

Перспективы применения гибридной технологии в релейной защите и автоматике

В 70–80 годах прошлого столетия электромеханические устройства релейной защиты (ЭРЗ) западного производства (General Electric, ASEA, BBC) достигли высокого уровня [1]: они были способны выполнять весьма сложные функции и работать по сложному алгоритму, полностью обеспечивая потребности развитой электроэнергетики. Стоимость сложных ЭРЗ доходила до нескольких десятков тысяч долларов, что было связано с ручным производством множества высокоточных деталей, ручной сборкой и ручной регулировкой готовых изделий. Стремление производителей снизить затраты на производство реле защиты привело их в 1970-х годах сначала к полупроводниковым реле, собранным из дешевых компонентов на печатной плате, а затем, в 1980-х годах, и к микропроцессорным реле с полной автоматизацией процесса сборки и проверки отдельных печатных плат, из которых и состоит современное микропроцессорное устройство релейной защиты (МУРЗ) [2].

Владимир ГУРЕВИЧ,
к. т. н.

Полупроводниковые реле защиты, собранные на дискретных электронных компонентах, полностью повторяли функции электромеханических реле, не внося никаких принципиально новых функций в релейную защиту.

Первые микропроцессорные реле тоже повторяли функции электромеханических защит, причем лишь самых простых. Это объясняется тем, что в то время перспективы применения микропроцессорной техники в релейной защите были еще туманны и основным стимулом к поиску альтернативы электромеханическим защитам было снижение затрат ручного труда в процессе производства. Типичным примером конструкций того времени является микропроцессорное реле типа RXIDK-2H и его полный транзисторный аналог — RXIDF-2H (рис. 1).

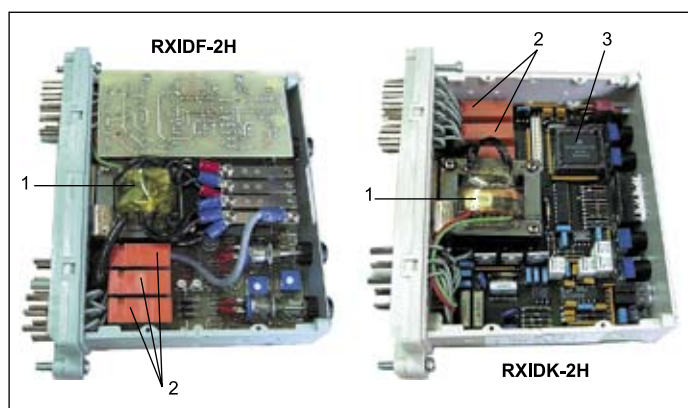


Рис. 1. Два токовых реле с зависимой выдержкой времени, одинаковыми техническими параметрами, характеристиками и размерами, произведенные одной и той же компанией (ABB):

- а) статическое полупроводниковое типа RXIDF-2H;
- б) микропроцессорное RXIDK-2H:
 - 1 — входной трансформатор тока;
 - 2 — выходные электромагнитные реле;
 - 3 — специализированный микропроцессор

В настоящее время МУРЗ достигли высокого уровня развития, тем не менее, за прошедшие десятилетия никакой революции в области релейной защиты не произошло. Ни основные функции релейной защиты, ни ее принципы, выработанные в течение столетия, так и не изменились. Улучшились лишь характеристики реле защиты за счет логических и вычислительных способностей микропроцессоров.

Процесс перехода от электромеханических устройств защиты к микропроцессорным в одних странах начался раньше и идет более интенсивными темпами, в других — начался позднее и идет медленнее, поэтому процент МУРЗ в энергосистемах разных стран существенно различается (от 10 до 70%). Однако во всем мире современные тенденции развития релейной защиты характеризуются повсеместным вытеснением электромеханических устройств релейной защиты и автоматике микропроцессорными. Связано это с множеством причин, основная из которых — это возможность полной автоматизации процесса производства и испытаний реле и получения сверхприбыли. (Стоимость современных МУРЗ производства ведущих западных компаний осталась на уровне ЭРЗ: \$3000–10 000, при очень небольших затратах ручного труда.)

С ростом количества применяемых МУРЗ и по мере их старения (некоторые типы МУРЗ находятся в эксплуатации уже 15–20 лет) стали проявляться многочисленные проблемы, связанные с их недостаточной надежностью [2]. Особая проблема возникла в последние годы в связи с развитием компьютерных и сетевых технологий (концепция Smart Grid [3]), а также технологий преднамеренных деструктивных электромагнитных воздействий на электронную аппаратуру [4]. В военных лабораториях всех развитых стран мира сегодня интенсивно разрабатываются методы разрушающего воздействия на электронную аппаратуру энергосистем с помощью компьютерных вирусов [5] и мощных электромагнитных импульсов (ЭМИ) [6]. Чем больше микропроцессорных устройств и систем используется в энергосистеме, тем она более уязвима к этим воздействиям. Таким образом, получается, что современные тенденции развития энергетики, в частности концепция Smart Grid, направлены в сторону увеличения ее уязвимости. Это неприятное последствие технического прогресса.



Рис. 2. Дистанционная защита линий, выполненная на МУРЗ типа MiCOM P437 (внизу) и электромеханических реле типа LZ-31 (вверху), включенных на параллельную работу

са уже начинают замечать специалисты [7], предлагающие для повышения устойчивости энергосистем к указанным выше воздействиям резервировать МУРЗ электромеханическими реле (значительно более устойчивыми к этим воздействиям), например за счет введения двухуровневой РЗА.

Согласно предложению Б. Д. Щедрикова, первый уровень РЗА должен быть образован МУРЗ, а второй — электромеханическими реле тока типа РТ-40 и реле времени типа РВМ-12. Оба комплекта реле (МУРЗ и электромеханика) включены на параллельную работу, причем время срабатывания электромеханической защиты выбрано на 0,1 с больше времени срабатывания МУРЗ. По мнению автора предложения, электромеханика должна подстраховать МУРЗ в случае ее несрабатывания при аварийном режиме (то есть фактически таким включением реализуется логическая функция «ИЛИ»). Следует заметить, что включение МУРЗ и электромеханики на параллельную работу не является чем-то новым и давно используется на практике (рис. 2) [8].

Однако при таком включении не решена проблема ложных срабатываний МУРЗ при воздействии на них ЭМИ, которые могут привести к не менее серьезным проблемам в энергосистеме, чем несрабатывание. В другой работе тот же автор предлагает вместо параллельного включения электромеханики и МУРЗ использовать их включение таким образом, чтобы электромеханическое реле типа КРБ-126 давало разрешение на выполнение операции включения отключающей катушки выключателя микропроцессорным реле (то есть, по сути дела, в этом случае реализуется логическая функция «И»). Такое включение обеспечивает, конечно, гораздо лучшую устойчивость РЗ к ЭМИ, однако

Таблица 1. Параметры современных малогабаритных тиристоров, предназначенных для монтажа на печатной плате

Параметр/Тип тиристора	30TPS 12	25TTS 12	70TPS 16	CS 60-16io1	BTW69-1200	CS 29-12io1C
Тип корпуса	TO-247AC	TO-220AC	SUPER-247	PLUS247	TOP3	ISOPUS 220
Максимальное напряжение, В	1200	1200	1600	1600	1200	1200
Максимальный ток, А	30	25	70	75	50	35
Импульсный ток, А	300	300	1200	1500	580	200
dv/dt, В/мкс	500	500	500	1000	1000	1000
di/dt, А/мкс	150	150	150	150	50	150
Ток утечки, mA (для t = 25 °C)	0,5	0,5	1	0,2	5	2
Ток удержания, mA	100	150	200	200	150	50
Время включения, мкс	0,9	0,9	—	2	—	2

Таблица 2. Параметры современных мощных высоковольтных IGBT-транзисторов

Параметр/Тип транзистора	IXSK35N120AU1	APT35GN120N	FGA25N120ANTD	IXGH25N160	FGA50N100BNTD
Тип корпуса	TO-246AA	TO-247	TO-3P	TO-247	TO-3P
Напряжение коллектор-эмиттер, В	1200	1200	1200	1600	1000
Длительный ток коллектора, А	35	94	25	75	50
Импульсный ток коллектора, А	140	105	90	200	100
Рассеиваемая мощность, Вт	300	379	312	300	156
Напряжение насыщения, В	4	2,5–4,7	2,15	2,5–4,7	2
Время включения, нс	80	24	50	47	140
Время выключения, нс	900	300	190	86	630

Таблица 3. Параметры быстродействующих вакуумных высоковольтных герконов

Параметр/Тип геркона	MRA5650G	KSK-1A75	HYR2016	HYR1559	MARR-5	KSK-1A85
Тип контакта	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Коммутируемое напряжение, В	1000	1000	1000	1500	1000	1000
Коммутируемый ток, А	1	0,5	1	0,5	0,5	1
Коммутируемая мощность, Вт	100	10	25	10	10	100
Пробивное напряжение, В	1500	1500	2500	1500	2000	4000
Время замыкания, мс	0,6	0,5	0,8	0,4	0,75	1
Время размыкания, мс	0,05	0,1	0,3	0,2	0,3	0,1
Размеры, мм	D = 2,75 L = 21	D = 2,3 L = 14,2	D = 2,6 L = 21	D = 2,3 L = 14,2	D = 2,66 L = 19,7	D = 2,75 L = 21
Чувствительность, ампервитков	20–60	15–40	15–70	15–50	17–38	20–60

снижает общую надежность РЗА (это неизбежная цена за повышение устойчивости защиты к ЭМИ). Кроме того, производство электромеханических реле неуклонно сокращается, а в странах Запада уже прекращено. ЭМРЗ, производство которых еще «теплится» на ЧЭАЗ, давно морально устарели и являются техникой даже не вчерашнего, а позавчерашнего дня.

Кроме того, проблемы производства ЭМРЗ (большие затраты ручного труда, низкая рентабельность) ведь никуда не делись. В этой связи использование гибридных (герконо-полупроводниковых) реле защиты, выполненных на современных компонентах и не требующих ручного труда в тех объемах, которые требовались при производстве электромеханики, представляются гораздо более перспективным направлением создания специальных и резервных защит, чем традиционные ЭМРЗ.

Принцип повышения устойчивости МУРЗ к мощным ЭМИ путем использования герметичных магнитоуправляемых электромеханических элементов — герконов, разрешающих действие МУРЗ, был предложен нами в [9] за 15 лет до публикации предложения о двухуровневой РЗА, а идея о необходимости создания гибридного (герконо-полупроводникового) устройства РЗ была предложена нами почти 20 лет тому назад

[10], сразу же, как только возникли первые сомнения относительно помехоустойчивости МУРЗ. Причем уже тогда речь шла об использовании современных герконов, а не устаревших электромеханических реле [11–14]. Сегодня, с созданием новой элементной базы (миниатюрные высоковольтные вакуумные и газонаполненные герконы с электрической прочностью изоляции до 4 кВ, мощные герконы с большими коммутируемыми токами), а также небольших по размерам транзисторов и тиристоров с рабочим напряжением 1200–1800 В и коммутируемыми токами в десятки ампер появились, естественно, и новые возможности по созданию гибридных реле (в качестве самостоятельных реле защиты или пусковых органов для МУРЗ) (табл. 1–3).

Особенности современных герконов — высокая надежность (при соблюдении нормируемых ограничений по току и напряжению), высокое быстродействие (доли и единицы миллисекунд), отличная защита от пыли и влаги, отсутствие необходимости зачистки и регулировки в процессе эксплуатации, малые размеры, полная гальваническая развязка цепи управления (катушка) от выходной цепи (контактов) и возможность очень простыми средствами получить высоковольтную изоляцию между цепью управления и выходной цепью.

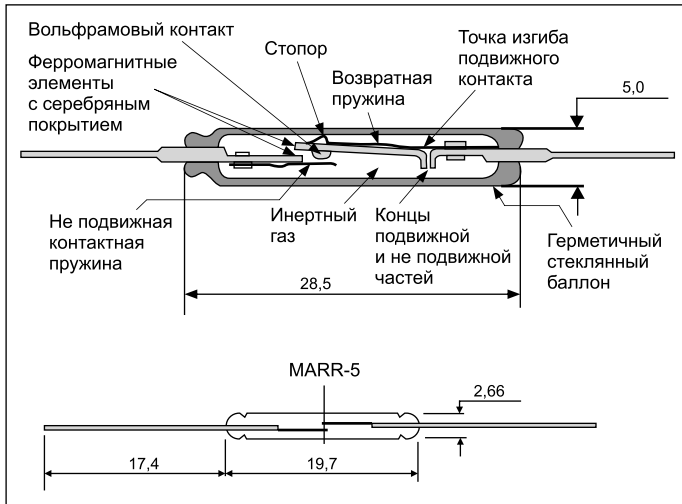


Рис. 3. Современные герконы, рекомендуемые для использования в новых реле: а) силовой газонаполненный геркон типа R15U (Yaskawa) с двумя стадиями коммутации; б) миниатюрный быстродействующий вакуумный геркон типа MARR-5 (Hamlin Inc.)

Японская компания Yaskawa выпускает серию небольших по размерам мощных силовых герконов, с коммутируемым током до 5 А при напряжении 250 В (рис. 3).

При использовании герконов следует всегда принимать во внимание, что их высокая надежность гарантируется только при соблюдении ограничений коммутационной способности, оговоренных в технической документации. Так же как и полупроводниковые приборы, герконы быстро выходят из строя даже при кратковременном превышении разрешенных параметров коммутации.

Вместе с тем современные герконы, хотя и являются электромеханическими элементами, по своей надежности и количеству коммутационных циклов приближаются к полупроводниковым элементам, а по ряду показателей, например устойчивость к помехам и импульсным перенапряжениям, значительно превосходят их. Особые качества реле на основе герконов, не свойственные обычным электромеханическим реле (высокое быстродействие, четкий и стабильный порог срабатывания, высокий коэффициент возврата на переменном токе и др. [1]), позволили создать на их основе целый ряд устройств защиты и автоматики для промышленности, энергетики и военной техники [14–16]. Гибридным герконо-полупроводниковым устройствам посвящено несколько монографий автора [15–17], в которых описаны десятки устройств этого нового перспективного направления.

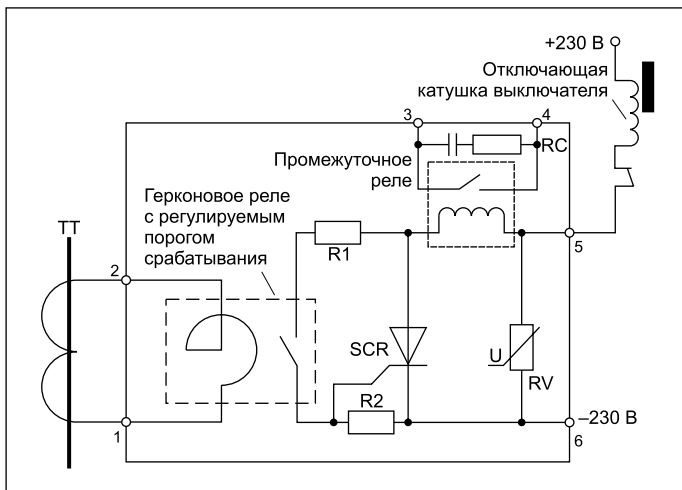


Рис. 4. Быстродействующее гибридное реле токовой отсечки со встроенным промежуточным сигнальным реле на герконе

Конкретным примером гибридного реле защиты может служить быстродействующее реле токовой отсечки, специально разработанное нами для делительной автоматики сети (рис. 4) [14]. Это очень простое устройство, содержащее минимальное количество элементов, выбранных с большими запасами по напряжению. Так, например, тиристор рассчитан на напряжение 1200 В, а миниатюрный вакуумный геркон — на 2000 В. Изоляция между входной катушкой и герконом выдерживает напряжение в 5 кВ, которое может быть при необходимости увеличено.

Не только простейшие функции РЗА, но и более сложные алгоритмы могут быть реализованы на этой элементной базе, например, реле с зависимой выдержкой времени, реле дифференциальной защиты, реле направления мощности, реле, реагирующие на короткое замыкание и не реагирующие на увеличение тока нагрузки и др. [13].

Особенности герконов позволяют использовать их и для создания специальных типов защиты, которые не могут быть реализованы на традиционной элементной базе — ни электромеханической, ни микропроцессорной, например для защиты мощных силовых трансформаторов от индуцированного геомагнитного тока [18]. В этом реле, предназначенном для защиты силовых трансформаторов от геомагнитных токов в земле, наведенного мощной солнечной бурей или компонентом Е3 высотного ядерного взрыва [6], нельзя использовать устройства, выполненные на микроселектронных компонентах, чувствительных к электромагнитному импульсу. Идеальным решением проблемы является использование гибридной герконо-полупроводниковой технологии, базирующейся на дискретных высоковольтных элементах [18], устойчивых к электромагнитным помехам и импульсным перенапряжениям (рис. 5).

На рис. 5а показан принцип действия реле, чувствительного к постоянной составляющей тока в нейтрали силового трансформатора (наведенный геомагнитный ток) и не чувствительного к переменному току в нейтрали силового трансформатора, изменяющемуся в широких пределах. Реле состоит из геркона RS с обмоткой, размещенного на кабеле, соединяющем нейтраль трансформатора с точкой заземления, перпендикулярно к оси кабеля, и обычного тороидального трансформатора тока СТ, установленного на этом кабеле. При отсутствии постоянной составляющей в токе нейтрали магнитное поле кабеля, воздействующее непосредственно на геркон, полностью компенсируется магнитным полем катушки, одетой на геркон, питающейся от трансформатора тока. Изменение переменного тока, протекающего в нейтрали, приводит к пропорциональному изменению обоих магнитных полей, действующих на геркон, и к их взаимной компенсации. В случае появления значительной постоянной составляющей в токе нейтрали (более 10–15 А) баланс магнитных полей, действующих на геркон, нарушается:

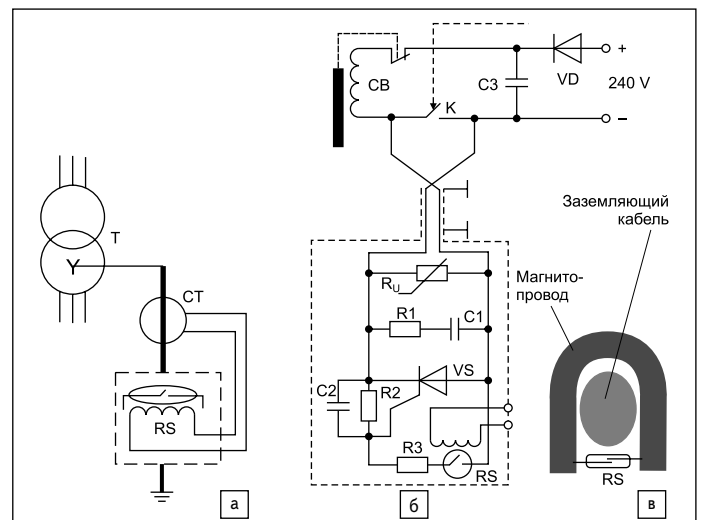


Рис. 5. Реле защиты силового трансформатора от низкочастотного индуцированного геомагнитного тока в цепи нейтрали

магнитное поле кабеля по-прежнему воздействует на него, а компенсирующее магнитное поле катушки, запитанной от трансформатора тока, нет, поскольку постоянная составляющая тока не проходит через трансформатор тока. В результате геркон срабатывает.

Реальная схема реле включает дополнительно усилитель мощности на тиристоре VS, варистор R_U и цепочку R1C1, защищающие тиристор от помех и перенапряжений (рис. 5б). Реле снабжено сплошным электростатическим экраном и ферромагнитным экраном, имеющим окно лишь со стороны кабеля в месте расположения геркона. Реле соединено с цепью отключающей катушки выключателя СВ посредством специального экранированного кабеля с витыми парами и многослойным комбинированным экраном, заземленным с двух концов [3], устойчивым к воздействию электромагнитного импульса [2]. В реле могут использоваться миниатюрные высоковольтные вакуумные герконы, например типа KSK-1A85 (производства компании Meder Electronics), с электрической прочностью изоляции между контактами 4000 В (табл. 3). При необходимости увеличения чувствительности могут быть использованы дополнительные ферромагнитные элементы (концентраторы магнитного поля), расположенные в области геркона (рис. 5в).

Для получения реле с более низкой чувствительностью и более высоким порогом срабатывания продольная ось геркона должна образовывать угол, отличный от 90°, с осью кабеля, на котором он установлен. Тиристор тоже миниатюрный, высоковольтный, типа SKT50/18E (производства компании Semicon), с максимальным напряжением 1800 В и максимальным длительным током 75 А, выдерживающий высокие скорости нарастания напряжения (1000 В/мкс) и широкий диапазон рабочих температур (-40...+130 °С). Цепь питания отключающей катушки снабжена накопительным конденсатором С3, обеспечивающим срабатывание выключателя даже при пропадании оперативного напряжения. Цепочка R2C2 предназначена для дополни-

тельного повышения помехоустойчивости устройства. Конденсатор С2 обеспечивает некоторую задержку включения тиристора, предотвращая его отпирание под действием мощной импульсной помехи.

Применение в этом реле дискретных высоковольтных компонентов вместо традиционной микроэлектроники позволяет обеспечить его высокую надежность в условиях воздействия мощных электромагнитных помех и перенапряжений, характерных для солнечных бурь и электромагнитного импульса.

Заключение

Еще раз подчеркнем, что описанная в статье технология предназначена для использования не вместо МУРЗ, а вместо ЭМРЗ; в тех случаях, когда использование МУРЗ экономически или технически не оправдано; в качестве резервной защиты; в качестве пусковых органов для МУРЗ, а также в специальных случаях, когда использование микроэлектроники недопустимо.

Описанная технология уже прошла «проверку временем». Разработанное автором гибридное реле тока «Квазитрон-2» [12] с выносными датчиками на герконах вошло в состав «Панелей защитных крановых» типов ПЗКМ-160, ПКЗМ-250, ПКЗМ-400, выпускаемых по ТУ 16-92ХИ-621.001.

Литература

1. Гуревич В. И. Электрические реле. Устройство, принцип действия и применения. Настольная книга электротехника. Серия «Компоненты и технологии». М.: Солон-Пресс, 2011.
2. Гуревич В. И. Микропроцессорные реле защиты. Устройство, проблемы, перспективы. Учебно-практическое пособие. М.: Инфра-Инженерия, 2011.
3. Гуревич В. И. Интеллектуальные сети — новые перспективы или новые проблемы? // Электротехнический рынок. 2010. № 6. 2011. № 1–2.
4. Гуревич В. И. Проблема электромагнитных воздействий на микропроцессорные устройства ре-

- лейной защиты // Компоненты и технологии. 2010. № 2–4.
5. Гуревич В. И. Кибероружие против энергетики // PRO Электричество. 2011. № 1.
6. Гуревич В. И. Проблема устойчивости микропроцессорных систем релейной защиты и автоматики к преднамеренным деструктивным электромагнитным воздействиям // Компоненты и технологии. 2011. № 4. 2011. № 5.
7. Щедриков Б. Д. Электромеханические устройства релейной защиты и автоматики в энергетике: настоящее и будущее // Релейная защита и автоматизация. 2010. № 1.
8. Гуревич В. И. О некоторых путях решения проблемы электромагнитной совместимости релейной защиты в электроэнергетике // Промышленная энергетика. 1996. № 3.
9. Гуревич В. И. Принципы повышения помехоустойчивости статических реле тока // Энергетика и электрификация. 1992. № 2.
10. Гуревич В. И. Пути повышения электромагнитной совместимости релейной защиты в электроэнергетике // Промышленная энергетика. 1995. № 2.
11. Гуревич В. И. О развитии средств релейной защиты электрических сетей // Энергетическое строительство. 1994. № 1.
12. Гуревич В. И. Универсальные защитные реле максимального тока нового поколения // Электротехника. 1994. № 1.
13. Гуревич В. И. Гибридные герконо-полупроводниковые устройства — новое поколение реле защиты // Проблемы энергетики. 2007. № 9–10.
14. Гуревич В. И. Высокостабильное герконо-полупроводниковое реле тока с повышенным быстродействием // Энерго-Инфо. 2007. № 2.
15. Гуревич В. И. Высоковольтные устройства автоматики на герконах. Хайфа, 2000.
16. Gurevich V. Protection Devices and Systems for High-Voltage Applications. New York — Basel: Marcel Dekker Inc., 2003.
17. Gurevich V. Electronic Devices on Discrete Components for Industrial and Power Engineering // CRC Press (Taylor & Francis Group), 2008.
18. Гуревич В. И. Силовые трансформаторы тоже подвержены влиянию Солнца // Электротехнический рынок. 2011. № 5.