

УДК 621.311

**АЛГОРИТМ АНАЛИЗА УСТОЙЧИВОСТИ ЭНЕРГОСИСТЕМ  
К ГЕОМАГНИТНЫМ БУРЯМ**© 2019 г. О. Н. Соколова<sup>1</sup>, Я. А. Сахаров<sup>2</sup>, С. С. Грицутенко<sup>3</sup>, Н. В. Коровкин<sup>1</sup>, \*<sup>1</sup>*Институт энергетики и транспортных систем Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия*<sup>2</sup>*Федеральное государственное бюджетное научное учреждение “Полярный геофизический институт”, Мурманск, Россия*<sup>3</sup>*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования “Омский государственный университет путей сообщения”, Омск, Россия**\*e-mail: nikolay.korovkin@gmail.com*

Поступила в редакцию 09.09.2019 г.

После доработки 22.10.2019 г.

Принята к публикации 23.10.2019 г.

Геомагнитные бури суть природные катастрофы, характеризующиеся низкой вероятностью, но большим прямым и косвенным ущербом. В отличие от других типов природных катастроф индустрия имеет малый опыт подготовки и оперирования электроэнергетических систем при появлении геомагнитных бурь, а также ликвидации их последствий. На протяжении долго времени данная проблема решалась исключительно специалистами в области геофизики. Использование традиционного метода оценки устойчивости энергосистем к геомагнитным бурям затруднено в связи с отсутствием необходимой информации в открытом доступе и необходимостью наличия специальных знаний. В статье показано, что анализ устойчивости энергосистем к геомагнитным бурям является многокритериальной задачей. На базе анализа критических факторов разной природы получен алгоритм оценки устойчивости, который может быть использован специалистами широкого профиля. Немаловажно, что исходные данные могут быть найдены в открытых источниках. Алгоритм был апробирован на актуальной схеме ЕЭС России и были выявлены географические области, в которых влияние геомагнитных бурь значительно. Показано, что даже страны с относительно низким риском появления геомагнитных бурь выигрывают от применения глобальной превентивной стратегии по ликвидации последствий.

*Ключевые слова:* геомагнитная буря, космическая погода, критические факторы, надежность, оценка риска, предотвращение, устойчивость, энергосистема

DOI: 10.1134/S0002331019050145

**ВВЕДЕНИЕ**

В то время как общество и технологические системы регулярно подвергаются негативному влиянию природных катастроф земного происхождения, учет космической погоды как еще одного вида природных катастроф ставит новые вопросы перед операторами электроэнергетических систем (ЭЭС). Согласно [1], природное явление характеризуется как катастрофа, если оно приводит к экономическим потерям более 99 млн долл. США, 20 погибшим или пропавшим без вести, 40 раненым, 2000 оставшимся без крова. Например, ураган Мэтью (Hurricane Mathew) в 2016 г. привел к экономическим потерям в размере 12.6 млрд долл. США, 734 пострадавшим, оставил 150 тыс. человек без крова

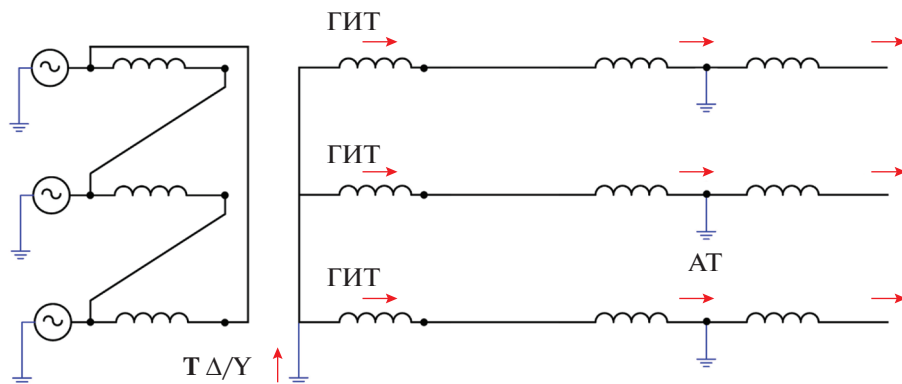


Рис. 1. Пути протекания ГИТ в контурах ЭЭС при установке группы однофазных трансформаторов.

и 1 млн потребителей без электроснабжения. Сильные геомагнитные бури (ГМБ) могут привести к сопоставимым потерям. Наиболее сильной описанной ГМБ с точки зрения амплитуды является “Событие Каррингтона” 1859 года [2]. Большинство современных технологических систем, которые мы предполагаем уязвимыми к воздействиям ГМБ еще не были изобретены в середине XIX века. ГМБ оказала воздействие только на работу телеграфных систем, приведя к их повсеместному отказу в Европе и Северной Америке. Если мнения о периоде возникновения ГМБ подобной амплитуды разнятся, то эксперты единодушны в том, что повторения ГМБ соизмеримой амплитуды приведет к значительному экономическому ущербу. Electric Power Research Institute, США, и страховая компания Lloyd’s дают предварительную оценку экономического ущерба от такой ГМБ в размере 4% от ВВП страны [3]. В зависимости от сценария ущерб может составлять 1.4–8.1% от ВВП США (18.57 трлн долл. США в 2016 году) [4].

ГМБ 13–14 марта 1989 г. (“Квебекское событие”) была переломным моментом в исследованиях влияния ГМБ на ЭЭС, поменяв статус исследования с фундаментального на фундаментально-прикладное. В США начали выполняться целевые программы, а проблема получила статус критической. Менее интенсивная ГМБ в октябре 2003 г. привела к сбоям в электроснабжении потребителей в Скандинавии, Северной Америке, к потере силового трансформатора в ЮАР и проблемам в работе Октябрьской железной дороги [5–7]. Умеренная ГМБ в ноябре 2004 г. привела к недопустимому нагреву элементов силовых трансформаторов в Китае [8]. Это позволяет сделать вывод, что мероприятия, направленные на повышение экономичности передачи электроэнергии на большие расстояния, понижают устойчивость ЭЭС к ГМБ. Повышение класса напряжения электропередачи приводит к уменьшению сопротивления проводников и, как следствие, уменьшению омических потерь. Дальнейшее строительство линий высокого и сверхвысокого напряжения, а также износ парка сетевого оборудования приводят к экспансии карты зон “высокого риска”, то есть зон, в которых риск негативного воздействия ГМБ на ЭЭС велик.

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 распространяются по любой заземленной системе проводников (рис. 1). 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.

Совершенствование теоретической базы о физических процессах на поверхности Солнца и в магнитосфере-ионосфере позволяет получить более точные прогнозы о времени появления и районах воздействия ГМБ. Тем не менее, достоверная или почти достоверная информация может быть получена за 30–60 мин до возникновения ГМБ на поверхности Земли. Это показывает необходимость превентивной разработки алгоритмов управления ЭЭС во время ГМБ и идентификации зон “высокого риска”. Устойчивость ЭЭС к ГМБ определяется совокупностью критических факторов, которые описаны в втором разделе 7 статьи. Третий раздел статьи посвящен описанию разработанного алгоритма, в четвертом приводится результат его апробации на схеме ЭЭС России.

## 2. КРИТИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ

Идентификация критических факторов, определяющих устойчивость ЭЭС к ГМБ, была целью многих исследований. Обобщенный лист критических факторов приведен в [9], куда входят: геомагнитная широта, топология ЭЭС (длина линии и ее ориентация), сопротивление линии, параметры установленного трансформаторного оборудования. При этом ранжирование критических факторов по степени их влияния на устойчивость ЭЭС к ГМБ не выполнено на настоящий день. Список критических факторов в данной работе расширен и дополнен прочими факторами различной природы. Критические факторы удобно разделить на 4 группы:

- параметры ГМБ (тип ГМБ, проводимость подстилающей породы, вероятность возникновения);
- параметры ЭЭС (топология, класс напряжения, режим работы, географическое расположение);
- параметры оборудования ЭЭС (класс напряжения, тип оборудования, конструктивная схема, изоляционные характеристики);
- информированность (общественная осведомленность, прогнозирование).

На базе такого разделения данных разработан алгоритм оценки устойчивости ЭЭС к негативным электромагнитным эффектам ГМБ.

### *2.1. Параметры геомагнитной бури как критический фактор*

Группа критических факторов “параметры ГМБ” включает факторы, предопределенные природой, то есть факторы, на которые невозможно повлиять, используя технические средства и организационные мероприятия.

Каждая ГМБ носит индивидуальный характер. Современное состояние прикладной геофизики не позволяет дать точные морфологические описания разным ГМБ. Дополнительной сложностью является невозможность корреляции между данными измерений в текущем и предыдущем солнечных циклах. Известно, что сильные и сверхсильные ГМБ индуцируют ГИТ, которые могут приводить к проблемам в оперировании ЭЭС [2]. Уровень воздействия ГИТ на режим ЭЭС может являться базой для классификации ГМБ. По этому принципу выполнена классификация ГМБ в шкале National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA scale) [10]. Характер ГМБ, индуцировавшей ГИТ, зависит от характера временных вариаций и энергетического спектра захваченных в магнитосфере и высыпающихся в атмосфере заряженных частиц. Различают внезапный импульс (sudden impulse), суббури (substorms), пульсации (pulsations), внезапное начало бури (sudden commencement).

Как геомагнитные вариации, так и вариации электрического поля на поверхности Земли вызваны изменениями в магнитосферно-ионосферной токовой системе. Изменение во времени горизонтальной компоненты магнитного поля ( $dH/dt$ ) дает достоверную оценку величины индуцированного электрического поля и ГИТ [11]. Напри-

мер, возмущение геомагнитного поля, приведшее к системной аварии в ЭЭС Квебека в 1989, равнялось  $dH/dt \sim 400$  нТ/мин.

Внезапный импульс и внезапное начало бури, регистрирующиеся до начала ГМБ, могут являться самостоятельными причинами в сбое работы ЭЭС [12]. Изменение магнитного поля во время внезапного начала бури во время Halloween storm в 06:02 UTC 29 октября 2003 г. составило  $dH/dt \sim 100$  нТ/мин в Кируне, Швеция [13]. Изменение магнитного поля, зарегистрированное во время ГМБ 24 января 2012 г. в 15:05 UTC на подстанции Ловозеро (67.97° N, 35.08° E), составило  $dH/dt \sim 180$  нТ/мин, а величина индуцированного ГИТ составила  $\sim 30$  А на подстанции Выходной (68.83° N, 33.08° E) [14].

Считается, что большие амплитуды ГИТ вызваны западными электроджетами во время суббури. ГМБ, сопровождающиеся ГИТ большой амплитуды, приводят к большому спектру проблем в оперировании ЭЭС. ГИТ величиной более 200 А, длящийся на протяжении 1 мин, был зарегистрирован на подстанции 400 кВ Rauma в ЭЭС Финляндии. Наиболее сильный ГИТ, среди данных доступных в открытых источниках на период с 1977 г., был зарегистрирован в апреле 2000 г. и составлял 320 А, длившийся более 10 секунд [15]. Амплитуда ГИТ, равная 60 А, была зарегистрирована 22 сентября 1999 г. при восточном электроджете [16]. В некоторых случаях интенсивность напряженности магнитного поля может достигать 2000–3000 нТ/мин [2]. Всплески ГИТ могут быть вызваны низкочастотными колебаниями после суббури или во время фазы восстановления [17].

ЭЭС, расположенные в высоких геомагнитных широтах, подвергаются воздействию ГМБ чаще, но при высоком уровне геомагнитной активности центр электроджета смещается в более низкие широты [18]. Иначе говоря, ЭЭС, расположенные в средних и низких геомагнитных широтах, могут испытывать большие проблемы в работе, так как подвержены влиянию сильных и сверхсильных ГМБ. В настоящее время северный геомагнитный полюс находится около полярного круга в Канаде, но при сохранении существующего тренда к 2050 году северный магнитный полюс будет располагаться около архипелага Северная Земля [19], что увеличит уязвимость как ЭЭС России, так и ЭЭС Европы к ГМБ.

Распределение электрического поля, индуцированного ГМБ, зависит в том числе от проводимости земной коры в районе развития ионосферных токов. Глубина проникновения электромагнитной волны  $\delta$  зависит от частоты  $f$  (1):

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{2\pi f \gamma \mu_0}},$$

где  $\gamma$  – проводимость подстилающей породы;  $\mu_0$  – магнитная проводимость вакуума.

Предварительная оценка показывает, что глубина проникновения при частоте  $f = 0.01$  Гц составляет  $\delta = 50$  км, а при частоте  $f = 0.0001$  Гц –  $\delta = 500$  км. Постановка и решение идентификационных задач подобного типа, необходимых для определения эквивалентных электромагнитных параметров, приводит к решению жестких (плохообусловленных) математических задач [20, 21]. Здесь отметим также ряд новых идей по экспериментальному определению эквивалентных электромагнитных параметров сетевых элементов [22], которые, однако, пока еще не распространены на низкие частоты.

Еще одним критическим фактором ГМБ является низкая информационная энтропия ГИТ, которая приводит к важным последствиям технического характера. Как отмечалось, скорость изменения ГИТ крайне незначительна. Поэтому, в соответствии с положениями теории информации, количество информации, которое можно получить в единицу времени при регистрации ГИТ мало, что усложняет решение задачи идентификации ГМБ современным контрольно-измерительным оборудованием. Рассмотрим эту проблему подробнее.

ГИТ является классическим случайным процессом, следовательно, он может анализироваться при помощи стандартного математического аппарата теории вероятностей. При этом, данный процесс хорошо предсказуем на временных интервалах порядка нескольких секунд и более. Следовательно, на таких интервалах детерминированная составляющая в этом процессе преобладает, а сам процесс можно считать квазидетерминированным [23]. Однако в задаче идентификации ГМБ интерес представляет случайная составляющая, так как согласно положениям теории информации, информацию переносит именно она, но ее содержание незначительно [22, 24–26]. Данный факт приводит к дилемме: либо затратить достаточное количество времени на идентификацию ГМБ, что может привести к несвоевременной реакции на развивающуюся аварийную ситуацию, либо проводить идентификацию с низкой вероятностью правильного решения, что может привести к повышению рисков экономического характера.

При определении количества информации, получаемой при регистрации ГИТ важными, являются два фактора. Первый фактор – это узкая полоса регистрируемого сигнала. Второй фактор – это соотношение сигнал шум в измерительном канале. Учет эти два фактора позволяет формула, полученная в [26]

$$C = \int_{-\infty}^{\infty} \log_2 (\eta^2(\omega) + 1) d\omega,$$

где  $\eta(\omega)$  – соотношение сигнал/шум в измерительном канале.

Величина  $C$  получила наименование коэффициент вариабельности. Она представляет собой максимальную взаимную энтропию ГИТ и регистрируемого измерителем сигнала. Другими словами, это максимальное количество информации, которое можно получить от ГИТ при идентификации ГМБ. Приведенная формула является точной, однако вычисление входящего в нее несобственного интеграла представляет вычислительные сложности. Поэтому в [26] так же предложена аппроксимация этой формулы, у которой данный недостаток отсутствует, а ошибку аппроксимации можно не учитывать в силу ее малых значений уже при  $N > 1000$ :

$$C = \frac{2\Delta F}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \log_2 \left( \frac{|U(k)|^2}{\gamma} + 1 \right),$$

где  $U(k)$  – дискретное преобразование Фурье отсчетов регистрируемого сигнала;

$\Delta F$  – полоса частот ГИТ;

$N$  – размер окна, на котором выполняется ДПФ регистрируемого сигнала.

Рассмотрим далее более подробно величину  $\eta(\omega)$ . В обычных измерительных системах сигнал значительно превышает уровень шума. Однако ГИТ обладают важной особенностью. Спектр ГИТ находится в той же частотной области, что и тепловые шумы измерительного тракта современного регистрирующего оборудования. Таким образом, величина  $\eta(\omega)$  имеет для всех  $\omega$  малые значения, что приводит к малым значениям коэффициента вариабельности. Следствие этого сигнал, получаемый в результате регистрации ГИТ при идентификации ГМБ, следует считать низкоэнтропийным. По сути, идентификации ГМБ сводится к известной в электротехнике задаче измерения постоянной составляющей, которая в настоящее время не имеет удовлетворительного решения. Причиной этого является резкое увеличение спектральной плотности теплового шума, характерного для любого радиотехнического устройства, при частоте, стремящейся к нулю.

Таким образом, можно резюмировать, что ГИТ представляет собой отдельный класс сигналов. Для их обработки требуется новые методы, позволяющие разделять временные зависимости, имеющие одинаковые спектральные характеристики. Из-за низкого коэффициента вариабельности ГИТ задача идентификации ГМБ выглядит

достаточно сложной, так как ГИТ просто не обеспечивает контрольно-измерительное оборудование необходимым количеством информации для принятия правильного решения с достаточно высокой вероятностью. С точки зрения авторов, для решения данной проблемы, следует проводить исследования сразу в двух направлениях. Во-первых, необходима оптимизация стоимости рисков ложного решения об идентификации ГМБ и стоимости мероприятий по устранению последствий аварии, возникшей по причине пропуска ГМБ регистрирующими устройствами. Во-вторых, оптимизировать измерительные и идентификационные алгоритмы с учетом свойства низкоэнтропийности ГИТ. Данный подход будет раскрыт ниже.

## *2.2. Параметры электроэнергетической системы как критический фактор*

Параметрами ЭЭС, которые определяют ее робастность к ГМБ, являются: класс напряжения, длина линии электропередач, географическое расположение. Характер их влияния рассмотрен на примере тестовой схемы ЭЭС Скандинавии по совокупности следующих причин (рис. 2). Во-первых, ЭЭС Скандинавии находится в высоких широтах, так называемых авроральном и субавроральном районах. Во-вторых, в предыдущие десятилетия были зарегистрированы сбои в работе ЭЭС Скандинавии, вызванные геомагнитной активностью. ЭЭС Скандинавии состоит из трех синхронно работающих ЭЭС Финляндии, Швеции и Норвегии. Параметры ГМБ, влияющие на работу ЭЭС, одинаковые или почти одинаковые, тем не менее сбои в работе были зарегистрированы только в ЭЭС Швеции. Это позволяет сделать вывод о том, что другие факторы также влияют на уязвимость сети к эффектам космической погоды. Модель тестовой схемы составлена на базе модели ENTSOE-2014 [27] и имеет реалистичное число узлов. ЭЭС Скандинавии была фокусом множества исследований [28–30]. Отличительной чертой нашего исследования является то, что рассмотрена только системообразующая сеть 400 кВ, так как ГИТ предпочитают протекать по сетевым элементам с минимальным сопротивлением. Дополнительно учтен заполярный транзит 150–220 кВ, соединяющий ПС 400 кВ Varangebotn (Норвегия) и ГЭС Pirttikoski и Petåjaskoski (Финляндия).

В [31] показано, что достоверное распределение ГИТ может быть получено даже при отсутствии полной информации о ЭЭС. К характерным чертам использованной тестовой модели следует отнести:

- учет всех электростанций;
- географические координаты узлов даны с различной погрешностью в пределах  $\pm 20$  км. Узлы, расположенные на расстоянии 20 км друг от друга, смоделированы как обобщенные узлы;
- трассы линий электропередач приняты прямыми при отсутствии точной информации;
- линии электропередач, в которых установлены устройства продольной компенсации реактивной мощности, смоделированы как разрыв сети;
- все узлы расчетной схема находятся достаточно далеко друг от друга, чтобы исключить их взаимовлияние [32].

Используя метод по расчету ГИТ, описанный в [33] показано, что распределение ГИТ в большей степени зависит от топологии сети, чем от геомагнитной широты. Высокие уровни ГИТ получены в узлах, имеющих большое число связей, к которым присоединены длинные линии электропередачи ( $l > 100$  км), а именно в узлах в южных частях ЭЭС Финляндии и Норвегии и центральной части Швеции. Другими словами, чем выше концентрация протяженных линий 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. В [34] показано, что угловые и концевые узлы подвержены высоким ГИТ. Таким образом,

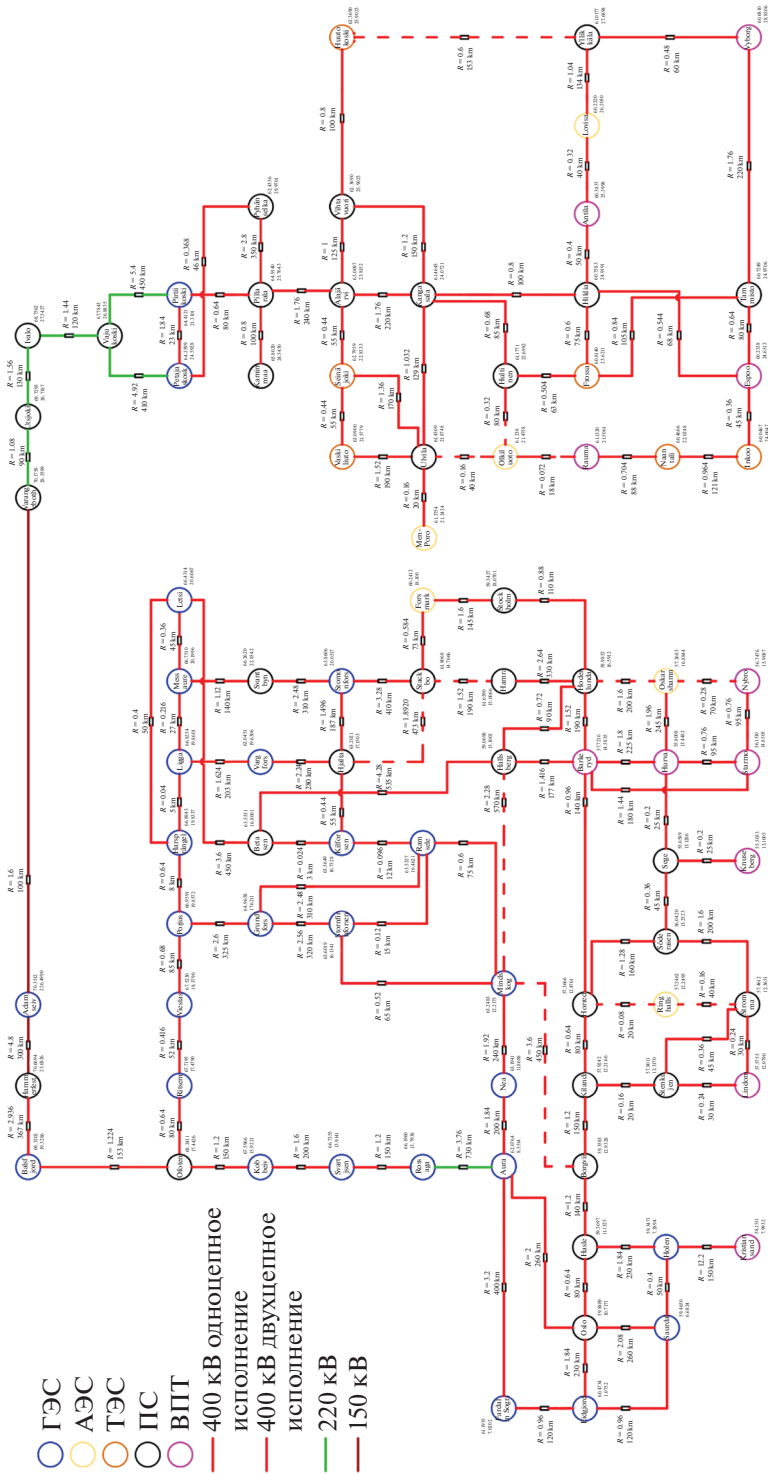


Рис. 2. Расчетная схема ЭЭС Скандинавии.

ЭЭС, расположенные в средних и низких широтах, также могут испытывать негативные эффекты ГМБ.

Еще одним параметром, определяющим уязвимость ЭЭС к ГМБ, являются схемы заземления оборудования. По правилам безопасности эксплуатации все высоковольтное оборудование должно быть заземлено. Обычно в сетях 110 кВ и выше применяется глухозаземленная нейтраль. Установка устройств, блокирующих протекание ГИТ в нейтральных силовых оборудований, является одной из мер по повышению устойчивости ЭЭС к ГМБ. Был выполнен анализ трех случаев: **А**, **Б**, **В**. Случай **А** соответствует исходной схеме, во втором случае **Б** токоограничивающие резисторы установлены в 10 узлах с наибольшими расчетными амплитудами ГИТ и в 10 узлах с наибольшим числом связей в случае **В**. Анализ показал, что выбор мест установки токоограничивающих резисторов должен выполняться с учетом анализа **Р** характерных режимов ЭЭС и **Г** характерных геомагнитных сценариев, иначе возможно неоправданное повышение амплитуды ГИТ в узлах сети. Например, ГИТ на ПС 400 кВ Ryhanselkä составляет 0.139 о.е. в случае **Б** (случай **А** принят за базовый) и 1.1 о.е. в случае **В**. Поиск оптимального расположения выполняется с помощью дробно-линейных аналитических зависимостей параметров режима ( $y$ ) от параметров управления ( $x$ ) [35].

Схема соединения сети определяется ее режимом работы. Гипотеза о том, что ЭЭС, работающие в режиме минимума нагрузки более уязвимы к эффектам космической погоды, была выдвинута Ф. Коза [36], но не была подтверждена расчетами. Анализ выполнен для схемы центрального энергорайона ЭЭС Якутии в силу отсутствия в свободном доступе информации о режимах работы ЭЭС Скандинавии. Любая сеть может быть представлена графом с  $N$  узлами и  $L$  связями. Графы сети для режимов зимнего максимума нагрузки (ЗМН) и летнего минимума нагрузки (ЛМН) приведены на рис. 3. Расчетная схема соответствует схеме соединений.

Анализ топологических характеристик сети позволяет оценить уязвимость электрической цепи при потере элемента. Уязвимость  $V_i$  определена как уменьшение эффективности сети при потере  $i$ -го элемента в этой статье. Отключение узла электрической сети вследствие аварийного возмущения приводит к уменьшению эффективности сети. Каждый узел сети характеризуется своим уникальным удельным вкладом.

$$V_i = \frac{E - E_i}{E},$$

где  $E$  – эффективность исходной сети, а  $E_i$  – эффективность при потере  $i$ -го элемента.

Эффективность определяется как:

$$E = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j} \frac{1}{d_{ij}},$$

где  $N$  – общее число узлов сети,  $d_{ij}$  – дистанция между  $i$ -м и  $j$ -м узлами сети.

Принято, что воздействие ГИТ приводит к одновременной потере двух параллельно работающих силовых трансформаторов в узлах 1, 3 и 6. Распределительное устройство выполнено по схеме две секционированные системы шин в узлах 3 и 6 и по схеме две системы шин в узле 1. Наибольшая уязвимость имеет место при потере оборудования в режиме ЛМН. Уязвимость сети при потере узла 6 в режиме ЗМН равна 0.199, а в режиме ЛМН – 0.225. Это объясняется тем, что в режиме ЛМН в эксплуатации находится оборудование, составляющее “хребет” системы генерация – передача – распределение. Потеря оборудования в режиме ЛМН может привести к проблемам с устойчивостью сети в связи со сниженными возможностями по применению управляющих воздействий. ГМБ приводит к большим прямым и “отложенным” потерям в режиме ЛМН. Ремонт силового трансформатора не может быть произведен на месте, соответственно, электроснабжение энергорайона будет ограничено на время проведения восстановительных работ.



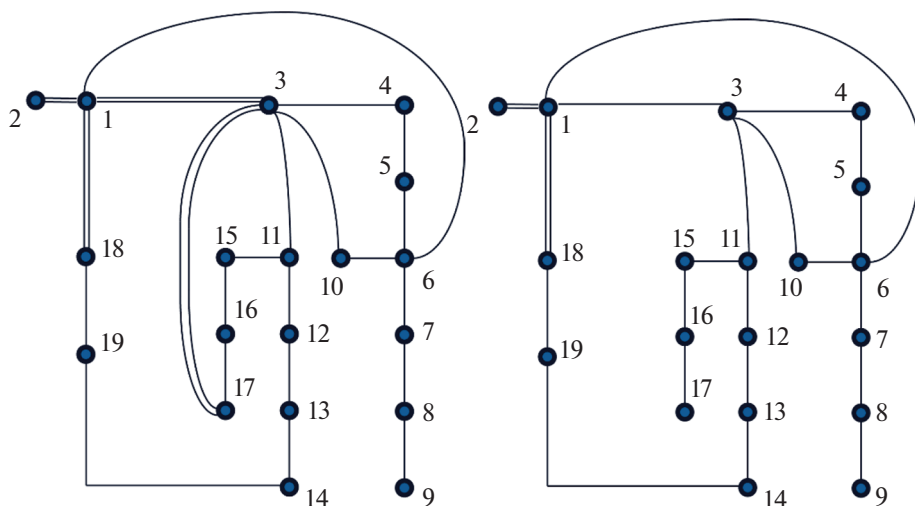





Рис. 3. Граф схемы центрального энергорайона ЭЭС Якутии в режиме: а – 3МН в 2014 году; б – ЛМН в 2014 г.

### 2.3. Параметры сетевого оборудования как критический фактор

Оборудование ЭЭС, спроектированное для эксплуатации в номинальном режиме, должно удовлетворять условиям надежной и беспереывной работы и в ряде нормированных режимов, при которых часть или все параметры режима отличны от номинальных. Максимально допустимые отклонения параметров выбираются с учетом нормированного уровня надежности, определяющего объем затрат на проектирование и производство с учетом издержек от недоотпуска электроэнергии в случае потери оборудования. Нормативный срок эксплуатации сетевого оборудования равен 25 годам [37], что подразумевает, что оборудование проектируется с учетом аварийных возмущений, имеющих низкую вероятность (раз в десятки лет). Тем не менее ГМБ как аварийное возмущение не учитываются в существующих нормах.

Непосредственно протекание ГИТ по обмоткам сетевого оборудования не приводит к заметным нарушениям. Основная опасность заключается в том, что под воздействием ГИТ изменяются характеристики оборудования, содержащего ферромагнитные элементы, что приводит к количественному и качественному изменению режима. Наиболее уязвимым оборудованием являются силовые трансформаторы. Устойчивость силовых трансформаторов к ГМБ определяется схемой магнитной цепи, схемой соединения обмоток и изоляцией трансформаторов. Наибольшей уязвимостью обладают однофазные стержневые трансформаторы, в которых пути протекания потоков прямой и нулевой последовательности совпадают. Магнитный поток полностью замыкается в сердечнике по пути основного магнитного потока. Трехфазные трехстержневые 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. Трехфазный пятистержневый трансформатор занимает промежуточное положение. Хотя токи трех фаз компенсируются в основных стержнях и прилегающих ярмах, они увеличивают друг друга в обратных стержнях, что приводит к насыщению сердечника. Относительная восприимчивость различных типов трансформаторов к эффектам ГМБ приведена на

	1.0	Однофазный стержневой трансформатор
	0.57	Трехфазный пятистержневой трансформатор
	0.05	Трехфазный трехстержневой трансформатор

**Рис. 4.** Относительная восприимчивость силовых трансформаторов к ГМБ как функция их конструктивной схемы.

рис. 4. Связь между током возбуждения  $I_B$  однофазного стержневого трансформатора и током ГИТ  $I_{ГИТ}$  выражается следующим образом:

$$I_B = \frac{\pi(1 - \cos \alpha)}{\sin \alpha - \alpha \cos \alpha} I_{ГИТ},$$

где  $\alpha$  – угол насыщения.

Анализ поврежденных трансформаторов показал, что тепловому воздействию в первую очередь подвержена бумажная изоляция. ГМБ, вызвавшая системную аварию в ЭЭС Квебека, привела также к потере силового трансформатора стоимостью 12 миллионов долларов США в Нью-Джерси, а именно к разрушению обмоток низшего напряжения, деградации изоляции всех трех фаз и плавлению металла проводников [2]. Если плавление металла проводников приводит к незамедлительной потере силового трансформатора, то частичная деградация их изоляции приводит к отложенному отказу. Частичные разряды в изоляции, вызванные ГИТ, могут приводить к отложенному отказу оборудования не только в высоких, но и в средних и низких частотах [38]. Альтернативным решением является использование материала NOMEX при проектировании изоляции силовых трансформаторов [39]. В настоящий момент полимерная изоляция не получила широкого распространения из-за того, что в результате диффузии молекулы полимерной изоляции растворяются в масле, меняя его свойства.

ГИТ оказывают как непосредственное влияние на синхронные машины (СМ), так и косвенное за счет изменения параметров режима ЭЭС. Прямое воздействие ГИТ на СМ незначительно. Значение магнитного поля от ГИТ, равному 210 А, составляет 7.4 мТл, что пренебрежимо мало по сравнению с рабочим значением магнитной индукции в зазоре  $\sim 1$  Тл. С другой стороны, нелинейное искажение гармонического состава переменного тока приводит к уменьшению допустимой мощности СМ  $P_{доп}$  [40]:

$$P_{доп} = \sqrt{\frac{nK_{F_1}}{\sum Q_{осн, n} + \sum Q'_{осн, n}}},$$

где  $nK_{F_1}$  – коэффициент Филльда;  $\sum Q_{осн, n}$  – сумма омических потерь,  $\sum Q'_{осн, n}$  – дополнительные потери.

Оценка, выполненная для турбогенератора ТВВ-500, показала, что при насыщении однофазного стержневого трансформатора мощность СМ следует ограничить на 50%, исходя из потерь в обмотке статора и ее перегрева. В случае однополупериодного насыщения трехфазного пятистержневой трансформатора допустимую мощность СМ следует снизить на 25%. Уменьшение допустимой мощности СИ ограничивает комплекс мер, применяемых диспетчером ЭЭС для обеспечения ее устойчивой работы во время ГМБ [41].

Воздействие ГМБ на другое оборудование ЭЭС не так значительно. Сравнительная оценка уязвимости оборудования к прямым и косвенным эффектам ГИТ дана в табл. 1. Под системным эффектом понимается кумулятивный эффект на режим ЭЭС от поте-

**Таблица 1.** Устойчивость оборудования энергосистемы к эффектам геомагнитных бурь

Наименование оборудования	Устойчивость к ГМБ	Системный эффект	Стоимость
Силовой трансформатор	Низкая	Большой	Высокая
Синхронная машина	Средняя	Большой	Высокая
Измерительный трансформатор	Средняя	Большой	Низкая
Шунтирующий реактор	Высокая	Большой	Высокая
Выключатель	Высокая	Средний	Средняя
Батарея конденсаторов	Высокая	Большой	Высокая
Вставка постоянного тока	Высокая	Большой	Высокая
ЛЭП	Высокая	Большой	Средняя

ри более, чем  $N - 1$  элемента одного типа. Указана стоимость ремонта/замены поврежденного оборудования в последнем столбце.

#### 2.4. Информированность как критический фактор

Информированность практики ЭЭС о негативном влиянии ГМБ на оперирование включает в себя два аспекта: информированность как общественная осведомленность и информированность как прогнозирование космической погоды. Так как ГМБ можно охарактеризовать как явления высокого риска, но низкой вероятности, то среди общественности отсутствует глубокое понимание возможных последствий по сравнению с другими природными катастрофами. Уровень осведомленности зависит от типа индустрии и от ее географического расположения. Практика ЭЭС как и космическая отрасль характеризуются самой высокой осведомленностью о эффектах ГМБ по сравнению с другими отраслями. [42] заключает, что даже страны с низким риском негативного эффекта космической погоды выиграют от применения глобальной стратегии по повышению устойчивости ЭЭС в связи с наличием сильных межсистемных связей между экономикой и техническими системами разных стран. Определение величины затрат, которую общество готово заплатить для минимизации эффектов космической погоды затруднительно. Различные подходы были предложены. Например, [43] предлагает использовать данные о структуре рисков, чтобы показать связь между вероятностью ущерба от различных событий и выбором между альтернативными стратегиями. Последние действия сосредоточены вокруг инициативы Федеральной комиссии по регулированию в области энергетики США (Federal Energy Regulatory Committee), результатом которой была подготовка и опубликование “National Space Weather Strategy” и “National Space Weather Action Plan” [44]. Риск от космической погоды классифицирован в национальном реестре рисков в Великобритании. В отличие от космической отрасли, где критерии безопасности преобладают над критериями экономичности, конфликтующие интересы между различными участниками рынка затрудняет введение единых нормативов. С целью повышения общественной осведомленности среди причастных сторон об эффектах ГМБ перестраховочная компания Swiss Re выпустила техническую брошюру под названием “The impact of solar storms on power systems” [45]. Повышение общественной осведомленности позволяет не только повысить эффективность разработки превентивных мер, но и повысить качество пост реконструирующих анализов. Например, в 2011 г. спустя 22 года было доказано, что ГМБ, приведшая к Квебекской аварии в Канаде, также оказал термическое воздействие на силовые трансформаторы в Греции [46].

Время распространения корональных выбросов массы от Солнца до Земли варьируется в промежутке от 2 до 4 дней. Наименьший зарегистрированный промежуток

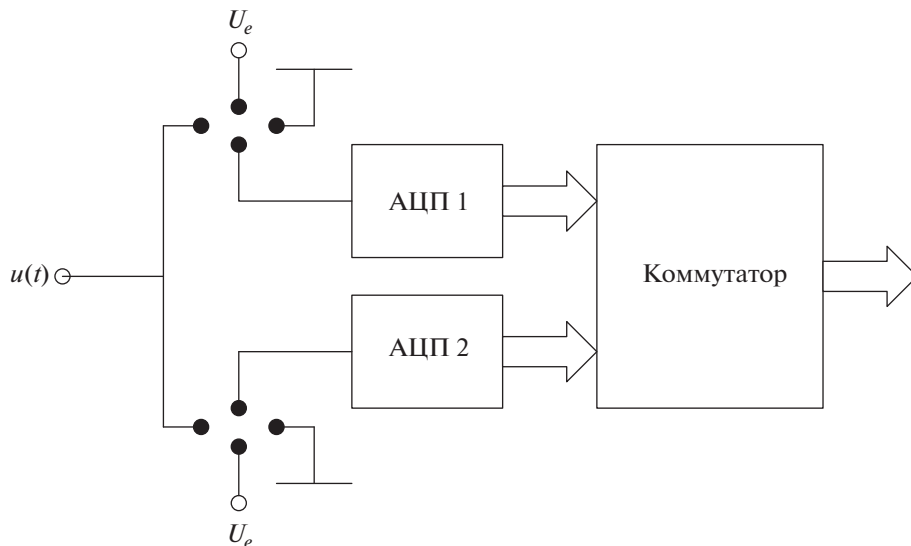


Рис. 5. Схема, позволяющая разделить тепловой шум АЦП и сигнал, получаемый при регистрации ГИТ.

составлял 0.75 дней [47]. [48] оценивает, что в случае воздействия адекватного “наихудшего сценария” у операторов ЭЭС будет порядка 12 ч для принятия решения. Данный промежуток времени безусловно слишком мал для принятия оптимальных управляющих воздействий, что показывает необходимость разработки комплекса мер до выброса корональной массы с поверхности Солнца. Результаты анализа критических факторов использованы при создании алгоритма для поиска ЭЭС, уязвимых к воздействиям кондуктивной помехи ультранизкой частоты. Алгоритм описан в разделе 3, а результаты его апробации на схеме ЭЭС России приведен в разделе 4 настоящей статьи.

Далее опишем методику разделения сигнала, получаемого в процессе регистрации ГИТ, при идентификации ГМБ. Как уже отмечалось выше, основной проблемой в данном случае является малый коэффициент “С” варибельности ГИТ. Это выражается в том, что спектр регистрируемого измерителем сигнала группируется около нулевой частоты в достаточно узкой полосе. В этой же полосе также группируется спектр тепловых шумов, которые имеют место в любом современном измерительном оборудовании. Мероприятия, направленные на подавления шумов, как правило имеют высокую стоимость и малую эффективность. Поэтому, предпочтительным выглядит метод компенсации. Следует заметить, что ГИТ и регистрируемый сигнал суть разные временные зависимости. В ГИТ шум отсутствует. Этот шум добавляется к сигналу в момент его регистрации, что дает возможность его компенсировать. Так как ГИТ имеет низкую энтропию, то его легко предсказать с высокой точностью на малых временных интервалах, также, как и тепловой шум. На этом базируется идея предлагаемого метода.

На рис. 5 представлена схема компенсирующего устройства. Сигнал ГИТ попеременно подается на аналого-цифровой преобразователь АЦП 1 и АЦП 2, где происходит его дискретизация и квантование. Как у любого измерительного прибора, у АЦП в результате как внешних воздействий (таких, например, как температура), так и внутренних (таких, например, как старение и деградация), могут изменяться два параметра – коэффициент усиления и уровень нуля. Естественно, указанные причины вызывают изменение и других параметров АЦП, однако их влияние на точность измерения име-

ет второй порядок малости. Несмотря на то, что регистрируемые процессы имеют очень узкий спектр (значительно ниже 1 Гц), частота дискретизации выбирается достаточно высокой (например, 1 кГц). Используя свойство низкой энтропии измеряемого сигнала, мы каждые несколько минут должны переключать регистрируемый сигнал со входа АЦП 1 на вход АЦП 2 и наоборот. При этом, один из АЦП занимается оцифровкой сигнала, а другой выполняет калибровку. При калибровке АЦП по очереди коммутируется сначала на землю, которая является эталоном нулевого уровня  $U_c$  и на эталонное напряжение  $U_e$ . Далее, когда на откалиброванный АЦП снова подается сигнал, методами цифровой обработки выполняется алгоритм компенсации, позволяющий удалить из сигнала ГИТ паразитную постоянную составляющую и компенсировать температурный уход коэффициента усиления  $k$ .

Математически сигнал после аналого-цифрового преобразования можно представить в виде следующей формулы

$$\tilde{u}(t) = k(u(t) + U_c),$$

где  $u(t)$  – сигнал ГИТ, который необходимо измерить;  $\tilde{u}(t)$  – искаженный сигнал, который получился в результате температурного ухода.

При заземлении, АЦП фиксирует сигнал  $U_0 = kU_c$ , а при коммутации на опорное напряжение  $U_1 = k(U_e + U_c)$ . На основании этих замеров составим систему уравнений вида:

$$\begin{cases} U_0 = kU_c \\ U_1 = k(U_e + U_c). \end{cases}$$

Из ее решения находим значения паразитной постоянной составляющей и текущего коэффициента усиления

$$\begin{cases} U_c = \frac{U_e U_0}{U_1 - U_0} \\ k = \frac{U_1 - U_0}{U_e}. \end{cases}$$

Определив паразитную постоянную составляющую и текущий коэффициент усиления, зная измеренный сигнал  $\tilde{u}(t)$ , находим  $u(t)$ :

$$u(t) = \frac{\tilde{u}(t)}{k} - U_c.$$

Описанная методика может быть улучшена за счет использования цифровой фильтрации, а также различных алгоритмов усреднения и компенсации краевых искажений, имеющих вид переходных процессов, возникающих при коммутации входа АЦП на эталонное напряжение на землю. Кроме того, возможно построение схемы на одном АЦП, когда выпадающий из-за калибровки участок сигнала восстанавливается методами интерполяции [49–51].

Таким образом, представленная методика позволяет регистрировать ГИТ за счет использования его свойства низкоэнтропийности. Это в свою очередь позволяет с большой вероятностью идентифицировать ГМБ и на основании получаемой информации проводить необходимые мероприятия по нейтрализации опасных воздействий на ЭЭС.

### 3. АЛГОРИТМ ПОИСКА УЗКИХ МЕСТ В ЭЭС К ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ЭФФЕКТАМ ГМБ

Наиболее используемый подход по оценки устойчивости ЭЭС к ГМБ описан в [52] и состоит из двух этапов. В рамках первого этапа, “геофизического”, выполняется расчет геоэлектрического поля, вызванного ГМБ с заданными характеристиками на заданной географии. На втором этапе, “инженерном”, рассчитываются значения ГИТ в заданной системе проводников. Недостатком данного подхода является необходимость информации о параметрах геомагнитного поля, измеренных на магнитных обсерваториях около рассматриваемой ЭЭС, значения проводимости подстилающей породы и характеристики системы проводников. Полный набор информации не всегда доступен в свободном доступе, что ограничивает применение данного подхода. Также применение данного подхода требует специальных знаний по геофизике. С другой стороны, ожидается рост спроса на исследования по оценке уязвимости ЭЭС к ГМБ. Следовательно, существует явная необходимость разработки алгоритма доступного широкому кругу персоналов.

Качественно новый алгоритм, представленный в этой статье, состоит из следующих элементов. Схематичная иллюстрация алгоритма показана на рис. 6. На первом шаге предусмотрен сбор информации о ЭЭС, а именно, информация об установленном оборудовании, схеме соединений, географическом расположении, проводимости подстилающей коры. Анализ сбоев в работе ЭЭС и сетевого оборудования и классификация причин сбоев выполняется на втором этапе. Корреляция между моментами сбоев по неизвестным техническим причинам и моментами повышенной геомагнитной активности выполняется на третьем этапе. Если такая корреляция имеет место, то необходим детальный анализ устойчивости данной ЭЭС к ГМБ. Если такая корреляция не была выявлена или не может быть однозначно определена, то следует выполнить четвертый шаг, на котором выполняется анализ оборудования какого класса напряжения установлено в ЭЭС. Проверка конструктивных схем оборудования класса напряжения более 220 кВ осуществляется на пятом этапе. Если на четвертом шаге установлено, что в ЭЭС отсутствует оборудование напряжением выше, чем 220 кВ, то дальнейший детальный анализ не требуется. На шестом шаге выполняется анализ данных с устройств регистрации ГИТ, установленных в нейтральных силовых трансформаторах, при их наличии. При наличии амплитуд ГИТ выше установленных барьерных значений требуется детальный анализ. Ранее было показано, что топология ЭЭС существенно влияет на ее уязвимость к геомагнитным токам. Если на седьмом шаге было показано, что к узлам, в которых установлено оборудование напряжением более 220 кВ уязвимых типов, присоединены линии протяженностью более 100 км, требуется продолжить анализ. На восьмом шаге определяется места установки устройств продольной компенсации реактивной мощности, а на девятом анализируются данные о трассе линии.

Преимуществом представленного алгоритма является учет критических факторов различной природы. По факту определения уязвимых районов может быть выполнен анализ статической и динамической устойчивости ЭЭС классическими методами для заданного распределения ГИТ.

### 4. ПРИМЕР АПРОБАЦИИ АЛГОРИТМА ПОИСКА УЗКИХ МЕСТ В ЭЭС К ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ЭФФЕКТАМ ГМБ

Разработанный алгоритм был апробирован на схеме ЕЭС России по причине уникальности ее качественных и количественных характеристик. ЕЭС России состоит из 7 объединенных систем (ОЭС), объединенных на синхронную работу: ОЭС Северо-Запада, ОЭС Дальнего Востока, ОЭС Сибири, ОЭС Урала, ОЭС Средней Волги, ОЭС Центра, ОЭС Юга. ЕЭС России находится на обширной территории в разных геомагнитных широтах, покрывающей 9 временных зон. Суммарная установленная мощ-

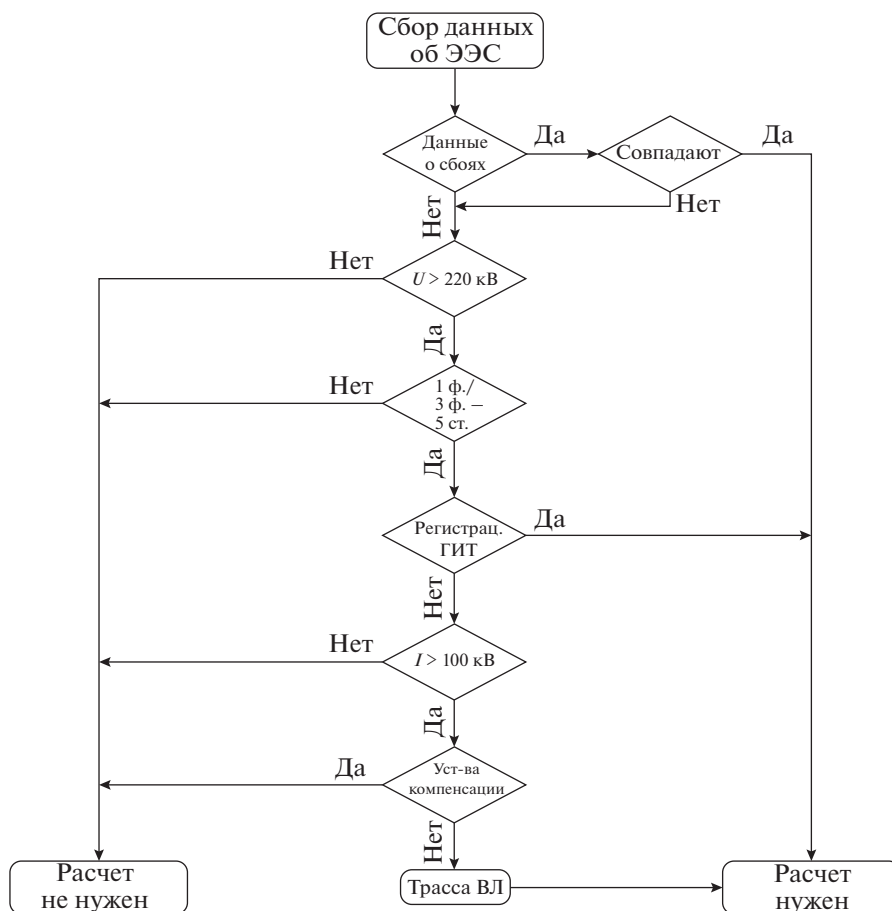


Рис. 6. Алгоритм первичной оценки устойчивости ЭЭС к геомагнитным бурям.

ность составляет 234.4 ГВт (на 1 марта 2018 г.). Отличительной характеристикой системообразующей сети является наличие большого числа (10200) длинных высоковольтных линий напряжением 110–750 кВ. Общее число установленных трансформаторов напряжением 110–750 кВ 8700, из которых 14% являются однофазными напряжением 500–750 кВ [53]. Части ЭЭС соединены слабыми межсистемными линиями со сниженной пропускной способностью по критериям устойчивой работы.

Авторы сравнили относительную уязвимость 7 ОЭС. 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 режим работы, географическое расположение систем, проводимость подстилающей породы, трасса линии, данные о сбоях в функционировании технических систем по неопределенной причине. Результаты обработки информации приведены в [54]. По результатам анализа ОЭС Сибири была охарактеризована как ЭЭС, в которой влияние ГМБ значительно. Наибольшая средняя длина высоковольтных линий в ОЭС Сибири. Также режиму ОЭС Сибири характерны перетоки мощности по сечениям, близким к предельно допустимым. Например, величина “запертой” мощ-

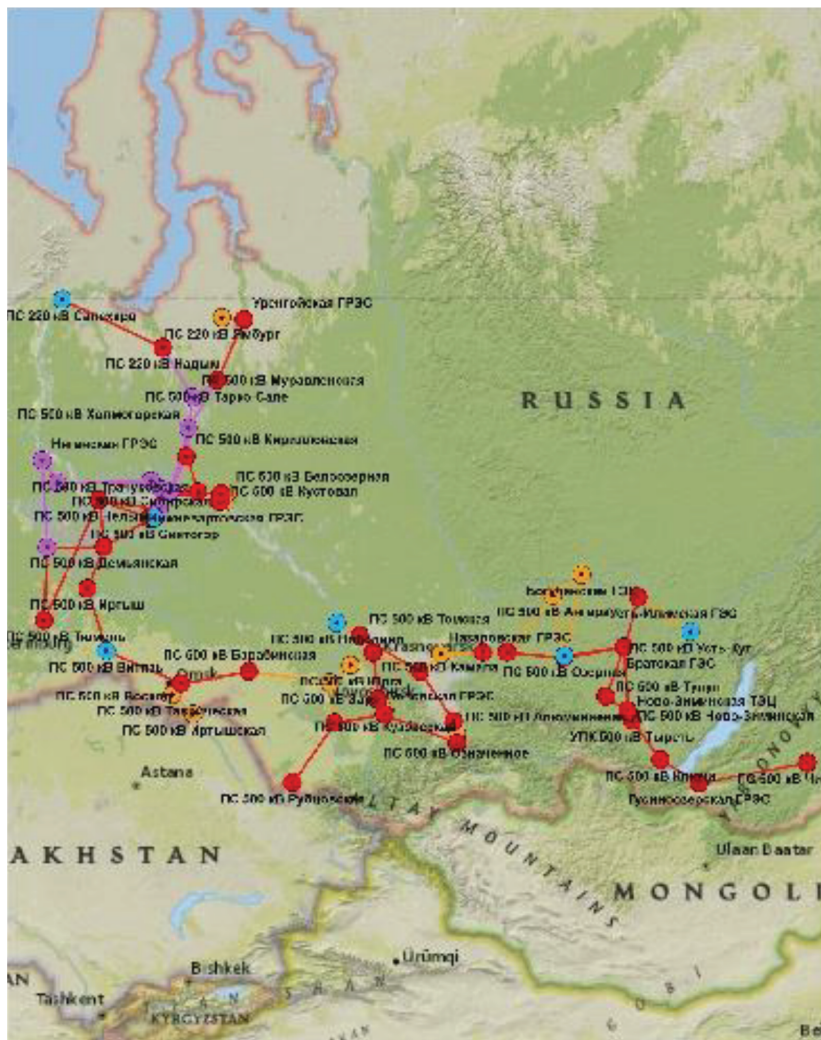


Рис. 7. Графическая визуализация “узких мест” объединенной энергосистемы Сибири к воздействиям сильных геомагнитных бурь.

ности Саяно-Шушенской ГЭС равна 2–4 ГВт [55]. Порядка 25% установленных однофазных трансформаторов выработали нормативный срок, равный 25 годам.

Графическая визуализация выполнена в географической информационной системе ArcGIS (рис. 7) на базе карты [56]. Создание подобных моделей позволяет проводить одновременный анализ геоинформационных данных о состоянии технологических систем и данных бизнес-аналитики, что снижает затраты на проектирование и эксплуатацию ЭЭС устойчивой к ГМБ за счет рассмотрения энергорайона не только с позиции обеспечения устойчивой работы, но и с позиции изменения состояния экономических показателей узлов нагрузки и генерации, физических параметров трасс линий электропередачи, узлов нагрузки и генерации. В рассматриваемой задаче учтены такие слои как физическая карта рассматриваемого региона, схема соединений энергорайона, расположение и параметры узлов нагрузки и генерации, карта прово-





Рис. 8. Совокупность критических факторов, влияющих на устойчивость ЭЭС к геомагнитным воздействиям.

димости подстилающей породы. 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 или реконструированные в течение последних 5 лет, отмечены розовым цветом. Энергорайон Ямало-Ненецкого автономного округа находится в высоких геомагнитных широтах, но из-за того, что оборудование подстанций было недавно реконструировано, он подвержен меньшему риску ГМБ, чем узлы, находящиеся в средних широтах.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Степень проработанности национальных стратегий по минимизации эффектов ГМБ на технологические системы зависит от географического района. Страны, столкнувшиеся с негативными эффектами за предыдущие десятилетия, более подготовлены. Продолжающееся развитие линий высокого и сверхвысокого напряжения, с одной стороны, и старение сетевого оборудования, с другой стороны, приводит к расширению карты зон “высокого риска”. Следовательно, даже страны, не имеющие зарегистрированных случаев влияния космической погоды на ЭЭС, выигрывают от проведения анализа устойчивости национальных ЭЭС к ГМБ. Цель этого исследования была в идентификации и анализе критических факторов, влияющих на устойчивость ЭЭС к ГМБ, и разработке алгоритма по оценке робастности ЭЭС на базе полученных данных.

Полученный алгоритм был апробирован на схеме ЕЭС России. Вопреки ожиданиям ОЭС Сибири была охарактеризована как ЭЭС, имеющая значительный риск негативного воздействия ГМБ, а не ОЭС Северо-Запада, расположенная в авроральном районе. Это показывает, что критические факторы технической природы являются доминантными (рис. 8). Среди факторов технической природы наиболее важными яв-

ляются параметры установленного оборудования, топология сети и ее режим работы. Информированность формирует отдельно стоящую группу факторов. Ее позиционирование в общей классификации является целью дальнейших исследований.

ГМБ могут приводить к одновременному отказу  $k$  сетевых элементов, где  $k$  – натуральное число больше единицы. Невозможность получения достоверного долгосрочного прогноза о районе и времени появления ГМБ на поверхности Земли обуславливает необходимость превентивного анализа устойчивости ЭЭС к возможным эффектам. Алгоритм, представленный в этой статье, позволяет не только определять зоны “высокого риска”, но и выделить узлы, защита которых необходима в первую очередь. Хотя по-прежнему необходимо ответить на следующие вопросы: 1) какая стоимость предотвращения будущих системных аварий, вызванных ГМБ;? 2) какие показатели критерия стоимость/эффективность для каждого из мероприятий;? 3) какой временной промежуток требуется для внедрения мероприятий.? На настоящий момент мы рекомендуем заинтересованным сторонам внедрить предварительный анализ устойчивости ЭЭС к ГМБ в свою практику не зависимо от их географического расположения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Swiss Re*, Natural catastrophes and man-made disasters in 2016: a year of widespread damages, sigma 2. 2017. Режим доступа: [http://institute.swissre.com/research/overview/sigma/2\\_2017.html](http://institute.swissre.com/research/overview/sigma/2_2017.html) (30.04.2018)
2. *Kappenman J.* Geomagnetic storms and their impacts on the US power grid, Metatech. 2010.
3. *Maynard T., Smith N., and Gonsalez S.*, Solar storm Risk to the north American electric grid, Lloyd's. 2013.
4. *Oughton E., Copic J., Skelton A., Kesaitė V., Yeo Z.Y., Ruffle S.J., Tuveson M., Coburn A. W., and Ralph D.* Helios Solar Storm Scenario, Cambridge Risk Framework series. 2016.
5. *Lundstedt H.* The sun, space weather and GIC effects in Sweden, *Advances in Space Research*. 2006. 37. 1182–1191.
6. *Gaunt C. T.* Reducing uncertainty—responses for electricity utilities to severe solar storms, *J. Space Weather Space Clim.* 2014. 4, A01. <https://doi.org/10.1051/swsc/2013058>
7. Effects of geomagnetic disturbances on Oktyabrskaya railway in Russia / Y. Yaroshenko [et al.] // Proceedings of ESWW7, 15–19 November 2010. Brugge, Belgium, 2010.
8. *Liu C.-M., Liu L.-G., and Pirjola R.* Geomagnetically induced currents in the high-voltage power grid in china, *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2009. 24. 2368–2374.
9. NERC. Interim Report: Effects of Geomagnetic disturbances on the Bulk power system, North American Electricity Reliability Corporation. 2012.
10. NOAA. NOAA Space Weather Scales. [Электронный ресурс]. 2011. Режим доступа: [https://www.swpc.noaa.gov/sites/default/files/images/NOAA\\_scales.pdf](https://www.swpc.noaa.gov/sites/default/files/images/NOAA_scales.pdf) (30.04.2018).
11. *Viljanen A., Nevanlinna H., Pajunpää K., and Pulkkinen A.* Time derivative of the horizontal geomagnetic field as an activity indicator, *Annales Geophysicae*. 2001. 19(9). 1107–1118.
12. *Zhang J.J., Wang C., Sun T., Liu C., and Wang K.* GIC due to storm sudden commencement in low-latitude high-voltage power network in china: Observation and simulation, *Space Weather*. 2015. 13. 643–655.
13. *Yamauchi, M., T. Iyemori, H. Frey, and M. Henderson.* Unusually quick development of a 4000 nT substorm during the initial 10 min of the 29 October 2003 magnetic storm, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2006. 111(A4).
14. *Belakhovsky V., Pilipenko V., Sakharov Y., and Samsonov S.* Geomagnetic and ionospheric response to the interplanetary shock on January, 24, 2012, *Physics of Auroral Phenomena*. 2017. 40. 100–103.
15. *Pirjola R., Kauristie K., Lappalainen H., Viljanen A., and Pulkkinen A.* (2005). Space weather risk, *Space Weather*, 3(2).
16. *Lam H., Boteler D., and Trichtchenko L.* Case studies of space weather events from their launching on the sun to their impacts on power systems on the earth, *Annales Geophysicae*. 2002. 20. 1073–1079.
17. *Pulkkinen A., Thomson A., Clarke E., and McKay A.* April 2000 geomagnetic storm: ionospheric drivers of large geomagnetically induced currents, *Annales Geophysicae*. 2003. 21(3), 709–717.
18. *Pulkkinen A., Bernabeu E., Eichner J., Beggan C., and Thomson A.* Generation of 100-year geomagnetically induced current scenarios. *Space Weather*. 2012. 10 (4).

19. Авакян С.В. Влияние магнитных бурь на аварийность систем электроэнергетики, автоматики и связи / С.В. Авакян, Н.А. Воронин, К.А. Дубаренко Научно-технические ведомости СПбГПУ СПб. 2012. № 3–2 (154): Наука и образование С. 253–266
20. Adalev A., Korovkin N., and Hayakawa M. Identification of electric circuits described by ill-conditioned mathematical models, IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers. 2006. 53.
21. Adalev A., Korovkin N., and Hayakawa M. Using linear relations between experimental characteristics in stiff identification problems of linear circuit theory, IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers. 2008. 55. 1237–1247.
22. Коровкин Н.В., Грицуненко С.С. Эффективный алгоритм измерения параметров длинных линий для реализации на сигнальном процессоре. Изв. РАН. 2017.
23. Грицуненко С.С. Адекватность использования аналогий в цифровой обработке сигналов. Известия Транссиба. 2010(2 (2)).
24. Грицуненко С.С., Коровкин Н.В. Метод измерения характеристик нелинейных элементов электрических цепей. Электричество. 2019(1): 37–44.
25. Коровкин Н.В., Грицуненко С.С. О применимости быстрого преобразования Фурье для гармонического анализа несинусоидальных токов и напряжений. Изв. РАН. Энергетика. 2017(2). С. 73–86.
26. Коровкин Н.В., Грицуненко С.С. Введение понятия “низкоэнтропийный сигнал”. Изв. РАН. Энергетика. 2019.
27. ENTSO-E. Continental Europe Operation Handbook, UCTE. 2014. Доступно <https://www.entsoe.eu/publications/system-operations-reports>
28. Piccinelli R., and Krausmann E. North Europe power transmission system vulnerability during extreme space weather, Space Weather Space Climate Journal. 2018. 8, A03.
29. Viljanen A., Pirjola R., Pr'acser E., Ahmadzai S., and Singh V. Geomagnetically induced currents in Europe: characteristics based on a local power grid model, Space Weather. 2013. 11(10). 575–584.
30. Pirjola R., Liu C., and Liu L. Geomagnetically induced currents in electric power transmission networks at different latitudes, 2010 Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC), IEEE. 2010. 699–702.
31. Viljanen A., Amm O., and Pirjola R. Modeling geomagnetically induced currents during different ionospheric situations, Journal of Geophysical Research: Space Physics. 1999. 104. A12. 28059–28071.
32. Pirjola R. Effects of interactions between stations on the calculation of geomagnetically induced currents in an electric power transmission system, Earth, planets and space. 2008. 60(7). 743–751.
33. Viljanen A., Pulkkinen A., Amm O., Pirjola R., and Korja T. Fast computation of the geoelectric field using the method of elementary current systems and planar earth models, Annales Geophysicae. 2004. 22(1). 101–113.
34. Pirjola R., Viljanen A., and Pulkkinen A. Research of geomagnetically induced currents (GIC) in Finland, 7th International Symposium on Electromagnetic Compatibility and Electromagnetic Ecology. 2007. 269–272.
35. Волков А.Н., Коровкин Н.В., Соколова О.Н., Сорокин Е.В., Фролов О.В. Методика оптимизации управляющих воздействий в послеаварийных режимах энергосистемы мегаполиса. Электрические станции. № 11. 2010. С. 33–37.
36. Council N.R. Severe Space Weather Events: Understanding Societal and Economic Impacts: A Workshop Report: Extended Summary, The National Academies Press, Washington, DC. 2009. <https://doi.org/10.17226/12643>
37. ГОСТ 11677-85. Трансформаторы силовые. Общие технические условия. Минск, 2001.
38. Oyedokun D., Gaunt C., Tenbohlen S., Heindl M., Beltle M., Reuter M., and Schneider D. Laboratory test for GIC effects on power transformers, Currents. 2011. 1(2).
39. Foo, C.C. e.a. Mechanical properties of NOMEX material and NOMEX honeycomb structure, Composite Structures. 2007. 80, 588–594. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2006.07.010>
40. Особенности создания и эксплуатации мощных машин переменного тока в автономных электросетях / И.А. Арсеньев [и др.] Научно-технические ведомости СПбГПУ, СПб. 2013. № 4–1 (183). С. 41–48.
41. Sokolova O., and Popov V. Critical infrastructure exposure to severe solar storms. Case of Russia, Safety and Reliability: Methodology and Applications. 2017. 1327–1340.
42. UNOOSA. United Nations/United Arab Emirates High Level Forum: Space as a driver for socio-economic sustainable development, United Nations Committee on Peaceful Uses of Outer Space (UNOOSA), Dubai. 2017. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.unoosa.org/documents/pdf/hlf/HLF2017/Bookof Abstracts.pdf> (30.04.2018).
43. Thompson K., Stedinger J., and Heath D. Evaluation and presentation of dam failure and flood risks, Journal of Water Resources Planning and Management. 1997. 123. 216–227.
44. Jonas S., and McCarron E.D. White house releases national space weather strategy and action plan, Space Weather. 2016. 14(2). 54–55.

45. Sokolova O., Burgherr P., Collenberg W., and Schwerzmann A. The impact of solar storms on power systems. 2014. Order no: 1505890 14 en, Swiss Re.
46. Zois I.P. Solar activity and transformer failures in the greek national electric grid, J. Space Weather Space Clim. 2013. 3, A32.
47. Schrijver C.J., Kauristie K., Aylward A.D., Denardini C.M., Gibson S. E., Glover A., Gopalswamy N., Grande M., Hapgood M., Heynderickx D., and Jakowski N. Understanding space weather to shield society: A global road map for 2015–2025 commissioned by COSPAR and ILWS, Advances in Space Research. 2015. 55, 2745–2807.  
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2015.03.023>
48. Cabinet Office. UK Space Weather Preparedness Strategy, Department for Business Innovation & Skills. 2015. Ref: BIS/15/457.
49. Королёва К.А., Грицутенко С.С. Восстановление выпадений дискретизируемого сигнала, имеющих место во время калибровки АЦП универсального счетчика электрической энергии на подвижном составе постоянного и переменного тока. Известия Транссиба. 2014(2 (18)).
50. Грицутенко С.С., Панюков А.Г. Метод линеаризации характеристики преобразования АЦП. Известия Транссиба. 2012(1 (9)).
51. Королёва К.А., Грицутенко С.С. Оптимальная интерполяция узкополосного сигнала в смысле минимума среднеквадратичной ошибки. Омский научный вестник. 2016(4 (148)).
52. Zheng K., Trichtchenko L., Pirjola R., and Lian-Guang L. Effects of geophysical parameters on GIC illustrated by benchmark network modeling, IEEE Transactions on Power Delivery. 2013. 28, 1183–1191.
53. Отчет о функционировании ЭЭС России в 2015 году [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.so-ups.ru> (30.03.2018).
54. National Geographic. National Geographic World Map (NASA Blue Marble, ESA GlobCover 2009), ESRI, Garmin, HERE, INCREMENT P, Department of Natural Resources Canada (NRCan), METI. 2009.
55. Соколова О.Н. Исследование действий геомагнитных токов на энергосистемы и мероприятий по предотвращению системных аварий: дис. канд. т. н. 05.09.05. 2017.  
<https://doi.org/10.18720/SPBPU/2/r17-13>
56. Характеристика ограничений передачи электрической мощности в ЕНЭС [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.fsk-ees.ru/media/File/evolution/Pril1.doc> (30.04.2018).

### Utilization-Based Energy Optimization Energy Storage

O. N. Sokolova<sup>a</sup>, Ya. A. Sakharov<sup>b</sup>, S. S. Gritsutenko<sup>c</sup>, and N. V. Korovkin<sup>a, \*</sup>

<sup>a</sup>*Institute of Energy and Transport Systems Peter the Great St.-Petersburg Polytechnic University, St.-Petersburg, Russia,*

<sup>b</sup>*Federal State Budget Scientific Institute “Polar Geophysical Institute”, Murmansk, Russia*

<sup>c</sup>*Omsk State Transport University, Omsk, Russia*

*\*e-mail: nikolay.korovkin@gmail.com*

Geomagnetic storms are considered to be extensive events i.e. high-impact low-frequency events. Contrary to other natural catastrophes, industry has little experience of power grid preparation and operation in the moment of geomagnetic storm appearance along with their effects mitigation. Historically, the problem of geomagnetic storm impact on power grids was just within the scope of geophysics research. The usage of the common approach is limited, since the knowledge of the data on geophysical parameters of the study region is required, which is not accessible to the specialists without relevant background. It is shown in the article that the problem of power grid robustness to geomagnetic storms is multi-criterial. An alternative algorithm for preliminary evaluation of power grid's robustness to geomagnetic storms is proposed based on the critical factors of different nature analysis. The advantage is that this algorithm can be used by specialists who do not have a comprehensive understanding of the geomagnetic storm's effects on power grid operation. Moreover, initial data for the algorithm is available in the open sources. The algorithm is tested on the Unified Power System of Russia. Regions with high geomagnetic storm risk are determined. It is shown that even countries with relatively low geomagnetic storm risk can benefit from the implementation of the global mitigation strategy.

**Keywords:** critical factors, geomagnetic storm, mitigation, power grid, reliability, resiliency, risk assessment, space weather