

Исследование электрических параметров твердотельных аппаратов защиты и коммутации

Крымко М. М., Корнеев С. В., Ростанин А. Н., Христьяновский А. Г., Шумков И. Е.

Представлены результаты измерения параметров твердотельного аппарата защиты и коммутации: сопротивления $R_{АЗК}$ в открытом состоянии, временных характеристик выходного напряжения при включении и выключении. Исследованы схемы защиты аппарата от перегрузок, возникающих как при нормальной работе устройства, так и при аварийной ситуации, вызванной коротким замыканием в цепи нагрузки. Описаны достоинства и недостатки данного варианта реализации АЗК. Предложены пути оптимизации конструкции аппарата с целью улучшения его эксплуатационных характеристик.

Введение

Твердотельные аппараты защиты и коммутации (АЗК) должны обеспечивать подключение устройств – потребителей электроэнергии к цепи питания, а также обеспечивать аварийное отключение нагрузки при возникновении нештатных ситуаций.

Исследование параметров отечественных и зарубежных АЗК на примере модуля РСК23 производства ОАО «СКТБ РТ», его функционального аналога MPC-53504-100-20-BS производства Micropac Industries Inc, а также RP-21025DO-110 производства DDC свидетельствует об отставании отечественных АЗК от зарубежных по ряду ключевых параметров, например: сопротивлению $R_{откр}$ в открытом состоянии, порогу включения защиты от короткого замыкания. Также во всех исследованных модулях отсутствует защита от индуктивных выбросов напряжения в цепи питания и выходных цепях.

1. Исследование параметров выходного блока АЗК

В [1] описан твердотельный аппарат защиты и коммутации для цепей постоянного тока с номинальным напряжением +27 В и номинальным током до 20 А. Этот модуль создан с учётом выявленных недостатков существующих отечественных и зарубежных АЗК.

Электрическая схема выходного блока АЗК представлена на рис. 1. Силовая часть устройства состоит из мощного n-канального МОП транзистора типа IRFS4310, токосъёмного резистора R14 и защитного диода VD7. Цепь управления затвором мощного МОП ключа имеет в своем составе две микросхемы КМОП драйверов: DA4, DA5. Драйверы имеют отдельные выходы верхнего и нижнего ключей ($вых_p$ и $вых_n$ соответственно). Выход $вых_n$ микросхемы DA4 соединён с затвором МОП ключа АЗК через резистор R8 с сопротивлением 240 Ом. Эта цепь управления предназначена для быстрого запирающего МОП транзистора в случае короткого замыкания нагрузки АЗК.

Медленное отпирание и запирающее МОП ключа осуществляется током через резисторы R9 и R10 соответственно. Осциллограммы выходного напряжения в этом режиме и их интерпретация приведены ниже. Сигналы управления на микросхемы драйверов поступают от PIC-процессора в составе АЗК.

Коммутируемый ток протекает между выводами ВХ и ВЫХ.

Мониторинг тока нагрузки осуществляется элементами:

– токосъёмным резистором R14;

- микросхемой операционного усилителя ОУ DA6;
- резистором R12;
- микросхемой программируемого потенциометра DD5.

Усиленное напряжение с токосъёмного резистора снимается с выхода ОУ и подаётся на входы компаратора и АЦП в составе PIC-процессора. Программное изменение сопротивления в составе микросхемы DD5 позволяет регулировать чувствительность схемы мониторинга тока, что даёт возможность производителю и/или пользователю настраивать АЗК на необходимую величину номинального тока $I_{ном}$.

Диод VD7 предотвращает перенапряжение на выводе Вых при отключении индуктивной нагрузки.

Цепь обратной связи между затвором и стоком МОП ключа, состоящая из стабилитронов VD4, VD5 и диода VD6, служит для ограничения напряжения между входом Вх и выходом Вых АЗК.

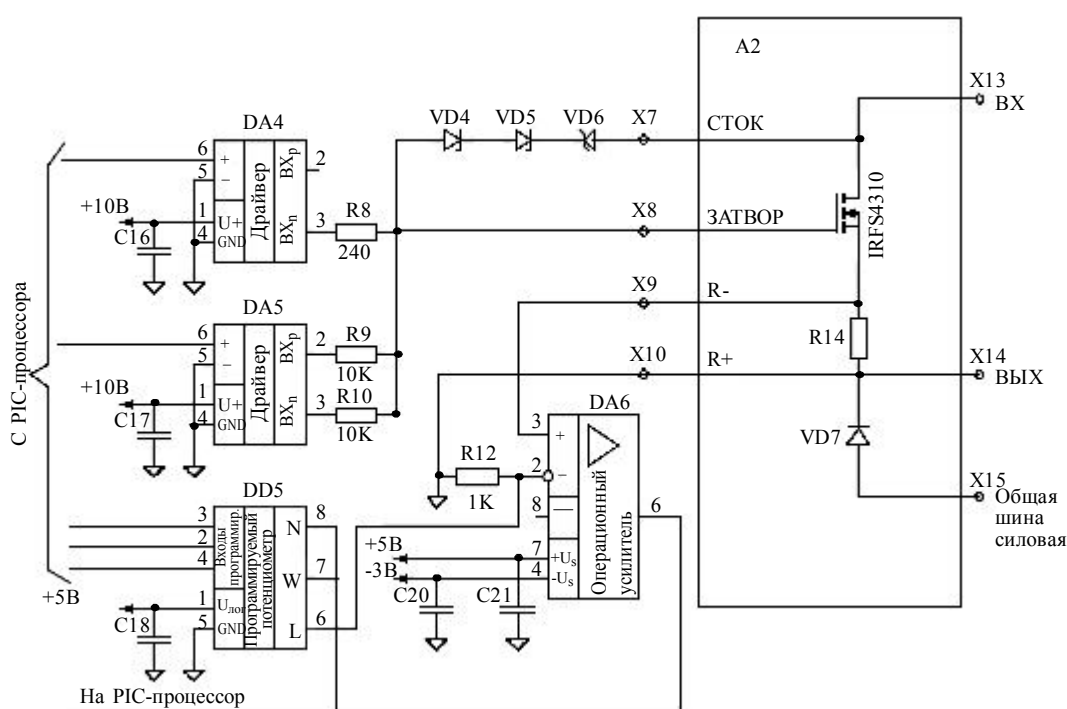


Рис. 1

Электрическая схема выходного блока АЗК

Изготовлены и исследованы АЗК двух типономиналов: на максимальный номинальный ток 5 А и 15 А. Токосъёмные резисторы R14 имеют номиналы 10 мОм и 2 мОм соответственно.

Результаты измерений сопротивления АЗК во включённом состоянии представлены в табл. 1. Измерения проводились по следующей методике: ток нагрузки задавался от внешнего источника постоянного тока, падение напряжения на различных участках цепи протекания тока внутри АЗК измерялось с помощью вольтметра.

При граничном токе $I_{гр} = 1,1 \cdot I_{ном} = 16,5$ А и величине $R_{АЗК} = 12,3$ мОм рассеиваемая АЗК мощность составляет 3,35 Вт. Тепловое сопротивление силовая плата-окружающая среда для АЗК данной конструкции составляет $\sim 10,0$ °С/Вт. Перегрев равен +33,5 °С. С ростом температуры конструктивных элементов устройства величина $R_{АЗК}$ будет увеличиваться и перегрев также возрастёт. Предпочтительной является

эксплуатация АЗК без применения радиатора, поэтому необходимо оптимизировать конструкцию устройства с целью значительного снижения величины $R_{АЗК}$.

Сопrotивление конструктивных элементов (выводов корпуса, контактов и токоведущих проводников) вносит существенный вклад в сопротивление АЗК во включённом состоянии (до 47 % в сумме) (табл. 1). Это говорит о том, что величина $R_{АЗК}$ может быть существенно уменьшена путём оптимизации конструкции силовой части АЗК без применения более мощного МОП ключа.

Таблица 1

Сопrotивление участков цепи протекания тока в АЗК во включённом состоянии при температуре окружающей среды $T_{окр} = +25\text{ }^{\circ}\text{C}$

№ образца	$I_{НОМ}$, А	R_{TC} (R14), МОм	$R_{АЗК}$, МОм	$R_{ВЫВ}$, МОм	$R_{TC\text{ ТОК}}$, МОм	$R_{СИ}$, МОм	$R_{ДОП}$, МОм	$R_{ДОБ}$, %	$R_{ДОБ}+R_{ВЫВ}$, %
1	15,7	2	12,30	2,86	3,25	4,51	2,93	23,82	47,07
2	15,0	2	11,70	2,70	3,15	4,70	2,30	19,66	42,74
3	5,0	10	19,25	2,30	11,10	4,60	2,35	12,21	24,16
4	2,5	10	19,30	2,45	11,25	4,50	2,35	12,18	24,87
5	3,0	10	20,20	2,92	11,26	4,68	2,60	12,87	27,33
6	10,0	2	11,50	2,82	3,04	4,59	2,09	18,17	42,70

ПРИМЕЧАНИЕ: R_{TC} – номинал токосъёмного резистора; $R_{АЗК}$ – суммарное сопротивление АЗК во включённом состоянии; $R_{ВЫВ}$ – суммарное сопротивление выводов ВХ и ВЫХ; $R_{TC\text{ ТОК}}$ – сопротивление токовой части токосъёмного резистора (с контактным сопротивлением); $R_{СИ}$ – сопротивление между стоком и истоком выходного МОП ключа; $R_{ДОБ}$ – добавочное сопротивление в цепи протекания тока (сумма контактных сопротивлений и сопротивлений токоведущих дорожек).

На рис. 2 представлены осциллограммы выходного напряжения АЗК, снятые при включении и выключении. Осциллограммы имеют два участка, отличающихся скоростью изменения потенциала. Участок малого $dU_{ВЫХ}/dt$ соответствует выходному напряжению от $U_{ПИТ}$ до $(U_{ПИТ} - \delta U)$. При этом $\delta U \approx 4,5\text{ В}$.

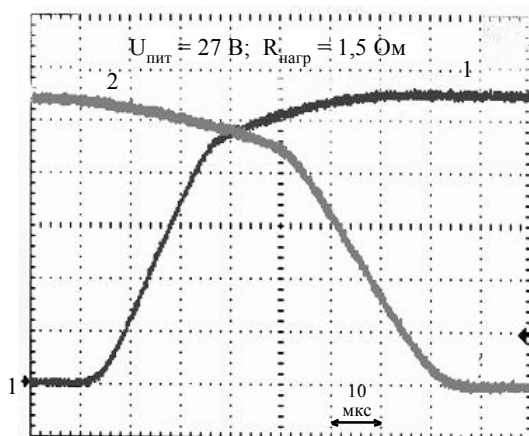


Рис. 2

Осциллограмма выходного напряжения АЗК при включении (кривая 1) и выключении (кривая 2). Общий вывод осциллографа соединён с общим выводом нагрузки

Скорость изменения выходного напряжения $dU_{ВЫХ}/dt$ определяется величиной проходной ёмкости $C_{ПРОХ}$ выходного МОП ключа АЗК и током, обеспечиваемым цепью управления затвором $I_{ГЕН}$ (драйвер DA5 и сопротивления R9, R10):

$$dU_{ВЫХ}/dt \approx I_{ГЕН}/C_{ПРОХ} \quad (1)$$

Величина проходной ёмкости принимает два различных значения в зависимости от знака разности потенциалов между затвором и стоком $U_{ЗС}$ МОП транзистора.

Максимальная скорость изменения выходного напряжения исследованного АЗК, вычисленная по данным табл. 2, составляет $\sim 1\text{ В/мкс}$. Этот параметр определяет качество аппарата с точки зрения генерации

помех. Зарубежные аппараты защиты и коммутации обеспечивают величину $dU_{\text{ВЫХ}}/dt$ порядка 0,1...0,2 В/мкс. Улучшить этот параметр у рассматриваемого отечественного АЗК увеличением сопротивления резисторов R9, R10 не представляется возможным, так как это приведёт к значительному снижению помехоустойчивости устройства. Целесообразным является включение в состав аппарата схемы управления затвором МОП ключа с обратной связью, обеспечивающей постоянную скорость изменения выходного напряжения. Следует также предусмотреть возможность отключения этой функции с переходом в режим работы с большой величиной $dU_{\text{ВЫХ}}/dt$. Это позволило бы использовать модуль на больших частотах, например в схемах с широтно-импульсной модуляцией. Максимальная частота переключения ограничивается динамической рассеиваемой мощностью, приходящейся на один акт включения-выключения аппарата. Данная величина растёт пропорционально времени нарастания и спада выходного напряжения АЗК.

Таблица 2

Время нарастания и спада выходного напряжения АЗК ($R_{\text{нагр}} = 1,5 \text{ Ом}$)

$U_{\text{пит}}, \text{ В}$	7,5		15,0		22,5		30,0		$I_{\text{ГЕН}}, \text{ мА}$
	Участок I	Участок II	Участок I	Участок II	Участок I	Участок II	Участок I	Участок II	
$t_{\text{нар}}, \text{ мкс}$	7,6	28,4	14,0	30,4	18,4	28,0	25,6	30,0	0,57
	36,0		44,4		46,4		55,6		
$t_{\text{спад}}, \text{ мкс}$	42,4	10,0	42,8	19,6	42,4	27,6	43,2	36,0	0,43
	52,4		62,4		70,0		79,2		

Графики зависимостей временных характеристик выходного напряжения АЗК от величины напряжения питания $U_{\text{пит}}$ приведены на рис. 3.

Данные измерения временных параметров выходного напряжения, приведённые в табл. 2, и выражение (1) использованы для оценки значения проходной ёмкости МОП ключа. Результаты представлены в табл. 3.

Таблица 3

Значение проходной ёмкости МОП ключа $C_{\text{прох}}$

$U_{\text{пит}}, \text{ В}$	$C_{\text{прох}}, \text{ нФ}$							
	7,5		15,0		22,5		30,0	
Участок	I	II	I	II	I	II	I	II
При нарастании $U_{\text{ВЫХ}}$	1,35	3,76	0,75	4,03	0,58	3,71	0,57	3,98
При спаде $U_{\text{ВЫХ}}$	4,24	1,34	4,28	0,79	4,24	0,65	4,32	0,60

Проходная ёмкость на участке медленного изменения выходного напряжения АЗК в 5...7 раз выше, чем на участке с большим $dU_{\text{ВЫХ}}/dt$ (табл. 3).

Измерение вольт-амперной характеристики АЗК между выводами ВХ и ВЫХ в выключенном состоянии даёт возможность оценить параметры схемы защиты от перенапряжения. Результаты измерений приведены в табл. 4.

Входной ток 100 мкА по выводу ВХ при заземлённом выводе ВЫХ соответствует напряжению на затворе МОП ключа, равному:

$$10 \text{ кОм} \cdot 100 \text{ мкА} = 1 \text{ В.}$$

Это напряжение заведомо меньше порогового напряжения МОП транзистора

IRFS4310. При этом напряжение стабилизации цепочки VD6, VD5, VD4 будет равно:

$$U_{\text{стаб}} = U_{\text{ВХ-ВЫХ}} - 1 \text{ В.}$$

Входной ток 10 мА по выводу ВХ означает, что напряжение на затворе МОП ключа достигло пороговой величины, равной

$$U_{\text{пор}} = U_{\text{ВХ-ВЫХ}} (10 \text{ мА}) - U_{\text{стаб}}.$$

МОП ключ IRFS4310 в составе АЗК обладает большой крутизной. Ток стока порядка 150...250 А обеспечивается при напряжении на затворе не более +6...+7 В относительно вывода ВЫХ даже с учётом обратной связи по току из-за резистора R14. Таким образом, элементы обратной связи сток-затвор должны обеспечить стабилизацию напряжения $U_{\text{ВХ-ВЫХ}}$ на уровне не более 80 В ($U_{\text{стаб}} + 7 \text{ В}$). Эта величина меньше максимально допустимого напряжения сток-исток, входящего в состав АЗК МОП ключа, равного 100 В.

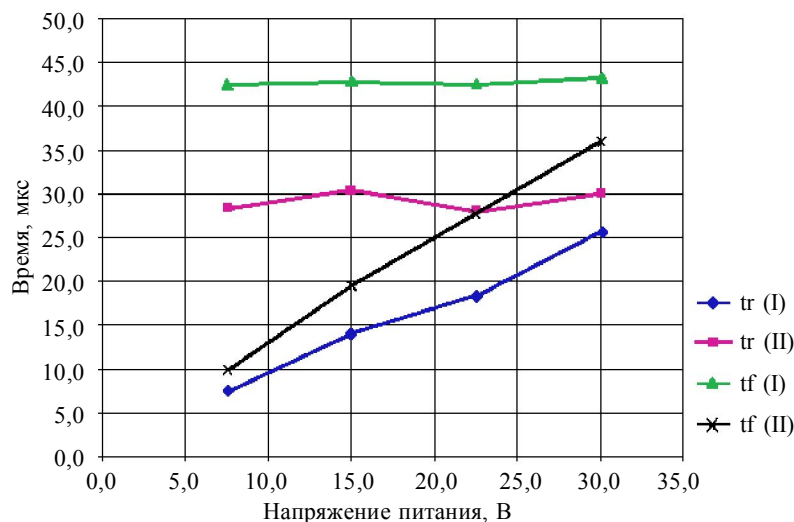


Рис. 3

Длительность участков нарастания и спада выходного напряжения АЗК

Таблица 4

Напряжение стабилизации в цепи обратной связи по входу ВХ ($U_{\text{стаб}}$) и пороговое напряжение МОП ключа ($U_{\text{пор}}$)

№ образца АЗК	$U_{\text{ВХ-ВЫХ}}, \text{ В}$		$U_{\text{стаб}}, \text{ В}$	$U_{\text{пор}}, \text{ В}$
	$I_{\text{ВХ-ВЫХ}} = 100 \text{ мкА}$	$I_{\text{ВХ-ВЫХ}} = 10 \text{ мА}$		
1	72,57	74,96	71,57	+3,39
2	73,10	75,47	72,10	+3,37
4	73,35	75,72	72,35	+3,37

длительностью 1 мс; DD3 – блок задержки логического сигнала с гальванической развязкой, время задержки ~ 0,5 мс; DD4 – драйвер управления мощным МОП транзистором типа IR2113; IRFP3306 – мощный n-канальный МОП транзистор, макетирующий внезапное возникновение («наброс») КЗ нагрузки; $R_{\text{кз}}$ – активное сопротивление закоротки; $L_{\text{кз}}$ – индуктивный элемент закоротки; $L_{\text{пит}}$ – индуктивный элемент в цепи питания АЗК; С1 – банк конденсаторов, обеспечивающий ток короткого замыкания (8 электролитических конденсаторов номинальной ёмкостью 4700 мкФ каждый).

Аппараты защиты и коммутации должны обеспечивать аварийное отключение нагрузки при возникновении нештатных ситуаций. Наиболее тяжёлым аварийным режимом работы АЗК является внезапное возникновение короткого замыкания нагрузки при включённом аппарате («наброс» КЗ).

Исследование процессов, происходящих в АЗК в режиме внезапного возникновения («наброса») КЗ, проводилось по измерительной схеме, представленной на рис. 4. Элементы схемы на рис. 4 представляют собой: DD1 – исследуемый аппарат защиты и коммутации; DD2 – формирователь входного логического импульса положительной полярности

Необходимые для схемы напряжения питания: логическое $U_{\text{лог}}$; питание драйвера DD4 $U_{\text{др}}$; силовое питание $U_{\text{пит}}$; обеспечиваются источниками питания АТН3031 (45 Вт) и PSW7 30-108 (1080 Вт).

На рис. 5 представлены осциллограммы напряжений в узлах схемы АЗК, снятые в режиме «наброса» КЗ при минимальной индуктивности цепи. Образец АЗК №1 имел номинальный ток 15 А и токосъёмный резистор R14 номиналом 2 мОм. Общая шина осциллографа соединена с нижним потенциальным выводом токосъёмного резистора.

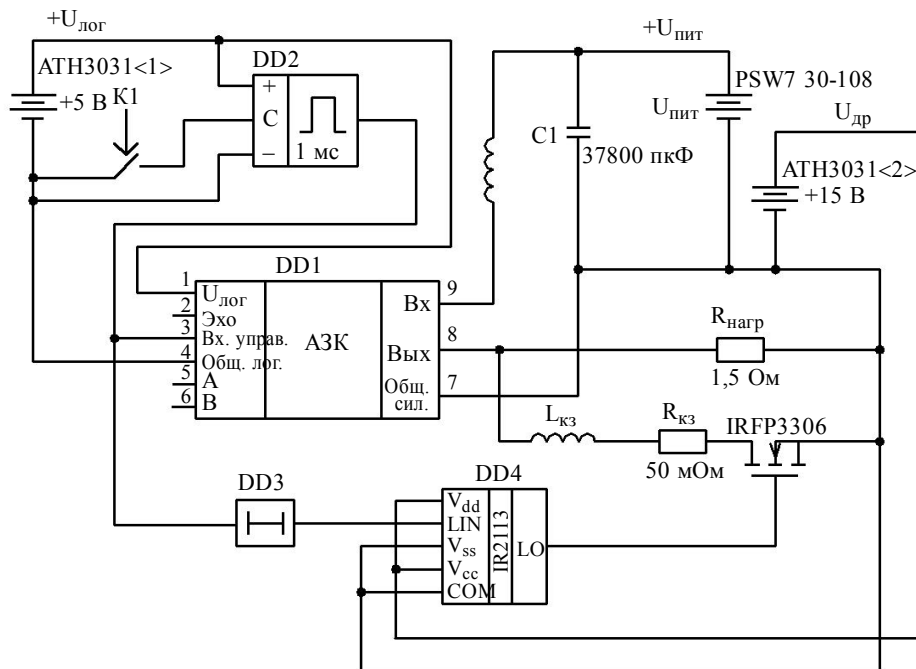


Рис. 4

Схема включения АЗК, макетирующая режим «наброса» КЗ

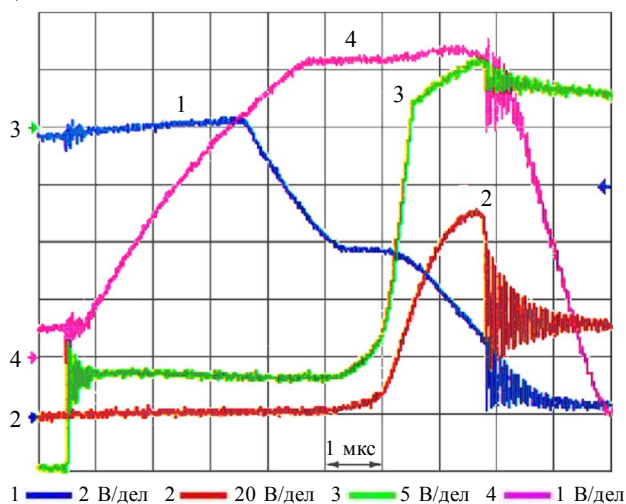


Рис. 5

Осциллограммы напряжений в узлах схемы АЗК при «набросе» КЗ: $L_{\text{пит}}$, $L_{\text{кз}}$ минимальны; номинальный ток АЗК равен 15 А; $R_{\text{тс}} = 2 \text{ мОм}$; образец № 1

На всех приведённых осциллограммах имеет место следующее соответствие:

- кривая 1 – напряжение на затворе МОП ключа;
- кривая 2 – напряжение на выводе ВХ, соединённом со стоком выходного МОП ключа АЗК;
- кривая 3 – напряжение на выводе GNDR, соединённом с общим выводом нагрузки;
- кривая 4 – усиленное напряжение с датчика тока.

Уровень потенциала 0 В для каждого отдельного сигнала показан стрелкой соответствующего цвета.

В образце АЗК № 2 усиленное напряжение датчика тока формируется

в соответствии с коэффициентом преобразования ток нагрузки-напряжение $K = 25,7$ мВ/А.

Оценка скорости нарастания тока нагрузки даёт значение порядка 58 А/мкс. Таким образом, суммарная индуктивность цепи КЗ составляет порядка 500 нГн. Скачок напряжения на выводе GNDD $dU \approx 8,5$ В при напряжении на конденсаторе С1, равном в начальный момент времени $U_{пит} = +30$ В, позволяет оценить соотношение между значениями индуктивностей $L_{U_{пит}}$ и $L_{кз}$: $L_{U_{пит}}/L_{кз} \approx 8,5/21,5$. Тогда $L_{U_{пит}} \approx 140$ нГн, а $L_{кз} \approx 360$ нГн.

Схема защиты от КЗ запускает процесс выключения АЗК при токе нагрузки, примерно равном $10 \cdot I_{ном}$ (150 А). Однако из-за инерционности схемы выключения ток возрастает до значений порядка 230...250 А.

Напряжение на стоке МОП ключа не превышает +72 В, поэтому обратная связь сток-затвор не работает. При запираии МОП транзистора ток индуктивности $L_{кз}$ протекает через защитный диод VD7, смещённый в прямом направлении. Этот ток имеет значительную начальную величину (230...250 А) и вызывает большое падение напряжения на диоде – порядка +6 В (пиковая мощность ~ 1500 Вт).

Прерывание тока через индуктивность цепи питания $L_{U_{пит}}$ приводит к возбуждению затухающих высокочастотных колебаний. Длительность этих колебаний составляет 2...3 мкс.

Макетирование режима «наброса» КЗ с минимальной индуктивностью цепи было также реализовано на модуле с номинальным током 2,5 А (образец № 4). Осциллограммы, снятые в этом режиме, приведены на рис. 6.

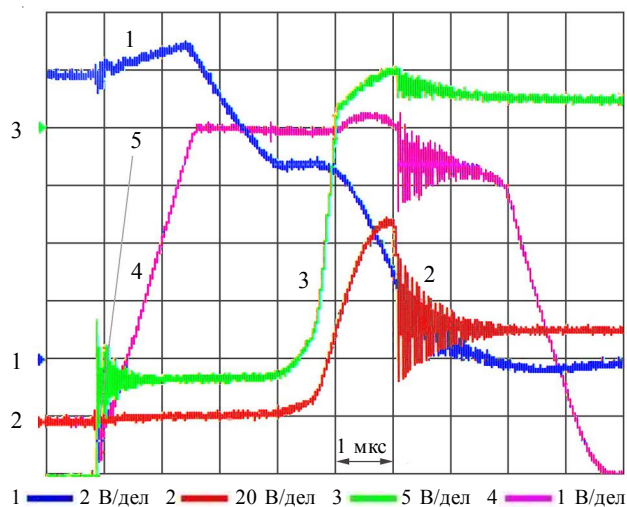


Рис. 6

Осциллограммы напряжений в узлах схемы АЗК при «набросе» КЗ: $L_{U_{пит}}$, $L_{кз}$ минимальны; $I_{ном} = 2,5$ А; $R_{тс} = 10$ МОм; образец № 4

В образце № 4 токосъёмный резистор R14 модуля имеет номинал 10 мОм. Коэффициент преобразования ток-напряжение $K = 158,5$ мВ/А. Условия нарастания тока при возникновении КЗ остаются практически такими же, какими они были в рассмотренном образце № 1. Иначе говоря, $dI/dt \approx 58$ А/мкс. Это должно было бы соответствовать скорости нарастания усиленного напряжения с токосъёмного резистора, равной

$$dU/dt \approx 0,1585 \cdot 58 \approx 9,2 \text{ В/мкс.}$$

На рис. 6 такой скорости нарастания напряжения соответствует кривая 5. Однако в состав АЗК включён ОУ с низким напряжением смещения, имеющий малую граничную частоту.

Скорость нарастания выходного напряжения этой микросхемы ограничена значением ~ 3 В/мкс. Порог включения защиты от КЗ настроен на величину ~ $10 \cdot I_{ном} = 25$ А. Инерционность системы защиты от КЗ для образца, настроенного на $I_{ном} = 2,5$ А (№ 4), оказывается значительно выше, чем для образца № 1 с $I_{ном} = 15$ А. В рассматриваемом случае в образце № 4 ток при «набросе» КЗ может превышать порог защиты в 5-6 раз, в то время как в образце № 1 имеет место превышение в

1,5-1,6 раза.

Следует сделать вывод о необходимости разделения цепи защиты АЗК от КЗ и цепи прецизионного мониторинга тока. Цепь защиты от КЗ должна иметь максимальное быстродействие, что подразумевает использование быстродействующего операционного усилителя и цепи управления затвором с малым сопротивлением R8 [2].

Если «наброс» КЗ при минимальной индуктивности цепи приводит к протеканию большого импульсного тока, то возникновение короткого замыкания при наличии элементов цепи с большой индуктивностью имеет другую специфику. На рис. 7 представлены осциллограммы напряжений в узлах схемы АЗК, снятые при наличии большой индуктивности в цепи короткого замыкания.

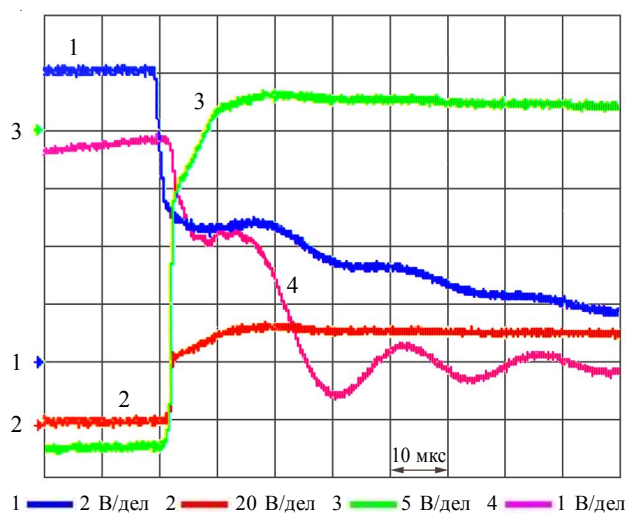


Рис. 7

Осциллограммы напряжений в узлах схемы АЗК при «набросе» КЗ:

$$L_{кз} \approx 40 \text{ мкГн}; I_{ном} = 15 \text{ А}; R_{тс} = 2 \text{ мОм}$$

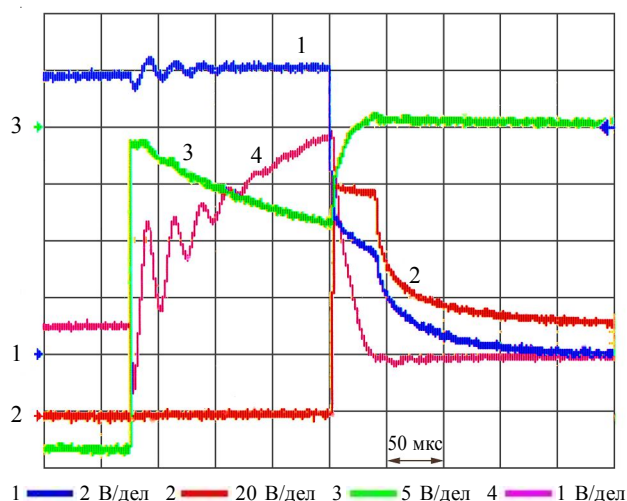


Рис. 8

Осциллограммы напряжений в узлах схемы АЗК при «набросе» КЗ:

$$L_{U_{пит}} \approx 40 \text{ мкГн}; I_{ном} = 15 \text{ А}; R_{тс} = 2 \text{ мОм}$$

Высокое значение индуктивности ($L_{кз} \approx 40 \text{ мкГн}$) обеспечивает медленное нарастание тока АЗК, который в результате не превышает порога включения защиты $\sim 145 \text{ А}$. После запираания выходного МОП ключа индуктивный ток в течение длительного периода времени (десятки микросекунд) протекает через защитный диод VD7. Такой аварийный режим работы АЗК не сопровождается выбросом напряжения на стоке МОП ключа (вывод ВХ).

На рис. 8 представлены осциллограммы напряжений в узлах схемы АЗК, снятые при наличии большой индуктивности в цепи питания.

Значение тока нагрузки, при котором включается защита от КЗ, составляет $I_{поркз} \approx 144 \text{ А}$. При запираании выходного МОП ключа происходит индуктивный выброс напряжения на выводе ВХ (сток МОП транзистора). При этом защитная цепочка между стоком и затвором ключа предотвращает повышение напряжения $U_{си}$ выше допустимого уровня. Величина $U_{си}$ стабилизируется на уровне не более +80 В. При этом в первый момент времени ток стока МОП транзистора, равный току индуктивного элемента в цепи $U_{пит}$, составляет 144 А. Таким образом, пиковая мощность, выделяемая на р-п-переходе МОП ключа, достигает значения $P_{макс} \approx 80 \text{ В} \cdot 144 \text{ А} = 11520 \text{ Вт}$. Согласно области безопасной работы (ОБР) выходного МОП ключа

IRFS4310 в составе АЗК максимально допустимая импульсная мощность для данного прибора составляет около 10 кВт при длительности импульса 100 мкс. Длительность критического режима в исследованном случае на порядок меньше указанной величины, то есть режим эксплуатации МОП транзистора не выходит за пределы ОБР.

Заключение

Результаты исследования электрических характеристик аппаратов защиты и коммутации, описанных в [1], позволяют сделать следующие выводы:

1. необходима оптимизация конструкции АЗК с целью снижения рассеиваемой мощности. Достигнуть этого можно путём уменьшения сопротивления аппарата во включённом состоянии за счёт конструктивных усовершенствований токопроводящих элементов без применения более мощного выходного МОП ключа;

2. схемотехнические решения в исследованной конструкции АЗК обеспечили максимальную скорость изменения выходного напряжения на уровне 1 В/мкс. Необходима оптимизация схемотехники устройства с целью снижения этой величины до значений 0,1...0,2 В/мкс, что позволит значительно снизить уровень генерации помех;

3. входящие в состав аппаратов элементы защиты от индуктивных выбросов напряжения, возникающих при выключении АЗК, обеспечивают безопасную работу компонентов устройства в нормальных и аварийных режимах работы;

4. существует необходимость значительно повысить быстродействие цепи защиты от короткого замыкания для предотвращения выброса тока при внезапном возникновении КЗ, существенно превышающего уровень включения защиты. Возможным решением представляется разделение цепи защиты от КЗ и цепи прецизионного мониторинга тока нагрузки.

Литература

1. Крымко М. М., Корнеев С. В., Колчин Г. С. и др. Силовой защитный коммутационный модуль для авиационных систем распределения электроэнергии // Тезисы докладов в сборнике материалов к XI всероссийской научно-технической конференции «Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА». – 2012.

2. Крымко М. М., Корнеев С. В., Ростанин А. Н., Христьяновский А. Г., Шумков И. Е. Исследование влияния индуктивности цепи на выброс тока в твердотельных модулях защиты и коммутации при набросе КЗ // Тезисы докладов в сборнике материалов к XI всероссийской научно-технической конференции «Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА». – 2012.