

## Особенности работы электромеханических и микропроцессорных устройств релейной защиты в условиях воздействия на электрическую сеть геоиндуцированного тока, зарегистрированного в период магнитной бури

© А.А. Тренькин,<sup>1</sup> Е.П. Грабчак<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики,  
607188 Саров, Нижегородская обл., Россия

<sup>2</sup> Объединенный институт высоких температур РАН,  
125412 Москва, Россия  
e-mail: trenkin@ntc.vniief.ru

Поступило в Редакцию 18 октября 2023 г.

В окончательной редакции 11 декабря 2023 г.

Принято к публикации 24 декабря 2023 г.

С использованием расчетно-экспериментальной технологии имитации работы устройств релейной защиты в электрической сети исследовано функционирование типичных отечественных электромеханического и микропроцессорного устройств релейной защиты при воздействии геоиндуцированных токов, вызываемых магнитными бурями. Показано, что в отличие от электромеханического реле воздействие геоиндуцированных токов на современное микропроцессорное устройство не приводит к срабатыванию реализованных в нем защит, в том числе токовой направленной защиты нулевой последовательности тока, по причине блокировки геоиндуцированных токов вторичными измерительными трансформаторами устройства.

**Ключевые слова:** магнитная буря, геоиндуцированный ток, электроэнергетическая система, релейная защита.

DOI: 10.61011/JTF.2024.02.57086.265-23

### Введение

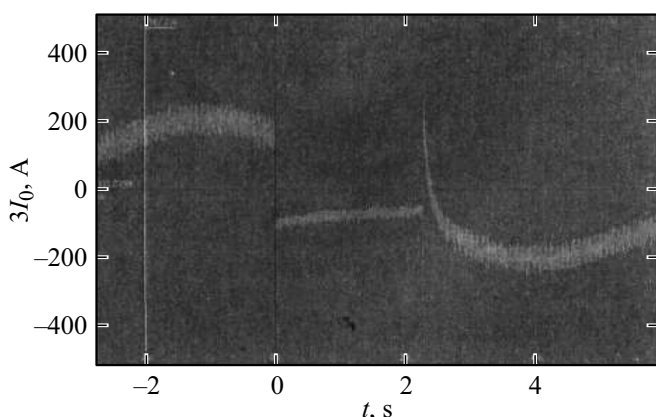
Проблема негативного воздействия магнитных бурь на электроэнергетические системы (ЭЭС) хорошо известна в историческом аспекте и ее актуальность возрастает с развитием энергетической инфраструктуры как в части увеличения масштаба и усложнения топологии электрических сетей, так и в части технологической трансформации.

Магнитные бури приводят к возникновению на поверхности земли низкочастотных геоиндуцированных токов (ГИТ) с характерной частотой  $\sim 10$  мГц, которые через глухозаземленные нейтрали силовых трансформаторов затекают в электрические сети. Величина затекающих токов достигает нескольких сотен ампер [1]. Эти токи способны вызывать сбои в работе электроэнергетического оборудования [2,3] и тем самым могут являться причиной крупных системных аварий, которые неоднократно происходили во время сильных магнитных бурь, преимущественно в высокоширотных районах, например, в 1989 и 2003 гг. в Северной Америке и Северной Европе [4–7].

Одной из причин таких аварий является неправильная работа систем релейной защиты (РЗ) в условиях присутствия в электрической сети ГИТ. Так, ложные действия

РЗ инициировали развитие крупной системной аварии в ЭЭС Гидро–Квебек во время магнитной бури в марте 1989 г. [4]. Срабатывания РЗ при воздействии ГИТ наблюдались и в Российской Федерации, например, в Объединенной энергетической системе Северо-Запада в ноябре 2001 г., в результате чего произошло отключение воздушной линии (ВЛ) 330 кВ Оленегорск–Мончегорск действием токовой направленной защиты нулевой последовательности [3].

Следует особо отметить, что ранее все устройства РЗ, в том числе используемые для защиты ВЛ 330 кВ Оленегорск–Мончегорск, выполнялись на базе электромеханических реле. В последнее время в мировой электроэнергетике происходит активный переход на микропроцессорные устройства релейной защиты (МУРЗ). Данные устройства могут обладать специфическими особенностями реакции на воздействие ГИТ, что обуславливает актуальность соответствующих исследований. В настоящей работе представлены результаты исследований работы отечественных электромеханических и микропроцессорных устройств РЗ в условиях воздействия на электрическую сеть ГИТ, зарегистрированного во время магнитной бури. Такие исследования представляют интерес при решении задачи моделирования воздействия ГИТ на ЭЭС.



**Рис. 1.** Осциллограмма тока в защите нулевой последовательности линии Оленегорск–Мончегорск со стороны подстанции Мончегорск.

## 1. Методика исследования и исходные данные

В статье [3] сообщалось о событии (24.11.2001 г. в 9 h 40 min) отключения во время магнитной бури ВЛ 330 kV Оленегорск–Мончегорск в Объединенной энергосистеме Северо-Запада. Линия отключилась срабатыванием четвертой ступени токовой направленной защиты нулевой последовательности (ТНЗНП) с выдержкой времени 2.2 s. Защита выполнена на электромеханических реле РТ-40 и РБМ-178. Процесс, сопровождающий отключение, был записан цифровым регистратором аварийных событий (рис. 1).

Задачей настоящей работы являлось сравнительное исследование реакции токовой защиты нулевой последовательности силового трансформатора, реализованной на двух типах изделий: электромеханическом реле РТ-40/0,6 (ЗАО „ЧЭАЗ“) и микропроцессорном устройстве БЭ 2704 V041 ЭКРА (ООО НПП „ЭКРА“) на воздействие ГИТ, зарегистрированного при описанном выше событии. Для этого проведены эксперименты по имитации такого воздействия на указанные устройства РЗ и определению их реакции.

Исходные данные для опытов получены с использованием реализованной в программе PSCAD модели типового участка электросети 500 kV, подвергающегося воздействию ГИТ. Схема модели приведена на рис. 2. Модель позволяет в режиме передачи трансформаторами мощности, близкой к номиналу, рассчитать мгновенные значения тока в обмотках группы автотрансформаторов типа АОДЦТН 167000/500/230/10,5 Т4.1–Т4.3 при подмагничивании их сердечника ГИТ. Этот ток задавался идеальным источником тока  $J_1$  (рис. 2) и соответствовал току в защите линии Оленегорск–Мончегорск. Средний участок кривой тока на рис. 1 модифицирован, исходя из условия, что защита линии на воздействие не реагировала. Другие трансформаторы модели Т1–Т3 играли роль

гальванической развязки в режиме передачи мощности от генератора к нагрузке.

Моделирование проведено для сети более высокого класса напряжения, поскольку используемая программа не позволяет адекватно рассчитывать подмагничивание трехфазных трансформаторов, установленных в сети 330 kV, в которой произошло отключение линии.

На рис. 3 приведены фрагменты токов в цепях высокого, среднего и низкого напряжений (ВН (HV), СН (MV), и НН (LV) соответственно) автотрансформатора Т4.1, приведенные к стороне ВН. Полученные таким образом токи ВН, СН, НН и ток нулевой последовательности являются исходными данными для экспериментального моделирования.

Для имитации функционирования исследуемых устройств РЗ в структуре электрической сети использовался разработанный в РФЯЦ-ВНИИЭФ программно-аппаратный симулятор, который с использованием полученных исходных данных формировал на входах устройств следующие сигналы: вторичные токи трансформаторов тока (ТТ, SCCT) со сторон ВН и СН и в нейтрали трехфазной группы автотрансформаторов.

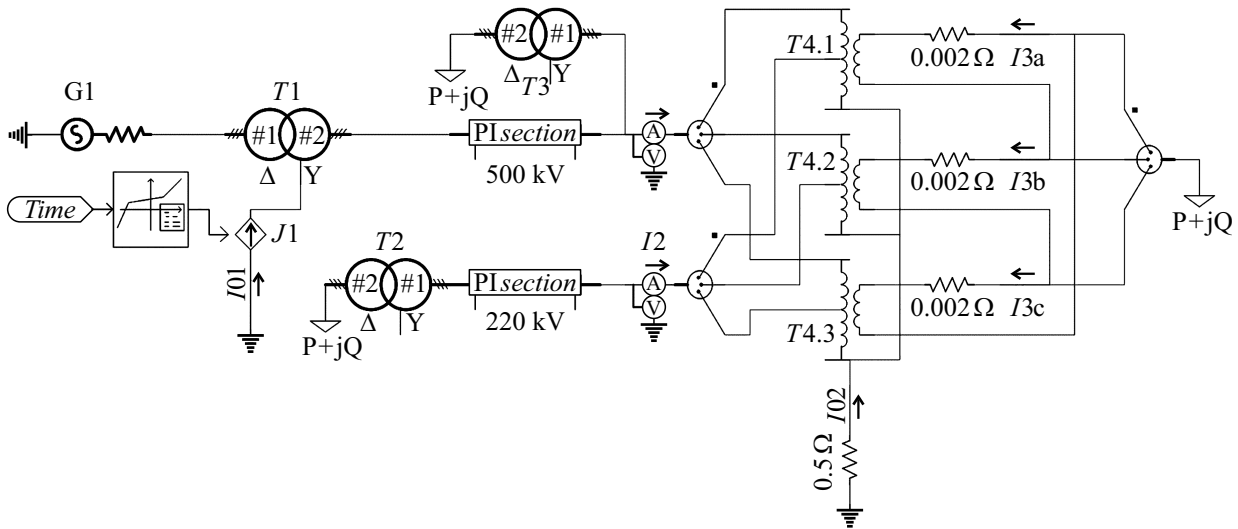
## 2. Экспериментальные результаты и их обсуждение

### 2.1. Эксперименты с реле РТ-40

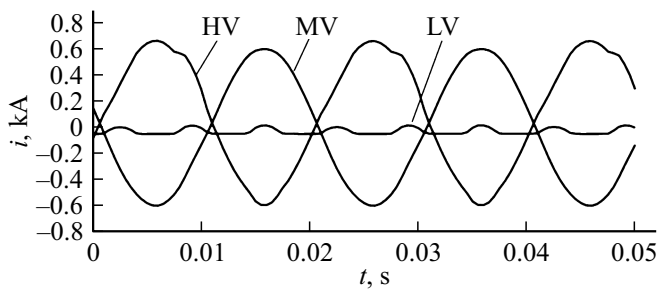
Основными элементами реле являются П-образный стальной сердечник с катушками, подвижный якорь с контактами и противодействующая спиральная пружина. При прохождении тока ТТ через катушки возникает магнитная сила, и якорь притягивается к сердечнику. Этой силе противодействует сила упругости пружины, зависящая от выставленной уставки тока срабатывания. Когда магнитная сила превышает силу упругости, якорь перемещается и нормально разомкнутые контакты замыкаются [8].

Посредством реле РТ-40 моделировалась работа пускового органа (без реле времени и, как следствие, без выдержки времени) токовой защиты нулевой последовательности (ТЗНП, ZSCP) высоковольтной линии. Уставка срабатывания была выставлена аналогичной уставке 4-й ступени токовой направленной защиты нулевой последовательности (ТНЗНП) линии Оленегорск–Мончегорск:  $3I_0 = 150$  А. Коэффициент трансформации выбран из условия соответствия вторичного тока рабочему диапазону реле 0.15–0.6 А и составляет 1000/1.

На рис. 4 показана схема опытов с реле РТ-40. На входе реле формировался ток ТТ нулевой последовательности. При достижении уставки реле замыкалось и на осциллографе регистрировалось возникающее на ограниченном резисторе напряжение, что обеспечивало визуализацию срабатывания реле.



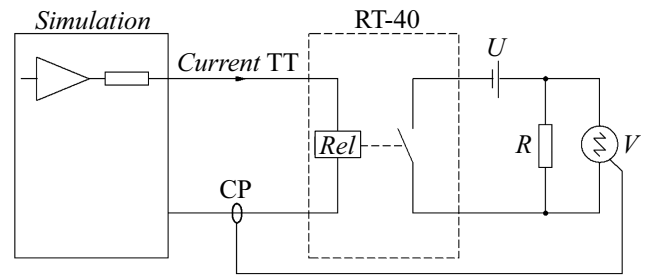
**Рис. 2.** Схема модели в программе PSCAD.  $T1, T2, T3$  — идеальные трехфазные трансформаторы (модель без учета насыщения сердечника);  $T4.1–T4.3$  — группа однофазных автотрансформаторов типа АОДЦТН 167000/500/230/10.5 (модель с учетом насыщения сердечника);  $J1$  — источник тока; PI Section — линия электропередачи;  $G1$  — генератор.



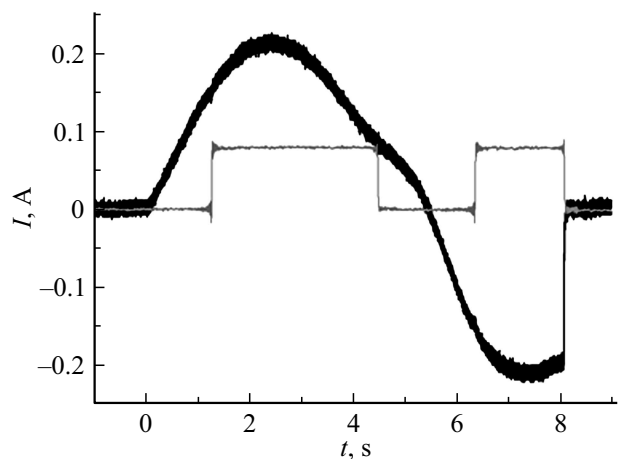
**Рис. 3.** Токи в цепи высокого (HV), среднего (MV) напряжения и третичной обмотки (LV) автотрансформатора  $T4.1$ , приведенные к стороне HV.

На рис. 5 представлена осциллограмма сформированного тока ТТ в нейтрали, а также дискретный сигнал, отображающий пуски ТЗНП (без выдержки времени).

Из рис. 5 видно, что по достижению уставки срабатывания (0.15 А) в момент времени  $t = 1.3$  s происходит пуск реле ТЗНП. Согласно логике работы противоаварийной автоматики, срабатывание ТЗНП и, как следствие, отключение линии должно произойти после выдержки времени  $\Delta t = 2.2$  s в момент  $t = 3.5$  s. После отключения линии через  $\sim 2$  s при  $t \approx 5.5$  s последует запуск автоматического повторного включения (АПВ), после которого линия будет возвращена в работу. При последующем снижении тока нулевой последовательности до значения тока возврата ( $\approx 0.1$  А) реле замыкается. Отсюда можно заключить, что срабатывание ТЗНП в эксперименте с реле РТ-40 хорошо согласуется с действием ТЗНП на линии Оленегорск–Мончегорск [3]. Следует отметить, что в экспериментах реле запускается еще раз — при  $t = 6.4$  s.



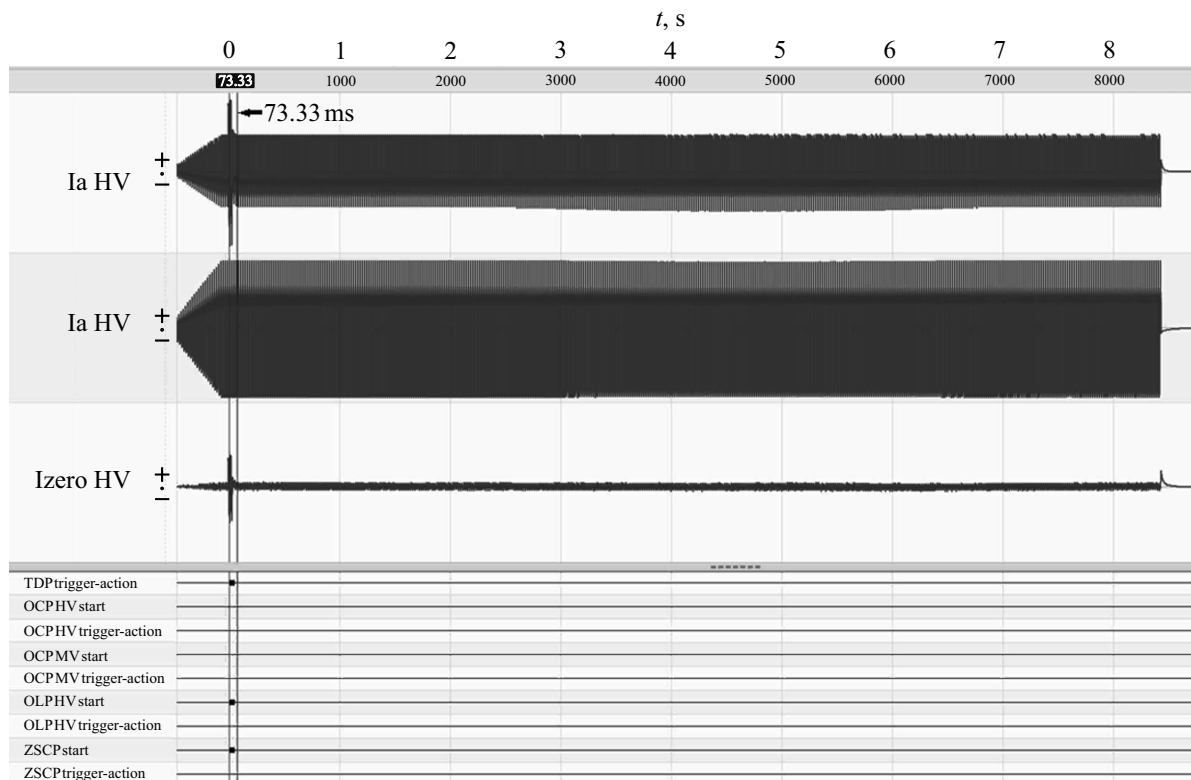
**Рис. 4.** Схема опытов с реле РТ-40.  $U$  — источник напряжения (1.5 В);  $R$  — ограничительный резистор (1 кОм);  $V$  — цифровой осциллограф;  $CP$  — токовые клещи.



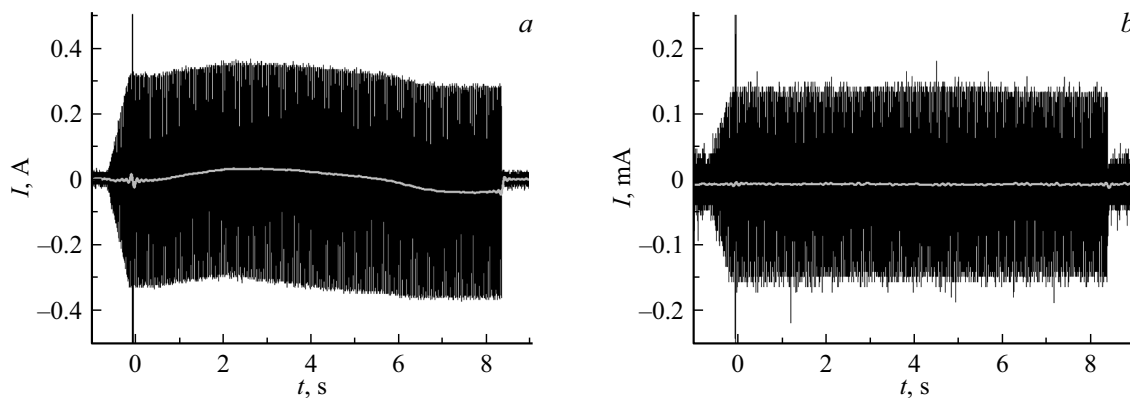
**Рис. 5.** Ток ТТ в нейтрали (черная кривая) и сигнала срабатывания реле РТ-40 (серая кривая).

## 2.2. Эксперименты с МУРЗ БЭ 2704 V041

Устройство БЭ 2704 V041 имеет модульное построение в виде отдельных конструктивных блоков — плат



**Рис. 6.** Токи в фазах (1-я и 2-я строки), в нейтрали (3-я строка) автотрансформатора, логические сигналы срабатывания защит (с 4-й по 12-ю строки).



**Рис. 7.** Осциллограммы тока в первичной (а) и во вторичной (b) цепях измерительного трансформатора МУРЗ БЭ2704 V542 (черные графики — полные токи; серые — низкочастотные компоненты).

центрального процессора, аналого-цифрового преобразователя, входов аналоговых (через вторичные измерительные трансформаторы) и дискретных сигналов, а также выходных электромагнитных реле [9].

В МУРЗ БЭ 2704 V041 реализован следующий набор токовых защит: дифференциальная защита трансформатора (ДЗТ, TDP), максимальная токовая защита (МТЗ, OCP), защита от перегрузки (ЗП, OLP) и ТЗНП. Уставки их срабатывания, кроме ТЗНП, были заданы по аналогии с уставками токовых защит на действующей подстанции в Нижегородской области и приведены в таблице. Коэффициент трансформации ТТ

со сторон ВН, СН и в нейтрали составляет 2000/1. Уставки ТЗНП выбраны как у 4-й ступени ТНЗНП высоковольтной линии Оленегорск–Мончегорск.

Для имитации функционирования МУРЗ в электрической сети на его токовых входах посредством программно-аппаратного симулятора формировались трехфазные токи ТТ со сторон ВН и СН автотрансформатора. Регистрация реакции МУРЗ обеспечивалась с помощью встроенной в МУРЗ функции „аварийный осциллограф“. Реализация такой возможности потребовала принудительного запуска аварийного осциллографа. Для этого в начало подаваемого на МУРЗ сигнала

Уставки срабатывания МУРЗ БЭ 2704 V041

$I_{nom}$ ВН, А	$I_{nom}$ СН, А	Уставки срабатывания токовых защит, А				
		МТЗ ВН	МТЗ СН	ТЗНП ВН	ДЗТ	ЗП ВН
578	1258	$I_{SCCT} = 1.13$ (линия) $\Delta t = 7.3$ s	$I_{SCCT} = 1.39$ (линия) $\Delta t = 7$ s	$I_{SCCT} = 0.075$ $\Delta t = 2.2$ s	$I_{dif}/I_{base} = 0.42$ $k_{br} = 0.5$ $I_{br}/I_{base} = 2.3$ $I_{2h}/I_{1h} = 0.15$ $\Delta t = 0$	$I_{SCCT} = 0.33$ $\Delta t = 10$ s

Примечание.  $\Delta t$  — выдержка времени;  $I_{base}$  — базовый ток, равный  $I_{nom}$  ВН автотрансформатора;  $I_{dif}$  — дифференциальный ток;  $k_{br}$  — коэффициент торможения;  $I_{br}$  — ток торможения;  $I_{1h}$  и  $I_{2h}$  — первая и вторая гармоники тока соответственно.

вставлен участок в два периода с увеличенной амплитудой, следствием чего являлись кратковременные запуски и срабатывания ряда защит, которые далее в рассмотрение не принимались. На рис. 6 представлены соответствующие осциллограммы токов и логических сигналов срабатывания защит.

Из рис. 6 видно, что, в отличие от опытов с реле РТ-40, квазипостоянный ток в нейтрали отсутствует, какие-либо пуски и соответственно срабатывания защит, в том числе ТЗНП, не происходят.

Следует отметить, что в отличие от РТ-40 аналоговые сигналы в устройство БЭ2704 V542 входят через вторичные измерительные трансформаторы. Измеренное сопротивление их вторичных обмоток составляет 57  $\Omega$ , индуктивность — 5 Н, импеданс на основной гармонике — примерно 1.5 к $\Omega$ . Эти трансформаторы могут не пропускать низкочастотные сигналы, что является причиной несрабатывания ТЗНП.

Для исследования этого эффекта были выполнены соответствующие измерения. Ток в первичной цепи трансформатора регистрировался токовыми клещами, а для измерения вторичного тока в разрыв цепи включался шунт с сопротивлением 200  $\Omega$ . Номинал шунта подбирался с целью минимизации искажения тока, вызванного подключением дополнительного сопротивления в измерительный контур МУРЗ, и необходимостью получения измеряемого сигнала с уровнем как минимум 10 мV для осуществления его корректной осциллографической регистрации. На рис. 7 представлены результаты измерений. Видно, что постоянная составляющая, присутствующая в первичной цепи трансформатора, во вторичной отсутствует.

## Заключение

1. С использованием расчетно-экспериментальной технологии имитации работы устройств релейной защиты в электрической сети исследовано функционирование типичных отечественных электромеханического и микропроцессорного устройств РЗ при воздействии ГИТ, вызываемых магнитными бурями. В качестве исходных данных использован сигнал в токовой направленной защите нулевой последовательности тока, зарегистрированный во время магнитной бури

24 ноября 2001 г. в ВЛ 330 кV Оленегорск–Мончегорск, что привело к ее отключению.

2. Показано, что воздействие ГИТ:

— вызывает срабатывание реле ТЗНП, аналогично событию на ЛЭП 330 кV Оленегорск–Мончегорск, что подтверждает адекватность имитационного моделирования;

— не приводит к срабатыванию реализованных в МУРЗ защит, в том числе, ТЗНП, по причине блокировки ГИТ вторичными измерительными трансформаторами МУРЗ.

3. Обнаруженные особенности работы электромеханических и микропроцессорных устройств РЗ необходимо принимать во внимание при экстраполяции исторических аварийных событий в ЭЭС, произошедших по причине воздействия ГИТ, моделировании воздействия ГИТ на ЭЭС, а также разработке соответствующих методов и средств защиты.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] O. Sokolova, N. Korovkin, M. Hayakawa. *Geomagnetic Disturbances Impacts on Power Systems Risk Analysis and Mitigation Strategies* (CRC Press, 2021)
- [2] В.А. Пилипенко. Солнечно-земная физика, 7(3), 72 (2021). DOI: 10.12737/szf-73202106
- [3] В.И. Пуляев, Ю.В. Усачев. Энергетик, 7, 18 (2002).
- [4] L. Bolduc, P. Langlois, D. Boteler, R. Pirjola. IEEE Transactions on Power Delivery, 15(1), 272 (2000). DOI: 10.1109/61.847262
- [5] J.G. Kappenman. Space Weather, 3(8), SO8C01 (2005). DOI: 10.1029/2004SW000128
- [6] A. Pulkkinen, S. Lindal, A. Viljanen, R. Pirjola. Space Weather, 3(8), SO8C03 (2005). DOI: 10.1029/2004SW000123
- [7] M. Wik, R. Pirjola, H. Lundstedt, A. Viljanen, P. Wintoft, A. Pulkkinen. Ann. Geophys., 27(4), 1775 (2009). DOI: 10.5194/angeo-27-1775-2009
- [8] Н.В. Чернобровов. *Релейная защита. Учебное пособие для техникумов. Изд. 4-е, перераб. и доп.* (Энергия, М., 1971)
- [9] Н.И. Овчаренко. *Микропроцессорная релейная защита и автоматика линий электропередачи ВН и СВН. Ч. 1* (НТФ „Энергопрогресс“, М., 2007)