

Электронное реле для защиты силового электрооборудования от воздействия геомагнитно-индуцированных токов ЭМИ ЯВ

Владимир Гуревич (vladimir.gurevich@gmail.com)

В статье рассмотрена проблема геомагнитно-индуцированных токов (ГИТ), возникающих в нейтралях силовых трансформаторов при воздействии электромагнитного импульса ядерного взрыва (ЭМИ ЯВ), и их влияние на силовое электрооборудование энергосистем. Приведено описание разработанного комплекта, состоящего из защитного электронного реле повышенной надёжности и тестера для проверки реле. Разработанные устройства построены на стандартных электронных компонентах и пригодны для массового производства.

ВВЕДЕНИЕ

Защита электрооборудования энергосистем от воздействия электромагнитного импульса высотного (более 30 км) ядерного взрыва (ЭМИ ЯВ) является актуальной проблемой, которой в последнее время уделяется большое внимание [1, 2]. Это связано с тем, что высотный ЯВ не влияет непосредственно на людей, но электромагнитный импульс, образующийся в результате такого взрыва, является мощным разрушительным фактором для электронного оборудования энергосистем и силового электрооборудования.

Как известно, ЭМИ ЯВ состоит из трёх компонентов: E1, E2 и E3. Эти компоненты существенно отличаются друг от друга по своим свойствам и характеристикам, что связано с целым комплексом сложных физических эффектов, возникающих в ионосфере при ЯВ. Например, компонент E1 – это

очень короткий одиночный импульс (2,5/25 нс), создающий очень высокую напряжённость поля у поверхности земли (50 кВ/м). Компонент E3, наоборот, очень медленный колебательный процесс с частотой менее 0,1 Гц, продолжительностью в несколько минут и очень низкой напряжённостью поля, не превышающей 85 В/км [3]. E2 – компонент, очень близкий по своему воздействию к разряду молнии, от которого энергетическое оборудование, как правило, защищено.

В данной статье рассмотрена защита силового электрооборудования энергосистем от компонента E3 ЭМИ ЯВ.

ВОЗДЕЙСТВИЕ КОМПОНЕНТА E3 НА СИЛОВОЕ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ ЭНЕРГОСИСТЕМ

На первый взгляд, проблема защиты от медленных электромагнитных

колебаний с такой низкой напряжённостью, как 85 В/км, может показаться надуманной, но это далеко не так. Дело в том, что данные электромагнитные колебания наводятся в многокилометровых воздушных линиях электропередач (ЛЭП) и замыкаются через цепь, имеющую очень низкое полное сопротивление, например через систему заземления (см. рис. 1). В результате через нейтралы силовых трансформаторов могут протекать геомагнитно-индуцированные квазипостоянные токи (ГИТ) с амплитудой в десятки и сотни ампер. При этом магнитопровод трансформаторов быстро насыщается, а его импеданс, соответственно, снижается. Существенно возрастают рабочие токи, протекающие через его обмотки, и, соответственно, увеличивается нагрев трансформатора. При аналогичных воздействиях на силовые трансформаторы геомагнитно-индуцированных токов во время сильных солнечных бурь в северном полушарии Земли уже зафиксировано несколько случаев перегорания обмоток очень мощных силовых трансформаторов стоимостью в миллионы долларов в Канаде и США. Помимо высокой стоимости таких трансформаторов дополнительными проблемами являются длительные сроки их изготовления и очень сложная транспортировка к месту установки. В связи с этим выход из строя подобных трансформаторов является чрезвычайным происшествием с большими последствиями для энергосистем, и предприятия готовы к существенным затратам на мероприятия, предотвращающие такие ситуации.

Компанией ABB активно продвигается устройство SolidGrid™ для блокировки ГИТ в нейтралях силовых трансформаторов (см. рис. 2). Как можно видеть из рисунка, это устройство представляет собой крупную высоковольтную установку, требующую подготовки довольно большой площадки для монтажа на подстанции. Стоимость устройства составляет около \$300 тыс. Изна-

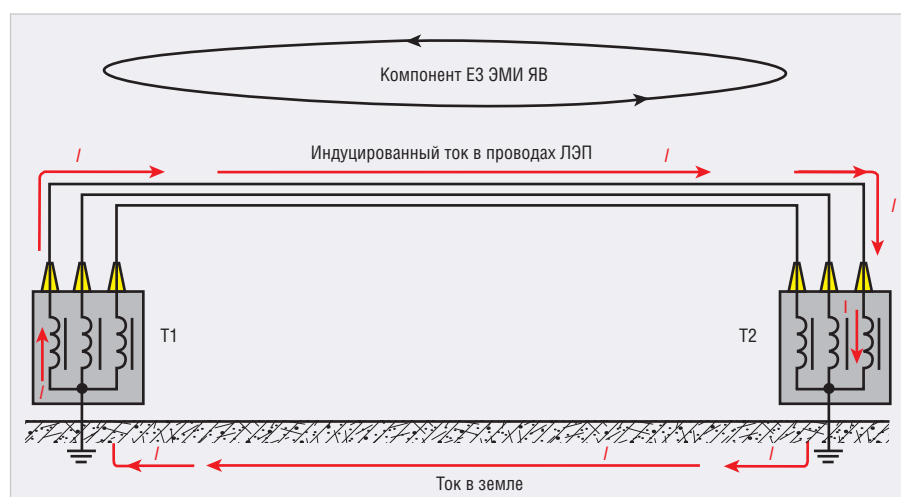


Рис. 1. Протекание геомагнитно-индуцированных токов (ГИТ) через нейтралы силовых трансформаторов T1 и T2

чально это устройство разрабатывалось для блокировки ГИТ при сильных солнечных бурях, которые могут продолжаться в течение многих часов. Позже эту установку начали предлагать и в качестве основного средства защиты от компонента ЕЗ ЭМИ ЯВ [4, 6] длительно-стью несколько минут. Однако напряжённость поля от этого компонента – 85 В/км, это близкое к максимально возможному значение, зависящее от множества внешних факторов (географического расположения трансформаторов и ЛЭП, сопротивления системы заземления, свойств грунтов, конструкции магнитной системы трансформаторов и т.п.), и поэтому ГИТ в нейтрали трансформатора совсем не обязательно принимает значения в сотни ампер. При наиболее вероятных токах, составляющих десятки ампер, силовой трансформатор, содержащий десятки тонн железа, меди и масла, просто не успевает нагреться до опасной температуры (см. рис. 3). Так, может быть, и проблемы вовсе не существует, и ГИТ, возникающими под действием компонента ЕЗ, можно просто пренебречь?

Во-первых, вероятность возникновения ГИТ большой амплитуды всё же существует при определённом сочетании внешних факторов. Во-вторых, силовой трансформатор с насыщенным магнитопроводом является мощным источником гармоник, генерируемых в сеть (см. рис. 4). Предельно допустимое значение суммарного коэффициента гармонических искажений для высоковольтных сетей с напряжением 160 кВ и выше составляет 1,5% [8]. Эти гармоники отрицательно воздействуют на многие виды электрооборудования, включённого в сеть, например на конденсаторные установки поперечной и продольной ёмкостной компенсации, устройства релейной защиты и т.д. Как поведёт себя это электрооборудование в реальных условиях под воздействием компонента ЕЗ неизвестно, однако, учитывая возможный ущерб, следует всё же признать целесообразным принятие превентивных мер. Неужели чрезвычайно дорогой и громоздкой установке, предлагаемой АВВ, не существует никакой альтернативы?

Предлагаемое решение проблемы

Решение проблемы защиты силового электрооборудования энергосистем от компонента ЕЗ ЭМИ ЯВ было



Рис. 2. Устройство SolidGround™ компании АВВ (слева) для блокировки ГИТ в нейтрали силового трансформатора

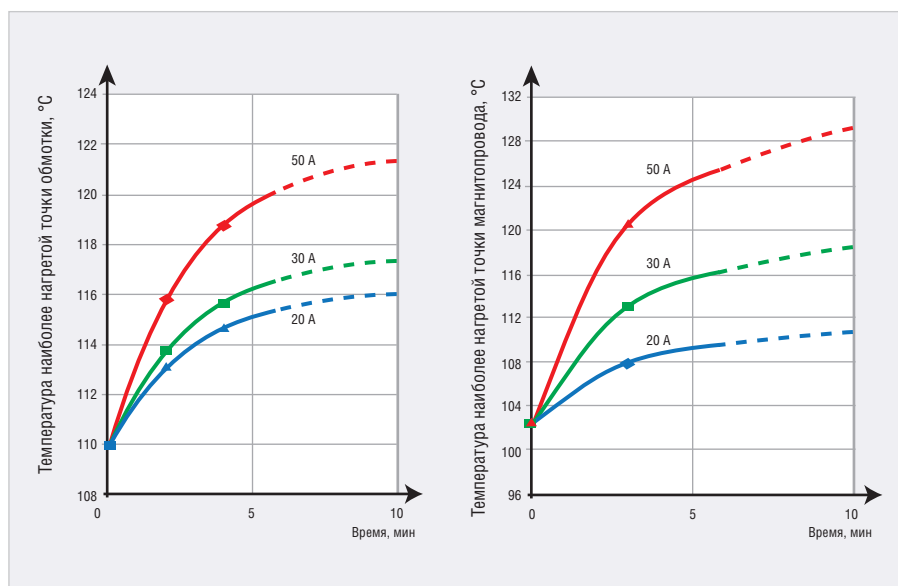


Рис. 3. Графики нагрева обмотки и магнитопровода силового трансформатора при протекании в его нейтрали геомагнитных токов величиной 20, 30 и 50 А

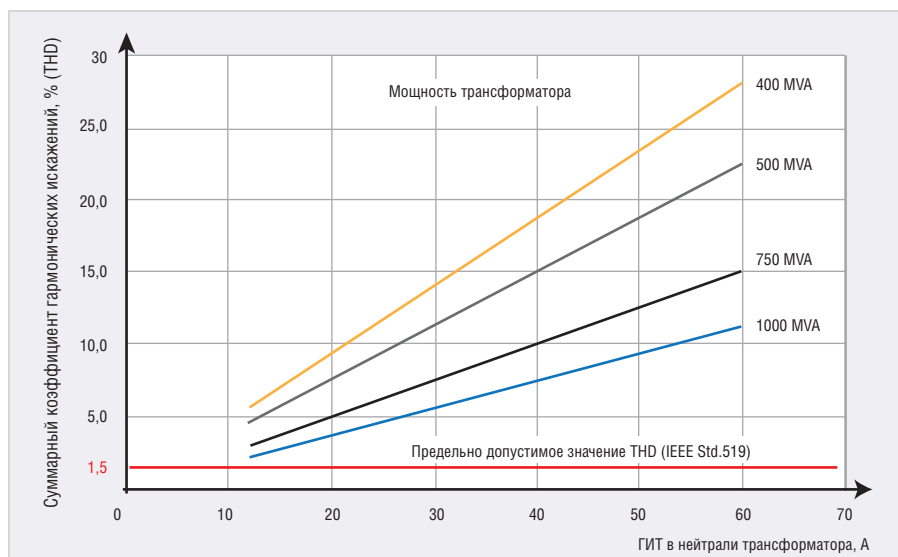


Рис. 4. Зависимость суммарного коэффициента гармонических искажений от величины ГИТ в нейтрали [7]

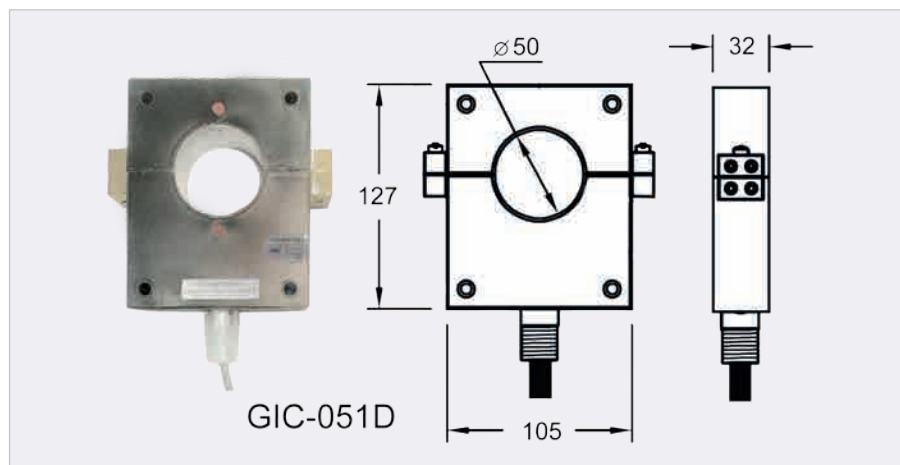


Рис. 5. Датчик ГИТ типа GIC-051D компании Ohio Semitronics, Inc. (размеры в мм)

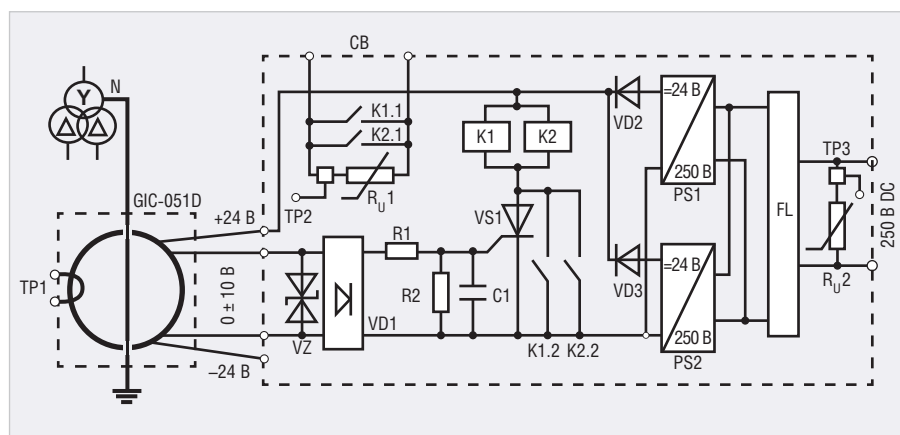


Рис. 6. Принципиальная схема электронного реле защиты силового трансформатора от компонента ЕЗ ЗМИ ЯВ

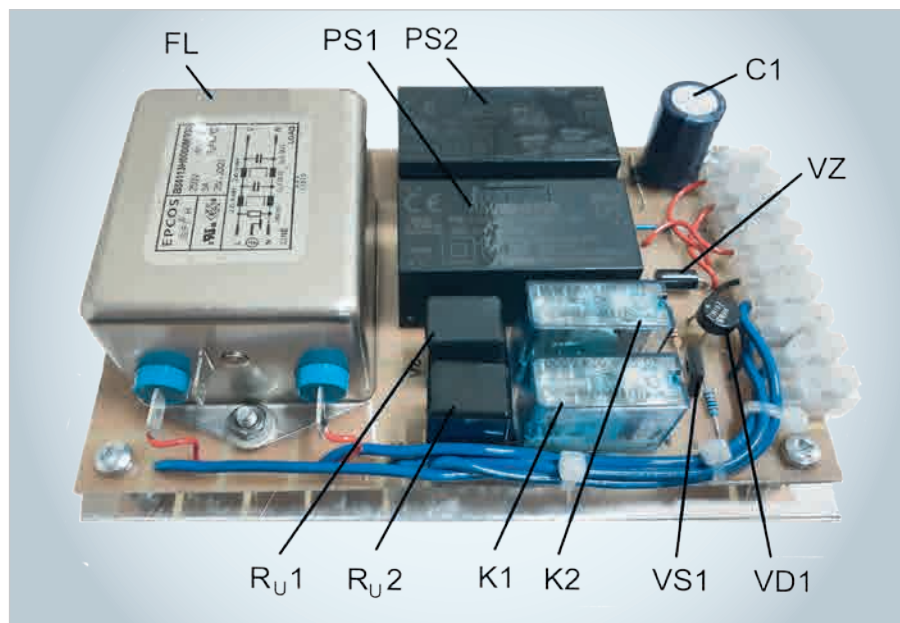


Рис. 7. Опытный образец электронного реле защиты силового трансформатора

предложено автором данной статьи ещё в 2011 году [9, 10]. Принцип действия такой защиты заключается в кратковременном отключении силового трансформатора при выявлении ГИТ в его нейтрали с последующим возвра-

том в рабочее состояние после паузы в несколько минут (то есть по окончании воздействия компонента ЕЗ). В статьях [9, 10] в качестве примера реализации такого принципа приведено описание защитного реле на основе

магнитоуправляемого контакта (геркона), снабжённого специальной магнитной системой, реагирующей на постоянный ток в заземляющем нейтраль трансформатора кабеле и не реагирующей на переменную составляющую тока. Однако такая конструкция защитного реле слишком сложна в реализации и требует довольно сложной индивидуальной настройки и подбора номиналов компонентов, что ставит под вопрос возможность массового производства данного прибора. В этой связи было разработано новое электронное реле для защиты трансформаторов, пригодное для массового производства и удобное для практического применения в энергосистемах. Реле состоит из датчика ГИТ, выполненного в виде разборного трансформатора тока, надеваемого на кабель заземления нейтрали, и специального реле, срабатывающего от сигнала этого датчика. В комплект устройства входит также тестер для периодической проверки исправности защитного реле непосредственно в месте его установки путём симуляции ГИТ.

В качестве датчика ГИТ выбрано устройство типа GIC-051D (см. рис. 5) компании Ohio Semitronics, Inc., как наиболее подходящее по параметрам и одновременно доступное по цене (\$650). Датчик надевается на кабель заземления нейтрали трансформатора и выдаёт выходное напряжение от нуля до 10 В лишь при квазипостоянном токе в этом кабеле с амплитудой от нуля до 50 А любого направления с частотой от нуля до 1,5 Гц. То есть датчик не реагирует на переменный ток частотой 50 Гц. При этом он выдерживает токи короткого замыкания в кабеле до 8 кА. Погрешность датчика составляет 0,5% от полного тока, т.е. 0,25 А. Датчик включён на вход разработанной электронной схемы реле повышенной надёжности (см. рис. 6). Схема содержит два параллельно включённых источника питания PS1 и PS2 (RAC20-24SK), два параллельно включённых выходных реле K1 и K2 (Finder 40.52.9.024.000), высоковольтный тиристор VS1 (C106M), варисторы RU1 и RU2 (T14 K300E2) на входе и выходе схемы со встроенными термозащитными элементами и высокоэффективный помехоподавляющий фильтр FL (EPCOS SIFI-H) на входе схемы. Тиристор VS1 снабжён эффективной помехоподавляющей цепью R2 и C1 с временной задержкой и шунтируемый после отпирания контактами реле.

На рисунке 7 показан опытный образец реле. Результаты испытаний приведены на рисунке 8.

В обычном режиме работы энергосистемы в кабеле заземления нулевой точки звезды силового трансформатора может протекать лишь переменный ток. При высотном ядерном взрыве в кабеле возникает постоянная составляющая тока (компонент ЕЗ), которая вызывает появление напряжения на выходе датчика GIC-051D, пропорционального этому току. При величине тока, превышающей 20 А, выходное напряжение датчика становится достаточным для отпирания тиристора VS1. Порог отпирания тиристора выбран фиксированным, без возможности его изменения с помощью подстроечного элемента, т.к. это ухудшило бы надёжность реле. Порог определяется величиной сопротивления резистора R2.

Отпирание тиристора приводит к срабатыванию двух электромагнитных реле K1 и K2, контакты которых действуют параллельно. Первая пара контактов воздействует через промежуточное реле на подстанции на отключающую катушку высоковольтного выключателя трансформатора. Вторая пара контактов шунтирует тиристор, защищая его от нагрева протекающим током и предотвращая многократные срабатывания и отпускания реле во время колебаний тока в кабеле. Возврат трансформатора в рабочее состояние осуществляется через несколько минут (т.е. по окончании действия компонента ЕЗ) системой автоматического повторного включения, и этой же системой через вспомогательный таймер производится кратковременное прерывание питания защитного реле. При таком кратковременном прерывании питания реле возвращается в исходное состояние, т.е. в ждущий режим.

Результаты измерений, полученные при исследовании схемы (см. рис. 8), показали её соответствие параметрам и ограничениям датчика типа GIC-051D, а также подходящую (обратно зависящую от входного напряжения на схеме) временную зависимость момента срабатывания.

Печатная плата покрыта с обеих сторон двумя слоями высококачественного влагостойкого лака и помещена в герметичный алюминиевый контейнер, обеспечивающий защиту схемы от воздействия компонента Е1 ЭМИ ЯВ. В аналогичный экранирующий кон-

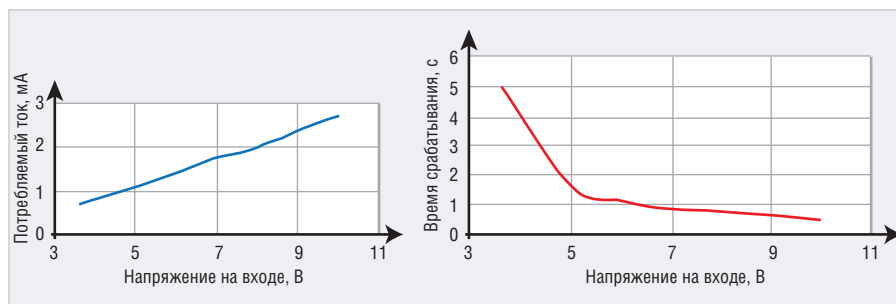


Рис. 8. Экспериментальные зависимости потребляемого схемой реле тока (слева) и временной задержки (справа) от напряжения на входе схемы

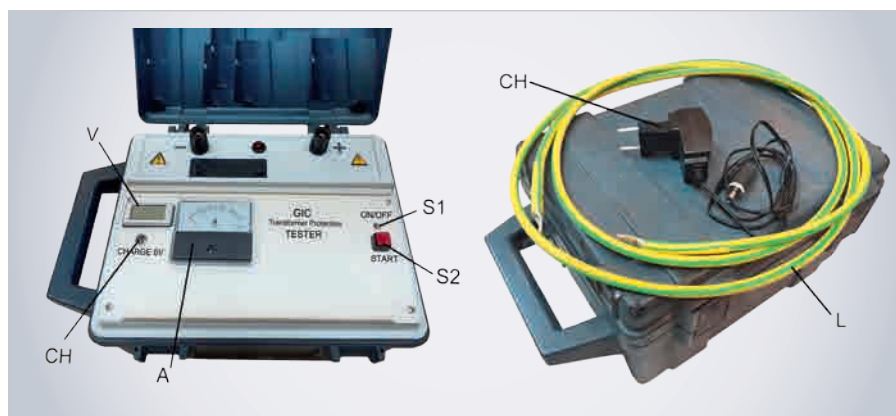


Рис. 9. Портативный тестер для проверки исправности защитного реле

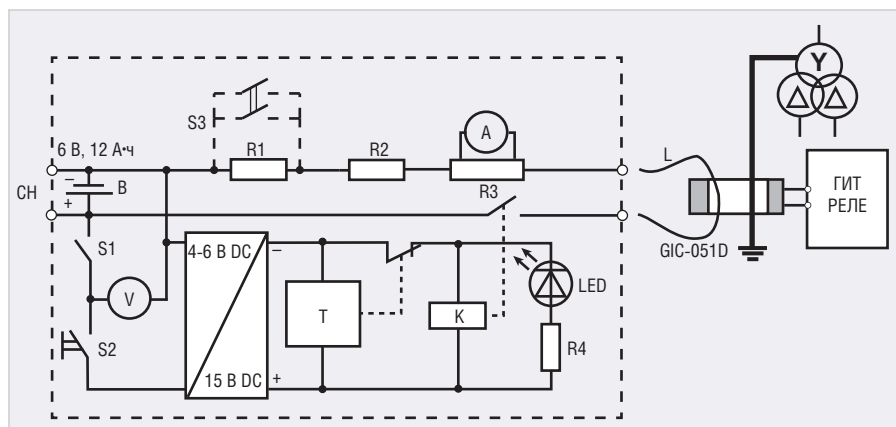


Рис. 10. Принципиальная электрическая схема портативного тестера для периодических проверок исправности реле защиты трансформатора

тейнер помещён и сам датчик. Соединение схемы с внешними цепями осуществляется при помощи экранированного кабеля.

ТЕСТЕР ДЛЯ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ПРОВЕРОК ИСПРАВНОСТИ ЗАЩИТНОГО РЕЛЕ

Как отмечалось выше, силовой трансформатор является важнейшим элементом системы электроснабжения, поэтому устройство его защиты должно быть чрезвычайно надёжным. Для того чтобы быть уверенным в исправности защитного реле, его нужно периодически тестировать. Для периодических

проверок исправности описанного защитного устройства, установленного на кабеле заземления нейтрали трансформатора, разработан специальный портативный тестер (см. рис. 9 и 10).

Источником тока в тестере является аккумуляторная батарея 6 В, 12 А·ч. Ток батареи (около 25 А) ограничивается двумя 100-ваттными резисторами R1 и R2 с сопротивлением 0,1 Ом, соединёнными последовательно. Некоторый запас по мощности выбран для предотвращения нагревания резисторов и изменения их сопротивления и, соответственно, выходного тока тестера. Однако, как показали испыта-

ния, можно вполне обойтись и одним 100-ваттным резистором с сопротивлением 0,2 Ом, установленным на алюминиевой панели. Выходной ток тестера подаётся на шлейф L, выполненный из отрезка изолированного медного провода, вставляемого при испытаниях в окно датчика GIC-051D (см. рис. 10).

В приборе использованы высококачественные, но доступные компоненты известных производителей. В качестве устройства, коммутирующего ток батареи, выбрано автомобильное электромагнитное реле К типа DG85C с контактами, рассчитанными на коммутацию постоянного тока до 80 А. Это реле выпускается с катушками управления на напряжение 6, 12 и 24 В. Однако наиболее распространёнными и доступными являются автомобильные реле на напряжение 12 и 24 В, что и определило их выбор для использования в устройстве. Для повышения напряжения с 4...5 В (напряжение 6-вольтовой батареи при включении на очень низкое внешнее сопротивление) до приемлемого значения 15 В в схеме тестера применён миниатюрный повышающий преобразователь напряжения типа IZ0515SA от XP Power. При испытании совместно с реле DG85C в качестве нагрузки этот преобразователь показал устойчивую работу и неизменное выходное напряжение 15 В при изменении входного напряжения в пределах от 3 до 10 В.

Для исключения нежелательного длительного разряда батареи при токе в несколько десятков ампер (при нажатой кнопке S2) в тестере использован простейший таймер типа НЗУ-2, обеспечивающий выключение реле К и прерывание его контактами тока батареи через 5 с после подачи на таймер питания.

Миниатюрный вольтметр V с жидкокристаллическим экраном (типа EMV1200) и небольшой аналоговый амперметр А с шунтом, которыми снабжён тестер, позволяют контролировать напряжение батареи и ток в датчике, симулирующий ГИТ во время испытаний.

Возможно некоторое усовершенствование тестера за счёт использования двух ступеней выходного тока. На нижней ступени проверяется несрабатывание реле при токе немного меньше уставки, а на верхней ступени проверяется срабатывание реле при токе немного больше уставки. Это усовершенствование возможно реализовать путём использования в тестере дополнительного двухполюсного тумблера S3 с контактами, рассчитанными на ток 20 А (показан пунктиром на схеме рисунка 10). Такие тумблеры широко представлены на рынке, например ET220K12-Z (Copal Electronics), S-331 (NKK Switches), EK204-73 (Carling Technologies) и другие. При этом сопротивление каждого токоограничивающего резистора (R1 и R2) должно составлять 0,2 Ом.

В тестере допускается использование аккумулятора меньшего размера и ёмкости, например ёмкостью 7 А•ч. Такой аккумулятор вполне справляется с возложенными на него задачами, а сам прибор получается намного компактнее и легче.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный комплект устройств позволяет решить актуальную проблему обеспечения надёжной защиты важнейшего элемента системы электроснабжения – силового трансформатора – от воздействия ЭМИ ЯВ. При

этом комплект достаточно прост, имеет невысокую стоимость и пригоден для массового производства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гуревич В.И. Электромагнитный импульс высотного ядерного взрыва и защита электрооборудования от него. М.: Инфра-Инженерия, 2019. 516 с.
2. Gurevich V. Protecting Electrical Equipment: Good Practices for Preventing High Altitude Electromagnetic Pulse Impacts. De Gruyter, Berlin, 2019. 386 p.
3. Recommended E3 HEMP Heave Electric Field Waveform for the Critical Infrastructures. Report of the Commission to Assess the Threat to the United States from Electromagnetic Pulse (EMP) Attack, 2017.
4. SolidGround™ neutral blocker is the most effective and economical solution to protect the electric power grid from stray DC, Solar Storms (GMD) and Nuclear EMP E3: <http://www.emprimus.com/solidground>.
5. Power World Grid Modeling with GIC and Neutral Blocking. Presentation to 2013 Power World Client Conference January 22, 2013.
6. SolidGround™ Grid Stability System Geomagnetic Storm Induced Currents (GIC) and Electromagnetic Pulse (EMP) E3 Protection. ABB Inc. High Voltage Products, 2012.
7. Analysis of Geomagnetic Disturbance (GMD) Related Harmonics. Report EPRI No. 3002002985, March 21, 2014.
8. IEEE Std. 519 – 2014. IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems, 2014.
9. Гуревич В.И. Силовые трансформаторы тоже подвержены влиянию Солнца. Электротехнический рынок. 2011. № 5. С. 48–51.
10. Gurevich V. Protection of Power Transformers Against Geomagnetically Induced Currents. Serbian Journal of Electrical Engineering, 2011, Vol. 8, No. 2, pp. 333–339.



НОВОСТИ МИРА

Микрон – школьникам: первые часы-телефон «Москвёнок» со встроенным чипом для прохода в школу и оплаты школьного питания

Карта «Москвёнок» стала ещё более удобной: Микрон, крупнейший производитель и экспортер микроэлектроники в России, и Тимтон Групп, российский ИТ-разработчик систем безопасности и мониторинга маршрутов детей, запустили в продажу в Москве первые часы-телефон WOCHI X и кожаные браслеты WOCHI P со встроенной RFID-меткой для прохода детей

в школу, оплаты питания и бесплатного посещения музеев в рамках системы «Москвёнок».

«Бесконтактные часы-телефон и кожаные браслеты включают полноценный функционал электронной карты школьника, – прокомментировал Станислав Братчиков, директор ТИМТОН ГРУП. – RFID-чип встроен под экран часов, что позволяет детям с лёгкостью проходить в школу и оплачивать питание, просто прикладывая часы дисплеем к считывателю. Браслеты выполнены из кожи растительного дубления. Благодаря использованию гибкой RFID-метки Микрона брас-

лет получился мягким, удобным для ношения школьнику любого возраста».

«Учебные заведения являются одним из ключевых объектов инфраструктуры, где необходимо уделять особое внимание вопросам безопасности. Технология RFID в этом секторе помогает обеспечить сочетание удобства и безопасности на современном уровне, – отметила Гульнара Хасьянова, генеральный директор ПАО «Микрон». – Всего в рамках этого проекта уже поставлено 20 000 меток, в 2020 году запланировано поставить более 100 000 меток».

Первые отечественные часы-телефон и кожаные браслеты под брендом WOCHI содержат метку M1743-0Q2M высокочастотного диапазона (HF), разработанную RFID-лабораторией Микрона. Новые факторы соответствуют всем требованиям системы «Москвёнок», впервые запущенной в учебных заведениях Москвы в 2012 году, и оснащены дополнительными функциями, что делает их ещё более удобными.

Часы-телефон WOCHI X помимо стандартных функций (определение местоположения, двусторонняя голосовая связь, обмен голосовыми сообщениями, телефонная книга на 10 номеров, несколько режимов звонков) имеет ряд преимуществ: простая активация в мобильном приложении, онлайн-активация чипа (на портале mos.ru) без необходимости посещения родителями школы для проведения процедуры привязки идентификатора к ребёнку. Все уведомления о входе-выходе ребёнка из школы, отчёт о школьном питании поступают родителям в мобильном приложении GEOPLANNER.

Часы и браслеты имеют яркие цветовые решения, ремни выполнены из высококачественных гипоаллергенных материалов. Часы-телефон имеют нецарапающийся ударопрочный дисплей и защищённый от влаги и пыли корпус.



Часы и браслеты рекомендованы Департаментом информационных технологий г. Москвы (заключение № 68 от 20 ноября 2019 года) в качестве электронного идентификатора подсистемы предоставления услуг в сфере образования с использованием электронных карт Комплексной информационной системы «Государственные услуги в сфере образования в электронном виде» (КИС ГУСОЭВ).

Система «Москвёнок» уже установлена в 4333 зданиях образовательных организаций города Москвы, а это более 95% всех зданий детских садов и школ города. «Москвёнком» пользуются уже один миллион школьников, более миллиона родителей дошкольников и около 185 тысяч работников образовательных организаций.

Все передаваемые данные полностью защищены: сервера по обработке данных расположены на территории РФ.

Использование компонентной базы отечественного производства гарантирует отсутствие недеklarированных возможностей и обеспечивает надёжное хранение данных и информационную безопасность.

Микрон имеет собственную RFID-лабораторию по разработке и тестированию радиочастотных идентификационных изделий во всех действующих диапазонах частот. На предприятии организован полный цикл производства продукции, что позволяет учитывать индивидуальные требования каждого заказчика. В продуктовой линейке фабрики более 150 видов различных RFID-меток.

В настоящее время RFID-продукция Микрона успешно применяется для различных задач, в том числе инвентаризации, контроля доступа, защиты бренда, автоматизации техпроцессов, складской и торговой логистики, сельскохозяйственных и промышленных предприятий, а также для управления доступом к различным объектам и единицам хранения, управления мероприятиями, обеспечения безопасности, контрольных и сервисных функций в финансовых, образовательных и медицинских учреждениях, в инфраструктурных и транспортных системах.

Пресс-релиз ПАО «Микрон»

ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ ДЛЯ СВЕТОДИОДОВ

Серии AE16 / AM16 для офисных светильников
Мощность 40 / 60 Вт



Преимущества:

- Высокая удельная мощность
- Гальванически изолированный выход
- Пульсации светового потока < 2%
- Коэффициент мощности $\lambda = 0,96$
- Двухкаскадная схема
- Металлический корпус, низкий уровень электромагнитных помех

 ММП-ИРБИС

MAIN@MMP-IRBIS.RU

8 (495) 987-10-16

WWW.MMP-IRBIS.RU

Рис. 10.10