

Симулятор для экспериментального моделирования работы устройств релейной защиты высоковольтных электросетей в условиях воздействия геоиндуцированных токов

© А.А. Тренькин,¹ А.Б. Буянов,¹ Е.П. Грабчак,² С.В. Воеводин,¹ А.В. Лимонов¹

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

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

Поступило в Редакцию 23 марта 2024 г.

В окончательной редакции 31 июля 2024 г.

Принято к публикации 8 июля 2024 г.

Разработан мобильный симулятор для экспериментального моделирования работы устройств релейной защиты в структуре сети высокого и сверхвысокого классов напряжения в условиях воздействия геоиндуцированных токов. Симулятор по исходной цифровой сигнатуре позволяет воспроизводить на входах устройств релейной защиты токи в диапазоне частот от 0 до 50 kHz, имитирующие сигналы с измерительных трансформаторов тока. Симулятор выполнен на легко доступной элементной базе, вес оборудования составляет 20 kg, питание осуществляется от электросети 220 V/50 Hz, потребляемая мощность — не более 1.6 kW. Исходными сигналами для симулятора могут быть токи, регистрируемые на действующих электроэнергетических объектах, а также полученные в результате расчетного моделирования работы энергосистем или заданные в виде стандартов.

Ключевые слова: релейная защита высоковольтных электросетей, имитация воздействия, геоиндуцированный ток.

DOI: 10.61011/JTF.2024.11.59108.98-24

Введение

Задача исследования влияния магнитных бурь на работу объектов и систем электроснабжения является весьма актуальной в связи с опасностью развития аварийных ситуаций в электроэнергетических системах (ЭЭС) в периоды геомагнитной активности [1–3]. Такого рода аварии с высоким экономическим ущербом случаются периодически, например, в 1989 и 2003 гг. в Северной Америке и Северной Европе [1,2,4–6]. Значимость указанной проблемы возрастает с развитием ЭЭС — ростом нагрузки, усложнением структуры, повышением класса напряжения объектов, электрификацией северных территорий.

Во время геомагнитных бурь в земной коре возникают низкочастотные (порядка 10 mHz) геоиндуцированные токи (ГИТ), которые втекают в глухозаземленные нейтралы силовых трансформаторов и вызывают их подмагничивание. В результате этого происходит значительное увеличение тока намагничивания, рост потребляемой трансформаторами реактивной мощности, чрезмерная генерация высших гармоник [1–3]. Помимо других негативных последствий, воздействие ГИТ может являться причиной неправильной работы систем релейной защиты и автоматики (РЗА), поскольку на их входы поступают искаженные присутствием ГИТ сигналы токов и напряжений, что, в свою очередь, способно иницииро-

вать аварийные ситуации [4,7,8]. Так, ложные действия РЗА вызвали развитие крупной системной аварии в ЭЭС Гидро-Квебек в Северной Америке во время магнитной бури в марте 1989 г. [4]. В Российской Федерации в ноябре 2001 г. наблюдалось аварийное отключение воздушной линии 330 kV Оленегорск–Мончегорск действием РЗА при воздействии ГИТ [8].

В последнее время в процессе технологической трансформации электроэнергетики электромеханические реле, на базе которых ранее выполнялись устройства РЗА, стремительно уступают место микропроцессорным устройствам релейной защиты (МУРЗ). Последние могут обладать специфическими особенностями реакции на воздействие ГИТ [9], что обуславливает актуальность соответствующих исследований.

Исследования особенностей работы РЗА в условиях воздействия на электрическую сеть ГИТ является непростой научно-технической задачей. Для этого, как минимум, необходимо наличие сигнатур сигналов токов и напряжений, ожидаемых на выходах измерительных трансформаторов, и аппаратных средств их подачи на входы блоков РЗА. Сигнатуры могут быть получены либо в процессе регистрации сигналов на действующих энергетических объектах в период геомагнитной активности, либо в результате имитационного моделирования воздействия ГИТ на модель ЭЭС, в структуре

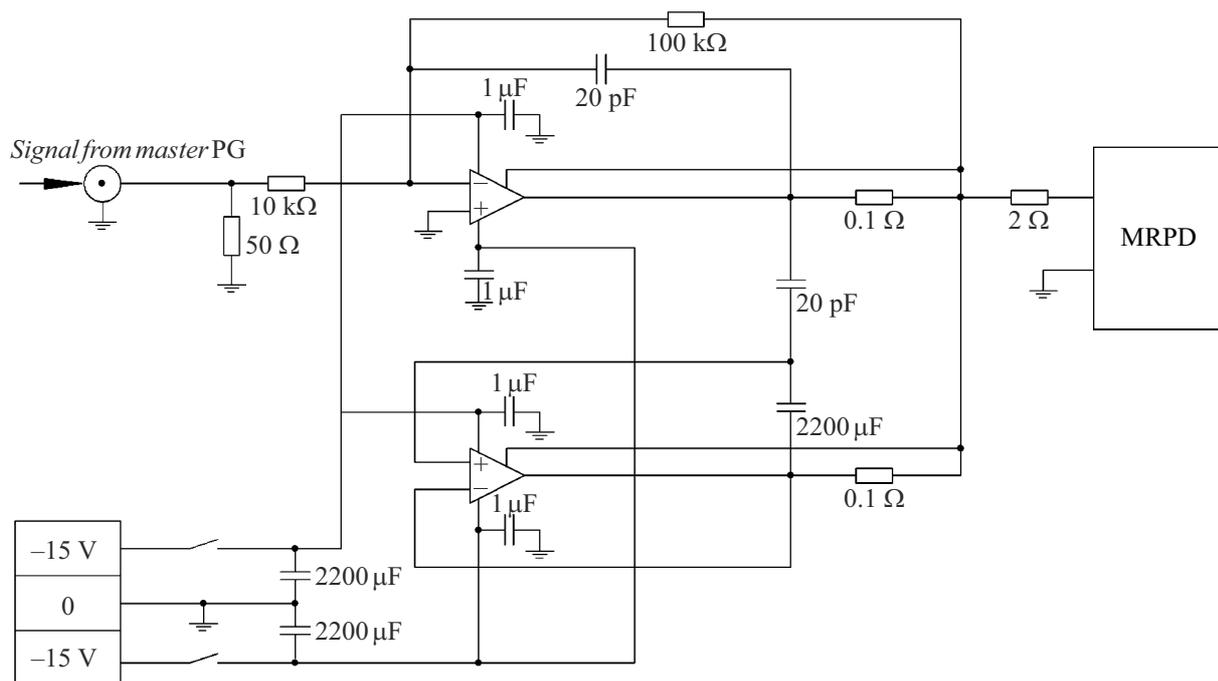


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема канала усилителя. MRPD — микропроцессорное устройство релейной защиты.

которой функционируют исследуемые РЗА. Также для систематического тестирования РЗА и другого электроэнергетического оборудования представляется целесообразным разработка и использование образцовых сигналов, аналогично Североамериканскому стандарту, регламентирующему обеспечение стойкости объектов и систем электроснабжения к воздействию интенсивных геомагнитных возмущений [10].

Наиболее мощным инструментом для моделирования процессов в ЭЭС, в том числе в режиме реального времени, является программно-аппаратный комплекс компании RTDS Technologies Ltd (Канада). Основное его достоинство заключается в возможности включения реальных устройств в модель ЭЭС в условиях замкнутой цепи взаимодействия по входным и выходным электрическим сигналам, что позволяет использовать комплекс для испытаний и сертификации релейного оборудования и ряда других устройств [11,12].

Однако, помимо высокой стоимости, в текущих условиях санкционной политики работа этих комплексов в России производителем не поддерживается. К тому же, во многих случаях отсутствует необходимость в использовании столь сложных информационно-технических средств, например, когда имеется типовая сигнатура сигнала и необходимо определить реакцию ряда блоков РЗА. В этой связи актуальной задачей является разработка относительно простого и недорогого устройства, обеспечивающего на входах блока РЗА формирование по заданной цифровой сигнатуре сигналов, ожидаемых при воздействии ГИТ на электрическую сеть. В на-

стоящей работе представлен результат разработки и апробации такого устройства — симулятора.

1. Описание симулятора

Симулятор содержит набор стандартных генераторов сигналов произвольной формы (в текущем оснащении это пять двухканальных генераторов с частотой до 60 МГц), синхрогенератор (стандартный генератор прямоугольных импульсов) и два идентичных шестиканальных блока усилителей тока. Блоки выполнены на основе низкочастотных операционных усилителей ОРА 541 РА, работающих по схеме усиления напряжения на постоянную активную нагрузку с номиналом 2 Ω. Принципиальная электрическая схема одного канала усилителя приведена на рис. 1.

Запитка усилителей обеспечивается десятью компактными независимыми источниками двуполярного напряжения $\pm 15\text{ В}$ с общей номинальной мощностью 1.5 кВт. Отдельный источник представляет собой последовательную сборку из двух однополярных серийно выпускаемых источников питания.

Оборудование симулятора размещается в единой подвижной стойке (рис. 2).

В МУРЗ двухобмоточных силовых трансформаторов, как правило, задействовано шесть аналоговых токовых входов: по три входа для подключения трансформаторов тока трех фаз со сторон обмоток высокого и низкого напряжений. Поэтому для имитации работы МУРЗ двухобмоточных трансформаторов требуется шесть каналов и соответственно включение одного блока усилителей.

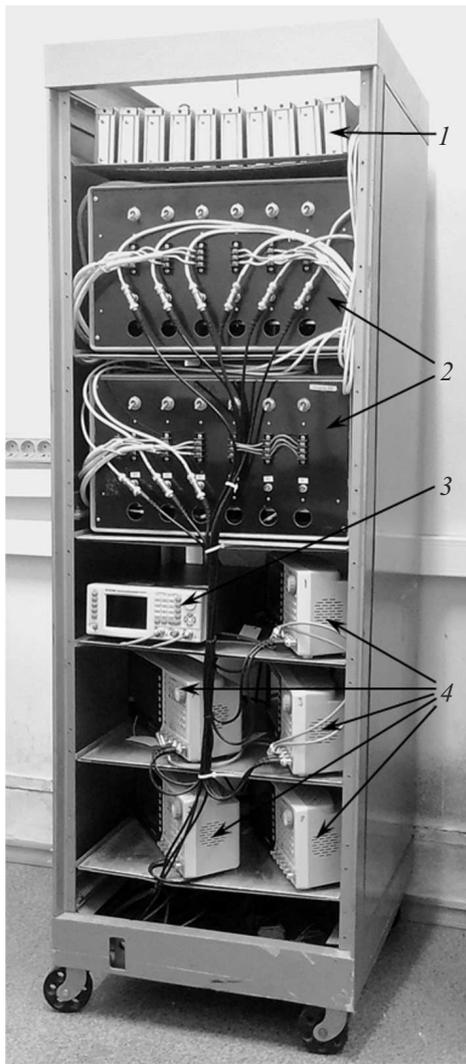


Рис. 2. Оборудование симулятора в подвижной стойке: 1 — источники питания усилителей, 2 — блоки усилителей тока, 3 — синхрогенератор, 4 — генераторы сигналов произвольной формы.

Второй блок необходим для формирования дополнительных сигналов, например, имитирующих работу МУРЗ трех- и четырехобмоточных силовых трансформаторов. На рис. 3 отображена структурная схема симулятора с шестью каналами.

Симулятор работает следующим образом. В заданный момент времени оператор запускает синхрогенератор *A1*, который по линиям связи выдает общий сигнал запуска для генераторов *A2–A4*. Получив такой сигнал, генераторы воспроизводят на своих выходах аналоговые сигналы напряжения, соответствующие предварительно записанным в память исходным сигнатурам. Далее сигналы напряжения транслируются на входы блока усилителей *A5*. Усилители преобразуют эти сигналы в идентичные по форме токи, которые передаются на входы исследуемого устройства защиты. Величины этих

токов регулируются амплитудами выходных сигналов генераторов *A2–A4*.

2. Апробация симулятора

Симулятор применялся в исследованиях работы ряда отечественных устройств релейной защиты в условиях воздействия геоиндуцированного тока на электрическую сеть сверхвысокого класса напряжения. В частности, в испытаниях участвовали электромеханические реле РТ-40 и РТ-140 (ЗАО „ЧЭАЗ“), а также микропроцессорные устройства релейной защиты силовых трансформаторов БЭ 2704 V041 и БЭ 2704 V542 (ООО НПП „ЭКРА“), „Сириус-УВ-1А-220В-И1“ и „Сириус-Т-1/1-220В-И1“ (ЗАО „РАДИУС Автоматика“). В качестве примера работы симулятора ниже представлены осциллограммы сформированных им токов на входах реле РТ-40 и МУРЗ БЭ 2704 V041. Исходные сигнатуры были получены в результате расчетного моделирования функционирования Объединенной энергосистемы Северо-Запада при аварийном отключении ее воздушной линии 330 kV Оленегорск–Мончегорск токовой защитой нулевой последовательности (ТЗНП) во время магнитной бури в ноябре 2001 г. [9]. При этом следует отметить, что устройство БЭ 2704 V041 ввиду схожего схмотехнического исполнения и логики работы с МУРЗ линий, в том числе по мнению экспертов НИУ „МЭИ“, можно использовать в данных исследованиях для реализации основных защит линий, включая ТЗНП.

На рис. 4 приведены исходный сигнал и осциллограмма входного тока реле РТ-40, выполняющего функцию ТЗНП, а также дискретный сигнал, отображающий пуск данной защиты. Уставка срабатывания реле устанавливалась как у ТЗНП воздушной линии 330 kV Оленегорск–Мончегорск [8].

На рис. 4 видно, что формы тока симулятора и исходного сигнала практически идентичны. Также можно отметить, что, согласно логике работы противоаварийной автоматики, срабатывание ТЗНП и, как следствие, отключение защищаемого объекта должно произойти после заданной выдержки времени в момент $t = 3.5$ s. Данное срабатывание согласуется с действием ТЗНП при аварийном отключении воздушной линии Оленегорск–Мончегорск [8].

На рис. 5 представлен исходный сигнал и осциллограмма тока, сформированного симулятором на входе МУРЗ БЭ 2704 V041. Данный ток является вторичным током измерительного трансформатора, установленного в фазе распределительной подстанции.

На осциллограммах рис. 5 видно, что исходный сигнал и ток симулятора практически не отличаются друг от друга. Также на осциллограммах в момент времени $t = 0$ присутствует кратковременный бросок тока. Этот бросок добавлен в сигналы искусственно и необходим для принудительного запуска встроенного в МУРЗ „аварийного“ осциллографа, позволяющего регистрировать

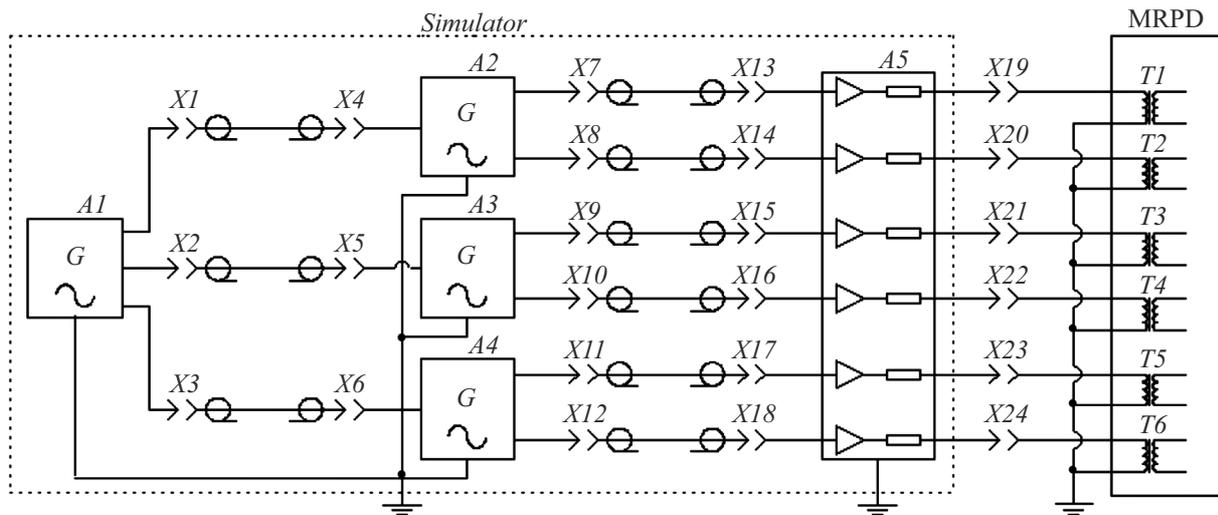


Рис. 3. Структурная схема симулятора: *A1* — синхροгенератор; *A2–A4* — генераторы сигналов произвольной формы; *A5* — блок усилителей; *X1–X24* — точки подключения линий связи; *T1–T6* — вторичные измерительные трансформаторы МУРЗ.

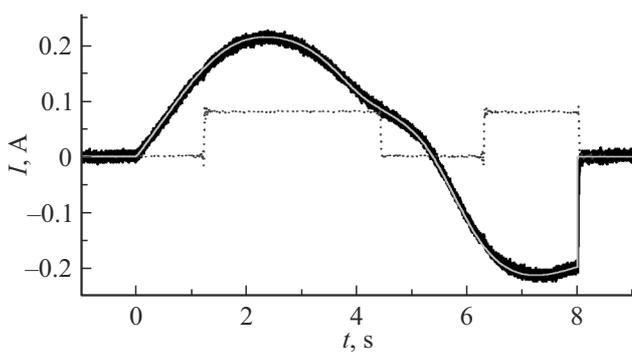


Рис. 4. Исходная сигнатура (серая сплошная линия), ток симулятора (черная линия), сигнал пуска ТЗНП (темно-серая пунктирная линия).

входные токи и выходные логические сигналы срабатывания реле защит. Бросок тока и сопутствующие ему срабатывания защит в рассмотрение не принимаются.

На рис. 6 представлены „аварийные“ осциллограммы фазных токов подстанции и логических сигналов срабатывания защит МУРЗ. Ток нулевой последовательности вычисляется устройством как сумма соответствующих фазных токов.

На рис. 6 видно, что в отличие от эксперимента с реле РТ-40, какие-либо пуски и соответственно срабатывания защит в том числе ТЗНП не происходят. В статье [9] показано, что данный факт обусловлен блокировкой низкочастотного ГИТ вторичными измерительными трансформаторами, установленными внутри МУРЗ.

Также проведен фурье-анализ исходного сигнала и тока, сформированного симулятором на входе МУРЗ. На рис. 7 представлены частотные спектры этих сигналов.

Относительные величины соответствующих гармоник исходного сигнала и тока симулятора отличаются менее

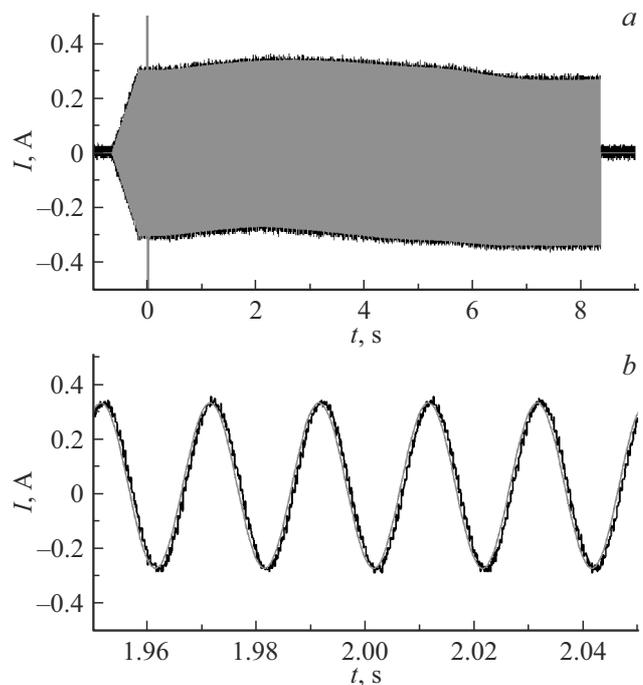


Рис. 5. Исходный сигнал (серый) и ток симулятора (черный) (*a*) и их развертки (*b*) в интервале времени $1.95 \leq t \leq 2.05$ s.

чем на 4%, что свидетельствует о хорошей точности воспроизведения исходных сигналов посредством разработанного симулятора.

Заклучение

1. Разработан мобильный симулятор для исследования функционирования устройств релейной защиты и

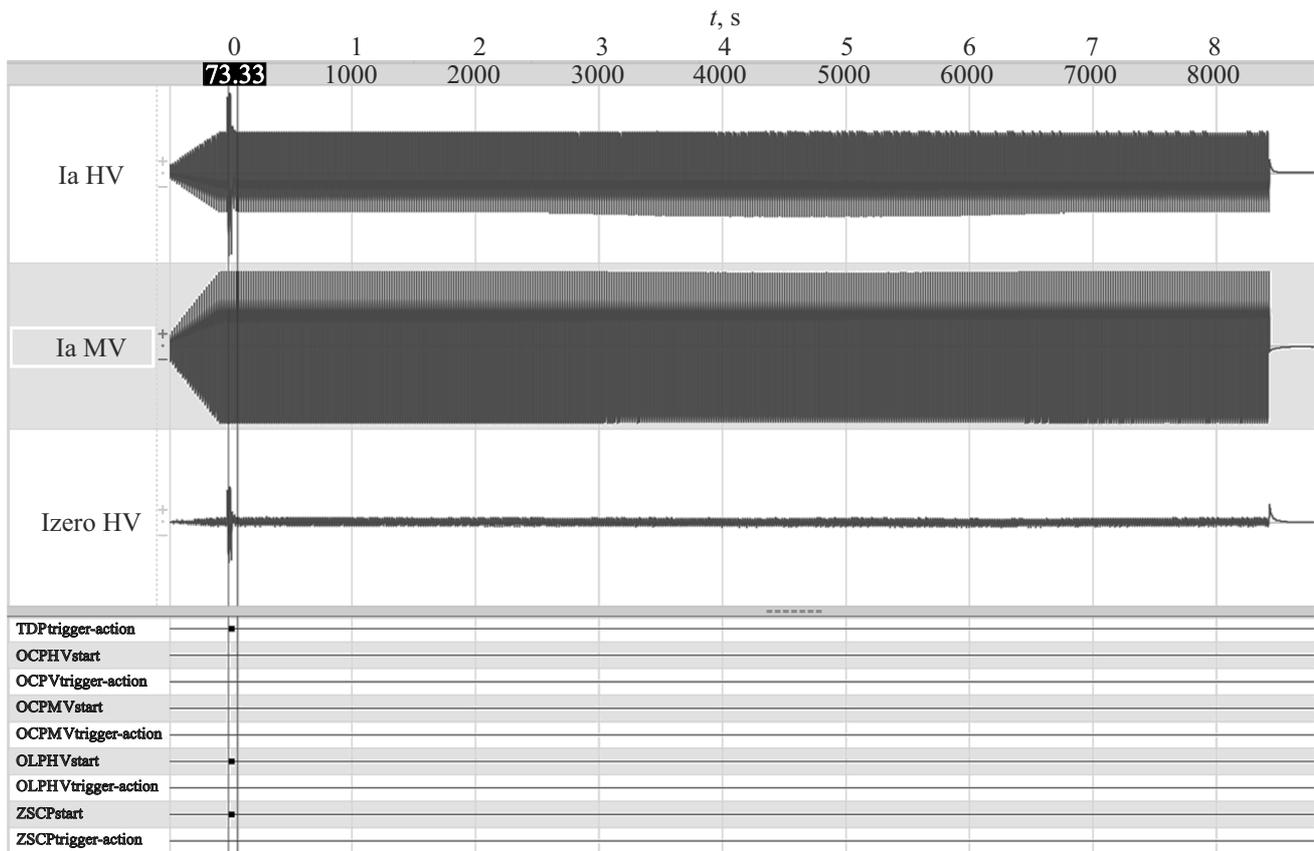


Рис. 6. Токи в фазах (1-я и 2-я строки) со стороны высокого (HV) и среднего (MV) напряжения, в нейтрали (3-я строка) подстанции, логические сигналы пуска (start) и срабатывания (trigger-action) защит (с 4-й по 12-ю строки): TDP — дифференциальная защита, OCP — максимальная токовая защита, OLP — защита по перегрузке, ZSCP — токовая защита нулевой последовательности.

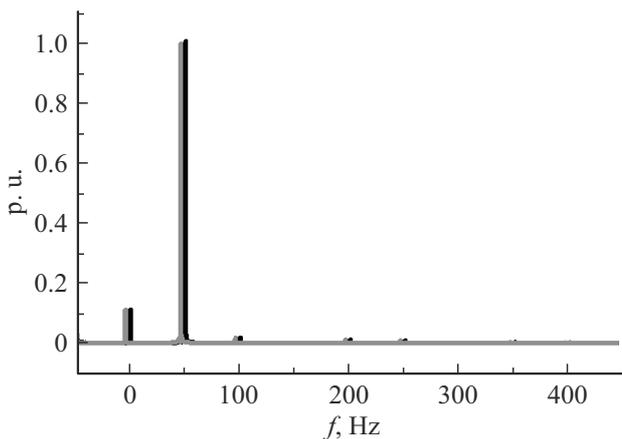


Рис. 7. Спектры исходного сигнала (серый) и тока на входе МУРЗ (черный).

автоматики при воздействии на электрическую сеть геоиндуцированных токов. Симулятор по исходной цифровой сигнатуре сигнала позволяет с хорошей точностью воспроизводить на входах устройств релейной защиты токи в диапазоне частот от 0 до 50 kHz, имитирующие

сигналы с измерительных трансформаторов тока, как в штатном режиме, так и искаженные в результате воздействия геоиндуцированных токов.

2. Симулятор включает в себя синхροгенератор, генераторы сигналов произвольной формы, блоки усилителей тока и источники питания усилителей. Оборудование симулятора может размещаться в единой подвижной стойке размером $0.5 \times 0.5 \times 1.5$ m. Масса оборудования — около 20 kg. Питание осуществляется от сети 220 V/50 Hz, потребляемая мощность — не более 1.6 kW.

3. Исходными сигналами для симулятора могут быть токи, регистрируемые на действующих электроэнергетических объектах, а также полученные в результате расчетного моделирования работы энергосистем или заданные в виде стандартов. Симулятор апробирован в исследованиях работы ряда отечественных электро-механических и микропроцессорных устройств релейной защиты в условиях воздействия геоиндуцированного тока на электрическую сеть сверхвысокого класса напряжения [9]. Данное устройство также может применяться для имитации штатного функционирования РЗА в электрических сетях высокого и сверхвысокого классов напряжения при определении электромагнитной

совместимости в условиях воздействия на РЗА сторонних факторов. Возможны и другие области применения симулятора.

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] А.А. Тренькин, В.В. Вахнина, С.В. Воеводин, О.Н. Коблова, А.А. Кувшинов, В.Д. Селемир, А.Н. Черненко. *Электричество*, **2**, 37 (2023). DOI: 10.24160/0013-5380-2023-2-37-49
- [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), S08C01 (2005). DOI: 10.1029/2004SW000128
- [6] A. Pulkkinen, S. Lindal, A. Viljanen, R. Pirjola. *Space Weather*, **3**(8), S08C03 (2005). DOI: 10.1029/2004SW000123
- [7] В. Сушко, Д. Косых. *Новости электротехники*, **3**(81), (2013).
- [8] В.И. Пуляев, Ю.В. Усачев. *Энергетик*, **7**, 18 (2002).
- [9] А.А. Тренькин, Е.П. Грабчак. *ЖТФ*, **94**(2), 299 (2024). DOI: 10.61011/JTF.2024.02.57086.265-23
- [10] NERC Standard TPL-007-4: Transmission System Planned Performance for Geomagnetic Disturbance Events. March 19, 2020.
- [11] Я.В. Законьшек, А.Л. Славутский. *Релейная защита и автоматизация*, **1**(06), (2012).
- [12] Д.О. Мочалов, Я.В. Законьшек, М.А. Шамис. *Релейная защита и автоматизация*, **1**(10), (2013).