

Гибридные герконо-полупроводниковые реле – новое поколение устройств релейной защиты

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

От редакции. В четвертом номере нашего журнала были опубликованы критические замечания зарубежного специалиста В. Гуревича на взгляды Российских релейщиков о перспективах развития релейной защиты. Сегодня мы предоставляем ему возможность выступить с конкретными предложениями и по-прежнему приглашаем наших читателей к дискуссии по этой важной теме.

Научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы в области электромеханических реле защиты, в отличие от электромеханических промежуточных реле общепромышленного назначения, не ведутся уже десятки лет. Все силы разработчиков реле защиты уже давно направлены исключительно в сторону микропроцессорных устройств. Это привело к тому, что в эксплуатации задержались на долгие годы реле, разработанные еще в начале прошлого века (например, реле РТ-80, разработанное известной некогда фирмой ASEA в 1918 году). Если в начале процесса вытеснения электромеханических реле микропроцессорными реле еще слышны были робкие голоса в защиту первых, то по прошествии десятков лет, в течение которых устаревшие электромеханические реле продолжали интенсивно изнашиваться и ржаветь, создавая проблемы эксплуатационному персоналу, сторонников таких реле практически уже не осталось. При этом, абсолютно правильное и понятное отрицательное отношение энергетиков к устаревшим и предельно изношенным электромеханическим реле совершенно не обоснованно распространяется на весь класс не микропроцессорных реле защиты. В немалой степени этому способствует мощная рекламная компания ведущих мировых электротехнических концернов, получающих сверхприбыль от производства микропроцессорных устройств защиты. Обычно, мало кто обращает внимания на то, что микропроцессорные реле – это и не реле вовсе, а некие многофункциональные комплексы, объединившие в одной конструкции функции многих устройств, часто не имеющих никакого отношения ни к реле ни к релейной защите. Например, такие важные и привлекательные функции, как запись аварийных режимов, способность дистанционной передачи данных по каналам оптической связи и т. п. «вкусности», на самом деле гораздо лучше, чем микропроцессорные реле, выполняют специализированные устройства, представленные на рынке во всем своем многообразии. Десятки компаний предлагают многоканальные (12, 24, 36 и более каналов) микропроцессорные регистраторы аварийных режимов, способные не только записывать эти режимы, но и анализировать их, производить вычисление расстояния до места повреждения, передавать данные через спутники GPS или компьютерную сеть и многое другое. Не меньшим количеством замечательных свойств обладают и многочисленные современные системы связи и передачи данных, представленные сегодня на рынке. Что же касается объединения в одном микропроцессорном устройстве функций нескольких видов реле защиты, то такое объединение вовсе не так безобидно, как кажется, поскольку отказ любого электронного компонента, обслуживающего микропроцессор, память, источник питания и т.д. приведет к отказу сразу всего комплекса релейной защиты, а не только одного какого-то вида защиты. В связи с изложенным, становится очевидным, что сравнивать многофункциональное микропроцессорное устройство нужно не с отдельно взятым реле тока, а с комплексом современной аппаратуры, выполняющим тот же набор функций.

Такой подход [1, 2] позволяет по-новому взглянуть на проблему переоснащения релейной защиты. К тому же, развитие элементной базы, включая мощные полупроводниковые и электромеханические коммутирующие элементы, не стояло на месте.

В последние годы появились небольшие по размерам тиристоры и транзисторы в стандартных корпусах (ТО-247, ТО-220), табл. 1 и 2, предназначенных для распайки на печатную плату, с коммутируемым током в десятки ампер при напряжении 1200 – 1600 Вольт.

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

Параметр/Тип тиристора	30TPS12	25TTS12	70TPS16	CS 60-16io1	BTW69-1200	CS 29-12io1C
Тип корпуса	TO-247AC	TO-220AC	SUPER-247	PLUS247	TOP3	ISOPLUS 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	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	IXSK35N120 AU1	APT35GN12 0N	FGA25N120AN TD	IXGH25N 160	FGA50N100 BNTD
Тип корпуса	TO-246AA	TO-247	TO-3P	TO-247	TO-3P
Напряж. 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	2.0
Время включения, наносек	80	24	50	47	140
Время выключения, наносек	900	300	190	86	630

Различные компании выпускает миниатюрные быстродействующие (доли миллисекунд) вакуумные герконы с пробивным напряжением 1000 – 2500 Вольт, которые могут служить прекрасным пороговым органом реле защиты, табл. 3.

Таблица 3. Параметры быстродействующих вакуумных высоковольтных герконов.

Параметр/Тип геркона	MRA5650G	KSK-1A75	HYR2016	HYR1559	MARR-5	R1-48C
Тип контакта	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Коммутируемое напряжение, В	1000	1000	1000	1500	1000	250
Коммутируемый ток, А	1	0.5	1	0.5	0.5	1
Коммутируемая мощность, Вт	100	10	25	10	10	70
Пробивное напряжение, В	1500	1500	2500	1500	2000	780
Время замыкания, мс	0.6	0.5	0.8	0.4	0.75	0.35
Время размыкания, мс	0.05	0.1	0.3	0.2	0.3	0.03
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 = 2.7, L = 20.5
Чувствительность, ампервитков	20 – 60	15 - 40	15 - 70	15 - 50	17 - 38	27 - 80

Японская компания Yaskawa и ее филиалы выпускает серию не больших по размерам мощных силовых герконов, с коммутируемым током до 5 А при напряжении 250 Вольт, рис. 1.

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, таких, как устойчивость к помехам, импульсным перенапряжениям, значительно превосходят последние. Особые качества реле на основе герконов, не свойственные обычным электромеханическим реле (высокое быстродействие, четкий и стабильный порог срабатывания, высокий коэффициент возврата на переменном токе др. [3]) уже позволили создать на их основе целый ряд устройств защиты и автоматики для промышленности, энергетики и военной техники [4, 5].

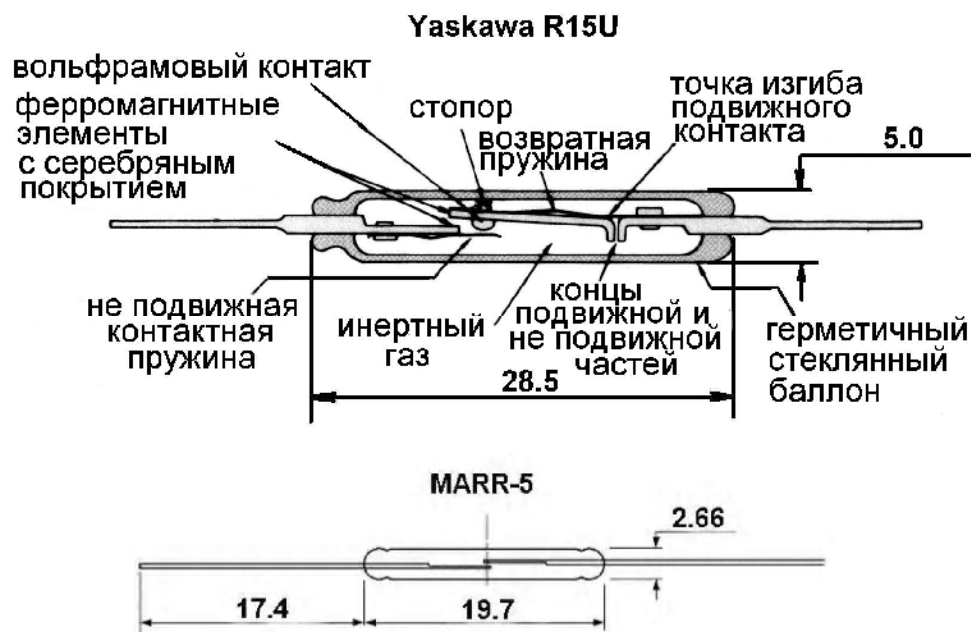


Рис. 1. Современные герконы, рекомендуемые для использования в новых реле. Вверху силовой газонаполненный геркон типа R15U (Yaskawa) с двумя стадиями коммутации; внизу – миниатюрный быстродействующий вакуумный геркон типа MARR-5 (Hamlin Inc.)

Это позволило даже говорить о «ренессансе» электромеханических реле защиты [6]. Более того, как оказалось, на основе герконов можно создавать специальные реле защиты с параметрами, недостижимыми для микропроцессорных защит [7].

На основе комбинации герконов, магнитных цепей и полупроводниковых элементов могут быть созданы весьма интересные и перспективные устройства релейной защиты, отличающиеся своей простотой и низкой стоимостью. Например, такое простое устройство, как геркон с двумя катушками управления (рис. 2а) может послужить основой для создания реле дифференциальной защиты, логических элементов, порогового суммирующего элемента и т.д. Геркон со специальной магнитной цепью (рис. 2б) оказывается не чувствительным к аperiodической составляющей тока в катушке. Геркон, включенный по схеме рис. 2с, реагирует на определенную величину несимметрии напряжений. В схеме рис. 2д геркон срабатывает только при быстром изменении тока

(напряжения) во входной цепи, характерном для аварийных режимов и не реагирует на медленные изменения тока, связанное с изменением нагрузки. Геркон также может реагировать непосредственно на магнитное поле токоведущей шины без дополнительных обмоток, рис. 2е.

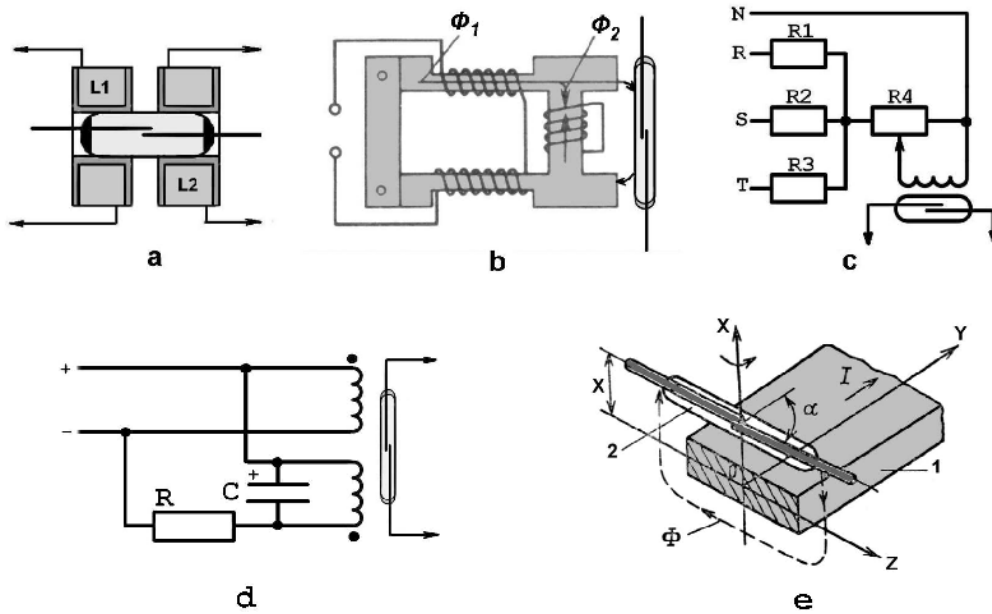


Рис. 2. Примеры различных применений герконов в устройствах защиты.

Рассмотрим конкретные примеры реализации наиболее распространенных видов реле защиты на основе предложенной технологии.

Реле максимального тока, рис. 3. Реле тока без выдержки времени являются наиболее массовыми устройствами защиты электрических сетей и электрооборудования от перегрузки. Этот вариант реле предназначен для непосредственного управления отключающей катушкой высоковольтного выключателя СВ.

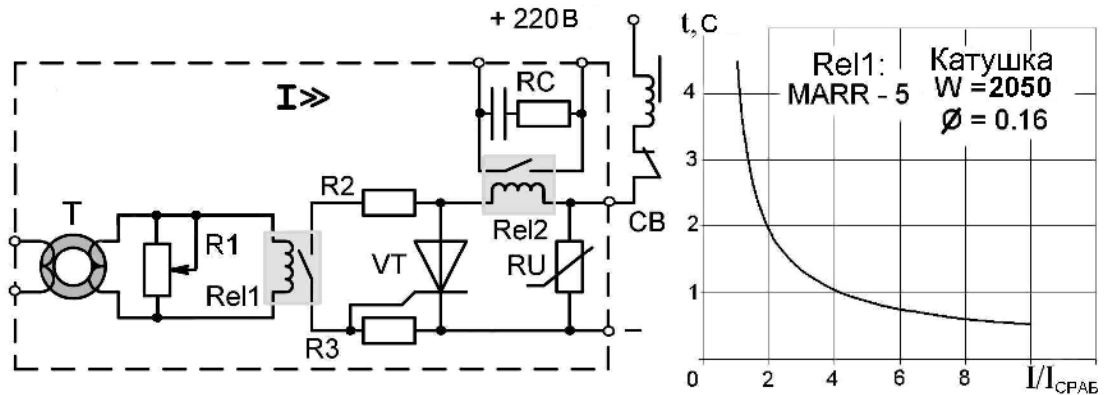


Рис. 3. Простейшее гибридное реле максимального тока мгновенного действия (токовая отсечка): принципиальная схема и экспериментальная время-токовая характеристика.

I/I_{CPAB} – отношение тока на входе реле к току срабатывания.

Чувствительным пороговым элементом устройства является реле Rel1 выполненное на миниатюрном быстродействующем герконе, его обмотка содержит 2050 витков, намотанных проводом 0.16 мм. При срабатывании этот геркон начинает вибрировать с удвоенной частотой входного тока. При первом же замыкании геркона отпирается тиристор VT и включает отключающую катушку выключателя СВ. Тиристор только включает эту катушку, отключение же ее осуществляется собственным блок-контактом выключателя. Реле Rel2 является промежуточным, предназначенным для цепей сигнализации или блокировки. В нем использован геркон средней мощности типа GC1513. Его катушка имеет очень низкое сопротивление и рассчитана на кратковременное протекание постоянного тока в диапазоне от 0.5 до 15 А (типичные токи отключающих катушек выключателей различных типов) при котором выходной геркон надежно замыкается. Регулирование порога срабатывания (загрубление реле) осуществляется с помощью потенциометра R1. В реле использован тиристор типа 30TPS12 с номинальным током 30А и максимальным напряжением 1200В и миниатюрный вакуумный геркон типа MARR-5. Входной трансформатор тока выполнен на низкочастотном ферритовом кольце с внешним диаметром 32 мм. Цепочка RC служит для защиты выходного контакта (геркона) от искровой эрозии при коммутации индуктивных нагрузок. Варистор RU типа SIOV-Q20K275 защищает устройство от коммутационных перенапряжений в цепи постоянного тока. Его напряжение (clamping voltage) не превышает 350В на постоянном токе. Это напряжение должно быть больше, чем номинальное напряжение сети, но меньше максимального допустимого напряжения тиристора и геркона. Как видно из экспериментальной время-токовой зависимости, это реле имеет прекрасное быстродействие, каким не обладает ни одно из известных электромеханических, статических или микропроцессорных устройств, оно не требует питания, не чувствительно к высокочастотным и импульсным помехам во входной цепи, надежно срабатывает при сильном искажении кривой входного тока [7].

Реле тока мгновенного действия с высоким коэффициентом возврата, рис. 4. В этой конструкции реле тока вместо силового тиристора использован мощный геркон типа R15U (Yaskawa) в качестве контакта выходного реле Rel2. В качестве источника энергии, необходимой для срабатывания этого реле, служит второй трансформатор тока T2.

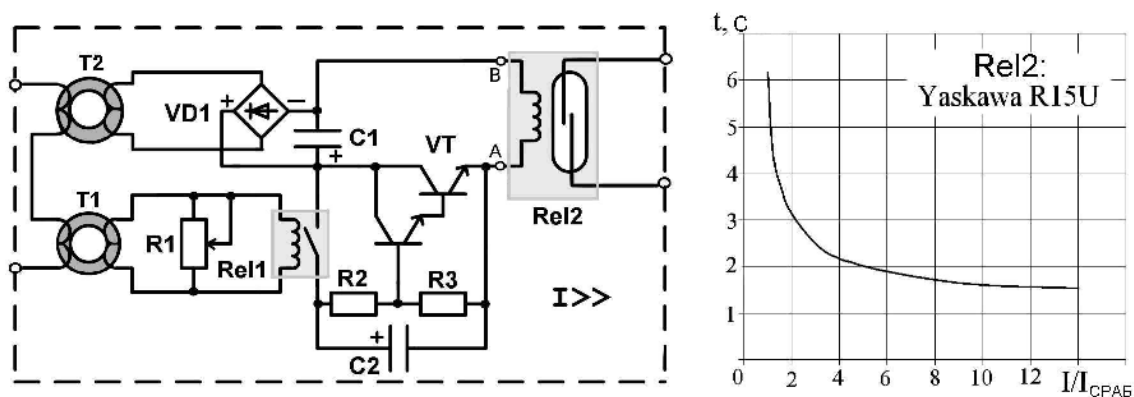


Fig. 4. Реле тока мгновенного действия с высоким коэффициентом возврата: принципиальная схема и экспериментальная время токовая характеристика.

I/I_{CPAB} – отношение тока на входе реле к току срабатывания.

Для управления выходным реле Rel2 вибрирующий входной геркон (Rel1) уже не подходит. Поэтому между входным пороговым элементом Rel1 и выходным реле Rel2 включен фильтр, образованный конденсатором C2 (22 мкф), резисторами R2, R3 и транзистором VT, в качестве которого может быть использован любой маломощный

транзистор на напряжение не менее 100В с коэффициентом усиления не менее 100, например, типа ZTX753, ZTX953. При использовании маломощного транзистора Дарлингтона (например, типа ZTX605) включенного, как показано на рис. 4, емкость С2 может быть значительно уменьшена. С помощью этого фильтра пульсации тока в цепи геркона реле Rel1 преобразуются в стабильный ток в цепи питания обмотки выходного реле Rel2. Коэффициент возврата миниатюрного геркона входного реле Rel1 на переменном токе близок к 0.99. Для получения реле с низким коэффициентом возврата (0.7 – 0.6) достаточно включить обмотку входного реле Rel1 через выпрямительный мост, а конденсатор С2 перенести на новое место: параллельно этому мосту. Поскольку для питания мощного выходного геркона требуется мощность, значительно большая, чем для питания входного миниатюрного геркона, в качестве трансформатора тока Т2 использовано два одинаковых трансформатора, аналогичных трансформатору Т1, выходные обмотки которых соединены параллельно, а первичная обмотка - общая, охватывающая сразу оба ферритовых кольца.

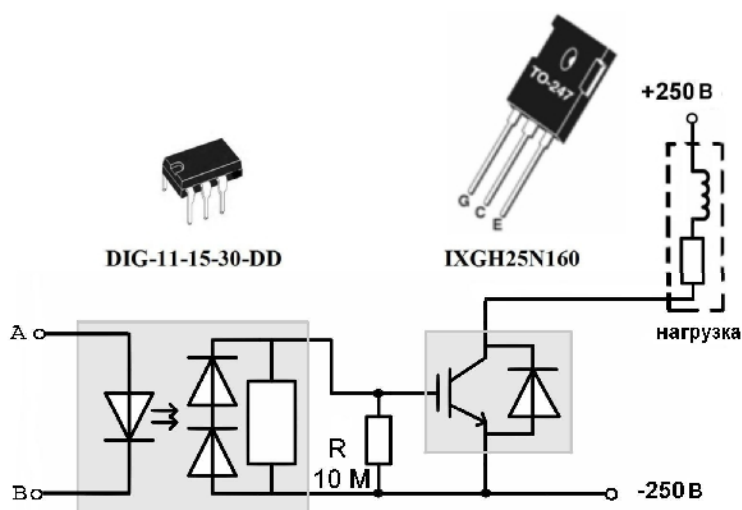


Рис. 5. Вариант выполнения выходного коммутирующего узла реле на основе современного IGBT-транзистора (IXGH25N160) и специализированного драйвера с динамическим разрядом емкости управляющего перехода (DIG-11-15-30-DD) для управления этим транзистором.

Полная мощность, потребляемая реле из токовой цепи при токе 5А не превышает 4 Вт. В качестве обмотки реле Rel2 использованы две катушки, одетые на геркон и соединенные между собой последовательно. Каждая из них содержит по 7600 витков, намотанных проводом 0.08. Экспериментальная время-токовая зависимость, рис. 4, получена для серии последовательных включений реле, в промежутках времени между которыми заряд конденсатора С1 сохранялся. При первом включении реле с незаряженным конденсатором время включения, примерно, вдвое больше. Такое ускорение срабатывания в случае повторного включения на короткое замыкание является полезным свойством реле. Даже с учетом увеличения времени срабатывания реле при первом включении, его быстродействие все еще остается очень высоким. Современные IGBT-транзисторы (табл.2) и комплектные устройства управления ими (так называемые «драйверы»), позволяют очень просто реализовать выходной узел реле на бесконтактной основе, рис. 5.

Реле тока с независимой и зависимой выдержкой времени, рис. 6. Как и в предыдущей конструкции, реле содержит два независимых входных трансформатора тока: первый (Т1) для питания чувствительного порогового органа на герконе (Rel1) и второй

(T2) для питания узла выдержки времени. В замкнутом положении микровыключателя S стабилитрон VD3 подключен к выходу диодного моста VD1 и обеспечивает постоянный уровень напряжения на входе узла выдержки времени вне зависимости от величины входного тока (в диапазоне срабатываний порогового органа). В этом случае реле работает с фиксированными выдержками времени, определяемыми емкостью конденсаторов C2 и сопротивлением резистора R2. При заряде этой емкости до определенного напряжения, отпирается тиристор VT1, и эта емкость практически полностью разряжается на низкоомную (81 Ом) катушку (2050 витков проводом 0.16) реле Rel2, вызывая срабатывание геркона этого реле. Для превращения этого устройства в реле с зависимой от тока выдержкой времени необходимо разомкнуть микровыключатель S. При этом, напряжение заряда конденсаторов C2 будет зависеть от величины входного тока: чем больше этот ток, тем большее напряжение будет приложено к конденсаторам C2 и тем быстрее они зарядятся до напряжения отпирания тиристора VT1, формируя типичную время-токовую характеристику, свойственную реле такого типа, рис. 6. Если в катушку реле Rel1 поместить второй геркон, смещенный от центра этой катушки (таким образом, чтобы его порог срабатывания был раз в 10 – 15 выше, чем первого геркона) и включить его параллельно геркону реле Rel2, то при этом устройство будет срабатывать мгновенно и включать отключающую катушку выключателя за 3 – 4 миллисекунды при больших кратностях тока. В качестве порогового элемента VD4, отпирающего тиристор VT1, в опытном образце реле использовался обычный стабилитрон Z, однако лучшие результаты могут быть получены при использовании так называемого «программируемого однопереходного транзистора» (programmable injection transistor – PUT), например, типов 2N6027, 2N6028. Этот элемент по своей структуре и характеристикам аналогичен тиристорам с очень малым током утечки (микроамперы) через управляющий переход, что позволяет лучше использовать емкость C2. С помощью резисторов R' и R'' «программируется» его напряжение отпирания.

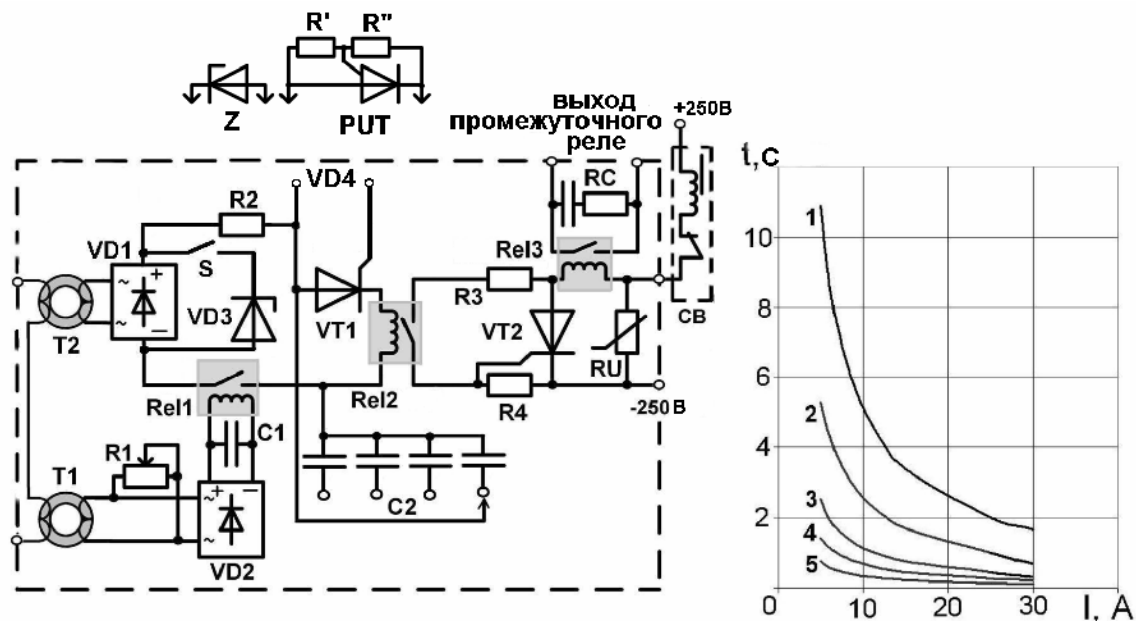


Рис. 6. Универсальное реле тока с выдержкой времени: принципиальная схема и семейство экспериментальных время-токовых характеристик для варианта реле с зависимой от тока характеристикой и различных значений емкости C2 (в мкФ):
1 - 4400; 2 - 3200; 3 - 2200; 4 - 1000; 5 - 300.

Реле направления мощности, рис. 7. Даже такую относительно сложную функцию, как определение направления мощности можно очень просто реализовать с помощью гибридной технологии. Как известно, направление мощности определяется углом сдвига фаз между током и напряжением, поэтому, фактически, реле направления мощности – это реле, реагирующее на угол между током и напряжением. Оказалось, что если подать на две первичные обмотки промежуточного трансформатора Т3 два близких по величине напряжения, сдвинутых по фазе, то напряжение на выходной обмотке будет очень сильно зависеть от угла сдвига фаз между этими напряжениями, рис. 7. Осталось лишь отстроиться от мешающего воздействия изменений амплитуды входных напряжений, получаемых с трансформаторов тока (Т1) и напряжения (Т2) на уровень выходного напряжения трансформатора Т3. Наиболее просто эта задача решается с помощью двух встречно включенных стабилитронов, как это показано на рис. 7. С помощью потенциометра R выбирается порог срабатывания реле при заданном угле.

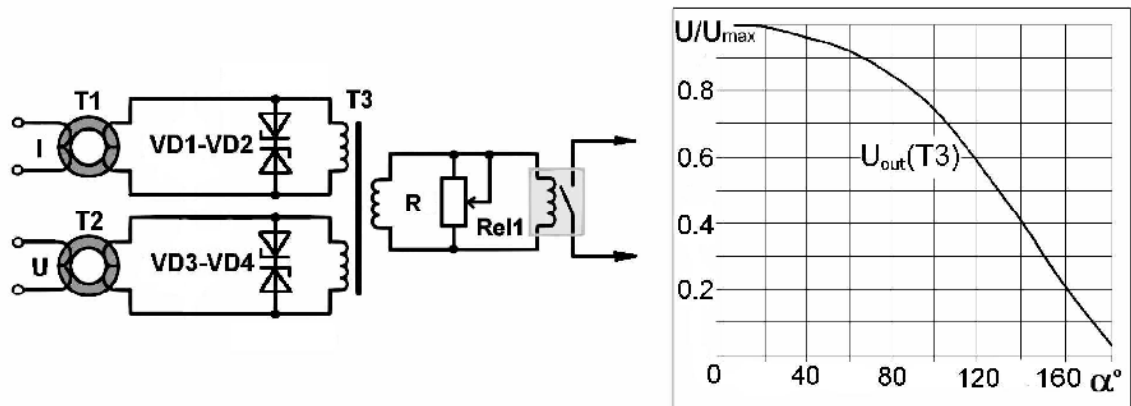


Рис. 7. Реле направления мощности, реагирующее на угол между входным током и входным напряжением: принципиальная схема измерительного порогового органа и экспериментальная зависимость напряжения на выходе трансформатора Т3 от угла между двумя напряжениями на его первичных обмотках.

Реле дифференциальной защиты, рис. 8. Использование двух трансформаторов тока (Т1 и Т2), включенных на вход порогового органа любого из описанных выше устройств уже позволяет реализовать простейшее двухвходовое реле дифференциальной защиты, рис. 8а.

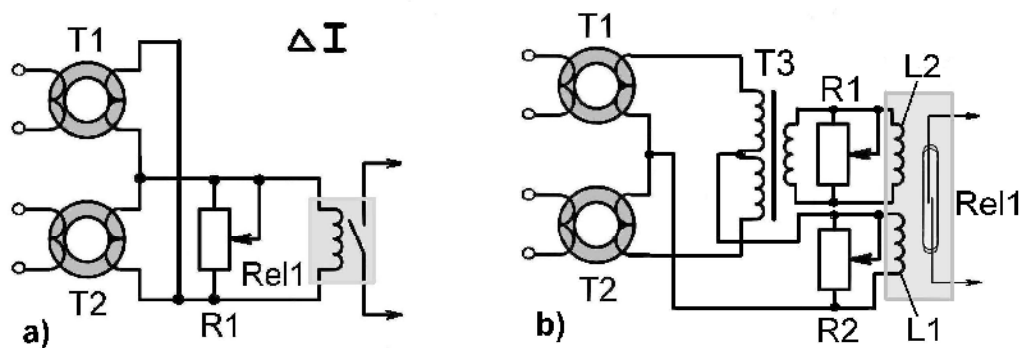


Рис. 8. Измерительные органы реле дифференциальной защиты: слева простейший вариант, справа – вариант измерительного органа с автоматически изменяющейся чувствительностью.

Интересные возможности предоставляет использование в этом устройстве двух отдельных промежуточных трансформаторов со вторичными обмотками, соединенными последовательно.

Для получения более сложной функции, такой как загробление реле с увеличением прямого тока через защищаемый объект, в устройство введен промежуточный трансформатор ТЗ, а на геркон реле Rel1 одеты две обмотки: L1 – дифференциальная и L2 – смещающая рабочую точку реле пропорционально прямому току, протекающему через защищаемый объект (рис. 8b).

Заключение.

Описание весьма интересных и перспективных устройств на предложенной элементной базе можно было бы долго продолжать. Однако, целью данной публикации является не перечисление преимуществ герконов, а доказательство того, что на основе комбинации современных герконов и современных силовых полупроводниковых элементов может быть быстро создано новое поколение гибридных реле защиты, не содержащие сложных и дорогих механизмов и способных на качественно новом уровне заменить устаревшие электромеханические реле при одновременном сохранении их высокой помехоустойчивости, ремонтпригодности и других положительных качеств. Использование нового поколения реле позволило бы отказаться от значительных финансовых затрат, связанных с необходимостью приобретения в массовом количестве весьма дорогостоящих микропроцессорных защит. При этом, дальнейшее совершенствование систем автоматического управления электрическими сетями за счет их оснащения микропроцессорными регистраторами аварийных режимов, оптическими системами связи и другими современными системами может производиться постепенно, по мере накопления финансовых ресурсов и вне всякой связи с релейной защитой, требующей замены уже сегодня. Таким доказательством, по мнению автора, могут служить описанные в данной статье примеры реле защит, разработанные и проверенные автором.

ЛИТЕРАТУРА

1. Gurevich V. Microprocessor Protection Relays: New Prospects or New Problems? – Electrical Engineering & Electromechanics, 2006, N3.
2. Гуревич В. И. Как нам обустроить релейную защиту: мнения Российских специалистов и взгляд со стороны – Вести в электроэнергетике, N 4, 2007.
3. Gurevich V. Electric Relays: Principles and Applications. CRC Press (Taylor & Francis Group), New York – London, 2005, 704 p.
4. Gurevich V. Protection Devices and Systems for High-Voltage Applications. Marcel Dekker, Inc., New York - Basel, 2003, 292 p.
5. Гуревич В. И. Высоковольтные устройства автоматики на герконах. Хайфа, 2000.- 368 с.
6. Гуревич В. И. «Ренессанс» электромеханических реле защиты? – PRO электричество, N 3 (19), 2006, с. 21 – 25.
7. Gurevich V. Simple Very High-Speed Overcurrent Protection Relay. - Electrical Engineering & Electromechanics, 2007, N1.