

НЕКОТОРЫЕ ПРИНЦИПЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПРИ ИХ ПРОЕКТИРОВАНИИ

А. П. Осипцов

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров

Категорический императив безопасности

В процессе развития технологической цивилизации постоянно растет уровень овладения энергией и уровень мощности создаваемых технических систем. Примеры – электрические энергостанции, плотины водохранилищ гидроэлектростанций, ракеты, склады хранения взрывчатых веществ (ВВ) и боеприпасов, ядерное оружие и его инфраструктура, крупнотоннажные суда, транспортные самолеты большой грузоподъемности, газопроводы, хранилища топлива и т. д.

Очевидная опасность высокоэнергетичных технических систем (ВЭС) постоянно поддерживает актуальным вопрос обеспечения их санкционированного, контролируемого приведения в действие и заставляет предпринимать, в том числе, проектные усилия по максимально возможному предотвращению несанкционированной реализации опасности.

Специалисты в области промышленной безопасности, охраны труда, кроме прочего, должны четко понимать устройство тех систем, безопасность работы с которыми они контролируют, а значит им необходимо и знание принципов, которыми руководствуются разработчики этих систем, стараясь проектировать и конструировать их максимально безопасными.

В полном согласии с философским законом диалектического материализма – законом единства и борьбы противоположностей – у требования обеспечения безопасности имеется естественное противоречие

с требованием обеспечения работоспособности. Одно достигается за счет другого, в ущерб другому. Инженерное искусство заключается в поиске, оценке возможности и достижении (при реализации) компромисса, оптимума, баланса этих основных характеристик технической системы в зависимости от наиболее важных и актуальных на момент разработки факторов – геополитических, финансовых, социальных, экологических, технологических и др.

Опыт работ РФЯЦ-ВНИИЭФ позволяет выделить ряд принципов проектирования технических устройств и систем, которые направлены на обеспечение безопасности. Эффективность этих принципов подтверждена годами лабораторных, опытно-конструкторских, испытательных и эксплуатационных работ. Часть информации известна. Однако неоспоримо, что проблема обеспечения безопасности никогда не теряет актуальность и регулярные ее обсуждения целесообразны.

Какими же техническими принципами следует руководствоваться и какими средствами можно добиться повышения безопасности при разработке ВЭС?

Обзор подготовлен на основе открытых источников.

Примеры принципов безопасности и их реализации в конструкциях

Принципы ограничения доступа

Один из очевидных и простых принципов обеспечения безопасности – **принцип**

ограничения доступа к ключевым элементам технической системы (ТС). Доступ к ключевым элементам ТС должен быть перекрыт изначально. Размещение ключевых элементов должно быть по возможности скрытым, по **принципу маскировки**, т. к. **демонстрация возможности провоцирует ошибку**.

Однако это не всегда возможно. Часто ВЭТС «насыщается» энергией или энергоносителем задолго не только до применения, но и до момента окончательного изготовления, когда доступ к ключевым цепям еще имеется. Для предотвращения опасного запускающего энергетического воздействия на ключевые цепи ТС при сборочно-разборочных операциях применяется **принцип естественной автоматической блокировки ключевых элементов системы**.

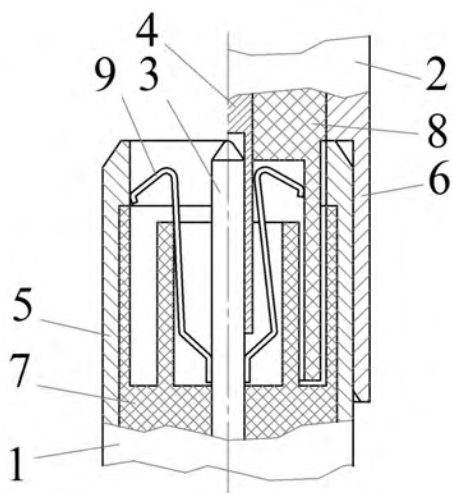


Рис. 1. Электрический разъем с блокирующими ламелями в открытом (слева) и состыкованном (справа) состояниях: 1 – вилка, 2 – розетка, 3, 4 – внутренние контакты, 5, 6 – наружные контакты (корпусные), 7, 8 – изоляторы, 9 – упругая ламель-шунт

Например, в электрических цепях возможно применение разъемов с встроенными блокирующими (шунтирующими) устройствами по типу описанных в изобретении «Электрический разъем» [1]. Если входной разъем открыт для доступа, то его цепь за-

шунтирована и заземлена. Отключение блокирующего шунта происходит автоматически механически при стыковке с ответной частью, когда опасного доступа к ключевой цепи – цепи питания уже нет.

Другой подобный способ описан в изобретении «Взрывное устройство» [2]. Детонационная цепь между детонатором и зарядом ВВ замыкается специальным мостиком безопасности, который в процессе и после установки перекрывает опасный доступ к детонатору.

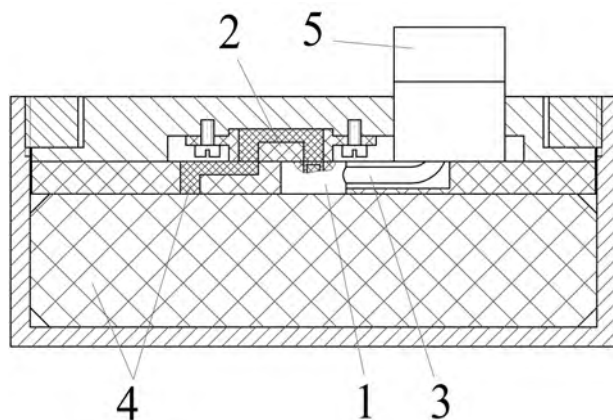


Рис. 2. Взрывное устройство с детонационным «мостиком безопасности»: 1 – детонатор, 2 – детонационный мостик безопасности, 3 – цепь подрыва, 4 – ВВ, 5 – заглушка

Проектируются также системы в соответствии с **принципом локального ограничения доступа к ключевым элементам**, когда защитные элементы фиксируются неразъемными снаружи замковыми устройствами, которые могут быть демонтированы после полной разборки изделия. Это также соответствует **принципу отличия порядка разборки от порядка сборки**.

Принципы структурных блокировок

Другой очевидный и простой принцип безопасности – **принцип недостающего ключевого звена (ПНКЗ)**. Здесь ключевое слово – ключ. Без ключа замок не открывается. На любом этапе производства, пассивного транспортирования или эксплуата-

онного хранения ТС не должна несанкционированно включаться. Для этого наиболее надежной мерой безопасности будет изъятие и отдельное хранение какого-либо существенного элемента с ограничением доступа к нему.

Иногда ТС содержит несколько подсистем и тогда работоспособность и приведение в действие ТС («запуск энергетического потока») достигается только при условии срабатывания всех подсистем – последовательного, одновременного или реализуемого в особом порядке. Такая ТС более защищена от случайного срабатывания, менее опасна, более обусловлена. Она работает как многовходовый сумматор – логический элемент «И». Такая структура ТС ставит реализацию ее срабатывания в зависимость от работоспособности каждого звена и позволяет гарантировать неработоспособное состояние ТС и отсутствие неконтролируемого полномасштабного «энергетического потока» вплоть до начала санкционированного применения, когда производится включение (перевод в работоспособное состояние) всех компонент ТС и запускаемый «энергетический поток» системы становится прогнозируемо управляемым.

Наиболее простой и яркий образ такой системы – обычная многозвенная цепь, в которой каждое звено необходимо, так, что при выходе из строя (сломе) любого из звеньев цепь перестает функционировать – передавать усилие.

Можно воспользоваться этим «цепным» свойством системы, чтобы гарантировать управляемое срабатывание (запуск «энергетического потока») только в нужный момент путем включения одного или нескольких предварительно отключенных звеньев системы. Чаще всего это достигается введением дополнительных устройств – коммутаторов – включателей «энергопотока».

Спровоцировать несанкционированное срабатывание ТС может только нештатное внешнее воздействие достаточного уровня – аварийное, ошибочное или другого характера. В этом случае внешние воздействия спо-

собны, как цепь запуска в триоде, привести к неконтролируемой реализации энергетического потенциала ВЭС. Яркие примеры – Чернобыль и Фукусима. В первом случае воздействия были ошибочными, во втором – аварийными.

И если отсутствие ключевого звена призвано защитить от ошибочных воздействий, то при аварийных воздействиях может применяться **принцип введения «слабого» звена** для приведения ТС в неработоспособное состояние при опасном внешнем воздействии. Для этого в систему, в структурную цепь ее ключевых звеньев вводится дополнительное устройство, заведомо ломающееся при достижении внешними воздействиями опасного для ВЭС уровня. Но таким устройством может быть и одно из ключевых звеньев системы, наиболее нестойкое к данному внешнему воздействию и структурно или пространственно размещаемое так, чтобы первым подвергнуться этому воздействию.

Пример реализации «слабого» звена в электрических цепях – плавкие или другого типа предохранители.

В не столь традиционных детонационных цепях в качестве «слабого» звена работает взрывное устройство по типу «прутковая защита» [3]. В некоторых изделиях, содержащих бризантные ВВ различной чувствительности, опасным элементом оказывается детонатор, содержащий наиболее чувствительное ВВ, способное взорваться при аварийном пулеосколочном воздействии и инициировать взрыв основного заряда малочувствительного ВВ. Для исключения такой возможности в детонационную цепь между детонатором и основным зарядом вводится разветвленный детонационный канал, окружающий детонатор своеобразной каркасной защитой. При воздействии опасного фактора первой до момента опасного срабатывания детонатора прерывается детонационная цепь, что предотвращает распространение детонации.

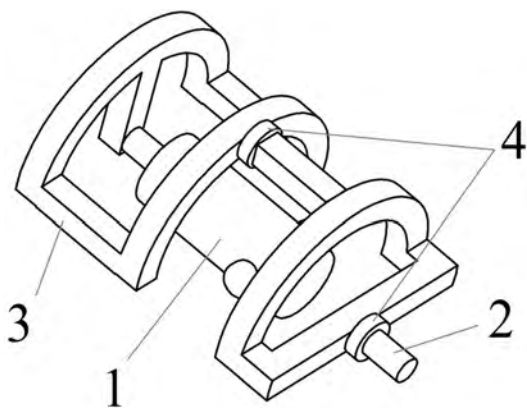


Рис. 3. Вариант «прутковой защиты» от детонации детонатора (корпусные детали не показаны): 1 – детонатор, 2 – выход детонации, 3 – детонационный канал, 4 – детонационный триод

Для сокращения времени работы в канал введены детонационные триоды – ДТ (сумматоры) по типу изобретенного Бабаком П. В. (ВНИИТФ) «Взрывного логического элемента И» [4]. Надо отметить, что ДТ – это управляемый элемент, который, как и электронный триод (транзистор), может быть использован для создания детонационных цепей, управляемых, в том числе, с целью обеспечения безопасности.

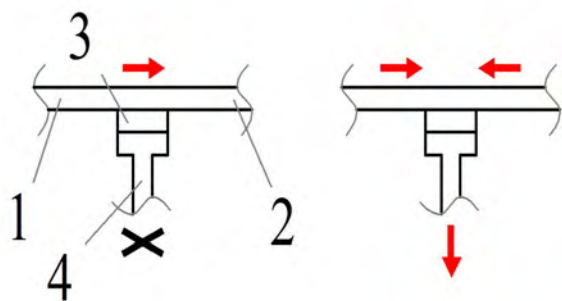


Рис. 4. Взрывной логический элемент И – детонационный триод Бабака П. В. и принцип его работы: 1, 2 – входы, 3 – сепаратор, 4 – выход. Стрелками показано направление хода детонации

Изобретение и проработка вариантов ДТ была начата американскими инженерами еще в середине XX века. Вероятно на этой основе в СССР, по крайней мере в на-

шей отрасли, пионером освоения ДТ стал сотрудник ВНИИТФ Белявский А. Г. Им даже был предложен термин «детоника» (данное направление по аналогии с микроэлектроникой и учитывая размеры устройств, можно назвать миллидетоникой). Наиболее интересен с точки зрения простоты конструкции уже упомянутый ДТ Бабака П. В., который также был независимо изобретен и испытан у нас в начале 1990-х. Был изобретен и ряд других конструкций ДТ. Но принцип работы всех этих ДТ основан на особенностях распространения детонации по удлиненным каналам [5, 6] – на наличии «слоя Харитона» [7] – поверхностного слоя удлиненного заряда ВВ со сниженным давлением протекания химической реакции и частично непрореагировавшим ВВ из-за «разгрузки» в окружающий материал.

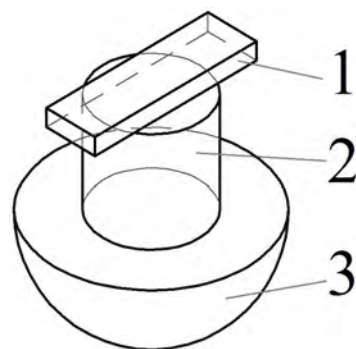


Рис. 5. Детонационный триод с сепаратором из ВВ: 1 – детонационный канал столкновения, 2 – сепаратор, 3 – заряд ВВ

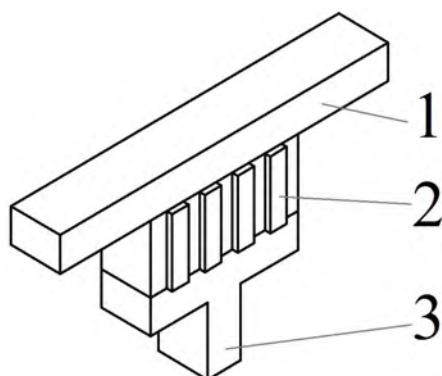


Рис. 6. Детонационный триод с пакетным сепаратором из инертных пластин и пластин из ВВ: 1 – канал столкновения, 2 – пакетный сепаратор, 3 – выходной канал

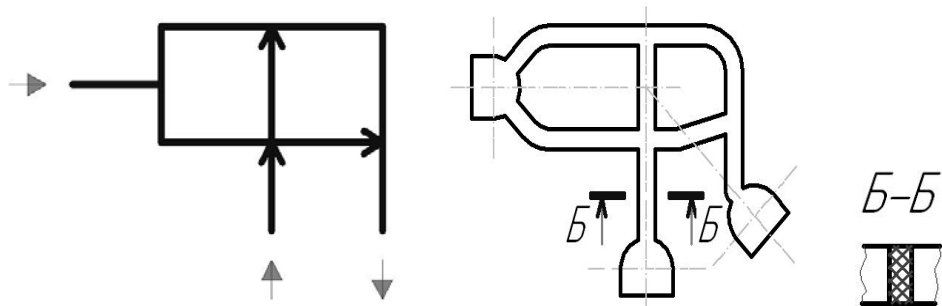


Рис. 7. Детонационный триод с «поперечным» затуханием детонации на поворотах узких каналов (схема и конструкция без корпусной детали). Стрелками у входов и на выходе показано направление хода детонации. Стрелки в сочленениях связей схемы символизируют прерывание связи

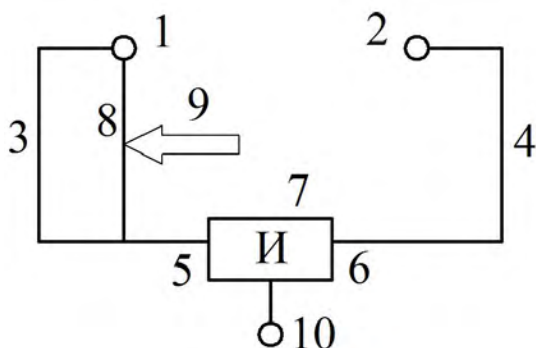


Рис. 8. Вариант схемы управляемой детонационной логической цепи с управляемым каналом вывода из строя (УКВС): 1, 2 – детонаторы, 3, 4 – основные каналы, 5, 6 – входы логического элемента И, 7 – логический элемент И, 8 – УКВС, 9 – управляющее (прерывающее) воздействие, 10 – выход

На основе ДТ проработан ряд схем так называемых «взрывологических цепей» (ВЛЦ). При анализе этих схем нами предложен **принцип функционального разрыва**, на основе которого построена запатентованная «Схема управляемой детонационной логической цепи» [8]. В симметричную схему ВЛЦ введен рассинхронизирующий управляемый канал вывода из строя (УКВС) и она изначально неработоспособна – самоуничтожается при случайном подрыве детонаторов практически в любом режиме. В то же время для приведения в работоспособное состояние ветви основной цепи не требуют каких-либо манипуляций – достаточно отключить (прервать) УКВС. Данная схема демонстрирует пример снижения влияния мер безопасности на работоспо-

собность, когда управляющие манипуляции производятся со вспомогательной цепью, а не основной.

В устройствах однократного действия применение принципа функционального разрыва с отключением УКВС может осуществляться наиболее простыми средствами в соответствии с **принципом простоты коммутирующих устройств**. Это также позволит сохранить на высоком уровне надежность ТС.

Еще одним примером построения слабого звена ВЭТС может быть «Устройство для формирования детонационной волны» [9]. В составных взрывных системах для передачи детонации основному заряду ВВ иногда применяются ВВ большей чувствительности. При пожаре такое ВВ может

расплавиться, накопиться в полостях конструкции и сдетонировать. При этом опасная связь с основным зарядом ВВ сохраняется. Для предотвращения передачи аварийной детонации предложено оснастить инициирующий элемент сердечником из материала с плотностью, отличающейся от плотности расплава ВВ, и отделить элемент от основного заряда инертным сепаратором. При этом штатная передача детонации происходит за счет подбоя кумулятивного эффекта, когда детонационная волна, огибая сердечник, становится сходящейся и формирует в сепараторе ударную волну высокой интенсивности, способную инициировать детонацию в основном ВВ. В случае же пожара, сердечник, в зависимости от плотности материала, тонет или всплывает в полости с расплавом ВВ от гравитационного воздействия и искажает конфигурацию ВВ с предотвращением формирования детонационной волны необходимой интенсивности.

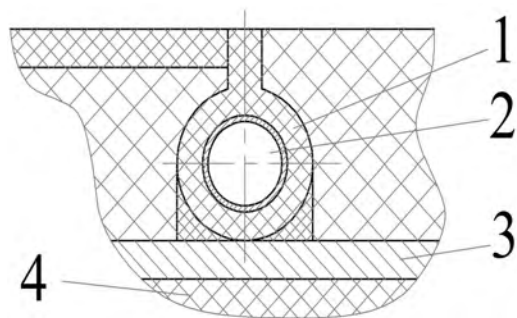


Рис. 9. Устройство для формирования детонационной волны, препятствующее передаче детонации при пожаре: 1 – расплавляемое ВВ, 2 – сердечник, 3 – сепаратор, 4 – основное ВВ

Для защиты размыкаемых электрических связей от случайного воздействия предлагается применять индуктивный разъем [10, 11] в соответствии с **принципом механического разрыва при сохранении функциональной связи** посредством проникающих полей (в данном случае – переменного магнитного поля). Он работает как трансформатор в цепи переменного или импульсного тока, только – разъемный трансформатор. В этом случае опасно открытые

токоведущие части разъема не нужны и могут быть постоянно изолированными от внешней среды.

Выводы

Таким образом, нами сделана попытка детерминировать некоторые принципы обеспечения безопасности и защищенности ВЭТС (частично – традиционные, частично – предлагаемые вновь), как возможные постулаты для дальнейшего использования.

Приведем сводный перечень продемонстрированных принципов обеспечения безопасности ВЭТС при их проектировании и принципов проектирования устройств безопасности ВЭТС:

- принцип недостающего ключевого звена;
- принцип введения слабого звена («подставляемого» звена);
- принцип пассивной безопасности (озвучен Кириенко С. В. после Фукусимской аварии), который можно конкретизировать в:
 - в принципе естественной автоматической блокировки ключевых элементов системы (либо – опережающего перекрытия или автоматического переноса блокировки);
 - в принципе функционального разрыва (в отличие от механического разрыва);
 - принцип локального ограничения доступа к ключевым элементам (замковые устройства ограничения доступа);
 - принцип отличия порядка разборки от порядка сборки (для реализации принципа локального ограничения доступа);
 - принцип механического разрыва при сохранении функциональной связи – немеханической либо механической другого характера;
 - принцип маскировки ключевых элементов;
 - принцип простоты (надежности) коммутирующих устройств.

Показанные выше варианты схемно-конструктивных технических решений демонстрируют способы реализации этих принципов обеспечения безопасности.

На взгляд автора, исходя из гуманитарных позиций, данные подходы должны быть открыты и доступны научному и инженерному сообществу без ограничений, поскольку направлены на предотвращение техногенных аварий и катастроф, если это не противоречит требованиям сохранения служебной и государственной тайны и не раскрывает способы достижения работоспособности или повышения тактико-технических характеристик ТС.

Список литературы

1. Авторское свидетельство СССР на изобретение № 938342. МПК: H01R17/00. Электрический разъем / Д. А. Фишман, А. Е. Телегин, В. А. Афанасьев, А. В. Зубанов. ВНИИЭФ. № 2890882/07. Заявлено 04.03.1980. Опубликовано 23.06.1982. Бюл. № 23.

2. Пат. РФ на изобретение № 2542803. МПК¹³: F42B 3/02, F42B 3/10. Взрывное устройство / А. П. Осипцов, В. А. Афанасьев, Е. Д. Яковлев. ВНИИЭФ. № 2013152815 / 11. Заявлено 27.11.2013. Опубликовано 27.02.2015. Бюл. № 6.

3. Пат. РФ на изобретение № 2575900. МПК: F42B 3/10. Взрывное устройство (варианты) / А. П. Осипцов, Р. М. Тагиров, Д. В. Горбенко, А. А. Поклонский. ВНИИЭФ. № 2014136290/02. Заявлено 05.09.2014. Опубликовано 20.02.2016. Бюл. № 5.

4. Авторское свидетельство на изобретение № 1778491. МПК: F42B 3/10, F42C 15/00. Взрывной логический элемент И / П. В. Бабак ВНИИТФ. № 4880879. Заявлено 05.11.1990. Опубликовано 30.11.1992.

5. Пат. РФ на изобретение № 2527818. МПК: F42B 3/10, F42C 19/00, F42C 15/34.

Детонационный триод (варианты) / А. В. Зубанов, А. П. Осипцов. ВНИИЭФ. № 2013116699/03. Заявлено 11.04.2013. Опубликовано 10.09.2014. Бюл. № 25.

6. Пат. РФ на изобретение № 2616044. МПК: F42B 3/10, F42C 19/00. Детонационный триод / А. П. Осипцов. ВНИИЭФ. № 2016112241. Заявлено 31.03.2016. Опубликовано 12.04.2017. Бюл. № 11.

7. Балаганский И. А., Мержевский Л. А. Действие средств поражения и боеприпасов: Учебник. Новосибирск: Изд-во НГТУ. 2004. С. 191.

8. Пат. РФ на изобретение № 2470256. МПК: F42D 1/04, F42B 3/10. Схема управляемой детонационной логической цепи / А. П. Осипцов, В. А. Афанасьев, М. Н. Балюк, Р. М. Тагиров, Д. В. Горбенко. ВНИИЭФ. № 2011118030/03. Заявлено 04.05.2011. Опубликовано 20.12.2012. Бюл. № 35.

9. Пат. РФ на изобретение № 2556733. МПК: F42B 3/10. Устройство для формирования детонационной волны / А. П. Осипцов ВНИИЭФ. № 2014107582/11. Заявлено 27.02.2014. Опубликовано 20.07.2014. Бюл. № 20.

10. РФ на изобретение № 2700662. МПК: H01F 38/14. Высокочастотный индуктивный разъем / А. П. Осипцов, Р. В. Яковенко, Г. С. Забелина, Н. М. Попова. ВНИИЭФ. № 2018117746. Заявлено 14.05.2018. Опубликовано 18.09.2019. Бюл. № 26.

11. Пат. РФ на изобретение № 2698350. МПК: F42D 1/05, F42B 3/182. Электрическая взрывная сеть / А. П. Осипцов, Р. В. Яковенко, В. А. Афанасьев. ВНИИЭФ. № 2018117750. Заявлено 14.05.2018. Опубликовано 26.08.2019. Бюл. № 24.