# Высокостабильное герконо-полупроводниковое реле тока с повышенным быстродействием

В. И. Гуревич, канд. техн. наук
(Israel Electric Corp.)

При организации защит от перегрузок по току как низковольтных, так и высоковольтных потребителей электроэнергии и электрических сетей используют, обычно, реле тока с зависимой или не зависимой выдержкой времени. В более сложных случаях используют для той же цели быстродействующие дифференциальные реле или дистанционные (для защиты высоковольтных линий). Однако, в некоторых ситуациях через защищаемый объект при коротких замыканиях могут протекать сверхтоки, способные вызвать разрушение объекта, даже снабженного одной из перечисленных видов защит. Для таких случаев предусмотрены специальные особо быстродействующие реле. Обычно, время срабатывания таких быстродействующих реле, как электромеханических, например, КО-1(ABB) так и микропроцессорных, например, SEL-551C (SEL), BE1-50 (Basler Electric), RCS-931A/B (NARI) и др. регламентируется изготовителями в пределах 20 - 40 миллисекунд. Причем, электромеханические реле часто оказываются более быстродействующими (18 - 25 мс), чем микропроцессорные (25 - 40 мс). Однако, иногда приходится сталкиваться с рекламными материалами в которых утверждается, что особо быстродействующее микропроцессорное реле способно срабатывать за время менее одного периода (менее 20 мс), рис. 1.

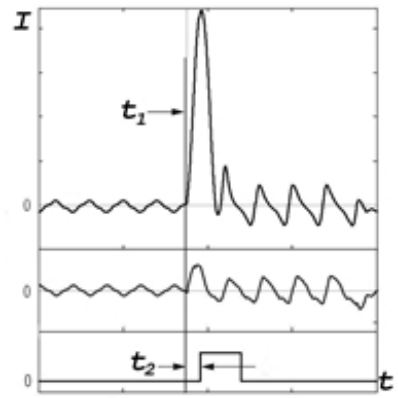



Рис. 1. Осциллограмма срабатывания быстродействующего микропроцессорного реле типа SEL-487B, приведенная в рекламных материалах, призванная подтверждить, что время его срабатывания действительно меньше 20 миллисекунд.

$t_1$ - момент возникновения короткого замыкания; $t_2$ - время срабатывания реле ($t_2 < 20$ мс).

Такие малые времена срабатывания действительно могут быть иногда получены при подаче на вход микропроцессорного реле тока с определенной амплитудой и искусственно установленной фазой первого полупериода тока короткого замыкания (как на приведенной осциллограмме). К сожалению, такие искусственно созданные условия крайне редко встречаются на практике, поэтому ко времени срабатывания менее 20 миллисекунд следует относиться скорее как рекламному трюку, чем как реально обеспечиваемому в условиях эксплуатации параметру.

В связи с большой актуальностью вопроса разработка реле токовой защиты с повышенным быстродействием ведется во многих компаниях. С учетом анализа реальных переходных процессов короткого замыкания с большой апериодической составляющей и сильным насыщением трансформаторов тока, некоторые исследователи пришли к выводу о невозможности создания реле защиты с быстродействием около одного полупериода (около 10 мс), основанного на контроле

мгновенного значения тока. Этими исследователями предлагается новый алгоритм, основанный на измерении первой (di/dt) и даже второй ($di^2/dt$) производной тока. Действительно, опытные осциллограммы переходного процесса, рис. 2, подтверждают стабильность такого параметра как производная тока (скорость изменения тока или угол наклона переднего фронта первого импульса тока короткого замыкания) даже при наличии в токе значительной апериодической составляющей.

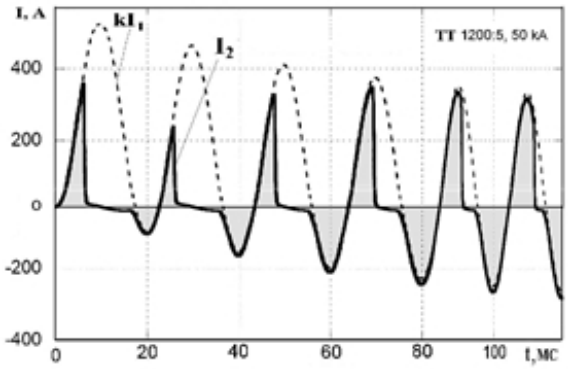
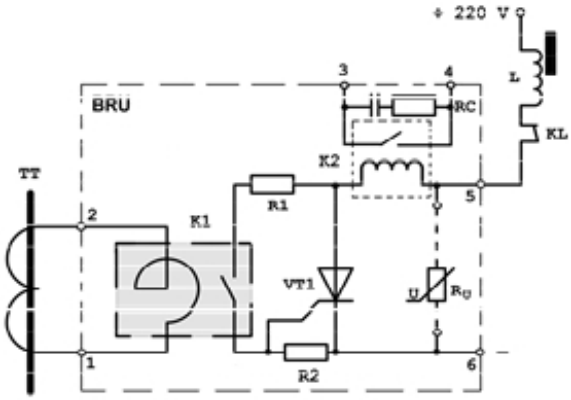



Рис. 2. Соотношение между формой тока ($I_2$ ), поступающего на вход реле со вторичной обмотки трансформатора тока при коротком замыкании и формой вторичного тока ( $kI_1$ ), расчитанного по коэфициенту трансформации k

На основе этих исследований одной из израильских компаний разработано микропроцессорное реле, реализующее этот алгоритм. При этом реле получилось достаточно сложным, так как контролировать только вторую производную тока оказалось недостаточным для обеспечения необходимой помехоустойчивости реле. Потребовалось введение специальных элементов, блокирующих чрезмерные срабатывания реле, возникающие из-за излишней чувствительности реле к некоторым режимам работы. Кроме того, поскольку производная тока зависит от соотношения между начальным током несрабатывания и конечным током срабатывания реле, оказалось, что реле не всегда надежно срабатывает если аварийному режиму предшествует повышенный, но не аварийный ток нагрузки. Несмотря на некоторые технические проблемы, предварительные испытания опытного образца этого реле подтвердили его высокое быстродействие. В наиболее неблагоприятном случае время срабатывания реле составило 8.4 мс, что значительно меньше, чем у всех, существующих сегодня на рынке микропроцессорных реле. Помехоустойчивость этого реле пока не исследовалась, в реальной эксплуатации оно не проверялось, тем не менее, возможность создания микропроцессорного реле тока с быстродействием не более половины периода можно считать доказанным.

Автором предлагается альтернативный вариант очень простого и дешевого быстродействующего реле, основанного на измерении мгновенного значения тока, которое может быть реализовано собственными силами энергосистем. Предлагаемое реле тока выполнено на основе геркона [1] и электронного усилителя мощности на базе высоковольтного тиристора, рис. 3, и собрано в корпусе реле тока РТ-40. Основным чувствительным элементом в этом устройстве является геркон К1, начинающий вибрировать с частотой 100 Гц при срабатывании. Первый же импульс открывает мощный тиристор, VT1, 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 KL выключателя. Устройство снабжено встроенным промежуточным реле К2, служащего для включения вспомогательных цепей сигнализации или автоматики. В качестве такого реле использовано герконовое реле с катушкой, расчитанной на кратковременное протекание тока до 10 - 15 А (обычный диапазон токов отключающих катушек выключателей различных типов). В опытном образце устройства катушка, намотанная проводом, диметром 0.71 мм обеспечивала надежное срабатывание промежуточного реле при токах от 0.5 до 15 А. В качестве коммутационного элемента использован



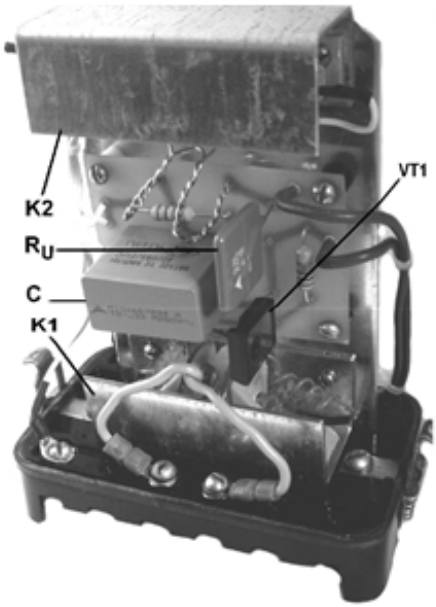




Рис. 3. Принципиальная схема и внешний вид (со снятым чехлом) базового варианта простого супербыстродействующего реле тока на герконе.

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 должет 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 VT1 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 К1 [2] может быть с возможностью регулирования порога срабатывания за счет перемещения геркона внутри катушки, или с фиксированной настройкой на определенный ток срабатывания.

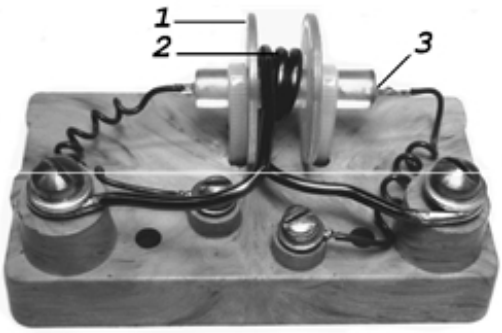



Рис. 4. Узел герконового реле К1, представленный на испытания с номинальным током срабатыва-ния $I_{N.\ P.}$ = 10А.
1 - диэлектрический каркас; 2 - обмотка (3 витка);
3 - геркон.

Последний вариант вполне преемлим, так как этот узел очень простой и дешевый. При необходимости изменения порога срабатывания реле старый узел просто заменяется

новым с необходимым порогом срабатывания. Порог срабатывания геркона (его положение внутри катушки) может быть также настроен непосредственно перед вводом реле в эксплуатацию с последующим закреплением геркона в катушке с помощью клея или силиконового компаунда. К испытаниям был представлен макет узла герконового реле, с порогом срабатывания 10А, рис. 4, без усилителя мощности на тиристоре (собственное время отпирания тиристора составляет менее 10 микросекунд, что никак не сказывается на общем времени срабатывания устройства).

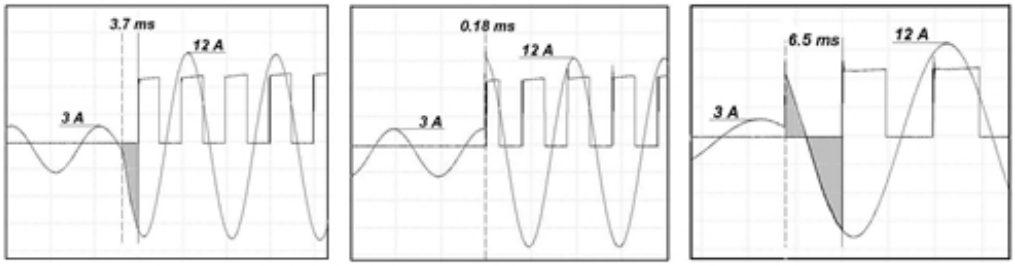



Рис. 5. Некоторые осциллограммы срабатывания узла герконового реле при скачкообразном изменении тока в его цепи с различной фазой включения тока срабатывания. Выделены зоны нечувствительности реле и указана их длительность, соответствующая времени срабатывания реле.

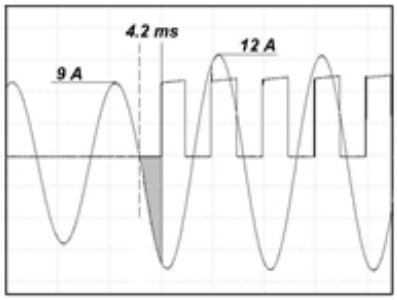



Рис. 6. Осциллограмма срабатывания реле при наличии предварительного тока (9 А), близкого к току срабатывания реле (10 А).

Испытания проводились путем искусственной симуляции различных режимов по току с помощью Power System Simulator F2253 (DOBLE Engineeing), а также путем инжекции 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. В первой серии опытов проводились измерения времени срабатывания реле при мгновенном изменении тока на входе реле в пределах от $0.2\text{-}0.8I_{N.P.}$ до $1.2\text{-}5I_{N.P.}$ с различной фазой включения тока срабатывания, а также с нулевой фазой включения тока срабатывания (переход с одного тока на другой в нуле синусоиды), рис. 5. Оказалось, что величина предварительного тока, предшествовавшего току срабатывания, не влияет на быстродействие реле, рис. 6, в отличие от устройства, реагирующего на производную тока. Проводилось также исследование влияния высших гармоник, содержащихся в токе, на быстродействие реле при разной фазе включении тока, рис. 7.

Как видно из приведенных осциллограмм, даже высокое содержание гармоник в токе не влияет на быстродействие реле. Определяющим фактором, по-прежнему, является фаза включения тока срабатывания и кратность мгновенного значения тока в момент включения. В самом неблагоприятном случае, то есть при малой кратности тока и фазе включения тока срабатывания близкой к 45є, максимальное время срабатывания реле может достигнуть 7 - 8 миллисекунд.

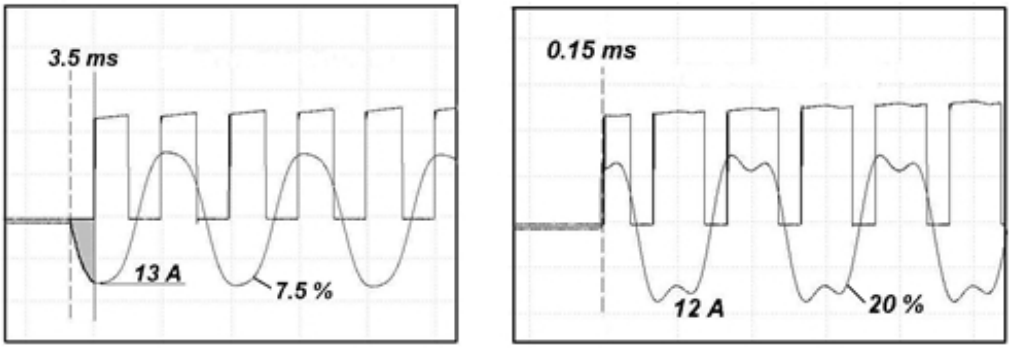



Рис. 7. Осциллограммы включения реле при большом содержании гармоник в токе (содержание третьей гармоники 7.5% и 20%).

Более тяжелыми для реле оказались испытания с реальными вторичными токами короткого замыкания, содержащими значительную апериодическую составляющую, вызывающую смещение синусоиды тока относительно оси, рис. 8.

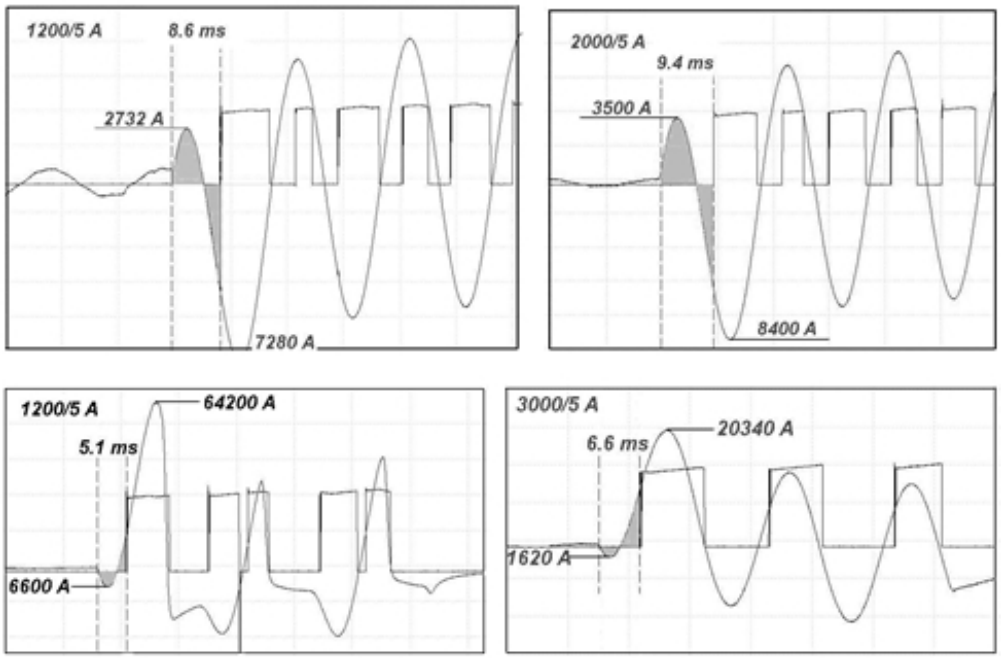



Рис. 8. Осциллограммы срабатывания реле при воздействии реальных вторичных токов короткого замыкания. На осциллограммах указаны коэффициенты трансформации трансформаторов тока и мгновенные значения токов положительной и отрицательной полярности первого периода.

Максимальное время срабатывания, зафиксированное при этих испытаниях составляет 9.4 мс. Кроме того, в некоторых опытах с большой апериодической 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 установлнение 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.

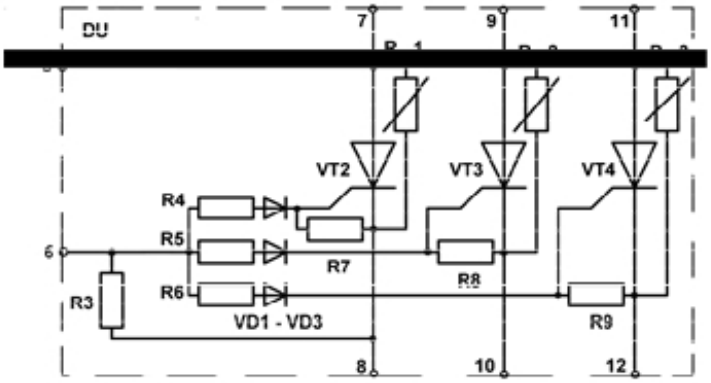



Рис. 9. Безинерционный демультиплексор, подключаемый к базовому реле для увеличения количества выходных цепей.

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. Однако, для такого применения одной выходной цепи реле явно недостаточно, особенно в случае сложной сети. В связи с этим, был разработан дополнительный блок размножения выходных цепей DU, рис. 9 (так называемый "демультиплексор").

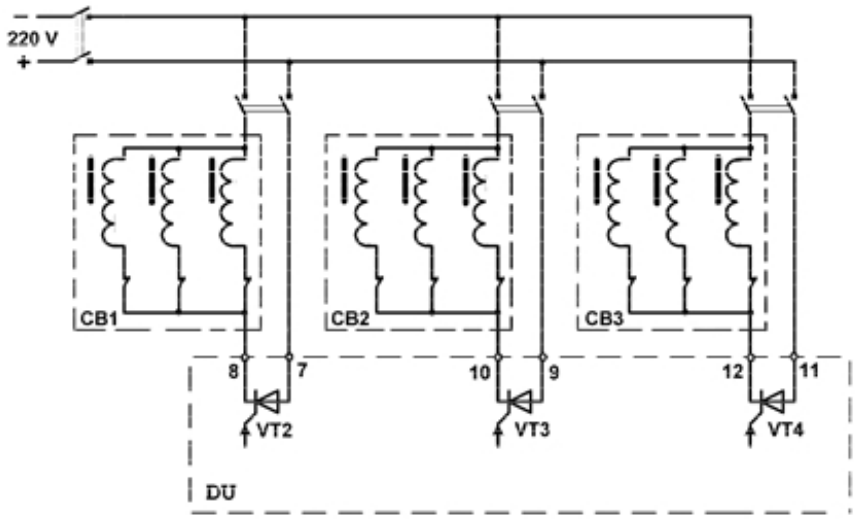



Рис. 10. Один из возможных вариантов соединения устройства с отключающими катушками трех выключателей: CB1, CB2 и CB3.

Этот блок обладает быстродействием в единицы микросекунд и специально предназначен для стыковки с описанным выше базовым реле. При этом варистор $R_U$ в базовом реле должен быть отключен. В демультиплексоре использованы такие же, как и в базовом реле тиристоры и варисторы. Диоды в цепях управления тиристоров также должны быть высоковольтными ( не менее 1200 В) и предназначены они для предотвращения ложного отпирания тиристоров при импульсных срабатываниях варисторов. Совершенно очевидно, что при необходимости базовое реле может быть объединено с демультиплексором и выполнено в виде единой конструкции. Один из возможных вариантов соединения устройства с отключающими катушками выключателей показан на рис. 10.

Благодаря использованию геркона в качестве чувствительного порогового органа, реле тока получается не только очень простым, дешевым, доступным для изготовления даже собственными силами энергосистем, но и весьма устойчивым к внешним воздействиям: искажениям тока, импульсным перенапряжениям, мощным высокочастотным излучениям [3], и др. Такой чувствительный орган на герконе, настроенный на срабатывание при больших кратностях тока, может быть также встроен в различные микропроцессорные реле защиты (или может подключаться к ним снаружи, через отдельный вход) в качестве элемента, действующего в обход микропроцессора для ускоренного отключения выключателя.

Выводы.

1. Разработка реле тока с быстродействием до 10 мс для ускорения действия релейной защиты является актуальной проблемой.

2. В настоящее время известен алгоритм работы микропроцессорного реле, чувствительного к сверхтокам, который обеспечивает реальное быстродействие реле в пределах одного полупериода тока.

3. Использование герконов в качестве чувствительного органа быстродействуюших реле тока является перспективным направлением и позволяет создавать простые и, в то же время, конкурентоспособные реле, предназначенные для выявления близких коротких замыканий и ускорения действия основной релейной защиты.

Литература:

1. Gurevich V. Protection Devices and Systems for High-Voltage Applications. - Marcel Dekker, New-York, 2003, 304 pp.
2. Gurevich V. Electric Relays: Principles and Applications. - CRC Press (Taylor & Francis Group), Boca Raton-London-New York, 2005, 704 pp.
3. Gurevich V. Electromagnetic Terrorism: New Hazards. - Electrical Engineering & Electromechanics, 2005, No. 4, pp. 81- 83.