

Электромагнитный импульс (ЭМИ) высотного ядерного взрыва является эффективным средством поражения критических видов электронного оборудования важнейших составных частей инфраструктуры страны. В статье рассмотрена проблема обеспечения функционирования системы оперативного постоянного тока (СОПТ) подстанций после воздействия ЭМИ и предложен эффективный метод, основанный на использовании специальных элементов для защиты работающего электрооборудования СОПТ совместно с резервными источниками питания на основе дизель-генераторов и компактных источников постоянного тока.

Средства обеспечения живучести системы

оперативного постоянного тока подстанций при воздействии электромагнитного импульса

Часть 1. Подстанции стационарного типа

Владимир Гуревич, г. Хайфа



Введение

Электромагнитный импульс (ЭМИ) высотного ядерного взрыва, а также специальные сверхмощные источники импульсного электромагнитного излучения являются одним из самых современных и эффективных средств поражения электронного оборудования энергосистем. Также при этом повреждаются системы связи, водоснабжения и другие важнейшие составные части инфраструктуры страны [1, 2], поэтому этот вид оружия развивается ускоренными темпами во всех развитых странах мира.

Система СОПТ является важнейшей составной частью подстанции, от исправности которой зависит работа всех остальных систем и видов оборудования подстанций, как силового, так и системы релейной защиты, автоматики, управления, связи, сигнализации и т.д. В случае отказа в работе

СОПТ, вся подстанция становится полностью неуправляемой и «невидимой» с центрального диспетчерского пункта. Поэтому система СОПТ в первую очередь нуждается в специальных средствах, которые обеспечили бы ее работоспособность при воздействии ЭМИ.

Эти спецсредства можно разделить на два вида: средства защиты действующего оборудования от ЭМИ и резервные источники питания для системы СОПТ, которые должны быть задействованы после воздействия ЭМИ при восстановлении работоспособности подстанции в случае исчезновения оперативного питания переменного тока.

Средства защиты действующего оборудования СОПТ от ЭМИ

Оборудованием, требующим специальных мер защиты в СОПТ являются в первую очередь электронные зарядно-подзарядные агрегаты (ЗПА), обеспечивающие электроснабжение шин постоянного тока, от которых питаются многочисленные потребители, а также осуществляется постоянный подзаряд аккумуляторных батарей. Обычный ЗПА представляет собой металлический шкаф с электронной аппаратурой, в который входит трехфазный кабель питания переменного тока и выходит двухжильный кабель постоянного тока, а также контрольный кабель сигнализации. С точки зрения защиты от ЭМИ, такой шкаф принципиально ничем не отличается от шкафов управления, релейной защиты и автоматики, методы и средства защиты которых от ЭМИ были предложены автором ранее [3 – 6]. Вкратце можно напомнить, что эти средства включают в себя меры по усилению экранирующей способности

шкафов, использование специальных экранированных контрольных кабелей, установку ферритовых фильтров ЭМИ на контрольных кабелях, применение элементов защиты от импульсных перенапряжений, усовершенствование системы заземления шкафа, в частности, использование так называемой «специальной плавающей земли» и отключаемого заземления [4]. Учитывая, что в СОПТ входит не только ЗПА, но и распределительный шкаф постоянного оперативного тока, шкаф переменного тока, от которого получает питание ЗПА, а также батарея аккумуляторов, то защита СОПТ не может ограничиться лишь защитой шкафа ЗПА. Кроме того, постоянный ток, протекающий в силовых кабелях, оказывает сильное нейтрализующее воздействие на индуктивные элементы стандартных фильтров ЭМИ и существенно снижает их эффективность. Поэтому защита СОПТ имеет некоторые особенности.

В связи с вышеизложенным, предлагаются следующие дополнительные средства защиты СОПТ:

1. Применение специальных дросселей в качестве фильтров ЭМИ в цепях силовых кабелей, подключенных к ЗПА и батарее аккумуляторов.

2. Установка блоков варисторов с большой рассеиваемой импульсной энергией на шинах постоянного тока и в трехфазной цепи питания переменного тока ЗПА.

3. Установка блоков варисторов со средней рассеиваемой импульсной энергией в шкафу ЗПА и на батарее аккумуляторов.

Один из возможных вариантов схемы СОПТ с упомянутыми элементами защиты, показан на **рис.1**, на котором обозначены:

- 1 – распределительный щит постоянного тока;
- 2 – распределительный щит переменного тока;
- 3 – батарея аккумуляторов;
- 4 – зарядно-подзарядный агрегат (ЗПА);

R1 – R8 – блоки варисторов с высокой рассеиваемой энергией;

R9 – R15 – блоки варисторов со средней рассеиваемой энергией;

L5, R16, K – элементы системы заземления шкафа и внутренней «земли» ЗПА (так называемой «специальной плавающей земли», подробно описанной в [4]).

В этой схеме дроссели в цепи батареи аккумуляторов позволяют ограничить амплитуду импульса тока ЭМИ, которая без этих дросселей может быть очень большой из-за очень низкого внутреннего сопротивления аккумуляторов. Применение дросселей в цепи постоянного тока ЗПА связано с тем, что внешняя цепь постоянного тока подключена напрямую к внутреннему выпрямительному мосту ЗПА на тиристорах, которые могут быть повреждены при отсутствии дросселей импульсом тока большой амплитуды. Эти дроссели могут быть меньшей мощности, чем те, что применены в цепи аккумуляторной батареи. Внешние кабели переменного

тока подключены к обмоткам входного трансформатора ЗПА, обладающих высоким импедансом для очень короткого импульса тока, поэтому в этой цепи нет необходимости в применении дополнительных токоограничивающих дросселей.

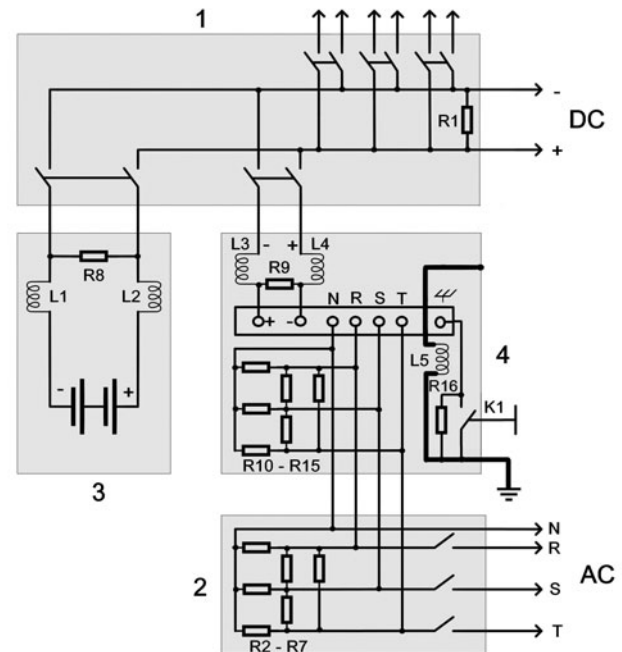


Рис.1

Мощные дроссели, пригодные для использования в СОПТ в качестве фильтров ЭМИ, производятся американской компанией CWS с обмотками геликоидального типа без сердечника и с сердечником, изготовленным по специальной технологии из специального материала показаны на **рис.2**.

В **таблице** приведены основные параметры некоторых дросселей серии ES с сердечником.

В качестве блоков варисторов с большой энергией рекомендуется использование варисторов, выпускаемые компанией EPCOS, Semicode, Dean Technology, Inc., Dongguan Uchi Electronics Co., и др. в стандартных корпусах с максимальной

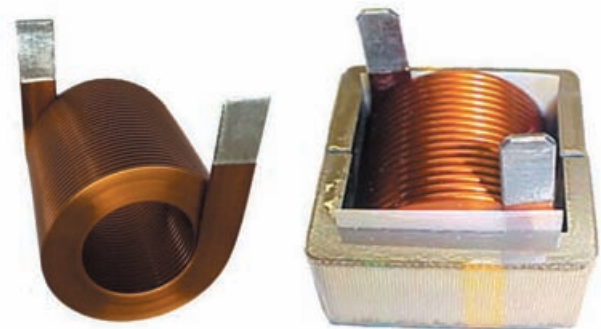


Рис.2

Тип	Максимальный длительный ток, А	Индуктивность при полном токе, мН	Сопротивление (импеданс)			Размеры, мм
			Постоянному току, мΩ	На частоте 1 МГц, кΩ	На частоте 1 ГГц, МΩ	
EK55246-341M-40AH	40	162	13.4	1.0	1.0	58x58x35
ES55242-140M-200AH	200	9.9	1.1	0.062	0.062	57x57x38

ными размерами 135x118x27 мм (рис.3). Такие блоки варисторов способны пропускать единичные импульсы тока 8/20 мс с амплитудой до 100 кА и рассеивать энергию 2 - 3 кДж, а некоторые типы – до 10 кДж. Время реакции на импульс указывается производителями в диапазоне 15 – 25 нс. Номинальное напряжение варисторов этого типа должно выбираться с запасом, поскольку они предназначены для защиты от высоковольтного импульса ЭМИ, а не от обычных импульсов



Рис.3

ных перенапряжений, всегда имеющих в системе. Например, для СОПТ с номинальным напряжением 250 В постоянного тока, эти блоки варисторов могут быть выбраны на напряжение 420 В постоянного тока (остаточное напряжение при срабатывании варистора (англ. clamping voltage) 840 В).

Остаточное напряжение 840 В при воздействии импульса ЭМИ не будет приводить к повреждению изоляции проводов и силовых кабелей, поскольку они должны выдерживать значительно более высокие значения импульсных напряжений, лежащие в области нескольких киловольт. С другой стороны, использование варисторов с таким запасом позволяет гарантировать их надежную работу в течение длительного времени без повреждений. Наличие дополнительных крепежных отверстий на корпусе варисторов этой конструкции, позволяет крепить их непосредственно на внутренних стенках шкафов, выполняющих в данном случае роль радиаторов, дополнительно повышающих надежность устройств, постоянно находящихся под воздействием приложенного рабочего напряжения.

В качестве блоков варисторов со средней рассеиваемой энергией могут быть выбраны варисторы, производимые перечисленными выше компаниями, а также Littlefuse (рис.4). Эти варисторы, устанавливаемые непосредственно в шкафу

ЗПА и на шинах аккумуляторной батареи, допускают протекание одиночных импульсных токов до 30 – 40 кА, имеют меньшую импульсную рассеиваемую энергию (300 – 500 Дж), меньшие максимальные габариты (обычно, 60x55x14 мм), меньшие запасы по рабочему напряжению, которое может быть выбрано, например, 320 В постоянного тока (остаточное напряжение при срабатывании варистора 650 В).

В некоторых источниках отмечается большее быстродействие лавинных диодов и супрессоров на их основе по сравнению с варисторами. К сожалению, производители этих элементов до сих пор не освоили их производство в корпусах, пригодных для монтажа в силовых шкафах, поэтому пока приходится ориентироваться на варисторы.

Резервные источники питания для системы СОПТ

Резервный источник питания (РИП) для системы СОПТ предназначен для восстановления работоспособности этой важнейшей системы после воздействия ЭМИ в случае отсутствия переменного оперативного тока для питания ЗПА или повреждения отдельных элементов СОПТ, несмотря на принятые меры защиты.

Рассматривалось два альтернативных варианта автономных РИП минимальной мощности, необходимой для поддержания работоспособности критических нагрузок СОПТ (мощность 5 кВт):

- на основе топливного элемента;
- на основе дизель-генератора.

Топливный элемент (ТЭ) относится к химическим источникам тока, в которых осуществляется прямое превращение энергии топлива в электрическую, минуя процессы горения. Поэтому ТЭ энергетически значительно более эффективны (КПД доходит до 40...50%), чем двигатели внутреннего сгорания (КПД до 26-29%). Кроме того, ТЭ являются экологически чистыми элементами, не выбрасывающими в атмосферу при работе загрязняющие вещества, как двигатели внутреннего сгорания.

Но, насколько важны эти замечательные свойства ТЭ для резервного источника энергии, который постоянно находится в законсервированном состоянии и вводится в работу лишь в исключительном случае и на ограниченный период времени? Ответ на этот далеко не риторический вопрос вполне очевиден. С другой стороны, ТЭ имеет и вполне очевидные недостатки. Самые распространенные виды ТЭ работают на основе водорода, который в электрохимических ячейках соединяется с кислородом воздуха, превращаясь в воду и вы-



Рис.4

деляя при этом энергию. Водород относится к взрывоопасным газам, требующим специальных методов хранения, транспортирования, наличия датчиков концентрации в воздухе и специальных разрешений. Использование вместо обычных баллонов с водородом специальных металло-гидридных контейнеров приводит к существенному удорожанию установки, которая и без этого в несколько раз дороже дизель-генератора той же мощности.

При установке же ТЭ вместе с баллонами водорода вне помещения, требуется защита его от несанкционированного доступа, террористических актов, вандализма, которые могут привести к взрыву установки.



а)



Рис.5

б)

На [рис.5,а](#) показан генератор мощностью 5 кВт (без системы охлаждения) на основе топливных элементов, а на [рис.5,б](#) – металло-гидридные контейнеры для хранения водорода.

Кроме того, ТЭ содержит множество электронных датчиков, микропроцессоров и других микроэлектронных устройств, управляющих его работой и предотвращающих возникнове-

ние аварийных режимов. Типовой ТЭ мощностью 5 кВт вырабатывает низкое напряжение постоянного тока (около 40 В). Чтобы преобразовать его в стандартное напряжение пере-



Рис.6

менного тока 230 В нужен мощный AC/DC преобразователь, а для стандартного напряжения постоянного тока 250 В – DC/DC преобразователь. Наличие большого количества сложных электронных систем приводит к резкому возрастанию уязвимости ТЭ к электромагнитным воздействиям, причем, не только к одиночному ЭМИ, но и дистанционным воздействиям автономных направленных источников высокочастотной энергии. Все это вместе взятое приводит к необходимости установки ТЭ с баллонами вне помещения в специальном толстостенном стальном боксе, защищающем ТЭ от взрыва при различных преднамеренных деструктивных механических и электромагнитных воздействиях.

На [рис.6](#) показаны ТЭ с баллонами, инвертором и аккумуляторами в специальном защитном стальном контейнере размерами 2х3х2 м. На [рис.6](#) обозначены:

1 – набор стандартных баллонов с водородом под давлением 150 атм.;



Рис.7

- 2 – электрохимическая ячейка;
3 – инвертор и аккумуляторы.

Кроме этого, в электрохимической ячейке ТЭ мощностью 5 кВт содержится свыше 20 литров электролита, как правило, очень активного и опасного химического реагента, например, такого как концентрированный раствор гидроксида калия (KOH), который в длительно неработающей электрохимической ячейке должен храниться отдельно и заливаться в ячейку перед ее запуском в работу. Кроме того, для запуска в работу ТЭ необходимо предварительно запустить в работу его электронные системы, а для этого требуется аккумуля



Рис.8

Компактные ДГ мощностью 5...7 кВт не содержат электронных систем управления и контроля и поэтому они намного менее чувствительны к ЭМИ, чем ТЭ. Тем не менее, учитывая, что при воздействии ЭМИ у поверхности земли возникает напряженность электрического поля, достигающая 50 кВ/м, такие ДГ необходимо защитить от пробоев изоляции в обмотках и проводах. Легкий металлический контейнер с плотно закрывающейся крышкой (дверцей) из алюминия толщиной 5 – 6 мм – это идеальное решение для защиты ДГ хранящегося на подстанции в качестве резерв-



Рис.10

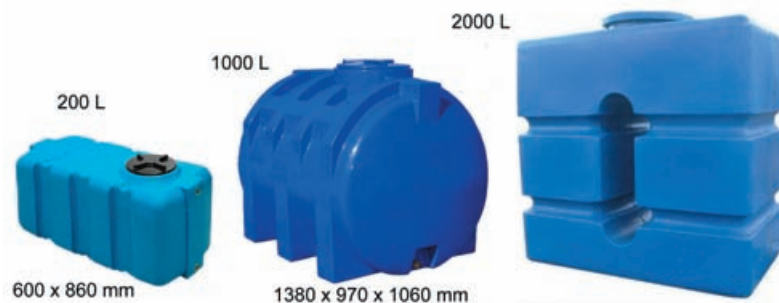


Рис.9

ного источника энергии. При этом все внешние кабели и внешняя выхлопная труба должны быть отключены от ДГ.

ДГ мощностью 5 кВт потребляют около 1 литра топлива в час. Запаса топлива, хранящегося в пластмассовой канистре емкостью 200 л (рис.9), хватит на неделю непрерывной работы такого ДГ, а канистры емкостью 1000 л – на месяц работы. Для повышения степени готовности резервного источника питания на основе ДГ, он может быть снабжен также резервным ЗПА (на случай выхода из строя основного ЗПА).

мулятор с постоянно работающим зарядным устройством.

Все эти особенности (а точнее проблемы) ТЭ делают их мало пригодными для использования в качестве резервного источника питания для СОПТ на подстанциях.

В отличие от ТЭ, обычные дизель-генераторы (ДГ) мощностью 5 – 7 кВт являются компактными, дешевыми, неприхотливыми устройствами, идеально подходящими на роль резервных источников питания СОПТ (рис.7).

Такие ДГ снабжены ручной системой запуска с помощью шнура, не требующей наличия аккумулятора. Они могут быть смонтированы даже непосредственно в здании подстанции, для чего нужно лишь заранее установить выхлопную трубу, проходящую через стенку здания (рис.8).



Компактные ЗПА, небольшой мощности с промежуточным звеном высокой частоты выпускаются многими компаниями. Например, два компактных ЗПА серии ADC7480 (с выходным напряжением 0 – 300 В и выходным током до 14 А) финской компании Powernet (рис.10), включенные для параллельной работы и снабженные всевозможными системами стабилизации, регулирования, защиты, распределения нагрузки между параллельно работающими устройствами, питающиеся от дизель-генератора мощностью 5 – 7 кВт способны обеспечить энергией среднюю подстанцию. На крупной подстанции они смогут обеспечить питание критических видов оборудования и поддерживать в нормальном рабочем состоянии подстанционную батарею аккумуляторов.

Эти ЗПА должны храниться в отключенном состоянии в том же самом контейнере, что и ДГ. Стоимость резервного источника питания на основе ДГ мощностью 5 кВт и двоярного ЗПА с суммарным током до 25 А составляет около 12 тыс. USD, что более чем в три раза меньше стоимости равного по мощности источника питания на основе ТЭ (без стоимости защитного стального контейнера) причем, без проблем с хранением водорода и без необходимости получения разрешений на установку и эксплуатацию. Стоимость одного дросселя и одного блока мощных варисторов составляет около 50 USD каждый.

Краткие выводы

Предложенный метод повышения живучести СОПТ на подстанциях включает применение специальных средств защиты работающего оборудования, основанных на использовании дросселей и варисторов, а также использование резервных

источников питания на основе дизель-генераторов и компактных источников питания постоянного тока, расположенных в защитном контейнере. Предложенный метод имеет вполне приемлемую стоимость и может быть свободно реализован на особо важных (критических) подстанциях, с применением имеющихся на рынке в свободной продаже комплектующих.

Литература:

1. Гуревич В. И. Защита оборудования подстанций от электромагнитного импульса - Инфра-Инженерия, Москва, 2015, 302 с.

2. Гуревич В. И. Уязвимости микропроцессорных реле защиты. Проблемы и решения - Инфра-Инженерия, Москва, 2014, 256 с.

3. Гуревич В. И. Доступные методы снижения уязвимости электронного оборудования энергосистем от воздействия электромагнитного импульса. // Электрик – 2016. - № 5. – С.22 – 25.

4. Гуревич В. И. Проблемы заземления электронной аппаратуры электроэнергетических объектов. // Компоненты и технологии. – 2017. - № 4. – С.106 - 111.

5. Гуревич В. И. Повышение устойчивости электронного оборудования действующих электроустановок к электромагнитному импульсу. // Энергетика и электрооборудование. – 2016. - № 5. –С.34 - 37.

6. Гуревич В. И. Применение LC-фильтров для защиты оборудования от электромагнитного импульса: реальная необходимость или инерция мышления? - Компоненты и технологии. – 2017. - № 7. С.44 – 47.

Серия DRC от MEAN WELL

Высокоэффективные промышленные блоки бесперебойного питания

- Простое построение промышленной DC-UPS системы
- Встроенная схема заряда аккумулятора и резервного переключения
- Защита аккумулятора от глубокого разряда
- Удаленный мониторинг рабочих параметров («AC OK», «Battery Low»)
- Модели мощностью 40, 60 и 100 Вт
- Номинальные выходные напряжения 12 и 24 В
- Широкий диапазон входных напряжений 90...264 В AC (127...370 В DC)
- Диапазон рабочих температур -30...+70 °C
- Соответствие международным стандартам безопасности и ЭМС
- Гарантия 3 года



Компания СЭА - авторизованный дистрибьютор MEAN WELL на Украине

Украина, 02094, г. Киев, ул. Краковская, 13-Б
 тел.: +38 044 291-00-41, факс: +38 044 291-00-42
 info@sea.com.ua, www.sea.com.ua



Компания СЭА
ИННОВАЦИИ И ПАРТНЕРСТВО

Более 25 лет надёжного партнёрства