

**ТЕХНОЛОГИИ**

УДК 621.35.035

**СХЕМОТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ УЗЛОВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ  
БЕЗОПАСНЫХ ТОКОВЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ**

В.А. НЕДЕЛЬКО, А.П. ДОСТАНКО, В.В. БЕРЕЗОВСКИЙ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь**Поступила в редакцию 24 мая 2005*

Представлены схемотехнические решения организации систем защиты источников питания плазменных электротехнологических установок от опасных режимов работы, связанных с резким повышением тока разряда. Дана классификация типов коротких замыканий в нагрузке в соответствии с причиной, вызвавшей их появление. Даны практические рекомендации по организации устройств токовой защиты в составе технологических источников питания.

*Ключевые слова:* тлеющий разряд, дуговой разряд, источник питания, короткое замыкание, устройство токовой защиты.

**Введение**

В технологии электронной техники в настоящее время большой интерес представляют импульсные методы ионно-плазменной обработки поверхностей ввиду определенных особенностей таких процессов. Импульсные методы позволяют снизить температуру подложек, расширить диапазон операционных параметров и номенклатуру обрабатываемых материалов, избирательно управлять параметрами среды, в которой происходит процесс, значительно повысить плотность импульсной плазмы при небольшом уровне средней мощности. Используя особенности горения импульсного плазменного разряда, можно производить модифицирование поверхностей различных материалов, придавая им особые свойства: ионно-плазменное азотирование, цементация, формирование покрытий тугоплавких металлов и др.

Существуют различные способы формирования высоковольтных сильноточных импульсов напряжения с целью возбуждения плазменного разряда [1]. Однако при этом возникают определенные трудности технического характера, связанные с особенностями нагрузки генератора импульсов, которой является плазменный разряд. В силу особенных условий проведения процесса обработки (низкий вакуум, неидеальность конструкции разрядной системы, разные газовые среды и т.д.) часто возникают условия, способствующие переходу плазменного разряда из нормального тлеющего режима в режим дугового разряда. Такой переход сопровождается резким скачкообразным увеличением тока через разрядный промежуток, в течение которого силовая цепь источника импульсного напряжения работает в режиме короткого замыкания, что нередко влечет за собой выход из строя различных составных частей источника. Поэтому при проектировании подобных источников важной задачей является разработка схем токовой защиты устройства. Частично эти задачи возлагаются на дополнительные элементы защиты в виде плавких предохранителей и токовых автоматов. Однако быстрое действие данных

устройств составляет единицы, а то и десятки миллисекунд, что для многих типов силовых ключей недопустимо долго. Очевидно, что быстродействующие системы защиты микросекундного диапазона действия должны основываться на электронных схемах.

Возможны следующие виды аварийных ситуаций, связанные с токовыми перегрузками [2]:

- короткое замыкание I типа;
- короткое замыкание II типа;
- токовая перегрузка;
- ток замыкания на землю.

Деление аварийных ситуаций на токи замыкания на землю, токи короткого замыкания и просто перегрузки по току производится в соответствии с причиной, вызывающей аварию.

Перегрузки по току характеризуются медленным повышением тока нагрузки в результате аварии схемы управления или внезапного уменьшения полного сопротивления нагрузки. Токи короткого замыкания являются результатом коротких замыканий в самом силовом приборе (повреждение схемы управления, дефектные силовые ключи и т.д.) и коротких замыканий в цепи нагрузки (повреждение изоляции, искусственно вызванные повреждения, особенности протекания процессов в нагрузке и др.). Токи замыкания на землю возможны при неисправном электрооборудовании.

Кроме этого, в случае коротких замыканий делается различие между короткими замыканиями типа I и II согласно времени их происхождения. Короткое замыкание I типа происходит в случае, когда до момента включения силового прибора возникает короткое замыкание в нагрузке. Если короткое замыкание происходит, когда прибор уже включен, — это короткое замыкание II типа. Оно представляет собой более серьезный тип перегрузки. Максимальное значение тока определяется только индуктивностью проводников, через которые проходит ток короткого замыкания, и величиной напряжения. Например, быстрое повышение тока в ненасыщенном IGBT-приборе ведет к увеличению напряжения затвор-эмиттер из-за тока, протекающего через емкость затвор-коллектор. В результате силовой прибор защелкивается и становится неуправляемым, возникает динамическая перегрузка по току, выводящая прибор из строя. Для нагрузки в виде плазмы газового разряда характерно возникновение коротких замыканий как I, так и II типа, но преобладают замыкания именно II типа – самые опасные для силового ключа [3].

При токовой перегрузке силовой ключ должен оставаться в пределах короткозамкнутой области безопасной работы (ОБР) в течение всего времени запирающего. Необходимо также учесть, что при выводе прибора из режима токовой перегрузки происходит прерывание тока повышенной амплитуды, что сопровождается перегрузкой по напряжению.

Таким образом, любой источник импульсного напряжения, имеющий нагрузку в виде плазменного разряда, должен иметь в своем составе устройство защиты от режимов опасного повышения разрядного тока и короткого замыкания в разрядной цепи.

На рис. 1 показана структурная схема системы токовой защиты с использованием резистивного шунта в виде датчика тока.

Система позволяет плавно производить регулировку тока срабатывания в пределах от 200 мА до 5 А. Элементом контроля тока через силовой ключ служит резистивный токовый шунт типа РШ — 75 мВ/30А, преобразующий ток в напряжение.

Схема работает следующим образом.

Напряжение, снимаемое с шунта, поступает на вход быстродействующего усилителя. Сигнал с усилителя подается на неинвертирующий вход компаратора. В нормальном режиме работы компаратор выключен, и ждущий мультивибратор разрешает работу драйвера. При возникновении аварийной ситуации и резком возрастании тока через ключ напряжение на выходе усилителя превысит  $U_{\text{оп}}$ , компаратор включится, произойдет запуск ждущего мультивибратора на время  $\tau_{\text{бл}} \approx 0,5$  с, в течение которого драйвер заблокирует силовой ключ. По истечении  $\tau_{\text{бл}}$  производится пробное включение ключа, и в случае наличия аварии он снова блокируется. Если же включение не сопровождается резким увеличением тока, схема входит в нормальный режим работы.

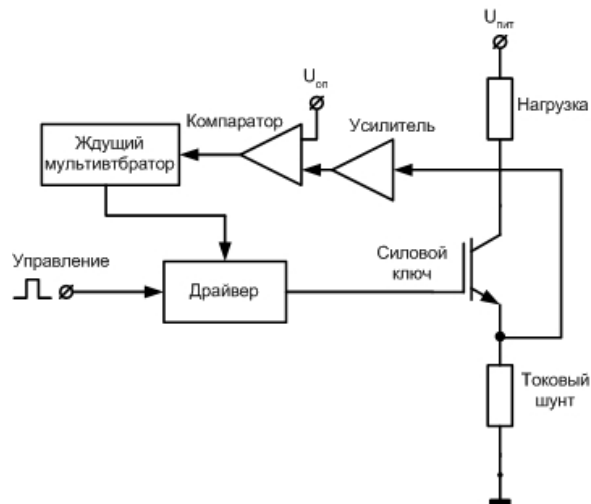


Рис. 1. Структурная схема устройства контроля режима аварийного возрастания тока с помощью датчика тока

Периодическое включение силового прибора с помощью ждущего мультивибратора обусловлено тем, что работа на плазменную нагрузку, как правило, сопровождается частыми бросками тока, особенно при переходных режимах горения плазмы. Подобное поведение нагрузки связано с особенностями самой плазмы, и хотя такой режим работы является нормальным для плазмы, он может вывести ключ из строя.

Прерывание тока в момент его резкого нарастания возвращает плазменную нагрузку в стабильный режим работы по току.

Особенностью данной схемы является необходимость использования быстродействующего усилителя и компаратора с целью минимизации времени нахождения силового ключа в аварийном режиме. При этом следует учесть, что при любой схеме защиты используемый силовой прибор должен допускать работу в режиме короткого замыкания в течение времени до момента срабатывания защиты. Для большинства современных дискретных IGBT-транзисторов это время составляет промежуток  $\tau_{кз} \leq 10$  мкс [4].

В качестве недостатка данной схемы можно выделить высокий коэффициент усиления усилителя по напряжению, что влечет за собой низкую помехоустойчивость и необходимость экранирования устройства. Вместо токового шунта могут быть использованы последовательно соединенные резисторы, но они должны иметь высокую мощность рассеяния и сверхмалую индуктивность. Серийно выпускаемые витые мощные резисторы обычно имеют недопустимо высокую паразитную индуктивность. Кроме того, измерительный резистор создает дополнительные потери мощности, что снижает эффективность схемы.

Экспериментально установлено, что схема стабильно работает и обеспечивает токовую защиту источника импульсного напряжения при мощностях нагрузки до 500 Вт и рабочих частотах импульсного генератора до 25 кГц.

Но построение систем защиты на дискретных элементах не всегда оправдано с точки зрения надежности и эффективности функционирования.

В настоящее время большинство ведущих мировых производителей изделий силовой электроники выпускают микросхемы управления силовыми ключами (драйверы) со встроенной системой токовой защиты на различные токи и напряжения. Эти микросхемы позволяют наиболее полно реализовать функции защиты силовых приборов с учетом особенностей поведения ключа в режиме токовой перегрузки.

Структурная схема устройства управления мощным силовым IGBT-транзистором со встроенной системой токовой защиты ключа на базе серийно выпускаемой ИМС IR 2121 (International Rectifier) представлена на рис. 2.

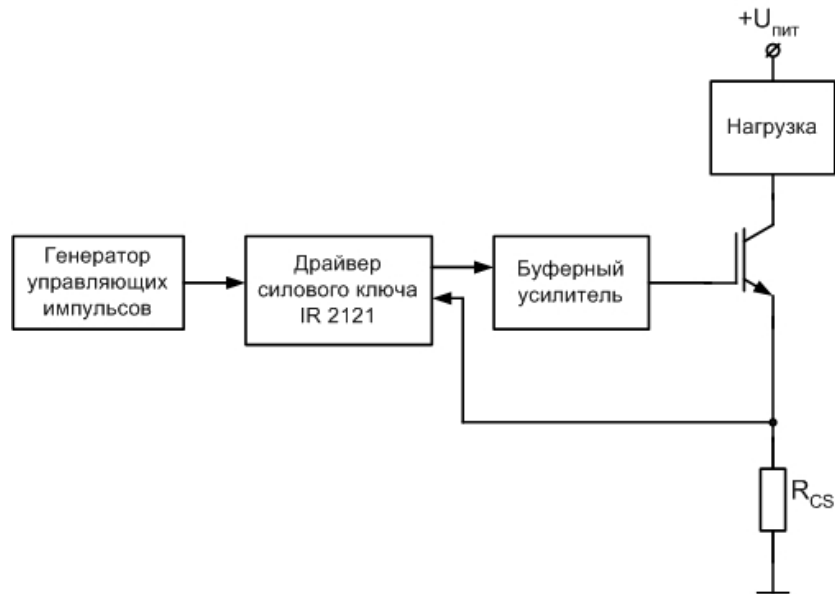


Рис. 2. Структурная схема устройства с токовой защитой на базе ИМС IR 2121

В большинстве случаев силовые ключевые электронные приборы работают на нагрузку, параметры которой стабильны и известны заранее. Причем, как правило, характер нагрузки индуктивный: электродвигатели, первичные обмотки трансформаторов и др. Нагрузка в виде плазменного разряда ведет себя нестабильно. Характер проводимости такой нагрузки во многом зависит от технологических режимов обработки: род газа, давление газа, форма и размеры катода. В связи с этим представляет интерес изучение функционирования силовых ключевых приборов при работе на плазменную нагрузку и выбор наиболее оптимальных схем управления на базе соответствующих драйверов.

Для IGBT-ключей известно, что если при появлении перегрузки уменьшить напряжение на затворе, период распознавания аварийного режима может быть увеличен. Это необходимо для исключения ложных срабатываний. Данная функция реализована в микросхеме IR 2121, упрощенная структурная схема которой показана на рис. 3 [4].

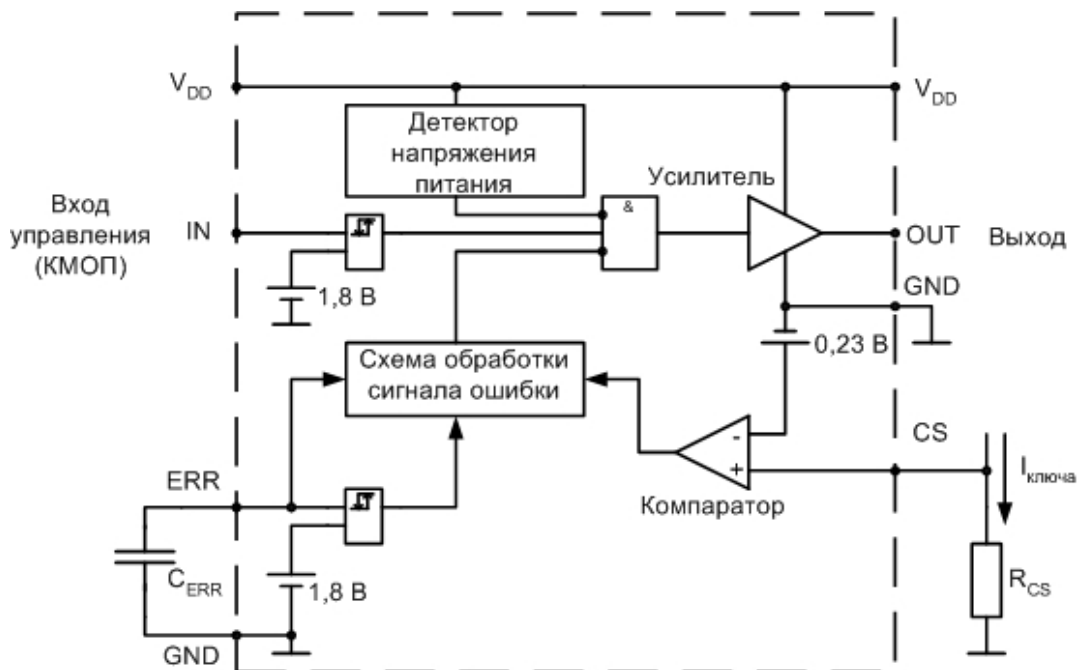


Рис. 3. Упрощенная структурная схема ИМС IR 2121

Внешний конденсатор  $C_{ERR}$  определяет время анализа  $T_D$  состояния перегрузки. При  $C_{ERR}=300$  пФ время анализа составляет около 10 мкс (это время заряда конденсатора до порогового напряжения 1,8 В). На это время включается схема стабилизации тока коллектора, и напряжение на затворе снижается. Если состояние перегрузки не прекращается, то через 10 мкс транзистор отключается полностью. Отключение защиты происходит при снятии входного сигнала, что позволяет разработчику организовать триггерную схему защиты. При ее использовании особое внимание следует уделить выбору времени повторного включения, которое должно быть больше тепловой постоянной времени кристалла силового транзистора.

Тепловая постоянная времени может быть определена по графику теплового импеданса  $Z_{thjc}$  для одиночных импульсов, что является справочной характеристикой на прибор. Кроме защиты от перегрузки по току драйвер анализирует напряжение питания входной части, отключая транзистор при падении  $U_{пит}$  ниже 9 В, что необходимо для предотвращения линейного режима работы транзистора. Такая ситуация может возникнуть при повреждении низковольтного источника питания.

Практическое применение схемы токовой защиты на IR 2121 показало, что она надежно защищает силовой ключ как от короткого замыкания I и II типов, так и от перегрузки по току. Однако для повышения надежности работы всей схемы рекомендуется управлять силовым ключом через дополнительный буферный усилитель (рис. 2), поскольку иногда наблюдался выход из строя ИМС управления при прерывании тока КЗ через силовой ключ при срабатывании схемы защиты, очевидно, из-за сильного обратного влияния паразитной емкости сток-затвор.

Недостатком схемы является необходимость использования достаточно мощного безындукционного резистора  $R_{CS}$  в качестве датчика тока, что влечет за собой дополнительные потери мощности и снижает эффективность схемы. Специально для прецизионного измерения импульсных токов фирма CADDOCK выпускает резисторы в корпусах ТО-220 и ТО-247, и их использование в данном случае является более предпочтительным. Использование импульсных трансформаторов тока в качестве датчиков тока нецелесообразно, так как они относительно дороги и нетехнологичны, требуют дополнительного контроля за состоянием магнитного насыщения.

Схема (рис. 2) показала надежную работу при мощностях нагрузки до 2 кВт и рабочих частотах до 45 кГц и может быть использована для построения схем токовой защиты различных устройств, в том числе источников импульсного напряжения для генерации плазменных разрядов.

Применение систем контроля за режимами токопотребления технологических установок способствует автоматизации их работы, повышению управляемости технологических процессов, использующих нестабильные технологические среды, в том числе газовые разряды различных типов.

Практика применения и проектирования устройств токовой защиты технологических установок показывает, что наиболее надежными и функциональными являются схемы защиты с применением специализированных ИМС управления ключами. Они позволяют реализовать наиболее безопасные условия вывода технологического источника из режима короткого замыкания. Помимо этого они имеют дополнительный вывод сигнализации о режиме короткого замыкания, что позволяет реализовывать триггерные схемы защиты. Для обеспечения должного уровня надежности следует уделять внимание выбору силового ключа с учетом реальных режимов работы источника.

# SCHEMATIC SOLUTIONS OF UNITS OF SECURING SAFE MODE OPERATION OF TECHNOLOGICAL HIGH-VOLTAGE SOURCES

V.A. NEDELKO, A.P. DOSTANKO, V.V. BEREZOVSKY

## Abstract

The schematic solutions of short-circuit protection system of high-voltage sources of plasma technological equipment is presented. The classification of short-circuit events depends of reasons, which initiate short-circuit is given. The practical recommendation of organization short-circuit protection units is offered.

## Литература

1. *Достанко А.П., Бордусов С.В., Неделько В.А.* // Электрохимические и электролитно–плазменные методы модификации металлических поверхностей: Тез. докл. междунар. науч.–техн. конф. Кострома, 8–11 сент. 2003 г. Кострома: КГУ им. Н.А. Некрасова; М.: ИЦ "МАТИ"–РГУ им К.Э. Циолковского, 2003. С. 64–65.
2. Силовые IGBT-модули. Материалы по применению / Под ред. проф. Ю.К. Розанова. М., 1997. С. 45.
3. Силовые IGBT-модули. Материалы по применению / Под ред. проф. Ю.К. Розанова. М., 1997. С. 93.
4. *Воронин П.А.* Силовые полупроводниковые ключи: семейства, характеристики, применение. М., 2001.