

Проблема выходных реле, используемых в микропроцессорных устройствах релейной защиты: что делать?

В.И. Гуревич, канд. техн. наук
Центральная Лаборатория Электрической компании Израиля

Переход на микропроцессорные устройства релейной защиты (МУРЗ) обусловлен рядом технических проблем, обычно скрытых от потребителя и поэтому малоизвестных [1]. Одной из таких проблем является несоответствие параметров контактов субминиатюрных электромеханических реле (ЭМР), применяемых в качестве выходных элементов МУРЗ, параметрам, указанным в технической документации на МУРЗ, действующим стандартам, и реальным условиям эксплуатации. Эта проблема была исследована автором в [2]. Уже после публикации результатов этих исследований автор обнаружил более раннюю публикацию [3], в которой специалистами из Vector Power Solutions, General Electric и National Grid Transco также обращалось внимание на эти несоответствия. Кроме того, автор получил отзывы на статью [2] от специалистов компаний-производителей ЭМР, из технического комитета 94 (All-or-nothing electric relays) ИЕС и др. Таким образом, можно считать, что существование этой проблемы подтверждено и признано международной технической общественностью.

Целью данной публикации является поиск путей решения этой проблемы.

1. Несоответствие параметров выходных контактов МУРЗ параметрам ЭМР.

1.1. Поскольку МУРЗ являются устройствами, действующими только в аварийных режимах, частота их срабатывания и общее количество срабатываний за весь срок службы очень невелики (скажем, 10^3 срабатываний) по сравнению с обычным количеством срабатываний, допустимых для ЭМР ($10^5 - 10^6$). Поскольку эрозия контактов при коммутации имеет кумулятивный характер, то совершенно очевидно, что производители ЭМР устанавливают ограничения на коммутационную способность контактов своих реле, исходя из обычного для них (то есть большого) количества срабатываний. Можно ожидать, что для количества срабатываний в 100 – 1000 раз меньше, принятого для ЭМР, «верхняя планка» ограничений на их коммутационную способность может быть существенно повышена.

1.2. Особо тяжелым для контактов реле считается режим коммутации индуктивной нагрузки на постоянном токе при напряжении 220В. В соответствии с технической документацией на ЭМР, применяемых сегодня в МУРЗ, ни одно из них не может быть использовано для работы в таких условиях. Чисто формально это совершенно справедливое ограничение. Однако, при рассмотрении этого вопроса следует принять во внимание, что под «коммутацией» для ЭМР понимается полный цикл, то есть и включение и выключение цепи, тогда как в МУРЗ в полном цикле работают контакты лишь промежуточных выходных реле, предназначенных для работы в цепях сигнализации или управления другими промежуточными реле. Наиболее мощные контакты МУРЗ, предназначенные для управления отключающей катушкой высоковольтного выключателя, работают только на замыкание контактов, без размыкания (размыкание осуществляется мощными вспомогательными контактами выключателя). Чисто теоретически, замыкание контактов не связано с образованием электрической дуги на контактах и поэтому вроде бы не должно быть каких-то особых ограничений на включение индуктивной нагрузки при напряжении 220 - 250 В постоянного тока. Проблема же заключается в том, что в действительности процесс замыкания контактов реле сопровождается многократными соударениями (замыканиями) и отскоками (размыканиями) контактов, то есть никакого «чистого» замыкания без размыкания просто не существует. Достаточно даже одного размыкания контактов при указанных выше условиях (индуктивная нагрузка на постоянном токе при напряжении 220 – 250 В), чтобы контакты субминиатюрных реле сварились под

действием электрической дуги. Причем, чем выше индуктивность нагрузки, тем больше энергия, выделяемая на контактах и выше вероятность их сваривания. По этой причине, параметры коммутации на постоянном токе, указываемые в технической документации на ЭМР, распространяются, как правило, только на чисто активную нагрузку и напряжение, не превышающее 30В, что даже близко не приближаются к требуемым значениям. Причем, никакого разделения на виды коммутации (полный цикл, включающий и замыкание, и размыкание, или только замыкание без размыкания) не делается исходя из приведенных выше соображений об опасности даже единичного отключения с мощной дугой на контактах. Интересно, что такой подход принят не только производителями ЭМР, но также и соответствующим комитетом по стандартизации ИЕС.

Однако, при более детальном рассмотрении этого вопроса оказывается, что ситуация вовсе не так однозначна, а скорее парадоксальна. Дело в том, что при включении индуктивной нагрузки контактами реле ток через контакты возрастает плавно. Чем больше индуктивность, тем медленнее нарастает ток. В то же время, отскоки контактов при соударениях в начальный период замыкания длятся очень ограниченный период времени, не превышающий обычно 3 – 4 мс для субминиатюрных реле и не зависящий от индуктивности нагрузки. При этом возникает парадоксальная ситуация: чем больше индуктивность нагрузки, тем меньший ток разрывается контактами реле при отскоках в процессе замыкания, рис. 1.

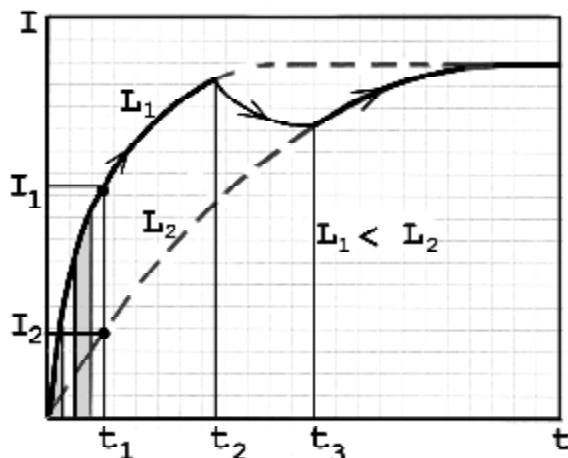


Рис. 1. Зависимость тока (I), разрываемого контактами реле при отскоках в процессе включения нагрузки от ее индуктивности (L),
 I_1 – ток включения при малой индуктивности нагрузки; I_2 – ток включения при большой индуктивности нагрузки; t_1 – время дребезга контактов; t_2 – начало движения сердечника в катушке отключения; t_3 – окончание движения сердечника.

Это означает, что изложенные выше общепринятые рассуждения и подходы в данной конкретной ситуации не релевантны и реальная способность контактов ЭМР включать индуктивную нагрузку может быть намного выше.

В связи с тем, что МУРЗ являются очень важными и ответственными устройствами, определяющими работоспособность важнейшего сектора экономики, необходимо срочное проведение исследований и испытаний работы контактов ЭМР в этом специфическом режиме. На основе этих исследований компании-изготовители ЭМР должны дополнить техническую документацию на свои реле данными о режиме очень редких включений индуктивной нагрузки при напряжениях постоянного тока 220 – 250 В, табл. 1.

Если, к тому же, добиться от производителей МУРЗ ревизии технической документации и устранения из нее явных ляпсусов в части коммутационной способности контактов выходных реле, описанных в [2], то может оказаться, что разница между

параметрами, записанными в технической документации на МУРЗ и ЭМР, на самом деле не так уж и велика.

Таблица 1. Коммутационная способность контактов субминиатюрных электромагнитных реле, широко применяемых в микропроцессорных устройствах защиты.

Субминиатюрные электромагнитные реле типа	Максимальная коммутируемая мощность (активная нагрузка)		Номинальные значения коммутируемого тока и напряжения (активная нагрузка)		Максимальный ток включения для нагрузок с постоянной времени L/R (мс), в режиме очень редких коммутаций (≤ 1000) на постоянном токе при напряжении 220 В			
					10 мс	20 мс	30 мс	40 мс
ST	2000 VA	150 W	8 A; 380 V	5 A; 30 V				
JS	2000 VA	192 W	8 A; 250 V	8 A; 24 V				
RT2	2000 VA	240 W	8A; 250 V	8A; 30 V				
RYII	2000 VA	224 W	8A; 240 V	8A; 28 V	?	?	?	?
G6RN	2000 VA	150 W	8 A; 250 V	5 A; 30 V				
G2RL-1E	3000 VA	288 W	12 A; 250 V	12 A; 24 V				

2. Несоответствие параметров выходных контактов МУРЗ действующим стандартам.

Некоторые стандарты, применяемые в качестве общемировых, например, IEC 60947-4, а также новая 3 редакция стандарта IEC 61810-1, находящаяся в данный момент в стадии согласования, рассматривают коммутационную способность контактов реле (в категории DC-13), соответствующей рассматриваемому режиму отдельно для отключения и для включения индуктивных нагрузок.

Табл. 2. Коммутационная способность контактов в зависимости от типа нагрузки для управляющих электромагнитов, клапанов и соленоидов.

Категория применения IEC 60947-4	Род тока	Коммутационная способность контактов в режиме нормальных коммутаций					
		включение			выключение		
		ток	Напряжение	cosφ	ток	Напряжение	cosφ
AC-15	Пер.	$10 I_N$	U_N	0.3	$10 I_N$	U_N	0.3
DC-13	Пост.	I_N	U_N	-	I_N	U_N	-
Коммутационная способность контактов в режиме редких коммутаций							
AC-15	Пер.	$10 I_N$	$1.1 U_N$	0.3	$10 I_N$	$1.1 U_N$	0.3
DC-13	Пост.	$1.1 I_N$	$1.1 U_N$	-	$1.1 I_N$	$1.1 U_N$	-
Коммутационная способность контактов для 1000 циклов замыкания							
DC-13	DC	?	?	$L/R \leq 10$ ms	-	-	-
	DC	?	?	$L/R \leq 20$ ms	-	-	-
	DC	?	?	$L/R \leq 30$ ms	-	-	-
	DC	?	?	$L/R \leq 30$ ms	-	-	-

I_N и U_N - номинальные значения токов и напряжений нагрузок, коммутируемых контактами реле

В соответствии с этими стандартами коммутационная способность контактов на включение и на отключение одинакова и составляет 100% номинального тока в режиме обычных коммутаций и 110% - в режиме редких коммутаций. Такие соотношения явно указывают на то, что при их определении учитывались отскоки контактов и вероятность разрыва цепи с индуктивной нагрузкой при полном токе, то есть без учета выводов, сформулированных в 1.1 и 1.2. В конкретном рассматриваемом режиме можно

допустить, по-видимому, значительно большие токи включения для контактов реле. По нашему мнению, эти стандарты должны быть дополнены с учетом приведенных выше соображений особым режимом коммутаций, используемым в МУРЗ, табл.2

3. Усовершенствование МУРЗ предприятиями-производителями.

Проведение всего необходимого цикла испытаний ЭМР в указанном режиме, внесение исправлений в техническую документацию на ЭМР и, тем более, исправление стандартов - достаточно длительный процесс, который может занять годы. В течение этого времени проблема может быть решена производителями МУРЗ самостоятельно, вне всякой связи с этими мероприятиями. Рассмотрим возможные пути решения этой проблемы.

3.1. Применение в качестве выходных реле МУРЗ компактных реле предназначенных специально для коммутации индуктивной нагрузки на постоянном токе с напряжением 220 – 250В, рис. 2. Для обеспечения такой возможности эти реле снабжены сильными постоянными магнитами, расположенными между контактами, магнитное поле которых взаимодействует с электрической дугой, возникающей между контактами в момент их расхождения, и выталкивает дугу из межконтактного зазора.

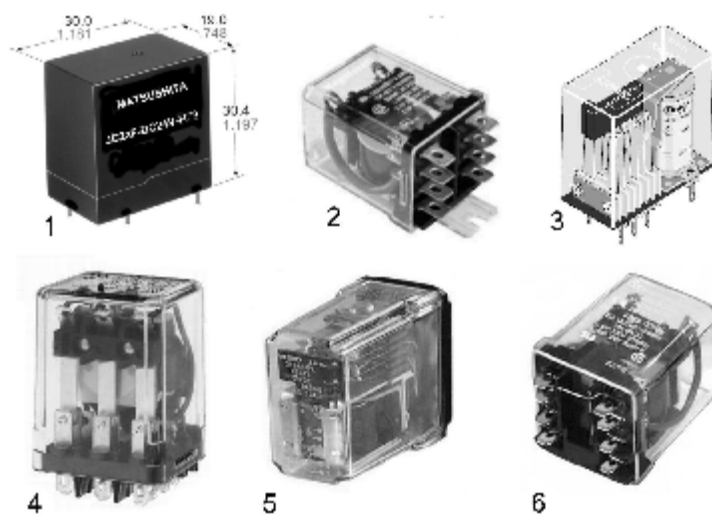
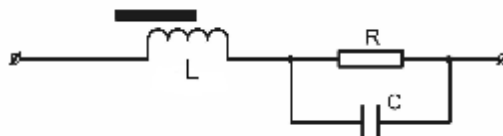


Рис. 2. Компактные реле со встроенным дугогасящим магнитом, предназначенные для коммутации индуктивной нагрузки при напряжении до 250 В постоянного тока
1 – реле JC2AF-DC24V-H73 (Matsushita); 2 – реле серии 300 (Magnecraft); 3 – реле IG2C-24VDCM (Kuhnke); 4 – реле KUEP-3D17-12 (Potter & Brumfield); 5 – реле серии 219 (Magnecraft); 6 – реле серии A283 (Magnecraft).

Некоторые из этих реле имеют исполнение, предназначенное для монтажа на печатной плате, например, реле типа JC2AF-DC24V-H73 и IG2C-24VDCM. Применение таких реле может оказаться эффективным не столько для включения отключающих катушек выключателей, используемых в обычных схемах (с учетом изложенного выше), сколько для включения этих катушек в схемах с форсирующим конденсатором, рис. 3, создающим импульс большого тока в катушке в начальный период ее включения. Для этой схемы приведенные выше рассуждения о малой величине тока, разрываемого контактами реле при отскоках на начальном этапе процесса замыкания, уже не релевантны, поэтому использование таких реле может оказаться весьма эффективным.

Рис. 3. Схема ускоренного включения отключающей катушки выключателя с форсирующим конденсатором.



3.2. Имеет смысл более широко использовать тиристоры на токи 30 – 70 А и напряжения 1200 – 1600 В, снабженные варисторами, в качестве мощного выходного контакта МУРЗ, предназначенного только для включения (без отключения) отключающей катушки высоковольтного выключателя.

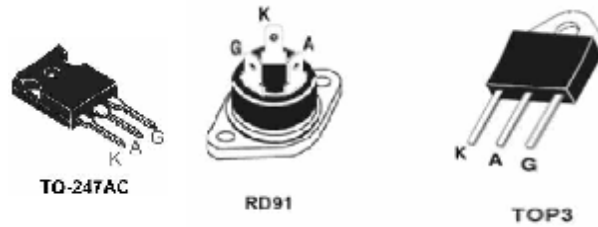


Рис. 4. Современные тиристоры на токи 30 – 75 А и напряжения 1200 – 1600 В, выполненные в малогабаритных корпусах различных типов.

Современные тиристоры с такими параметрами, табл. 3, имеют небольшие размеры, рис. 4, и с учетом кратковременности протекания тока могут использоваться без радиаторов. Тиристоры должны быть выбраны с током удержания не менее 50 – 70 мА, чтобы они не оставались во включенном состоянии под действием постоянно протекающего тока так называемых «supervision relays», контролирующих исправность всей цепи отключающей катушки посредством пропуска через нее небольшого тока (около 15 – 20 мА). Тиристоры имеют лучшую перегрузочную способность по сравнению с транзисторами IGBT, FET.

Табл. 3. Параметры современных тириستоров некоторых типов, пригодных для использования в качестве выходных элементов МУРЗ.

Тип тиристора		BTW69-1200	40TPS12	CS 60-16io1 CS 60-14io1 CS 60-12io1	70TPS16 70TPS12
Повторяющееся напряжение, В	V_{DRM} , V_{RRM}	1200	1200	1600 1400 1200	1600 1200
Максимальный прямой ток, А	I_T (RMS)	50	55	75	75
Макс. ток перегрузки (для 10 мс), А	I_{TSM}	580	500	1500	1200
Падение напряжение в проводящем состоянии, В	V_{TM}	1.9	1.85	1.4	1.4
Ток удержания, мА	I_H	150	150	200	200

3.3. Перспективным решением является использование в МУРЗ гибридных схем, предусматривающих параллельное включение контакта электромеханического реле и полупроводникового коммутационного элемента. Одна из таких схем предложена автором, рис. 5. В этом устройстве входной управляющий сигнал прикладывается к обмотке электромагнитного реле и, одновременно заряжает конденсатор С, через

ограничительный резистор R1 и управляющий переход тиристора VS. Тиристор мгновенно открывается током заряда этого конденсатора за единицы микросекунд и включает отключающую катушку L выключателя. Через время, порядка 10 – 15 мс (собственное время срабатывания электромагнитного реле), замыкается контакт К реле, шунтирующий тиристор. Ток отключающей катушки L перетекает в цепь контакта К. В самом начале процесса расхождения контактов при отскоке, межконтактное сопротивление и напряжение на контактах начинают возрастать. Это напряжение прикладывается к тиристоры VS. При увеличении этого напряжения до величины 5 – 7 В тиристор опять мгновенно открывается так как в это время конденсатор С еще не зарядился полностью и в управляющей цепи тиристора все еще протекает ток заряда этого конденсатора, достаточный для его отпирания. Емкость конденсатора С и сопротивление резистора R1 выбираются из условия обеспечения тока управления тиристора порядка 50-70 мА в течение времени 10 – 15 мс, то есть до полного окончания дребезга контактов. Таким образом, в процессе включения отключающей катушки не происходит разрыва цепи и не возникает дуга на контактах реле. После полного заряда конденсатора, ток в цепи управляющего электрода тиристора прекращается, он окончательно запирается и уже не влияет на состояние цепи нагрузки. При исчезновении управляющего сигнала на входе устройства, конденсатор разряжается через катушку реле К.

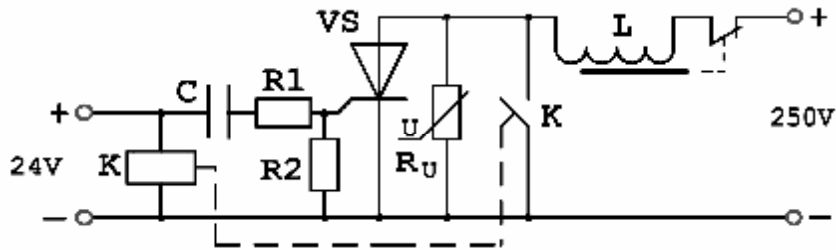
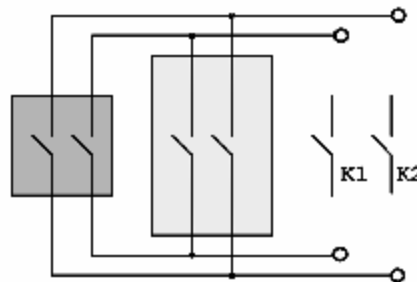


Рис. 5. Схема гибридного коммутационного элемента, предназначенного для включения отключающей катушки (L) выключателя на напряжение 250В постоянного тока.

3.3. Поскольку основа проблемы включения отключающей катушки выключателя заключается в дребезге контактов реле, сопровождающемся кратковременными разрывами тока в процессе замыкания, то естественным решением этой проблемы могло быть техническое решение компенсирующее эти разрывы за счет комбинации двух параллельно включенных контактов с различными параметрами вибрации, не совпадающими по фазе, рис. 6. Совершенно очевидно, что если соединить параллельно-попарно контакты реле различных типов с различными механическими свойствами контактов, то практически с полной уверенностью можно гарантировать несовпадение фазы колебаний контактов, то есть отсутствие разрывов цепи в процессе замыкания индуктивной нагрузки.

Рис. 6. Схема включения контактов реле, исключающая кратковременные разрывы цепи тока при замыкании



Производители МУРЗ могут взять на вооружение этот принцип, используя в своих изделиях обычные серийные ЭМР, как это описано выше, а производители ЭМР могут

освоить выпуск реле содержащих в одном корпусе два контакта с разной жесткостью или массой, вибрация которых при отскоках не совпадает по фазе, соединив оба эти контакта параллельно.

3.4. В настоящее время на рынке появились герконы с повышенной коммутационной способностью, рис. 7 и реле на их основе, которые можно было бы с успехом использовать в качестве выходных контактов в МУРЗ.

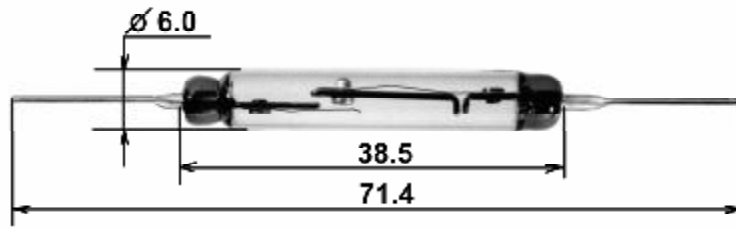


Рис. 7. Мощные герконы типа R14U и R15U (торговая марка Bestact[®], производитель: Yaskawa) с двойным разрывом, специально предназначенные для коммутации индуктивной нагрузки.

Такие герконы с номинальным током 5А способны не только включать, но также и отключать цепи с индуктивной нагрузкой при напряжении 230 В постоянного тока. Например, они способны отключать нагрузку с постоянной времени 40 мс на постоянном токе 0.4 – 0.6 А, что вполне достаточно для использования их в качестве сигнальных контактов МУРЗ, предназначенных для управления внешними промежуточными реле. Время включения этих герконов не превышает 5 мс, время дребезга контактов – не более 2 мс; количество коммутаций: 50 – 100 миллионов. Очевидно, что при снижении требований к количеству циклов коммутации в 10.000 раз, можно ожидать дополнительного увеличения их коммутационной способности (что должно быть подтверждено производителем, естественно).

При выборе типа сигнальных реле МУРЗ следует учитывать, что некоторые из них будут использоваться для включения катушек внешних электромагнитных реле на постоянном токе, а некоторые - для коммутации низковольтных и слаботочных сигналов на логических входах других МУРЗ. Обычно, это никак не учитывается производителями МУРЗ, однако, известно, что для коммутации мощных нагрузок и для коммутации слаботочных низковольтных сигналов контакты должны иметь разные свойства и должны быть выполнены из различных материалов. Это находит отражение и в технической документации на ЭМР. Так, например, реле с мощными контактами имеют ограничения на нижний порог коммутируемого тока и напряжения, и этот порог часто лежит в пределах значений, используемых на практике. В связи с этим, в МУРЗ должны быть использованы в качестве сигнальных ЭМР двух типов, соответствующих отмеченным выше типам нагрузки.

3.4. В качестве мощных сигнальных выходных реле МУРЗ возможно использование современных высоковольтных IGBT транзисторов. Малые размеры (пластмассовый корпус типа ТО-247 и аналогичные ему), большие запасы по току, высокие выдерживаемые перенапряжения, большая рассеиваемая мощность, высокая допустимая рабочая температура кристалла, табл. 4, делают такие транзисторы весьма привлекательными элементами для коммутации индуктивных нагрузок (катушек промежуточных реле) потребляющих 0.1 – 5 А при напряжении 250 В постоянного тока. Для защиты от перенапряжений при коммутации индуктивных нагрузок, такие транзисторы могут быть дополнительно защищены варисторами с напряжением срабатывания 500 – 700 В.

Табл. 4. Параметры современных IGBT транзисторов некоторых типов, перспективных для использования в качестве выходных сигнальных реле МУРЗ.

Тип IGBT транзистора		IXSK35N120AU1	APT35GN120B	FGA25N120ANTD
Напряжение коллектор-эмиттер, В	V_{CES}	1200	1200	1200
Ток коллектора, А длительный импульсный	I_C	35	94	25
		140	105	90
Напряжение насыщения, В	$V_{CE(SAT)}$	4 - 8	2.5 - 4.7	3.5 - 7.5
Рассеиваемая мощность, Вт	P_{tot}	300	379	312
Тип корпуса	-	TO-264A	TO-247	TO-3P
Максимальная температура кристалла, °C	T_J	150	150	150

Как известно, некоторую проблему при использовании IGBT транзисторов, представляет собой правильная организация их цепей управления. Однако сегодня эта проблема успешно решена и на рынке имеются многочисленные устройства управления IGBT транзисторами (так называемые «драйверы») выполненные в виде небольших модулей, рис. 8, содержащие внутри все необходимые элементы для надежного включения и выключения IGBT транзисторов. Один такой модуль и два транзистора образуют аналог высококачественного переключающего контакта, гальванически изолированного от внутренних цепей управления МУРЗ.

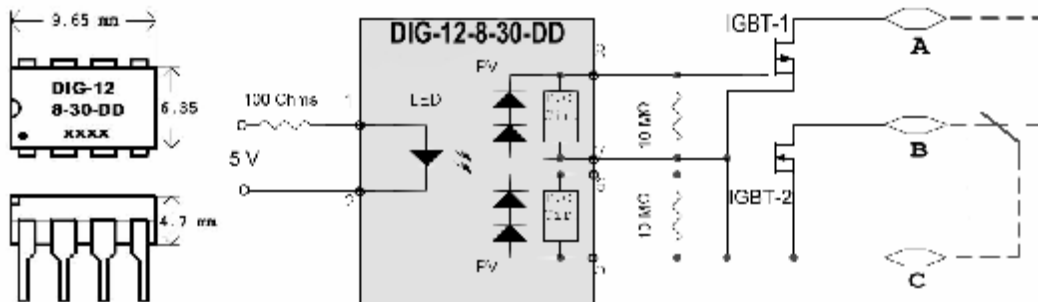


Рис. 8. Управляющий модуль с оптической развязкой (драйвер) типа GIG-12-8-30DD и схема его подключения к паре IGBT транзисторов, образующей аналог переключающего контакта.

На рынке полупроводниковых приборов имеются и полностью готовые к использованию при напряжении 250 В постоянного тока модули на основе IGBT транзисторов, снабженные всеми необходимыми элементами для управления, защиты и гальванической развязки. Такие модули имеют несколько большие размеры (58.4 x 45.7 x 22.9 мм), по сравнению с одиночным IGBT транзистором с драйвером, но

не требуют для своего монтажа ни печатной платы, ни каких либо других вспомогательных элементов (рис. 9) и поэтому могут быть использованы в любой конструкции МУРЗ.

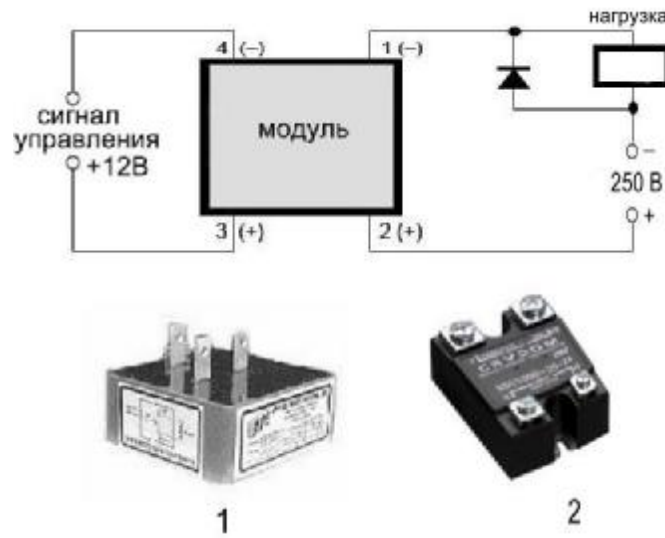


Рис. 9. Твердотельные полупроводниковые модули для коммутации индуктивной нагрузки при напряжении 250 В постоянного тока

1 – APSW-DC75 типа (Applied Power Systems);

2 – SSC1000-25 типа (Crydom).

Оба модуля имеют большую коммутационную способность по току и выдерживают высокие перенапряжения (75А, 1500 В – для 1 и, соответственно 25А, 1200 В – для 2).

4. Усовершенствование МУРЗ силами эксплуатационного персонала энергосистем.

Простейшим решением проблемы для контактов, включающих отключающую катушку выключателя, может быть использование внешнего усилителя мощности простейшего типа, включаемого между выходным контактом МУРЗ и катушкой, рис. 10.

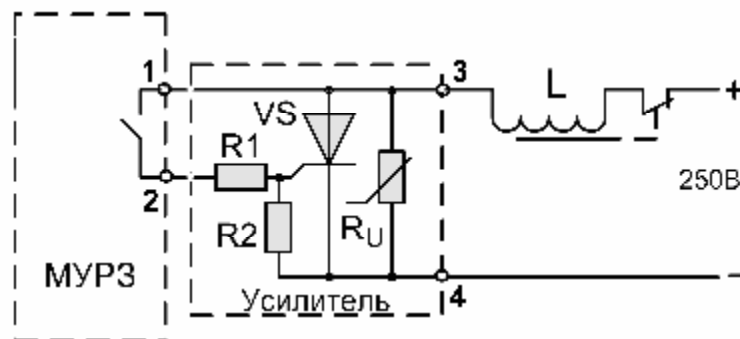


Рис. 10. Простейший усилитель мощности на одном тиристоре.

В тех случаях, когда от одного выходного контакта МУРЗ необходимо включить группу отключающих катушек, принадлежащих разным выключателям, можно использовать силовой демультиплексор на тиристорах, рис. 11, подключаемый к выходу усилителя.

Для контактов сигнальных реле (от которых требуется не только замыкание, но также и размыкание цепей с индуктивной нагрузкой) могут быть использованы искрозащитные модули пассивного типа, включаемые параллельно контактам реле, например, RC-цепочки самодельного изготовления или готовые, выпускаемые многими компаниями, рис. 12.

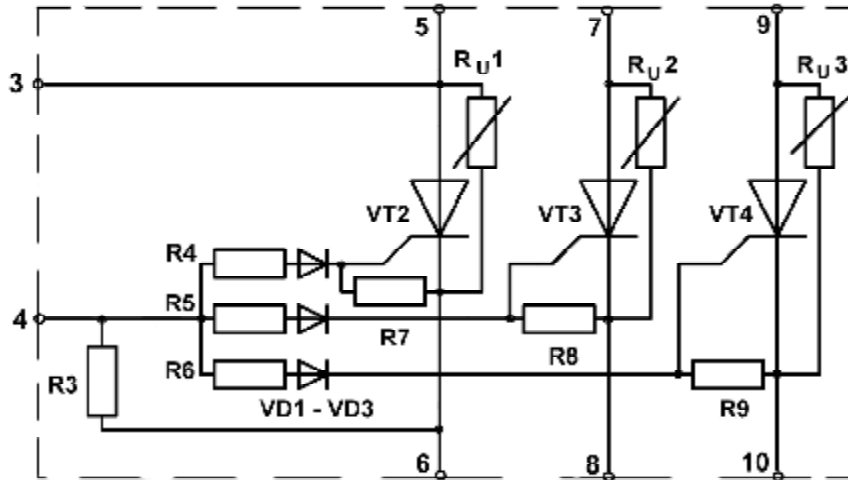


Рис. 11а. Схема силового демультиплексора, применяемого для размножения выходных цепей усилителя.

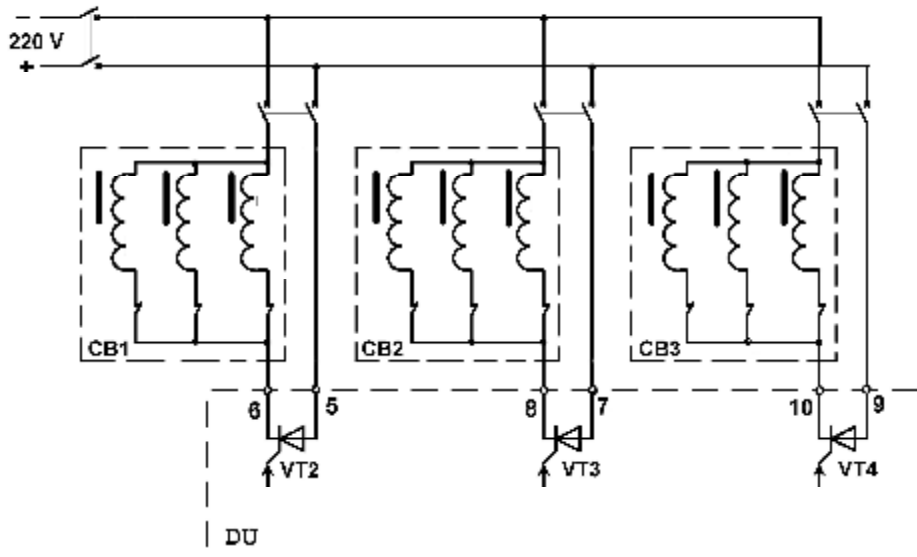
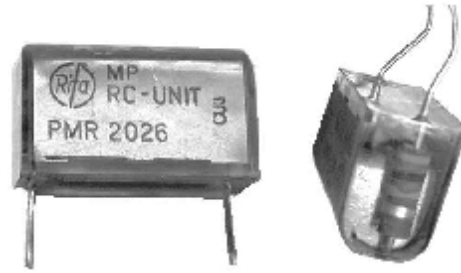


Рис. 11б. Схема внешних присоединений для силового демультиплексора DU.
CB1, CB2, CB3 – трехфазные высоковольтные выключатели.

Рис. 12. Искрозащитный модуль, содержащий элементы R и C, производимый компанией RIFA для защиты контактов реле.



Более эффективную защиту контактов реле от электрической дуги обеспечивают защитные модули активного типа, содержащие активные полупроводниковые элементы, такие, например, как транзисторы, рис. 13.



Рис. 13. Защитные модули активного типа (SEL-9501, SEL-9502), выпускаемые компанией SEL.

Естественно, модули такого типа намного сложнее (и дороже) модулей пассивного типа. Например, более простая разновидность такого модуля (Пат. США 5703743), содержит два транзистора: IGBT и FET типов, один симистор, три диода, три стабилитрона. В более сложной модификации (Пат. США 6956725) дополнительно к перечисленным выше элементам используется трансформатор тока, диодный мост, несколько конденсаторов и резисторов. Эти модули свободно продаются компанией SEL и могут быть с успехом использованы любым потребителем, эксплуатирующим микропроцессорные реле защиты. Выбор того или иного типа искрозащитного модуля обусловлен конкретными параметрами индуктивных нагрузок, коммутируемых выходными контактами МУРЗ. При более «легких» нагрузках, с постоянной времени, не превышающей 7 – 10 мс, могут быть использованы простейшие RC-цепочки и модули, а для нагрузок с $R/L = 30 - 50$ мс более подходящими являются модули активного типа.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Gurevich V., “Electrical Relays: Principles and Applications”. – Taylor & Francis Group, London – New-York, 2005, 704 pp.
- [2] V. Gurevich, “Nonconformance in Electromechanical Output Relays of Microprocessor-Based Protection Devices Under Actual Operation Conditions”, Electrical Engineering & Electromechanics, 2006, vol. 1, p.12 – 16.
- [3] Hindle P.J., Bolger G., Fitch J., Modernising the Old Transmission Protection Interfaces – Integrated Bay Solutions to Conventional Plant. – Developments in Power System Protection, 2004, Vol. 2, 8th IEE International Conference, p. 490 – 493.