

# СОЗДАНИЕ ЗАПАСОВ СМЕННЫХ МОДУЛЕЙ ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ – КАК СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ЖИВУЧЕСТИ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ

В.И. Гуревич, канд. техн. наук

## Введение

Проблема преднамеренных электромагнитных деструктивных воздействий (ПЭДВ) на электроэнергетические системы становится в последнее время все более актуальной в связи с двумя современными тенденциями: расширяющимся применением микроэлектроники и микропроцессорной техники в электроэнергетике – с одной стороны, и интенсивными разработками средств дистанционного поражения электронной аппаратуры – с другой [1]. Наиболее мощным средством ПЭДВ является электромагнитный импульс высотного ядерного взрыва (ЭМИ ЯВ), в частности, его компоненты E1 и E2 [1], при воздействии которых не происходит поражения людей и механического разрушения наземных объектов, но возникают множественные электрические пробои низковольтных микроэлектронных компонентов современных электронных систем защиты, контроля и управления, широко применяющихся в электроэнергетике. Современная тенденция нарастания зависимости электроэнергетики от таких систем ведет к тому, что их массовый отказ будет означать полный коллапс энергосистемы, поэтому проблема повышения живучести энергосистемы при массовых отказах микроэлектронных систем приобретает особое значение.

## Оптимизация запасов сменных модулей электронной аппаратуры

Одним из эффективных путей повышения живучести энергосистемы является быстрое восстановление поврежденных устройств с использованием запасных частей, инструментов и принадлежностей (ЗИП). Однако создание запасов ЗИП требует значительных денежных средств, особенно в случае сложнейших электронных микропроцессорных систем защиты, автоматики и управления, широко применяющихся в энергосистемах. Поэтому, во всем мире уже давно занимают поиском оптимальных запасов ЗИП, позволяющих сочетать требуемую надежность этих систем при минимуме затрат.

Создание оптимальных запасов ЗИП – общая проблема, хорошо известная во многих отраслях техники, которая на сегодняшний день хорошо проработана теоретически с использованием различных математических методов оптимизации [2–9]. Известные методы оптимизации запасов ЗИП основаны на анализе статистики отказов элементов, сменных модулей или комплектных изделий. То есть, количество необходимых комплектов ЗИП рассчитывают исходя из того факта, что отказы электронной аппаратуры являются единичными случайными событиями, происходящими с определенной частотой, подчиняющейся статистическим законам распределения случайных величин. Необходимость увеличения количества комплектов ЗИП с целью обеспечения восстановления работоспособности оборудования после воздействия ЭМИ ЯВ не вызывает сомнения. Но как именно его увеличивать? Совершенно очевидно, что в случае воздействия ЭМИ ЯВ на энергосистему

происойдут одновременные массовые отказы электронной аппаратуры, не подчиняющиеся никаким статистическим законам. Кроме того, обычный, достаточно длительный процесс заказа и получения новых комплектов ЗИП для пополнения хранящихся запасов после израсходования заготовленных ранее комплектов, непригоден в рассматриваемом случае. Поэтому простое увеличение складских запасов ЗИП в полтора-два раза (как это иногда практикуется не очень дальновидными руководителями) не решает проблемы, а такое увеличение этих запасов, при котором ЗИПом будет обеспечена абсолютно вся электронная аппаратура, находящаяся в эксплуатации, – просто не реально по экономическим соображениям. Поэтому, для расчета оптимального комплекта ЗИП должен использоваться совершенно другой подход.

Предлагаемый метод базируется на трех основных принципах:

- не все электронные устройства должны снабжаться комплектами ЗИП, а лишь некоторые из них, определенные как критически важные устройства (КВУ), без которых в принципе невозможно даже частичное функционирование электроэнергетических объектов, среди которых, в свою очередь, должны быть выбраны лишь критически важные объекты (КВО) для энергосистемы;
- для выбранных КВУ должны быть созданы полные, а не частичные комплекты ЗИП;
- запасы ЗИП КВУ должны быть созданы в дополнение и вне связи с запасами ЗИП, хранящихся на складах.

Таким образом, оптимизация запасов ЗИП в рассматриваемом случае сводится лишь к расчету количества КВУ, необходимых для комплектации КВО в конкретной энергосистеме.

## Проблема хранения запасов ЗИП

Проблема хранения запасов ЗИП требует решения двух задач: где хранить ЗИП и как его хранить.

Сегодня во многих энергосистемах комплекты ЗИП хранятся на складах, часто значительно удаленных от энергетических объектов, откуда их получают при необходимости ремонтные службы или непосредственно службы, занимающиеся эксплуатацией. При необходимости восстановления КВУ после воздействия на энергосистему ЭМИ ЯВ возникает проблема экстренной доставки критически важных грузов на критически важные объекты, поскольку под воздействием мощного электромагнитного импульса с большой вероятностью будут выведены из строя микроконтроллеры, управляющие работой современных транспортных средств.

Для систем электросвязи в соответствии с [3] используется двухуровневая система ЗИП, включающая комплекты «ЗИП-0» и «ЗИП-Г». Комплект ЗИП-0 является неотъемлемой частью устройства (в рассматриваемом случае КВУ) и должен находиться на месте эксплуатации устройства (в нашем случае, на КВО). Комплекты ЗИП-Г (групповые)

используются для пополнения комплектов ЗИП-0 и хранятся в крупном центре технического обслуживания (или на складе). Комплекты ЗИП-0 и ЗИП-Г должны быть проверены и испытаны перед передачей на хранение.

Такой подход к организации хранения ЗИП электронной аппаратуры при необходимости восстановления энергосистемы после воздействия ПЭДВ полностью оправдан и является, по нашему мнению, максимально эффективным также и в электроэнергетике, поскольку устраняет проблему экстренной доставки ЗИП на КВО для восстановления КВУ. Хранение ЗИП КВУ непосредственно на месте эксплуатации КВУ не требует решения этой проблемы. Еще одна проблема может быть решена при такой организации хранения ЗИП КВУ: проблема их конфигурирования и настройки перед установкой в аппаратуру, что требует значительного времени, участия высококвалифицированного персонала, использования специальной электронной аппаратуры и компьютеров (которые также могут быть повреждены). В качестве примера такого вида КВУ могут служить современные микропроцессорные устройства релейной защиты (МУРЗ), без которых невозможно функционирование энергосистемы. При массовых отказах МУРЗ, в результате воздействия ЭМИ ЯВ, будет крайне затруднительно заниматься настройкой множества комплектов ЗИП МУРЗ одновременно на многих удаленных энергообъектах. Поэтому, комплекты ЗИП МУРЗ, определенных как КВУ, должны не только храниться рядом с действующими МУРЗ, но и должны быть заранее запрограммированы, настроены и конфигурированы для быстрой замены отказавших блоков конкретного МУРЗ, работающего с конкретными настройками и уставками.

Второй вопрос, требующий решения: как хранить ЗИП КВУ? Проблема заключается в том, что ЭМИ ЯВ создает у поверхности земли напряженность электрического поля, достигающую до 50 кВ/м. При такой напряженности поля на выводах даже относительно небольших по размерам электронных компонентов (в пределах одной печатной платы) может возникать разность потенциалов, достаточная для электрического пробоя p-n переходов, тончайших слоев изоляции в микропроцессорах или стирания информации в ячейках элементов памяти. Поэтому комплекты ЗИП КВУ должны храниться в защищенных от ЭМИ ЯВ контейнерах.

Какими свойствами должны обладать эти контейнеры? Обратимся к стандарту MIL-STD-188-125-1 [10], оговаривающему требования по эффективности экранирования критически важных объектов от воздействия ЭМИ ЯВ, таблица 1.

Таблица 1 – Минимальные требования по эффективности экранирования критически важных объектов от воздействия ЭМИ ЯВ (по рисунку 1 из MIL-STD-188-125-1 [10])

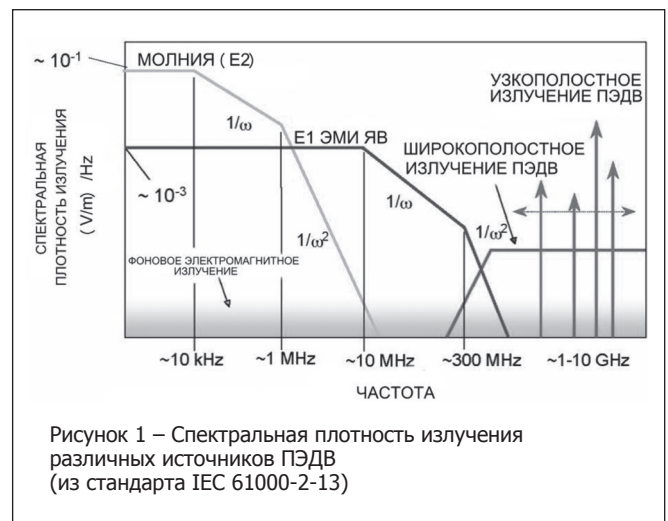
Частота излучения	Ослабление, вносимое экраном, дБ
10 кГц	20
100 кГц	40
1 МГц	60
10 МГц	80
1 ГГц	80

В то же время, стандарт IEC 61000-2-13 [11] приводит данные о спектральной плотности излучения различных видов ПЭДВ, рисунок 1, из которых видно, что для компонентов E1 и E2 (в стандарте E2 обозначен как «молния», поскольку его параметры близки к параметрам молнии) ЭМИ ЯВ плотность излучения остается максимальной высокой на частотах ниже 10 кГц и резко снижается уже на частотах выше 300 МГц. Другие источники ПЭДВ (не ЭМИ ЯВ) создают относительно высокую плотность излучения в диапазоне более высоких частот, вплоть до 10 ГГц. Поэтому, эффективная защита должна обеспечиваться в диапазоне частот от единиц килогерц до 10 ГГц.

Как известно, глубина проникновения электромагнитной волны в металлы определяется скин-эффектом и зависит от частоты: чем выше частота (f), тем на меньшую глубину (Δ) проникает волна, то есть, тем тоньше может быть стенка экрана:

$$\Delta = 503 \sqrt{\frac{\rho}{\mu_m f}}$$

где Δ – глубина проникновения волны, ρ – удельное сопротивление металла, μ<sub>m</sub> – магнитная проницаемость металла, f – частота излучения.



Глубина проникновения электромагнитной волны – это поверхностный слой металла, в котором напряженность электромагнитного поля снижается в e = 2,718 раза. По данным [12], в этом слое будет выделяться почти 86 % энергии, поступающей с поверхности. В таблице 2 приведены результаты расчета по приведенной выше формуле для наиболее широко используемого в качестве экрана металла – алюминия.

Как можно видеть из таблицы, контейнер из алюминия с толщиной стенки не менее 3 мм может обеспечить достаточно эффективное ослабление излучения всех видов ПЭДВ.

Что же предлагает сегодня рынок защитных контейнеров? Прежде всего, этот рынок широко представлен крупными и тяжелыми толстостенными металлическими контейнерами, рисунок 2, снабженными защищенными системами вентиляции и фильтрами для вводных кабелей. Такие контейнеры широко применяются в армии и они, безусловно, обеспечивают надлежащую защиту располо-

Таблица 2 – Глубина проникновения электромагнитной волны в стенки экрана из алюминия для различных частот

Частота	1 кГц	10 кГц	100 кГц	1 МГц	10 МГц	100 МГц	1 ГГц
Глубина проникновения волны, мм	2,6	0,83	0,26	0,083	0,026	0,0083	0,0026

женного в них оборудования. К сожалению, это очень дорогие средства защиты, которые вряд ли можно использовать для хранения ЗИПа в электроэнергетике.



Рисунок 2 – Крупные металлические контейнеры-боксы для защиты от ЭМИ ЯВ, снабженные системами вентиляции и фильтрами для подключения внешних кабелей

Еще одной разновидностью защитного контейнера является комната без окон со стенками и дверями, облицованными медными листами (такие комнаты предлагаются компанией Holland Shielding Systems). Такого рода защитные контейнеры также обладают замечательной экранирующей способностью (от 40 до 120 дБ, в частотном диапазоне – от 10 кГц до 10 ГГц), но также, как и в предыдущем случае, имеют слишком высокую стоимость.

Простыми, надежными и очень дешевыми контейнерами для защиты от ЭМИ ЯВ являются, по заверению их производителей, пластиковые пакеты различных размеров с металлизированным слоем, рисунок 3.

Как правило, производители таких пакетов указывают высокую степень ослабления излучения, достигающую до



Рисунок 3 – Пластиковые пакеты с металлизированным слоем, предназначенные для защиты небольших электронных приборов от ЭМИ

40–45 дБ, но при этом скромно умалчивают, для какого частотного диапазона получены эти значения. Может ли металлизированный слой толщиной в несколько микрон эффективно ослаблять электромагнитное поле в частотном диапазоне от килогерц до гигагерц? Таблица 2 дает однозначный ответ на этот вопрос: нет, не может!

Еще одной разновидностью защитного контейнера, также широко представленного на рынке и рекламируемого как надежное средство защиты от ЭМИ ЯВ, является тент (палатка), выполненный из такого же, как и пакеты, металлизированного пластика или, в лучшем случае, сотканый из ткани, содержащей металлические нити, рисунок 4.



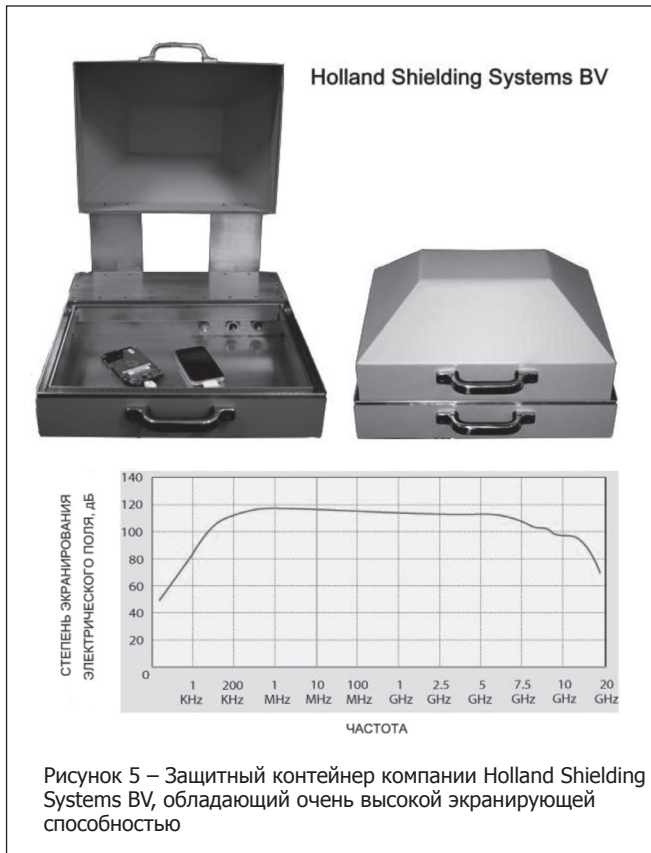
Рисунок 4 – Защитный тент (палатка), изготовленный из металлизированной ткани

Специальные переносные толстостенные металлические контейнеры, обеспечивающие очень эффективное экранирование, также широко представлены на рынке, рисунок 5.

К сожалению, такие контейнеры слишком дороги для хранения ЗИП и имеют недостаточный внутренний объем.

Самыми подходящими, по нашему мнению, являются простые алюминиевые контейнеры, сваренные из листового алюминия в форме простых ящиков с крышками, рисунок 6. Такие контейнеры с толщиной стенки 3/16 дюйма (4,8 мм) имеют вполне приемлемую степень экранирования: не менее 50 дБ в диапазоне частот 100 кГц – 1 ГГц; (76 дБ – при частоте 300 МГц; 66 дБ – при частоте 1 ГГц) и выпускаются рядом компаний, в том числе Montie Gear, EMP Engineering и др. по стандартным или индивидуальным размерам.

Следует отметить, что такие простые контейнеры нужных размеров могут быть изготовлены в любой мастерской, выполняющей сварочные работы. При этом, с целью предотвращения воздействия электромагнитных полей верхней части частотного диапазона на хранящиеся электронные приборы (которое может проникнуть во внутреннюю полость контейнера через зазоры, образуемые неплотно прилегающей крышкой) рекомендуется особо чувствительные электронные изделия (например, печатные платы с микропроцессорами и элементами памяти) поме-



щать в описанные выше пластиковые металлизированные пакеты перед размещением в контейнерах.

**Выводы**

1. Одной из мер быстрого восстановления работоспособности электроэнергетической системы после воздействия того или иного вида ПЭДВ является создание специальных комплектов ЗИП электронной аппаратуры.
2. Известные методы оптимизации запасов ЗИП неприменимы для рассматриваемого случая.
3. Для обеспечения быстрого восстановления исправности электронной аппаратуры энергосистем должны быть созданы полные комплекты ЗИП для критически важных устройств (КВУ), расположенных на критически важных объектах (КВО) электроэнергетики. КВУ и КВО должны быть заранее определены.

4. Комплекты ЗИП для КВУ должны быть независимы от общих запасов ЗИП, хранящихся на складах.

5. Комплекты ЗИП КВУ должны быть заранее проверены, настроены и конфигурированы и должны храниться в непосредственной близости от КВУ, к которым они относятся.

6. Комплекты ЗИП КВУ должны храниться в защищенных от ЭМИ ЯВ и других видов ПЭДВ закрытых контейнерах, которые могут быть изготовлены путем сварки из листов алюминия толщиной около 5 мм. Особо чувствительные блоки, содержащие микропроцессоры и элементы памяти должны быть предварительно помещены в металлизированные пластиковые пакеты.

**Литература:**

1. Гуревич, В.И. Уязвимости микропроцессорной релейной защиты: проблемы и решения / В.И. Гуревич. – М.: Инфра-Инженерия, 2014. – 256 с.
2. Жаднов, В. Автоматизация проектирования запасов компонентов в комплектах ЗИП: методы и средства / В. Жаднов // Компоненты и технологии. – 2010. – № 5. – С. 173–176.
3. ОСТ 45.66-96 Запасные части, инструменты и принадлежности средств электросвязи. Стандарт отрасли. – М.: ЦНТИ «Информсвязь», 1997.
4. Зацаринный, А.А. Особенности расчета комплектов ЗИП в автоматизированных информационных системах в защищенном исполнении / А.А. Зацаринный [и др.]. – Системы и средства информатики, 2013. – Т. 23, № 1. – С. 113–131.
5. Допира, Р.В. Методика расчета системы обеспечения запасными частями территориально распределенной радиоэлектронной техники / Р.В. Допира [и др.]. – Программные продукты и системы. – 2009. – № 1. – С. 128–130.
6. ГОСТ РВ 20.39.303-98. Комплексная система общих требований. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование военного назначения. Требования к надежности. Состав и порядок задания. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 1998.
7. Trimp, M.E. Optimize initial spare parts inventories: an analysis and improvement of an electronic decision tool / M.E. Trimp, R. Dekker, R.H. Teunter. – Report Econometric Institute E1 2004-52, Erasmus University Rotterdam. – 2004. – 70 p.
8. MIL-STD-1388-2. Department of Defense Requirements for a Logistic Support Analysis Record, 1993.
9. Love, R.E. An Analysis of Spare Parts Forecasting Methods Utilized in the United States marine Corps / R.E. Love, B.F. Stebbins. – Thesis AD-A184 698, Naval Postgraduate School, Department of the Navy, 1987.
10. MIL-STD-188-125-1 High-Altitude Electromagnetic Pulse (HEMP) Protection for Ground-Based C4I Facilities Performing Critical, Time-Urgent Missions; Part 1: Fixed Facilities.
11. IEC 61000-2-13: 2005 Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 2-13: Environment – High-power electromagnetic (HPEM) environments – Radiated and conducted.
12. Промышленные электротермические установки / Н.М. Некрасова, Л.С. Кацевич, И.П. Евтюкова. – М.: Госэнергоиздат, 1961. – 415 с.