

И.А.Бершадский, Ал.А.Дубинский

ТЕСТИРОВАНИЕ МЕТОДА БЕСКАМЕРНОЙ ТЕПЛОВОЙ ОЦЕНКИ ИСКРОБЕЗОПАСНОСТИ СХЕМЫ ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ

Метод бескамерной тепловой оценки искробезопасности схемы источника питания типа ИПИ-24-3 обеспечивает приемлемую точность результатов, позволяет избежать необоснованных запасов при определенных предельных параметров, вызванных особенностями проверок и испытаний во взрывных камерах.

К л ю ч е в ы е с л о в а: искробезопасность, бескамерная тепловая оценка, источник питания

Постановка проблемы. Современные тенденции развития автоматизации технологических процессов на предприятиях, потенциально опасных по взрыву газов и пылей, в том числе на угольных шахтах, приводят к необходимости оснащения взрывозащищенного электрооборудования цифровыми устройствами управления и защит, позволяющими осуществлять как полный мониторинг всех функций, так и дистанционное управление и изменение параметров. Выходные цепи датчиков и задающих устройств, расположенных вне взрывобезопасной оболочки, целесообразно делать искробезопасными, что существенно уменьшает их габаритные размеры и позволяет применять серийные устройства общего назначения.

Интеллектуальные датчики температуры, давления, потока и концентраторы и контроллеры верхнего уровня требуют достаточно мощных искробезопасных источников питания. Оптимальным уровнем напряжения для них является 12 В, в отдельных случаях (для отдаленных или мощных потребителей) – 24 В, а номинальная сила тока достигает 5А при напряжении 12 В и 3 А при напряжении 24 В. Для реализации таких параметров требуются принципиально новые подходы к построению искробезопасных источников питания.

Искробезопасные источники повышенной мощности, отключающиеся при коммутации цепи, используются также для питания электрогидропереключателей на всех автоматизированных проходческих и добычных комбайнах. В соответствии с «Программой повышения безопасности труда на угольных шахтах», утвержденной постановлением КМУ от 06.07.2002 г. № 939, актуальным является обеспечение устойчивой и надежной работы систем искробезопасного электропитания.

Анализ исследований и публикаций. В [1] приведено описание искробезопасного блока питания и защиты для цифровых систем управления и диспетчеризации. Исследование разрядов и процессов коммутации, а

также аварийных режимов позволяет оценить искробезопасность подключенных к нему цепей. Работы [2, 3] показывают возможность использования с этой целью предлагаемого метода бескамерной тепловой оценки опасности искрения в электрических цепях взрывозащищенного оборудования. Использование такого метода для расчета сложных схем разрабатываемых и эксплуатируемых искробезопасных источников питания ранее не проводилось.

Цель статьи. Обоснование целесообразности бескамерной тепловой оценки искробезопасности электрических цепей рудничного электрооборудования на примере исследования переходных процессов при коммутации индуктивной нагрузки искробезопасного источника питания ИПИ-24-3 и определения предельных параметров его работы.

Результаты исследований. Предлагаемый метод расчетной оценки искробезопасности электрических цепей, называемый далее методом бескамерной тепловой оценки, повышает точность определения опасности искрения при размыкании контактов электрической цепи сложной конфигурации в атмосфере взрывоопасной смеси за счет усовершенствования модели расчета параметров слаботочного разряда в электрических цепях взрывозащищенного электрооборудования. Кроме того, метод обеспечивает уменьшение объема трудоемких испытаний при экспериментальной оценке искробезопасности, особенно на стадии проектирования и при поиске оптимальных схемных решений.

Структура математической модели (рисунок 1), реализующей данный метод, содержит источник 1 электрической энергии с линейной, трапецеидальной или прямоугольной вольтамперной характеристикой на выходе, реактивную электрическую цепь 2 с произвольным соединением входящих в неё элементов, блок 3 дугового разряда, учитывающий динамическое изменение тепловой постоянной времени дугового разряда τ и отводимой от разряда мощности P_d в зависимости от силы тока и напряжения коммутационного процесса, конвертор 4 из электрической модели в тепловую, блок 5 результатов расчета температурного фронта пламени, равного температуре горения метановоздушной смеси 2000 К, накопители 6 и 7 информации, позволяющие применить графические средства для вывода результатов или сохранения и документирования отчетов. Для расчетов в блоках 3 и 4 используется база теплофизических свойств газовых смесей 8 в заданных условиях работы электрооборудования и база дизайна искробезопасного механизма 9, учитывающая скорость и характер расхождения контактов, их размеры и материал.

Программа, реализующая предлагаемый способ, функционирует следующим образом. В нормальном режиме работы под действием источника 1 в электрической цепи 2 рассчитывается установившийся режим, характеризуемый заданной силой тока искробезопасного аппарата $I(t)$ и напряжением рабочих элементов $U(t)$. При коммутации одной из ветвей элек-

трической цепи, в которой установлен блок 3 дугового размыкания с заданными параметрами, рассчитывается выделение энергии разряда $W(t)$ и времени его существования T , а также зависимость мгновенного изменения эффективной электрической

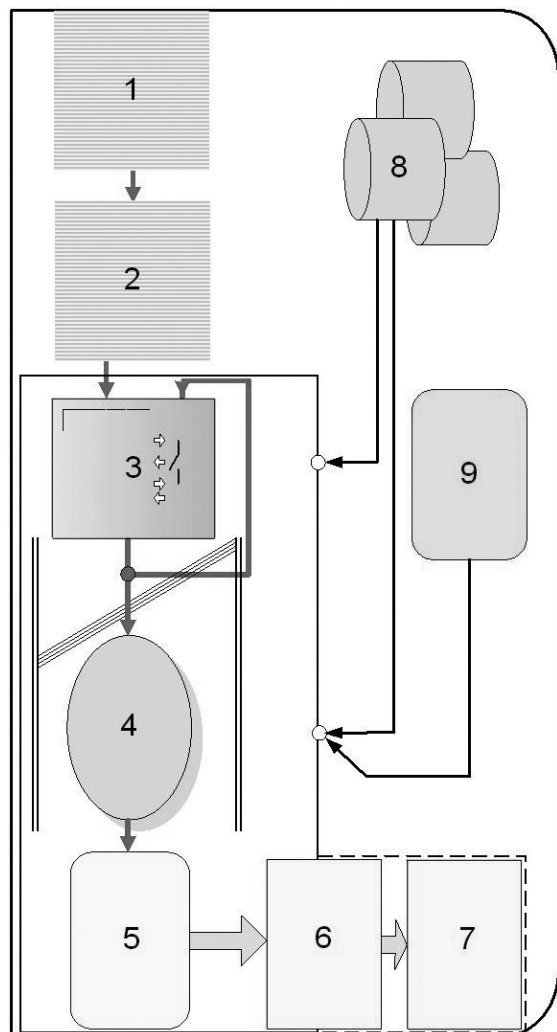


Рисунок 1 – Блок-диаграмма программного обеспечения автоматического анализа воспламенения в тестовой электрической цепи

мощности дуги $P(t)$ от времени t . Модель разряда представлена передаточной функцией в виде математической записи уравнения Майра, а тепловая постоянная времени дуги τ корректируется обратной связью по силе тока в блоке 3.

Полученные параметры разряда передаются в тепловую модель блока 4. В нем решается система дифференциальных уравнений в частных производных, определяющая развитие теплового взрыва (наличие или отсутствие температурного фронта пламени) с учетом явлений теплопроводности и диффузии при экзотермической химической реакции окисления метановоздушной смеси. Скорость размыкания контактов цепи, начальная проводимость дуги и момент начала размыкания цепи определяются пользователем в диалоговом окне.

Задача состояла в оценке искробезопасности электрической цепи с источниками повышенной нагрузочной способности, отключающимися при коммутации и контролирующими превышение модулем скорости изменения силы тока нагрузки значения более 1 А/мс. Для анализа работы указанных источников необходимо определить энергию и время разряда в режиме отключения нагрузки, уровень и форму сигналов, формирующихся при коммутации на схемах сравнения, а также чувствительность и быстродействие ключей. Для цепи нагрузки с учетом длины кабелей до 1000 м необходимо найти предельные параметры подключаемой нагрузки. Опасность ее подключения к источнику должна проверяться путем анализа опасности искрения емкостных элементов.

Исследования проведены на примере коммутации активно-индуктивной нагрузки источника питания искробезопасного типа ИПИ-24-3 (но-

минальное выходное напряжение 24 В, сила номинального выходного тока 3 А) с маркировкой взрывозащиты Ив по ГОСТ 12.2.020-76, выполненного по комбинированной схеме: с токовой отсечкой и с отключением по производной силы тока нагрузки.

ИПИ-24-3 состоит из двух функциональных узлов: преобразователя напряжения сети 127...220 В в напряжение постоянного тока 12 В или 24 В и барьера искрозащиты (рисунок 2).

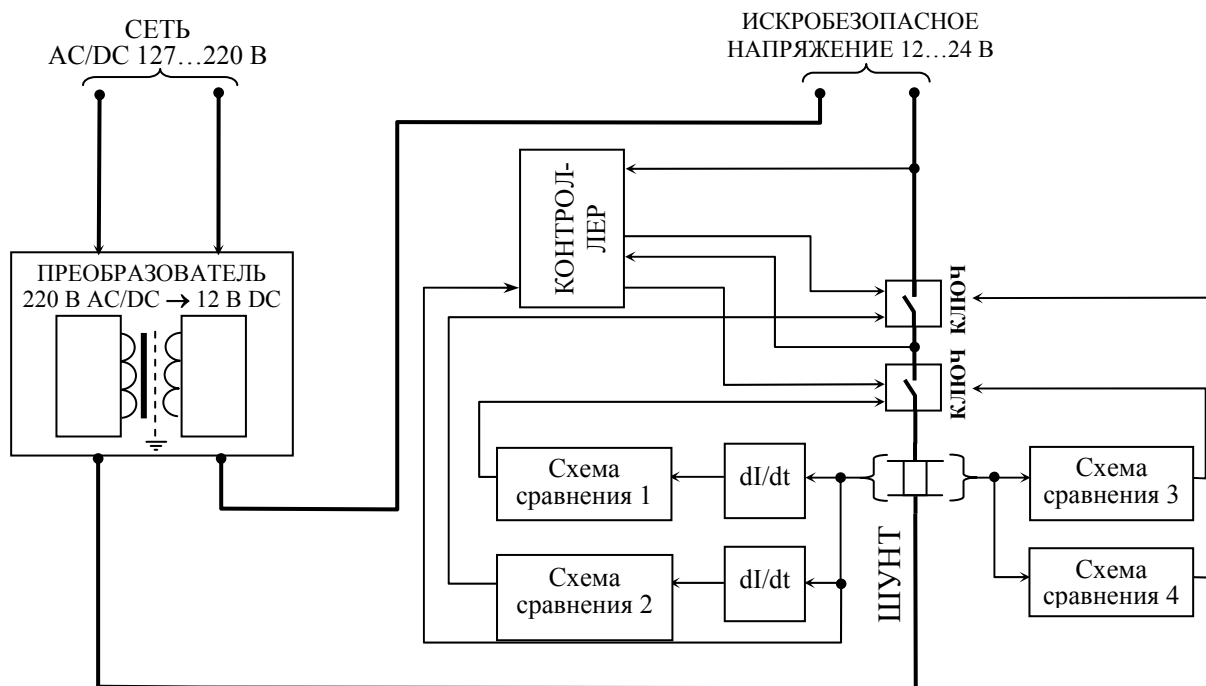


Рисунок 2 - Блок-схема искробезопасного источника питания

Барьер искрозащиты состоит из двух силовых ключей с независимым управлением, обеспечивающим дублирование, шунта для измерения силы тока нагрузки источника и схемы управления. Для обеспечения требуемого быстродействия при ограничении силы тока на заданном уровне используются две независимые схемы сравнения 3 и 4, которые переводят ключи в линейный режим работы. Ограничение силы тока достигается за счет управления электрическим сопротивлением ключей. Схемы 3 и 4 формируют ниспадающую токовую характеристику с уровнем отсечки 5,5 А (для 12 В) или 3,3 А (для 24 В). Быстродействие схем гарантирует ограничение силы тока в случае короткого замыкания за время 2...3 мкс.

Сигнал от шунта подается также на схемы дифференцирования и сравнения 1 и 2, реализующие компараторы. При превышении модулем скорости изменения силы тока нагрузки заданного значения 1 А/мс они воздействуют на соответствующие силовые ключи и разрывают цепь питания нагрузки. Быстродействие схем – не менее 5...7 мкс. Таким образом, при коммутации цепи нагрузки энергия источника питания почти полностью

рассеивается в сопротивлениях силовых ключей и не выделяется в электрическом разряде. После отключения тока нагрузки схемы 1 и 2 обеспечивают паузу в 20...25 мкс до следующего включения силовых ключей.

Контроллер переводит барьер во включенное состояние и обеспечивает плавное включение ключей со скоростью изменения силы тока, меньшей, чем порог срабатывания схем сравнения 1 и 2, следит за тепловой нагрузкой ключей, не допуская их перегрева, а также контролирует напряжение на нагрузке. Он может приоритетно отключать силовые ключи и включать их, если нет запрета на это со стороны схем сравнения 1-4. Анализируя входные сигналы, контроллер вычисляет мощность тепловой нагрузки силовых ключей и при необходимости отключает их на время паузы.

Расчетная схема цепи барьера искрозащиты показана на рисунке 3. Цепи дублирования и сервисных функций микроконтроллера не показаны, поскольку в коммутации нагрузки они не участвуют. В схеме имеются основной $V1$ (24 В) и вспомогательные источники напряжения $V2$ и $V3$ (5 В) для питания цепей защиты. Транзисторный ключ $X3$ на полевом MOSFET-транзисторе IRL205_IR представлен корректной SPICE-моделью. Узел токовой защиты моделируется транзистором $Q4$, компараторы $X1$ и $X2$ обеспечивают в течение 4,7 мкс подачу отключающего сигнала на ключ $X3$.

Нагрузка индуктивностью LH и сопротивлением RH отключается в момент времени c_{br} . Модель разряда в цепи состоит из ключа $SW1$, управляемого по времени, резистора RD , сопротивление которого отражает динамическую инерционную модель слаботоочного разряда [2], и вспомогательной цепи (источника EI и индуктивности $LI=1$ Гн, рисунок 3). Резистор $R0$ используется для контроля силы выходного тока источника, а резистор $R2$ - для устранения коллизий в программе при подключении индуктивности к источнику напряжения.

После запуска расчета до момента времени $c_{br}=2$ мс сопротивление ключа $SW1$ задано равным 10^{-4} Ом (он замкнут). Через нагрузку протекает ток силой 2,93 А. Начиная с 2 мс сопротивление ключа увеличивается до 10^7 Ом за время 4 нс – контакты размыкаются и остаются в таком состоянии до конца моделирования, при этом в цепь нагрузки вводится сопротивление дугового разряда RD (рисунок 4).

Из рисунка 4г,е следует, что ток нагрузки $I(R0)$ за время расчета проходит фазу колебаний, амплитуда которых постепенно затухает до силы тока обрыва разряда, равной $I_{об} = 20$ мА согласно IEC 60079-11-99.

В то же время напряжение на разрядном промежутке $V(n)$ достигает значения катодного падения напряжения $U_k=8$ В с запаздыванием в 46 мкс, что прослеживается на рисунках 4г,д,е, изображающих переходный процесс в период времени 2...2,4 мс. Таким образом, начало отдачи энергии в разряд совпадает с переходом мощности через ноль (рисунки 5а, в). Окончание отдачи энергии в разряд определяется по графику затухания силы тока после достижения значения $I_{об} = 20$ мА (рисунок 4б).

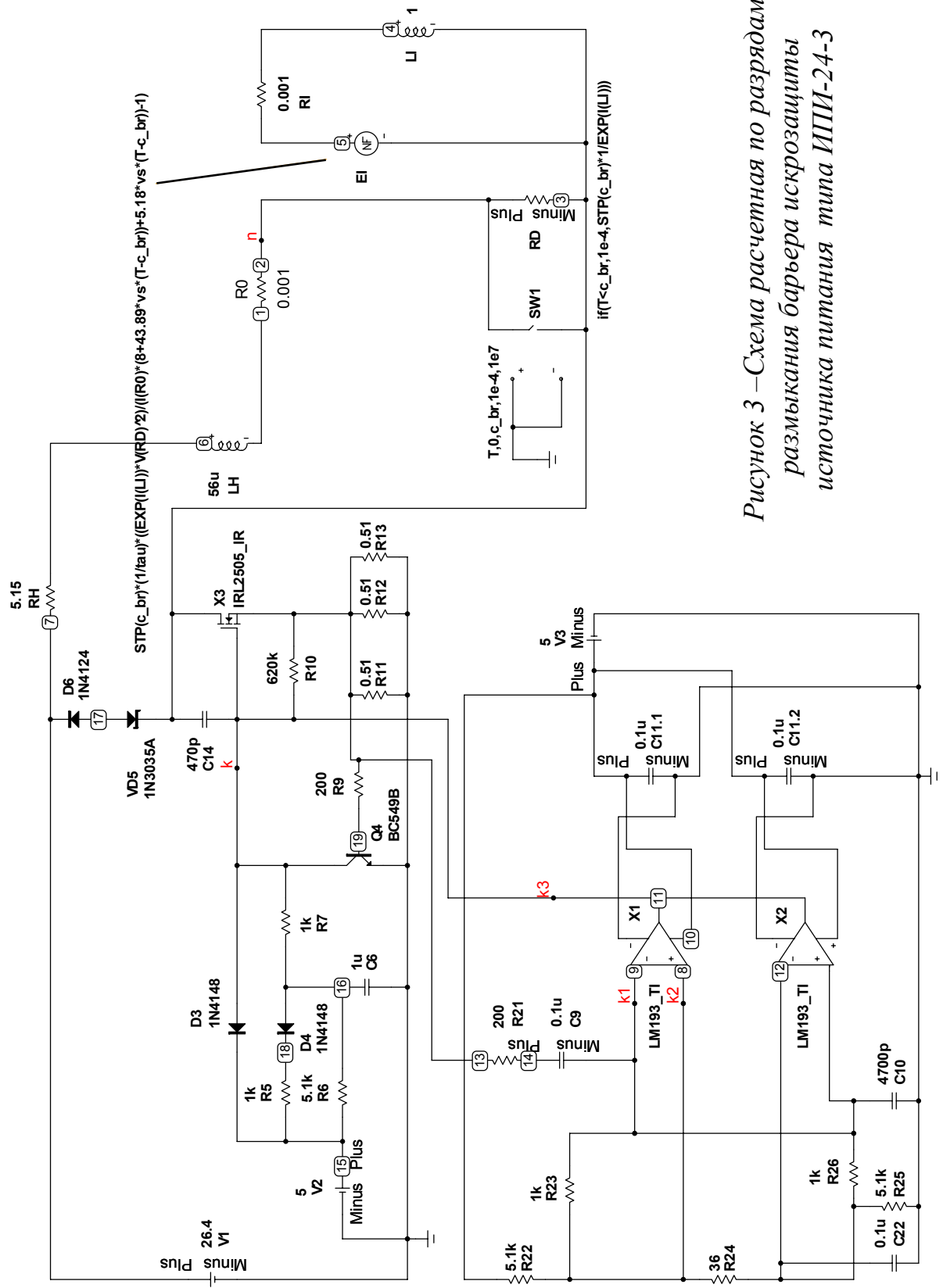


Рисунок 3 – Схема расчетная по разрядам
 размыкания барьера искрозащиты
 источника питания типа ИПИ-24-3

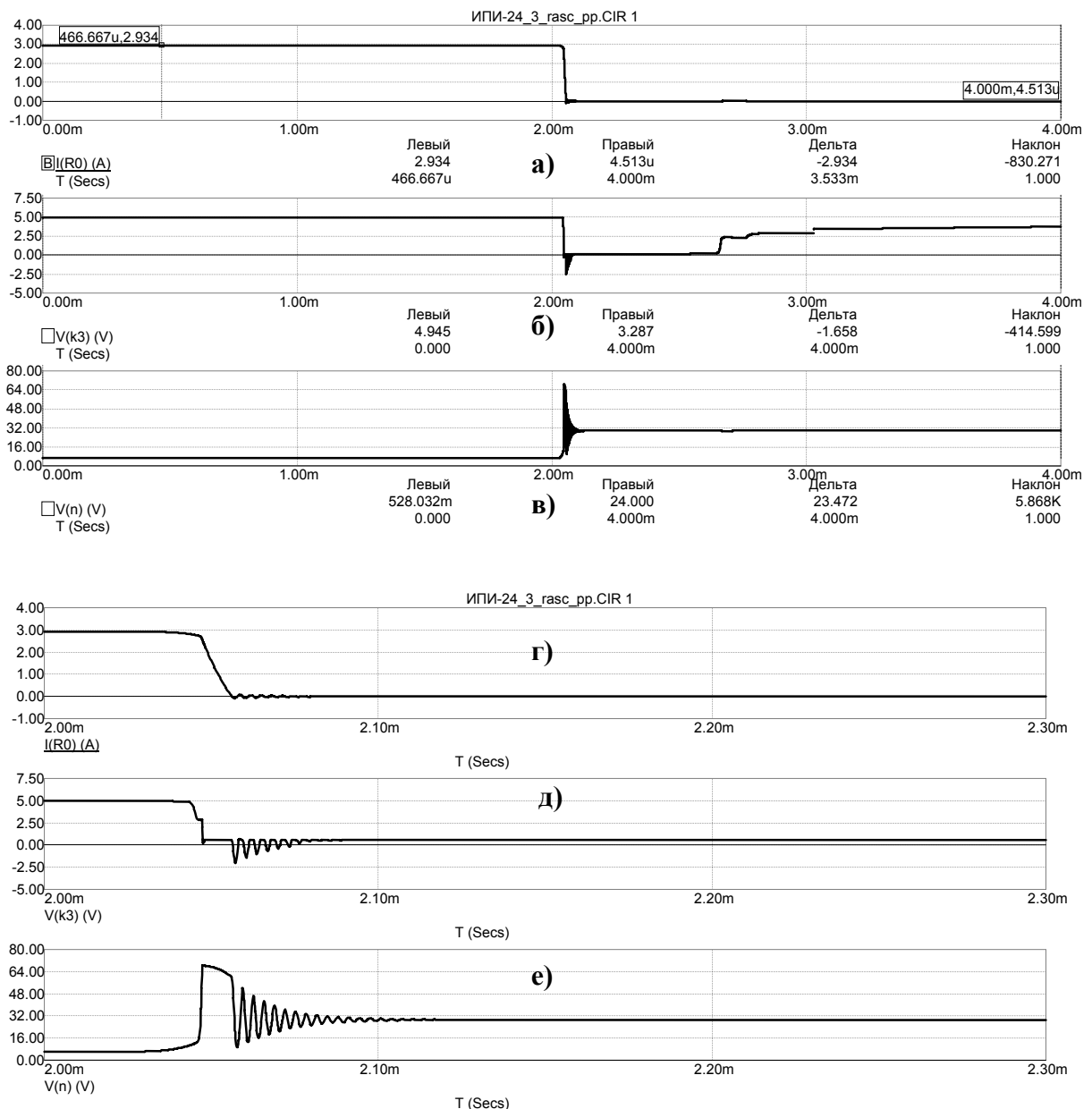


Рисунок 4 – Диаграммы, характеризующие работу источника питания в режиме коммутации: а) сила тока нагрузки $I(R0)$; б) напряжение отключающего сигнала $V(k3)$; в) напряжение на выходе $V(n)$ в интервале времени 0...4 мс; г), д), е) – то же в интервале времени 2...2,3 мс

Следствием колебаний силы тока могут стать срывы разряда при испытаниях источника питания на искробезопасность во взрывных камерах и эпизодические взрывы (с вероятностью $<10^{-3}$). В некоторых случаях это приводит к необходимости иметь излишние запасы по силе тока испытываемой цепи.

Приведенные положения показывают целесообразность предварительных испытаний схем искробезопасных источников питания с помощью компьютерной модели метода бескамерной тепловой оценки и определения параметров разряда и вероятной опасности воспламенения.

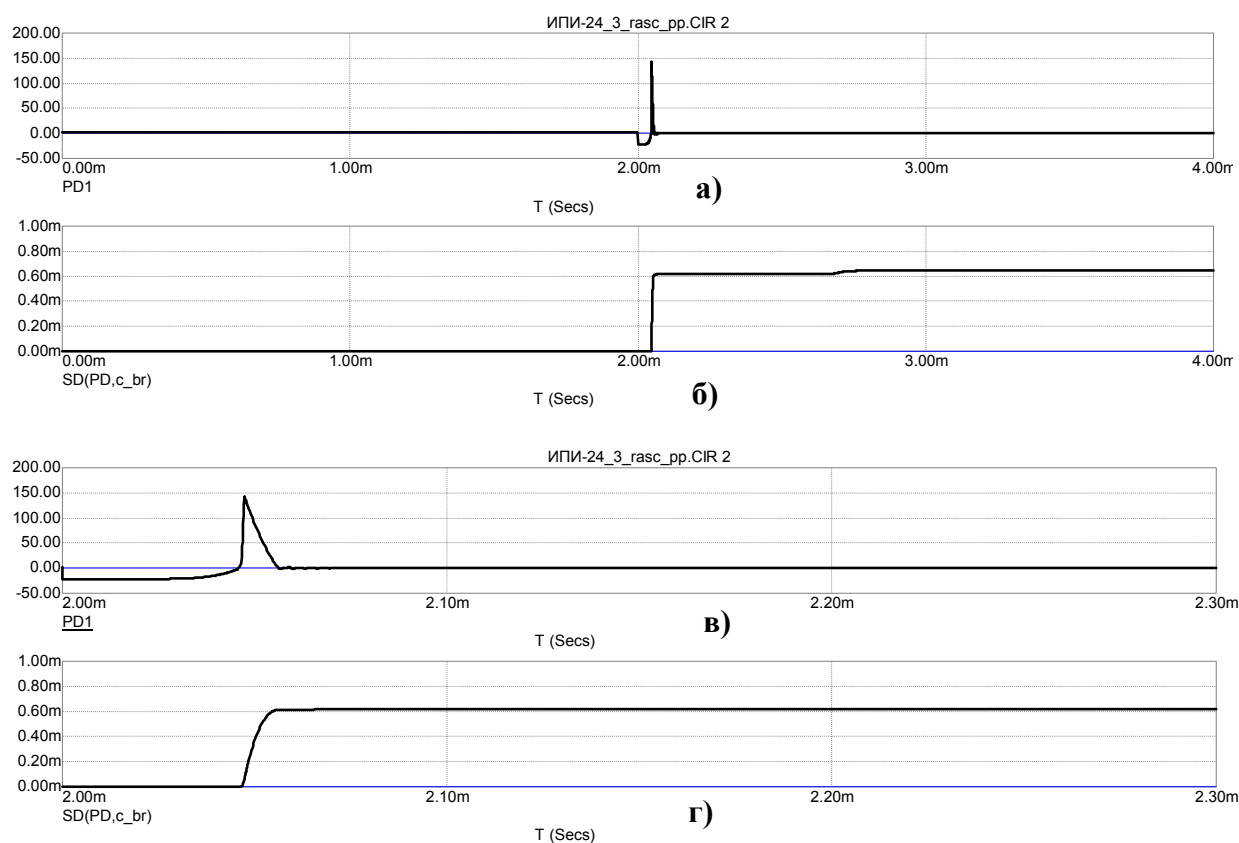


Рисунок 5 - Зависимость мощности нагрузки PD1(а, в) и энергии разряда SD (б, г) источника питания в интервале времени а), б) – 0..4 мс; в), г) – 2...2,3 мс

Результаты тестирования сведены в таблицы 1 и 2. Согласно ГОСТ 22782.5-78 необходимо испытывать искробезопасные цепи с применением коэффициента искробезопасности, чтобы гарантировать испытание или оценку для цепи, которая с большей вероятностью вызовет воспламенение, чем первичная цепь, или же первичная цепь должна испытываться в более легковоспламеняющейся взрывоопасной смеси. При увеличении напряжения сети до 110 % номинального значения или подачей напряжения от батарей источников питания и устройств, ограничивающих напряжение на максимальном уровне, коэффициент искробезопасности должен быть обеспечен одним из следующих способов:

а) для индуктивных и резистивных цепей уменьшают сопротивление ограничительного резистора для увеличения силы тока испытываемой цепи в число раз, кратное коэффициенту искробезопасности. Если коэффициент искробезопасности не может быть достигнут таким способом, то увеличивают напряжение;

б) для емкостных цепей напряжение испытываемой цепи увеличивают в число раз, кратное коэффициенту искробезопасности.

Таблица 1

Индуктивность нагрузки LI , мкГн	Время разряда T , мкс (после окончания колебаний)	Энергия разряда W , мкДж	Температура «поверхности дуги» TK , К	Радиус дуги электрического разряда r , мм	Скорость размыкания v , м/с	Факт воспламенения
100	14,85	376,2	3803	0,095	6,5	нет
150	17,37	574,2	4136	0,118		нет
160	18,65	614,6	4210	0,121		нет
180	18,9	693,8	4351	0,131		есть

Примечание. Газовая смесь – метан, сила тока нагрузки – 2,93 А.

Таблица 2

Индуктивность нагрузки LI , мкГн	Время разряда T , мкс (после окончания колебаний)	Энергия разряда W , мкДж	Температура «поверхности дуги» TK , К	Радиус дуги электрического разряда r , мм	Скорость размыкания v , м/с	Факт воспламенения
50	16,2	0,585	4211	0,116	6,5	нет
55	17,3	0,646	4263	0,123		нет
56	17,97	0,659	4248	0,126		есть
58	18,09	0,683	4281	0,128		есть
60	18,3	0,706	4309	0,13		есть

Примечание. Газовая смесь – метан, коэффициент запаса по току 1,5. Отсюда $I_0 = 3,3 \cdot 1,5 = 4,95$ А, $U_0 = 25 \text{ В} \cdot 1,1 = 26,4$ В

При заданном коэффициенте искробезопасности, например 1,5, для таких цепей вначале в 1,5 раза увеличивают силу действующего в цепи тока. Определяют индуктивность, при которой установленная сила тока становится минимальной воспламеняющей (вызывает воспламенение взрывоопасной смеси с вероятностью 10^{-3}). Затем в 1,5 раза увеличивают напряжение, а силу тока устанавливают равной искробезопасному значению для найденной индуктивности и увеличенного напряжения. После этого проводят испытание цепи на искробезопасность.

При тестировании цепи, работающей в газовой смеси группы I (метан) с силой тока $I(R0) = 2,93$ А, получаем безопасные параметры: индуктивность $LI=160$ мкГн, энергия разряда $W = 614,6$ мкДж, опасная скорость размыкания $v=6,5$ м/с. С учетом коэффициента искробезопасности по силе тока $K_i = 1,5$ имеем $I(R0) = 4,95$ А и напряжение источника $U_0 = 26,4$ В.

Опасность подключения емкостной нагрузки тестировалась согласно расчетной модели рисунка 6. Ключ $SW1$ в исходном состоянии разомкнут, что обеспечивает заряд конденсатора $C1$ до напряжения источника пита-

ния $V1$. Переходный процесс запускается в момент замыкания ключа (100 мкс). Дополнительная цепочка VD , Rd , Dd задает предварительную силу тока через разряд и моделирует возникновение в нем автоэлектронной эмиссии. Начальное напряжение на разряде уменьшается от значения $V1$ до установившегося $U_p = 10$ В по экспоненте с постоянной времени 10^{-9} с. Модель RR задает изменение во времени сопротивления разрядного промежутка, которое, в свою очередь, зависит от параметров разрядного контура.

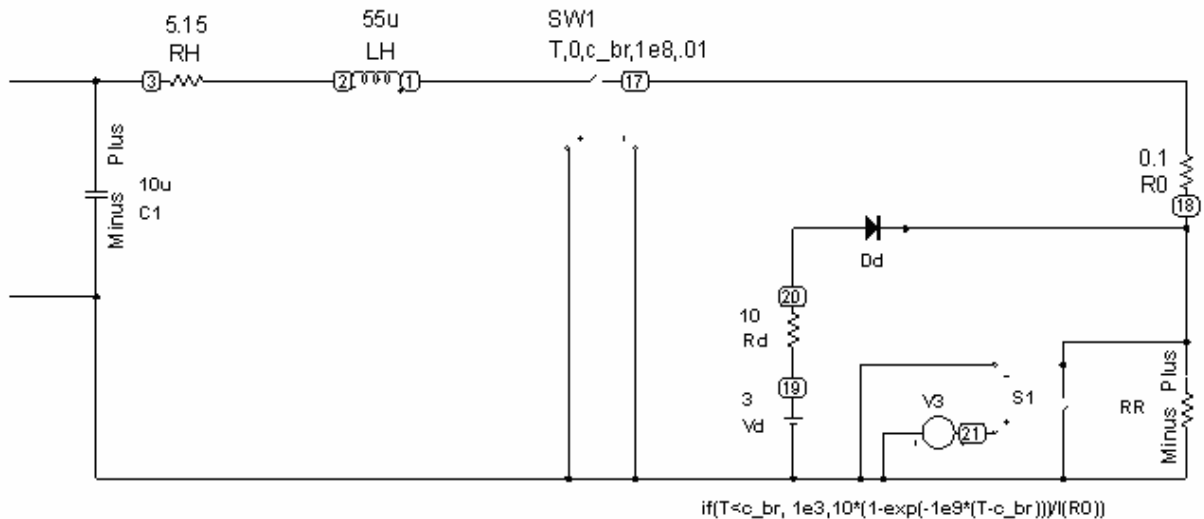


Рисунок 6 – Схема расчетная емкостных разрядов замыкания барьера искрозащиты источника питания типа ИПИ-24-3

Ключ $S1$ используется для имитации режима перехода от сопротивления дугового разряда к сопротивлению контактов при их схождении. Переход выполняется плавно после окончания дугового разряда для предотвращения скачка напряжения.

Безопасные параметры в результате тестирования составляют: $LH=55$ мкГн, $T=17,3$ мкс, $W=0,646$ мкДж, опасная скорость размыкания $v=6,5$ м/с, безопасная емкость при подключении нагрузки LH и RH - 9 мкФ.

Для источников питания ИПИ-24-3 проведены контрольные испытания в Государственном испытательном сертификационном центре взрывозащищенного и рудничного оборудования (Донецк), вывод экспертизы №1843-2010. Допустимые параметры искробезопасных цепей составили:

- индуктивность L_0 – не более 0,05 мГн;
- емкость C_0 – не более 10 мкФ,

что удовлетворительно согласуется со значениями безопасных параметров, полученными расчетным методом бескамерной тепловой оценки.

Примечательно, что анализ протоколов камерных испытаний ряда образцов искробезопасных источников питания показал наличие упреждающих запасов параметров искробезопасных цепей из-за использования об-

разцовых индуктивностей и емкостей с номиналами, кратными 5 и 10. Рассмотренный расчетный метод позволяет устранить этот недостаток камерных испытаний.

Выводы:

1. На стадии проектирования и разработки целесообразно применять метод бескамерной тепловой оценки искробезопасности схем с требуемыми искробезопасными параметрами, применение которого актуально при сопоставлении различных способов обеспечения искробезопасности, в частности, измерительных органов узлов отключения при коммутации, в том числе источника питания типа ИПИ-24-3.

2. Бескамерная оценка также позволяет избежать необоснованных запасов при определении предельных параметров, вызванных особенностями проверок и испытаний во взрывных камерах, что в ряде случаев повышало потребительские качества изделий.

Список литературы

1. Лоцманов М.С. Искробезопасные блоки питания и защиты для цифровых систем управления и диспетчеризации / М.С. Лоцманов, А.А. Дубинский, В.Д. Власов // Взрывозащищенное электрооборудование: сб. науч. тр. УкрНИИВЭ. - Донецк: УкрНИИВЭ, 2007.- С.118-123.

2. Ковалев А.П. Моделирование параметров разряда и расчетная оценка искробезопасности при размыкании электрической цепи / А.П. Ковалев, И.А. Бершадский, З.М.Иохельсон // Электричество.– 2009.- №11.– С. 62-69.

3. Бершадский И.А. Симуляция переходных процессов в искробезопасных цепях горношахтного электрического оборудования и прогнозирования опасности воспламенения газовой смеси / И.А. Бершадский, Д.В. Северин // Вісті Донецького національного технічного університету.- Донецьк: ДонНТУ, 2008. - №2. - С. 178-183.