems* / Oleg V. Frolov, [et. all.] // *Power Technology and Engineering*. — Springer. — 2011. – Vol. 45 No. 1 — pp. 50-52
3. Соколова. О.Н. Сравнение эффективности методов управления в энергосистемах России и Европы при геомагнитных бурях / О.Н. Соколова // *Научно-технические ведомости Санкт-*

Публикации в других изданиях:

4. Соколова О.Н. Оптимизация управления режимом энергосистемы по критериям качества и надежности электроснабжения. // Сборник научных трудов 1-й Международной научно-практической конференции «Научные и технические средства обеспечения энергосбережения и энергоэффективности в экономике РФ». — СПб.: Изд-во Политехн. Ун-та, 2011. С. 15-22
5. Principles of the Control Action Optimization for the Emergency Control System [Электронный ресурс] / Oleg V. Frolov [et. all.] // 3^d International Scientific and Technical Conference «Actual in Development of Power System Protection and Automation» 30.05 – 03.06.2011. — St.-Petersburg, 2011. — электрон. опт. диск (CD-ROM).
6. Sokolova O. N., Korovkin N.V. Optimization Principles of the Control Actions in the Postemergency State of the Power System [Электронный ресурс] / Olga Sokolova, Nikolay Korovkin, // SDPS 2012, 10-14.06.2012. – Berlin, Germany, 2012— электрон. опт. диск (CD-ROM).
7. Sokolova O.N. The comparison of Principles of Security Ensuring in ENTSOE and UPS of Russia [Электронный ресурс] / Olga Sokolova, Nikolay Korovkin, Rachid Cherkaoui // IEEE 7th International Workshop on Deregulated Electricity Market Issues in South-Eastern Europe. 20-21.09.2012. – Bucharest, Romania, 2012— электрон. опт. диск (CD-ROM).
8. O. Sokolova, P. Burgherr, W. Collenberg, “Solar Storm Impact on Critical Infrastructure”, Safety and Reliability: methods and applications, CRS Press, 2014, pp. 1515-1521.
9. O. Sokolova, P. Burgherr, W. Collenberg, A. Schwerzmann, The Impact of Solar Storms on Power Systems, Swiss Re, 2014, 28p.
10. O. Sokolova. An analytical method for evaluation of solar impact on power system operation [Электронный ресурс] / Olga Sokolova, N. Korovkin, V. Popov // 12th European Space Weather Week. 23-27.11.2015. – Ostende, Belgium, 2015— электрон. опт. диск (CD-ROM).
11. O.Sokolova. Assessing the impact of space weather on the large-scale power grid [Электронный ресурс] // 2015 Annual conference SCCER-FURIES Shaping the Future Swiss Electrical Infrastructure. November 25th 2015. – Lausanne, Switzerland, 2015— электрон. опт. диск (CD-ROM).
12. O. Sokolova, N. Korovkin. Power grid sustainability to solar storm effects as a function of state parameters [Электронный ресурс] // IEEE Workshop on Complexity in Engineering COMPENG 2016. July 4th-7th 2016. – Catania Italy, 2016— электрон. опт. диск (CD-ROM).