

«Ренессанс» электромеханических реле защиты?

В. И. Гуревич, канд. техн. наук

На фоне дискуссий, инициированных автором [1, 2] о перспективах и проблемах микропроцессорных реле защиты продолжает успешно развиваться заложенное им же направление [4, 5], в основе которого лежит применение герметизированных магнитоуправляемых контактов (герконов) в качестве чувствительных пороговых элементов различных устройств релейной защиты. Хотя герконы выпускаются по технологии электровакуумных приборов и на предприятиях электронной промышленности, а по внешнему виду они мало чем напоминают электромеханические реле защиты, тем не менее, они являются именно электромеханическими устройствами.

Устройства такого рода не являются чем-то абсолютно новыми и были разработаны уже довольно давно, однако, по ряду причин они не были известны широкому кругу специалистов в области релейной защиты.

Автором была разработана целая серия высоковольтных герконовых реле защиты от перегрузки мощных высоковольтных источников питания постоянного тока напряжением 10 -100 кВ, рис. 1 для электрофизических установок (инжекторные комплексы для нагрева плазмы, промышленные ускорители), мощных технологических лазеров, радиолокационных комплексов различного назначения. Такие реле успешно используются на таких известных Российских предприятиях, как ВНИИРадиотехники, Правдинский завод радиорелейной аппаратуры, НПО «Антей», НИИ Электрофизической Аппаратуры им. Ефремова и др., а также на ряде Израильских предприятий.



Рис. 1. Серия высоковольтных герконовых реле защиты на напряжения 15 - 75 кВ для мощного высоковольтного электронного оборудования военного и технологического назначения.

Используя чувствительность герконов к магнитной составляющей электромагнитного поля тока, протекающего по токоведущей шине, рис. 2, была разработана также целая серия устройств сетевой автоматики на основе безобмоточных датчиков тока с высоковольтной изоляцией, которые не требовали использования трансформаторов тока и устанавливались прямо на высоковольтной токоведущей шине с напряжением 6 - 10 кВ, рис. 3.

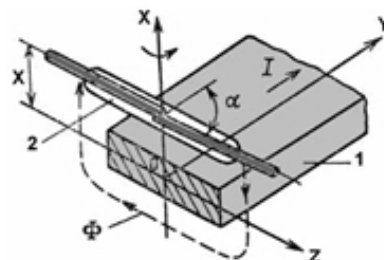


Рис. 2. Принцип построения безобмоточных датчиков тока на герконах, чувствительных к магнитному полю тока, протекающего по шине.

На основе этих датчиков, рис. 3, автором были разработаны и выпускались малым предприятием «Инвентор» в г. Харькове указатели коротких замыканий с самовозвратом для городских сетей, устройства для дуговой защиты комплектных распределительных устройств того же класса напряжения и другие устройства.

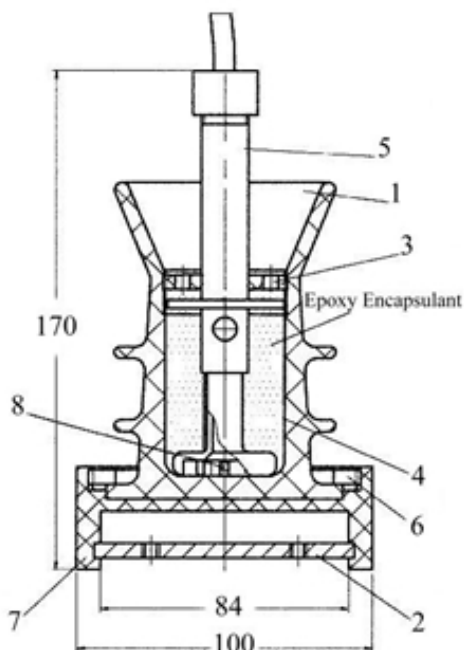
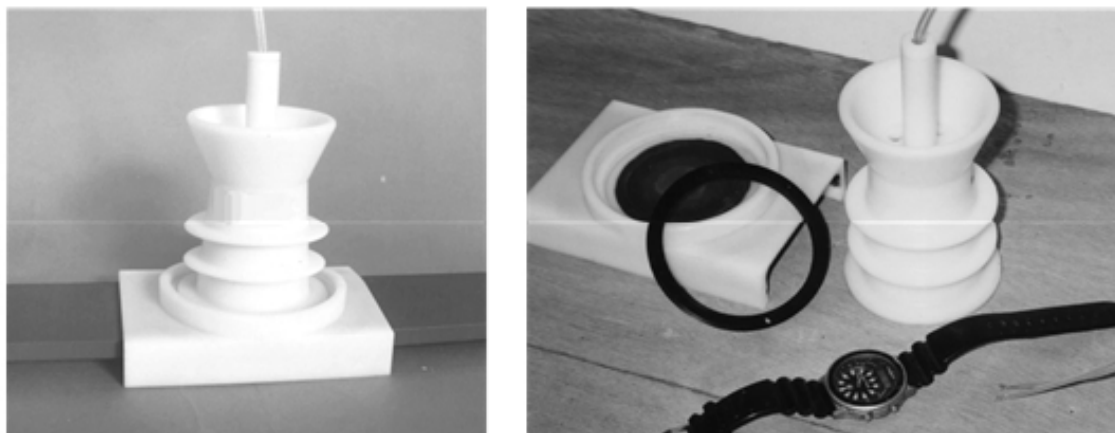


Рис. 3. Безобмоточные высоковольтные датчики тока на герконах, предназначенные для непосредственной установки на токоведущих шинах 6 - 10 кВ.

1 - раструб главного изолятора; 2 - съемная крепежная пластина с резьбовыми отверстиями, в которые ввинчиваются болты, упирающиеся в токоведущую шину и обеспечивающие фиксацию устройства; 3 - изоляционная шайба; 4 - оребренная часть изолятора; 5 - вспомогательный проходной изолятор, через который пропущены выводы геркона, выполненные высоковольтным проводом; 6 - пластмассовое кольцо, фиксирующее главный изолятор в основании; 7 - диэлектрическое основание седловидной формы, предотвращающее коронирование шины в месте установки устройства; 8 - геркон.

Главный изолятор может поворачиваться вокруг своей продольной оси, при этом чувствительность устройства меняется в широком диапазоне. Специальные полупроводящие покрытия в местах сочленения подвижных элементов предотвращают коронирование. Свободные полости внутри изолятора заполнены эпоксидным компаундом. В качестве материала главного изолятора и основания использован ULTEM1000 - полимерный материал, обладающий отличными электроизоляционными, механическими и термофизическими свойствами.

Появление на рынке электронных компонентов миниатюрных быстродействующих вакуумных герконов, с пробивным напряжением межконтактного промежутка,

превышающего 700 - 1000 В, табл. 1, и мощных высоковольтных полупроводниковых ключевых элементов, таких, как тиристоры и транзисторы на напряжение 700 - 1200 В и токи 20 - 30 А открывают перспективы создания простых гибридных герконо-полупроводниковых устройств защиты без встроенных источников питания непосредственно от оперативной сети 220 В постоянного тока.

Таблица 1. Параметры быстродействующих миниатюрных вакуумных герконов некоторых типов, пригодных для использования в реле защиты.

Параметр/Тип	MRA560G	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, не менее, В	1500	1500	2500	1500	2000	780
Время замыкания, не более, мс	0.6	0.5	0.8	0.4	0.75	0.35
Время возврата, не более, мс	0.05	0.1	0.3	0.2	0.3	0.03
Размеры, мм	Диам. 2.75 L = 21	Диам. 2.3 L = 14.2	Диам. 2.6 L = 21	Диам. 2.3 L = 14.2	Диам. 2.66 L = 19.7	Диам. 2.7 L = 20.5
Чувствительность, ампервитков	20 - 60	15 - 40	15 - 70	15 - 50	17 - 38	27 - 80

В качестве примера, на рис. 4 приведена принципиальная схема быстродействующего реле тока на таких элементах с питанием от сети 220 В и с мощным выходным коммутирующим элементом, способным включать одновременно целую группу отключающих катушек высоковольтных выключателей. В этом устройстве геркон выполняет роль чувствительного порогового элемента, начинающего вибрировать с частотой 100 Гц при достижении током в катушке значения, соответствующего порогу срабатывания. Транзистор VT1 полностью повторяет колебания геркона. При отпирании этого транзистора подается положительный потенциал на базу транзистора VT2 и одновременно заряжается конденсатор С. Транзистор VT1 предназначен для обеспечения большого зарядного тока конденсатора. Этот транзистор должен обладать сравнительно высоким коэффициентом усиления для того, чтобы не нагружать геркон, а также высоким напряжением эмиттер-коллектор, достаточным для работы при напряжении 220 В постоянного тока и относительно большим током коллектора для обеспечения быстрого заряда конденсатора и увеличения быстродействия реле. Этим условиям удовлетворяет транзистор Дарлингтона BU808DF1. С этим транзистором и ограничительным сопротивлением резистора R3 30 - 50 Ом конденсатор С заряжается очень быстро даже при значительной емкости, что может обеспечить быстродействие реле в 5 - 15 мс при собственном быстродействии геркона менее одной миллисекунды. Транзистор VT2 выполняет роль фильтра, включенного между входным транзистором VT1, работающим в пульсирующем режиме и выходным транзистором VT3, пульсации в цепи которого не допустимы.

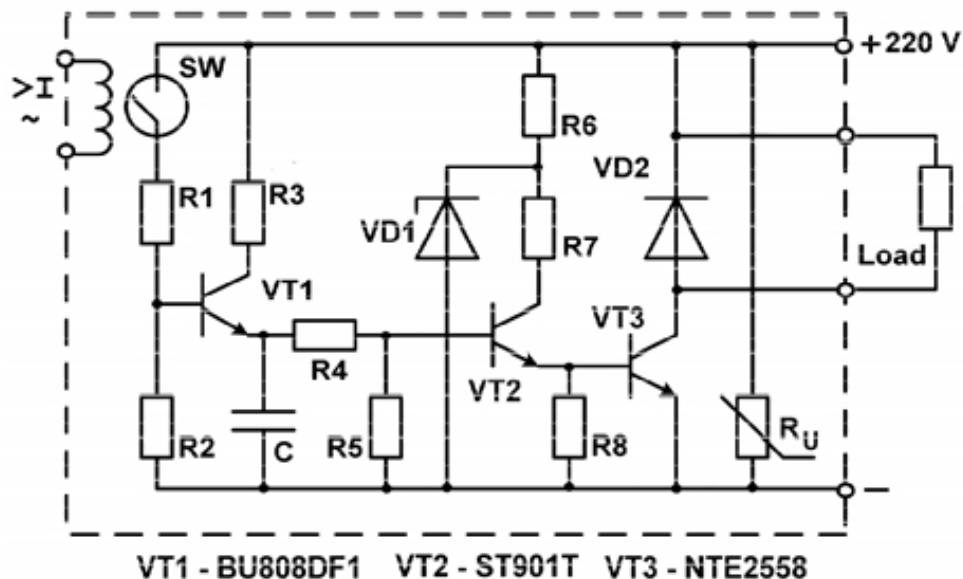


Рис. 4. Простое быстродействующее реле максимального тока на герконе

Этот транзистор должен обладать очень высоким коэффициентом усиления для того, чтобы малой емкости конденсатора C было достаточно для удержания этого транзистора в открытом состоянии при исчезновении входного напряжения в момент размыкания контактов геркона при возбуждении его магнитным полем переменного тока с частотой 100 Гц. Поскольку не существует транзисторов с коэффициентом усиления около 1000 при напряжении коллектор-эмиттер 800 - 1000 В, в качестве этого транзистора выбран транзистор Дарлингтона типа ST901T с минимальным коэффициентом усиления 1500 и напряжением эмиттер-коллектор 350 (500) В. Для обеспечения требуемых запасов по напряжению коллекторное напряжение на этом транзисторе снижено до 50 - 100 В с помощью стабилитрона VD1. Использование стабилитрона для снижения рабочего напряжения допустимо только для этого транзистора, поскольку только он используется в режиме относительно слабых токов. Транзистор VT3 также выбран Дарлингтона с тем, чтобы для его работы с относительно мощной нагрузкой (несколько ампер) базовый ток был бы не большим. Мощный выходной транзистор позволяет использовать в качестве нагрузки не только промежуточные реле, но также мощные контакторы, пускатели катушки отключения высоковольтных выключателей и т.п.

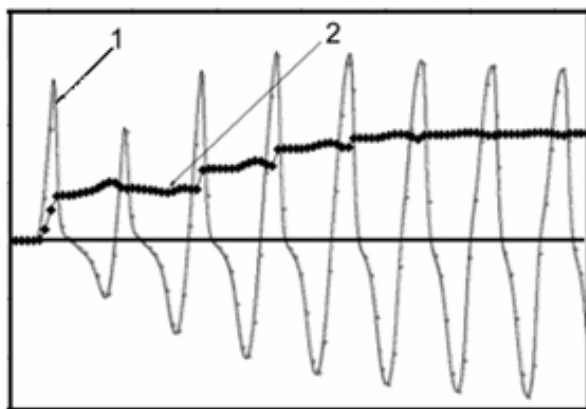
Устройство такого рода обычно не предназначены для длительной работы под током, поэтому использование радиаторов для транзисторов не требуется.

Высокий коэффициент возврата реле (0.85 - 0.90) обеспечивается опять таки герконом, который в поле переменного тока имеет именно такие значения. Регулирование порога срабатывания реле производится путем изменения положения геркона в катушке. Для этого могут применяться простые пластмассовые элементы. Учитывая простоту и низкую стоимость узла «катушка-геркон» можно использовать и фиксированную настройку этого узла изготовителем с последующей заменой этого узла на другой в случае необходимости изменения тока срабатывания. Узел «геркон-катушка» имеет отличные изоляционные свойства и является прекрасным фильтром, не пропускающим через себя высокочастотные сигналы помех, а отсутствие в электронной части реле слабых

низковольтных компонентов резко повышает помехоустойчивость устройства и, к тому же, резко упрощает его.

Герконы имеют некоторые специфические особенности, которые следует учитывать при их использовании. По сравнению с обычными реле, герконы имеют очень малую перегрузочную способность, обусловленную малой массой и теплоемкостью контактов, а также малую величину контактного нажатия и относительно продолжительный дребезг контактов при замыкании. По этим причинам даже кратковременное превышение максимально допустимых параметров коммутации приводит к сильной электрической эрозии контактных элементов и их «залипанию». Многочисленные случаи неправильного применения герконов (например, для включения сигнальных ламп накаливания, имеющих, как известно, 8 - 10 кратный пусковой ток или для включения обмоток промежуточных реле на постоянном токе без искрозащитных цепей), привели к появлению у многих специалистов негативного отношения к герконам как к не очень надежным элементам. Вместе с тем, герконы выпускаются миллионами штук и успешно применяются в весьма ответственной аппаратуре.

На основе разветвленных магнитных систем, аналогичных магнитным системам сложных электромеханических реле защиты и чувствительного элемента на основе геркона возможно создание не только простейших реле защиты, таких, как реле максимального тока, но и значительно более сложных устройств защиты, например, таких как реле мощности, реле сопротивления и т.п. Совершенно очевидно, что такие реле не смогут заменить многофункциональные микропроцессорные релейные терминалы, однако они оказываются вполне конкурентоспособными с однофункциональными микропроцессорными устройствами защиты. Как известно, микропроцессорные и электромеханические реле по-разному реагируют на аварийные режимы [6, 7]. В частности, это относится даже к простейшим реле токовой отсечки, рис. 5. В данном случае, при большой кратности тока короткого замыкания и наличии значительной апериодической составляющей в токе, микропроцессорные реле с функцией токовой отсечки не обеспечивают требуемой точности и быстродействия. Для преодоления этого препятствия многие разработчики предлагают алгоритм выявления короткого замыкания, основанный на измерении первой и даже второй производной тока, которая остается неизменной даже при искажениях формы кривой тока. Микропроцессорные реле, работающие на таком алгоритме, оказываются сложными, дорогими и, как показывает опыт автора, проводившего приемочные испытания одного из таких реле, не достаточно устойчивыми к воздействию переходных процессов в сети. Остается открытым вопрос о влиянии на такое реле переходных процессов, возникающих при подключении батарей емкостной компенсации. Как известно, при включении конденсаторов в токе линии наблюдаются колебания с искажениями, которые имеют большую величину производной, чем синусоида основного тока, что может привести к ложному срабатыванию реле. В этой



ситуации простейшее реле токовой отсечки на герконе оказывается вполне конкурентоспособным со сложным микропроцессорным реле.

Рис. 5. Форма тока короткого замыкания во вторичной обмотке трансформатора тока (1) и типичный сигнал (2) с выхода аналого-цифрового преобразователя, поступающий на обработку в микропроцессорном реле.

Такое реле было разработано автором, рис. 6, и испытано.

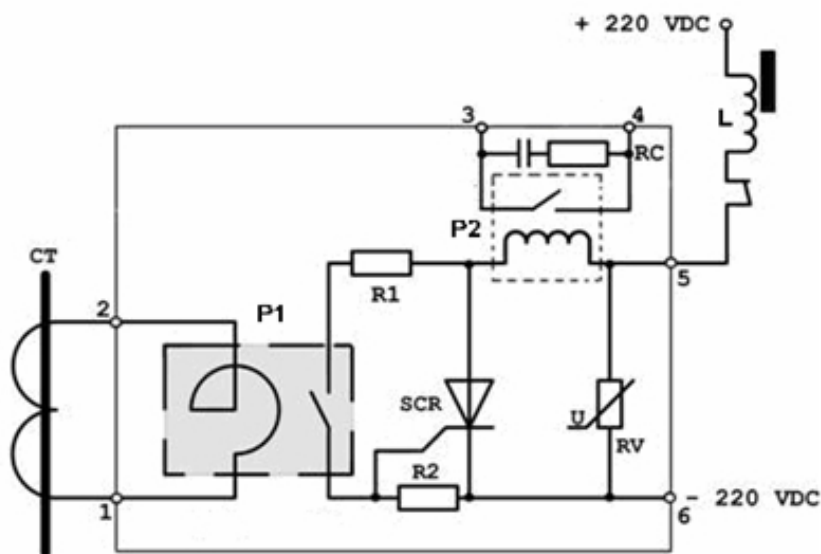
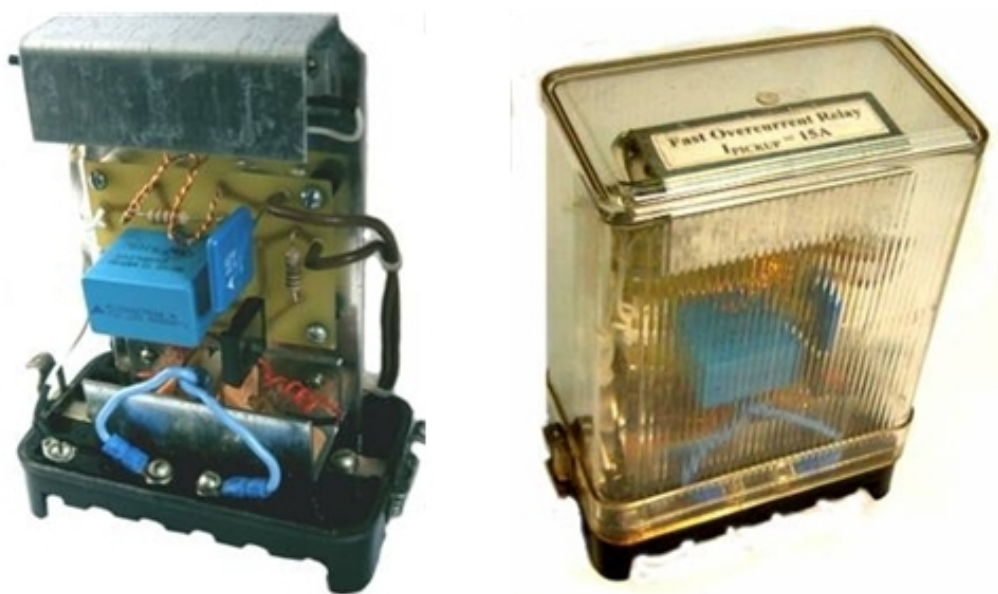


Рис. 6. Опытный экземпляр супербыстродействующего реле токовой отсечки

Предлагаемое реле тока выполнено на основе геркона и электронного усилителя мощности на базе высоковольтного тиристора и собрано в корпусе реле тока РТ-40. Основным чувствительным элементом в этом устройстве является геркон P1, начинающий вибрировать с частотой 100 Гц при срабатывании. Первый же импульс открывает мощный тиристор SCR, включающий отключающую катушку L выключателя. Тиристор остается во включенном состоянии, несмотря на вибрацию геркона, до тех пор, пока цепь не будет разорвана собственным блок-контактом выключателя. Устройство снабжено встроенным промежуточным реле P2, служащего для включения вспомогательных цепей сигнализации или автоматики. В качестве такого реле использовано герконовое реле с катушкой, рассчитанной на кратковременное протекание

тока до 10 - 15 А (обычный диапазон токов отключающих катушек выключателей различных типов). В опытном образце устройства катушка, намотанная проводом, диаметром 0.71 мм обеспечивала надежное срабатывание промежуточного реле при токах от 0.5 до 15 А. В качестве коммутационного элемента использован геркон типа DRT-DTH (Hamlin), с испытательным напряжением 1000 В и коммутируемой мощностью 50 Вт, снабженный искрозащитной RC цепью для коммутации высокоиндуктивной нагрузки на постоянном токе (следует иметь ввиду, что конденсатор, используемый в RC цепи также должен быть высоковольтным). В качестве чувствительного порогового элемента, в устройстве использован миниатюрный высоковольтный вакуумный геркон типа MARR-5 (Hamlin) или типа MIN-21 (Binsack Reedtechnik GmbH) выдерживающие испытательное напряжение 1.5 - 2 кВ и имеющие собственное время срабатывания не более 0.6 - 0.7 миллисекунды. Оба геркона, каждый со своей катушкой, выполнены в виде отдельных узлов и снабжены П - образными ферромагнитными экранами из стали толщиной 1 мм. Тиристор SCR типа 30TPS16 выбран с большим запасом по току (30А) и напряжению (1600 В), что позволяет выбрать для его защиты от перенапряжений варистор R_U также с большим запасом (clamping voltage - 850 - 1000 В) относительно номинального напряжения сети 220 В и тем самым повысить и его надежность и долговечность.

Конструкция узла герконового реле P1 может быть с возможностью регулирования порога срабатывания за счет перемещения геркона внутри катушки, или с фиксированной настройкой на определенный ток срабатывания. Последний вариант вполне приемлем, так как этот узел очень простой и дешевый. При необходимости изменения порога срабатывания реле старый узел просто заменяется новым с необходимым порогом срабатывания. Испытания реле проводились путем искусственной симуляции различных режимов по току с помощью Power System Simulator F2253 (DOBLE Engineering), а также путем инъекции в реле помощью того же симулятора реальных вторичных токов короткого замыкания, восстановленных из COMTRADE файлов (полученных из регистраторов аварийных режимов, установленных в различных точках сети 160 кВ). Минимальное время срабатывания, зарегистрированное в экспериментах, составило 0.4 мс. В самом неблагоприятном случае, то есть при малой кратности тока и фазе включения тока срабатывания близкой к 45°, максимальное время срабатывания реле достигало 7 - 8 миллисекунд

Более тяжелыми для реле оказались испытания с реальными вторичными токами короткого замыкания, содержащими значительную аperiodическую составляющую, вызывающую смещение синусоиды тока относительно оси. Максимальное время срабатывания, зафиксированное при этих испытаниях составляет 9.4 мс. Кроме того, в некоторых опытах с большой аperiodической составляющей, зафиксировано снижение величины тока несрабатывания реле почти до 0.7 от его номинального тока срабатывания. Это объясняется тем, что при совпадении фазы включения реле с периодом максимального смещения первой полуволны синусоиды тока, реле срабатывает при токе, намного меньшем, чем при нормальной синусоиде в установившемся режиме. По нашему мнению, это явление не очень существенно, поскольку основным назначением такого быстродействующего реле является не точное определение тока короткого замыкания, а установление самого факта наличия близкого (или опасного) короткого замыкания для ускорения действия защиты. При настройке реле на первичный ток, например, 20 кА, его возможное срабатывание в некоторых случаях при токе 14 кА, также однозначно свидетельствует о наличии опасного короткого замыкания, как и срабатывание при токе 20 кА.

Одним из основных применений такого быстродействующего реле является использование его в качестве пускового органа для секционирования шин. Во многих энергосистемах или в отдельных узлах сети токи короткого замыкания достигли значений, превышающих предельную отключающую способность выключателей. В частности, такая ситуация сложилась во многих сетях Мосэнерго. Применение быстродействующего реле,

описанного выше, для выдачи команды на разделение параллельных линий до того, как успеют сработать обычные реле защиты, позволяет разделить ток короткого замыкания между несколькими выключателями.

Приведенные примеры показывают, что нужно не отвергать сходу любые идеи и разработки в области реле защиты, не относящихся к микропроцессорным, как это становится модным сегодня, а серьезно рассматривать такие разработки в каждом конкретном случае. При более внимательном рассмотрении ситуации оказывается, что далеко не всегда сложные и дорогие микропроцессорные защиты имеют преимущества перед электромеханическими и гибридными (механико-электронными или «мехатронными») реле, а последние еще далеко не исчерпали своих возможностей. Новые технологии релестроения вполне способны возродить умирающую сегодня отрасль электромеханических реле защиты, тем более в современных условиях, при возрастающей опасности электромагнитного терроризма [5], которому особенно подвержены современные микропроцессорные защиты.

Литература:

1. Гуревич В. И. Микропроцессорные реле защиты. Новые перспективы или новые проблемы? - Новости электротехники, N 6 (36) 2005, с. 57 - 60.
2. Гуревич В. И. Микропроцессорные реле защиты: альтернативный взгляд. - Мир техники и технологий, 2006, N 2(51), с. 8 - 11.
3. Gurevich V. Protection Devices and Systems for High-Voltage Applications. - Marcel Dekker, New-York, 2003, 304 pp.
4. Gurevich V. Electric Relays: Principles and Applications. - CRC Press (Taylor & Francis Group), Boca Raton-London-New York, 2005, 704 pp.
5. Gurevich V. Electromagnetic Terrorism: New Hazards. - Electrical Engineering & Electromechanics, 2005, No. 4, pp. 81- 83.