

УСТРОЙСТВО ЗАЩИТЫ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ

ВЛАДИМИР ГУРЕВИЧ
vladimir.gurevich@gmx.net



Название статьи может показаться тавтологией: «защита... защиты», но как бы это ни выглядело странным, релейная защита электроэнергетических объектов действительно нуждается в защите. Но от чего и как нужно защищать релейную защиту?



Релейная защита является важнейшей системой, от надежности и правильной работы которой во многом зависит надежность электроснабжения потребителей. Однако, несмотря на свое название («защита») и вопреки распространенному мнению, релейная защита не может защитить от аварийных режимов, то есть не может *предотвратить* возникший аварийный режим в системе электроснабжения, а может лишь ограничить масштабы его воздействия во времени и в пространстве на эту систему, то есть снизить материальный ущерб от аварии, и не более того [1]. Все вышесказанное относится к исправному реле защиты и к его правильной работе. Но ведь реле защиты, как и любое другое сложное техническое устройство, может выйти из строя. При этом в случае возникновения аварийного режима такое неисправное реле уже не сможет ограничить масштабы его воздействия во времени и в пространстве на энергосистему. Однако такая ситуация вполне предсказуема, и вероятность ее возникновения принимают во внимание при проектировании систем электроснабжения. В частности, используют дублирование реле защиты; для ответственных объектов применяют различные типы реле защит так, что при отказе какого-то одного типа реле в действие вступает другой тип или реле, включенное в другой точке системы электроснабжения, и т. п.

Как известно, у реле защиты имеется два вида отказов: так называемые «несрабатывания» и «излишние срабатывания». Перечисленные выше меры позволяют в какой-то степени компенсировать ущерб от несрабатывания отдельного реле защиты, но никак не влияют на излишние срабатывания реле. При этом, как показано в [1], возникает совершенно новая ситуация, при которой неисправное реле защиты в результате излишнего срабатывания может выдать ложную команду на отключение выключателя и тем самым искусственно вызвать прекращение нормального функционирования системы электроснабжения. При этом происходит не только отключение тысяч потребителей, сопровождающееся большим

ущербом, сопоставимым по своим последствиям с аварийным режимом в системе электроснабжения, но и возникает опасность крупной системной аварии, вызванной внезапными перетоками мощностей в сложной и разветвленной энергосистеме. Как показано в [2], в 25–28% случаев причиной возникновения крупнейших системных аварий, имевших место в мире, были отказы релейной защиты. А если добавить к этому, что в 50–70% случаев перехода обычного аварийного режима в тяжелую системную аварию повинна также релейная защита [2], то получается, что именно она ответственна практически за все системные аварии.

Современная тенденция повсеместной замены электромеханических реле защиты (ЭМРЗ) микропроцессорными устройствами релейной защиты (МУРЗ) сопровождается снижением надежности релейной защиты [3]. Это обусловлено целым рядом причин, среди которых немаловажной является резкое возрастание уязвимости МУРЗ (по сравнению с ЭМРЗ) к кибератакам [4] и к преднамеренным электромагнитным деструктивным воздействиям (ПЭДВ) [5, 6].

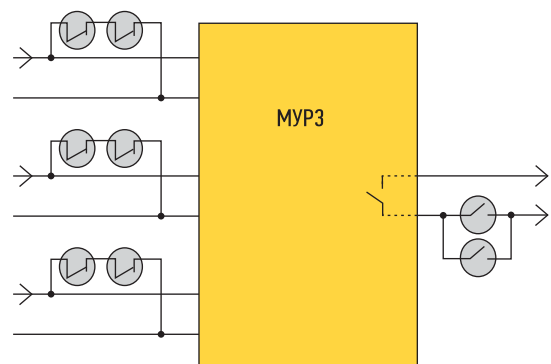
Решением проблемы могло бы стать объединение лучших параметров МУРЗ (широкие функциональные возможности, специальные характеристики срабатывания, недоступные ЭМРЗ, и т. д.) с лучшими параметрами ЭМРЗ (устойчивостью к помехам, кибератакам, ПЭДВ). Но возможно ли в принципе создание такого гибрида? Практика отвечает на этот вопрос утвердительно. Известно, что во многих энергосистемах установка самых первых образцов МУРЗ сопровождалась их дублированием ЭМРЗ, включенных на параллельную работу [7]. По мнению, изложенному в [8], такая техническая политика, заключающаяся в дублировании МУРЗ с помощью включенного на параллельную работу ЭМРЗ с дополнительной выдержкой времени 0,1 с, является актуальной и оправданной и сегодня. Автором [8] однозначно утверждается, что «десятилетний опыт совместного применения МП УРЗА и электромеханических УРЗА на модернизированных (новых) подстанциях Вели-

коустогских электрических сетей «Вологдаэнерго» показал, что только в этом случае получается современная подстанция с современной и сверхнадежной системой РЗА... ни в коем случае нельзя снимать с производства электромеханические реле, комплекты и панели».

Но насколько справедливы столь категоричные утверждения? Во-первых, совершенно очевидно, что при параллельном включении МУРЗ и ЭМРЗ речь может идти только об уменьшении количества «несрабатываний» защиты, но никак не о количестве «излишних срабатываний». А ведь именно последний вид отказов, как это было показано выше, представляет наибольшую опасность, и именно от такого вида отказов в настоящее время не предусмотрено никаких мер. Кроме того, с точки зрения теории надежности, при таком параллельном включении двух реле вероятность отказов типа «излишние срабатывания» только возрастет. Во-вторых, современные ЭМРЗ вовсе не являются «современными» в том смысле, в котором этот термин использует автор [8], то есть новыми и самыми совершенными на сегодня. Скорее наоборот, так называемые «современные» ЭМРЗ были разработаны многие десятки лет тому назад и уже давно морально устарели.

Решение этой проблемы, по нашему мнению, лежит в иной плоскости. В [9] нами предложена идея не задержанного, как в [8], а наоборот, ускоренного срабатывания ЭМРЗ. Причем оба реле (МУРЗ и ЭМРЗ) включены функционально не параллельно, а последовательно (рис. 1).

РИС. 1. ▼
Применение ЭМРЗ на основе герконов для шунтирования чувствительных входов МУРЗ и блокирования цепи его выходного контакта



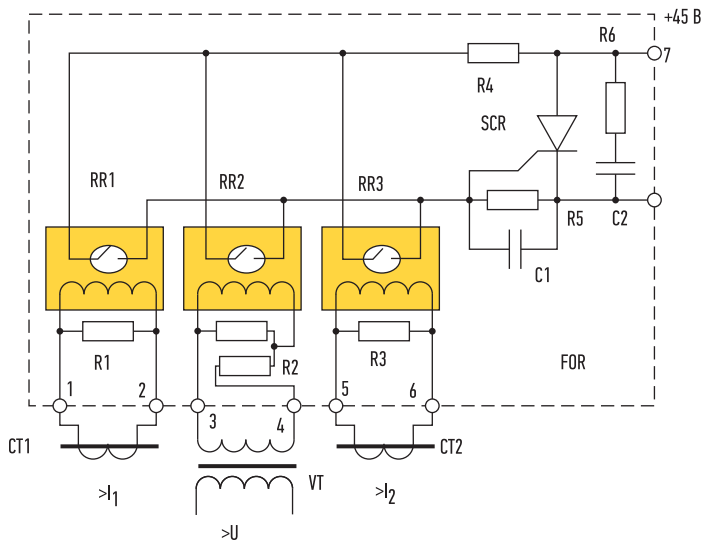
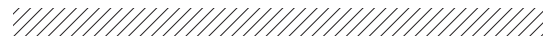


РИС. 2. ► Пусковой орган на основе быстродействующего гибридного реле тока

При этом в нормальном режиме работы МУРЗ заблокировано, а при возникновении аварийного режима ЭМРЗ срабатывает первым (как пусковой орган МУРЗ) и деблокирует МУРЗ, разрешая его нормальную работу.

В качестве такого пускового органа может служить быстродействующее (единицы миллисекунд) реле тока (напряжения, мощности). Такой пусковой орган невозможно активизировать кибернетической атакой, он на порядки более устойчив к помехам и к ПЭДВ, чем МУРЗ. Если использовать принцип шунтирования чувствительных входов МУРЗ нормально замкнутыми герконами пускового органа, то это может предотвратить проникновение высоковольтных

импульсов на чувствительные входы МУРЗ и его повреждение ПЭДВ. Включение герконов такого пускового органа последовательно с контактами выходных реле МУРЗ предотвратит несанкционированные действия релейной защиты под воздействием кибернетического вмешательства извне. Таким образом, без активации такого пускового органа МУРЗ не сможет воздействовать на режим работы энергосистемы, даже будучи активированным посредством кибернетической атаки или будучи подвергнутым воздействию ПЭДВ. Если же пусковой орган был активирован, то ничего не мешает использованию особых характеристик и широких функциональных возможностей МУРЗ.

Совершенно очевидно, что так называемые «современные» ЭМРЗ не пригодны на роль быстродействующих пусковых органов МУРЗ. В таком качестве наиболее подходит быстродействующее гибридное реле тока (FOR), подробно исследованное в [10] (рис. 2).

В этом устройстве при достижении порогового значения тока контакт-детали геркона одного из реле RR1–RR3 начинают вибрировать с частотой 100 Гц. Первое же их замыкание вызывает отпирание тиристора SCR, включенного последовательно с нагрузкой постоянного тока, который остается включенным и в те моменты времени, когда вибрирующий геркон разомкнут. Геркон продолжает вибрировать до тех пор, пока релейная защита не отключит поврежденный участок с аварийным током (как правило, это период от десятков миллисекунд до единиц секунд). Такой принцип построения пускового органа имеет ряд существенных преимуществ:

- четкий и стабильный порог срабатывания с возможностью его регулирования путем изменения положения геркона в катушке или замены резистора R1 – R3;
- высокое быстродействие (доли-единицы миллисекунд);
- высокий коэффициент возврата вибрирующего геркона (близок к единице);
- полная гальваническая развязка с высоким уровнем изоляции (киловольты) от внешней входной цепи тока;

ТАБЛИЦА 1. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИХ ВАКУУМНЫХ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ГЕРКОНОВ НЕКОТОРЫХ ТИПОВ

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	1,0
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

- герметичность контактов и отсутствие необходимости в их зачистке и регулировке.

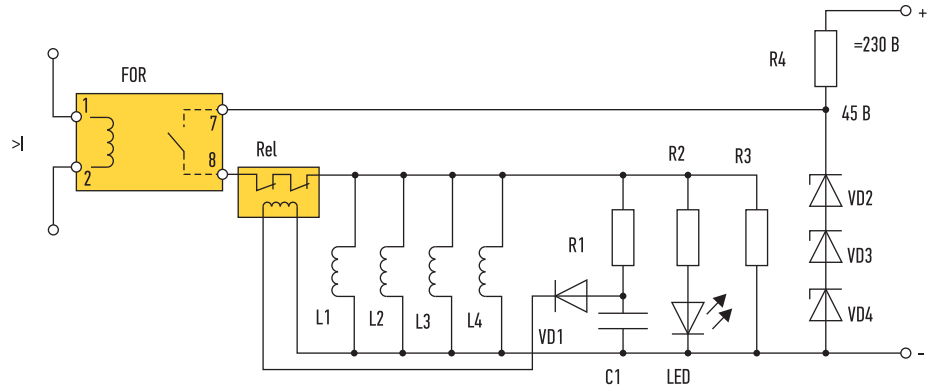
В качестве чувствительного порогового элемента в пусковом органе могут быть использованы миниатюрные вакуумные герконы, выдерживающие испытательное напряжение не менее 1 кВ и имеющие собственное время срабатывания около 1 мс (таблица 1).

Узел, содержащий геркон и токовую катушку с несколькими витками толстого провода, помещен в ферромагнитный экран.

В таблице 2 приведены параметры некоторых типов наиболее подходящих для использования в пусковом органе тиристоров. Для повышения помехоустойчивости пускового органа в нем применены дополнительные RC-элементы.

Пусковой орган управляет работой исполнительных герконовых реле, включенных по схеме рис. 3.

Все элементы этой схемы питаются от стабилизированного делителя напряжения на стабилитронах VD2–VD4, обеспечивающего напряжение 45 В и защищающего от проникновения на схему импульсных перенапряжений из питающей сети. Под этим напряжением (45 В) находятся и элементы пускового органа. При его срабатывании напряжение подается на обмотки управления всех исполнительных герконовых реле, которые, срабатывая в течение



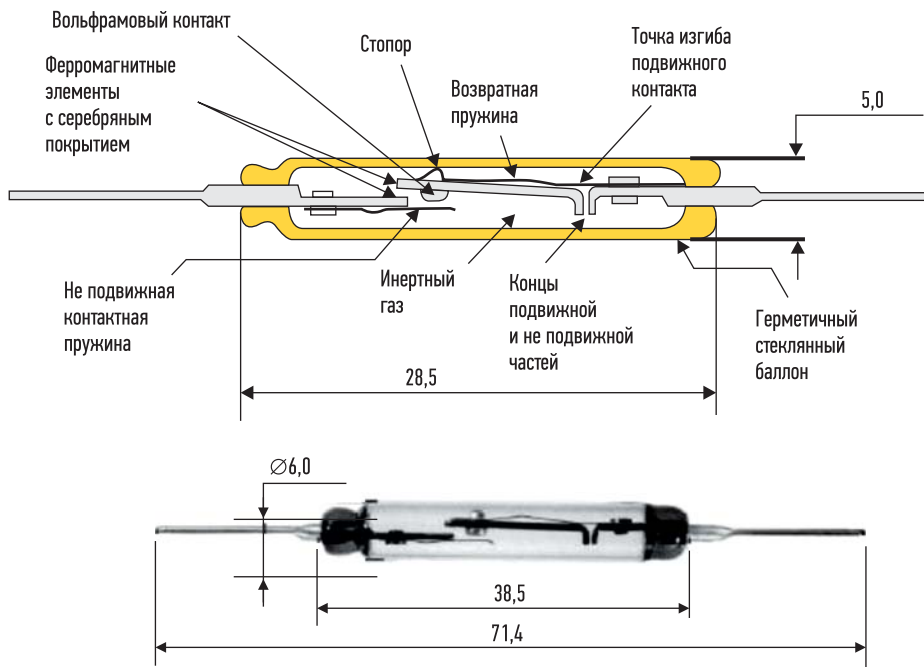
нескольких миллисекунд, дешунтируют (деблокируют) МУРЗ, разрешая его нормальную работу. Одновременно начинается заряд конденсатора C1 через резистор R2. Через время порядка 10 с напряжение на конденсаторе достигнет напряжения отпирания динистора VD1, через который конденсатор C1 быстро разряжается на обмотку электромагнитного реле Rel. В результате этого реле кратковременно срабатывает, размыкая свои нормально замкнутые контакты и разрывая на время 100–300 мс цепь питания обмоток исполнительных реле. При этом тиристор SCR пускового органа FOR запирается, и все устройство возвращается в исходное состояние (ждущий режим). Поскольку для работы МУРЗ в аварийном режиме защищаемого объекта необходимо время, не превышающее обычно

нескольких секунд, то времени возврата схемы в ждущий режим около 10 с вполне достаточно для полного завершения цикла нормальной работы МУРЗ. Поскольку суммарный ток, потребляемый обмотками L1–L4 исполнительных реле, может оказаться меньше тока защелкивания (I_L) и тока удержания (I_H) тиристора SCR, схема рис. 3 дополнена мощным резистором R3, увеличивающим суммарный ток, протекающий через тиристор, до 250–300 мА. Хотя на рынке имеются специальные тиристоры с повышенной чувствительностью и с токами защелкивания и удержания, не превышающими 10 мА (TS820-600, TIC106, BT258-600R, X0402MF, MCR708A1 и др.), их применение в данном устройстве не рекомендуется, так как может снизить его помехоустойчивость.

РИС. 3. ▲ Схема включения исполнительных герконовых реле (L1–L4 – обмотки управления этих реле, контакты которых показаны на рис. 1)

ТАБЛИЦА 2. ВАЖНЕЙШИЕ ПАРАМЕТРЫ НЕКОТОРЫХ ТИПОВ МОЩНЫХ ТИРИСТОРОВ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ РАСПАЙКИ НА ПЕЧАТНУЮ ПЛАТУ

Параметр	Тип	CS 20-12io1	CLA50E1200NB	25TTS12	30TPS12	BTW68-1200
V_{RRM}/V_{DRM} , В		1200	1200	1200	1200	1200
$I_{T(RMS)}$, А		30	79	25	30	30
$I_{T(AV)}$, А		19	50	16	20	19
I_{TSM} , А		200	650	300	250	400
I_{GT} , мА		65	50	60	45	50
I_L , max., мА		150	125	200	200	40
I_H , max., мА		100	100	100	100	75
dv/dt, В/мкс		1000	1000	500	500	250
T_{GT} , мкс		2	2	0,9	0,9	100
T_J , °C		-40...+125	-40...+150	-40...+125	-40...+125	-40...+125
Корпус		TO-247	TO-247	TO-220AC	TO-247AC	TOP3 ins.

**РИС. 4. ▲**

Мощный газонаполненный геркон типа Bestact R15U фирмы Yaskawa с двустадийной коммутацией

В качестве контактов исполнительных реле, блокирующих выходной контакт МУРЗ, могут быть с успехом использованы газонаполненные герконы Bestact R15U фирмы Yaskawa (рис. 4), предназначенные для включения токов до 30 А при напряжении 240 В за время, не превышающее 5 мс.

Высоковольтные миниатюрные вакуумные переключающие герконы различных типов, содержащие нормально замкнутый контакт (таблица 3), могут быть использованы для шунтирования чувствительных (не токовых) входов МУРЗ.

Совершенно очевидно, что, в соответствии с теорией надежности, включение дополнительных контактов, пусть даже и высоконадежных, последовательно с контактами выходных реле МУРЗ или параллельно его входам, приведет к определенному снижению надежности релейной защиты. Насколько? Для ответа на этот вопрос сегодня нет никакой реальной информации ввиду полного отсутствия опыта эксплуатации таких устройств. Однако, в случае если это окажется необходимым, такое снижение надежности может быть очень просто компенсировано использованием двух параллельно

или последовательно соединенных герконов в качестве каждого дополнительного контакта, как это показано на рис. 1.

У электромеханических реле вероятность отказов типа «излишние срабатывания» несравненно меньше вероятности «несрабатывания», поэтому их параллельное соединение (в отличие от простого параллельного соединения МУРЗ) однозначно увеличит надежность релейной защиты. Для нормально замкнутых дополнительных контактов, шунтирующих входы МУРЗ, повышение надежности может быть достигнуто последовательным соединением этих контактов между собой (рис. 1).

Конденсатор времязадающей цепочки, как и все остальные элементы устройства, выбран улучшенного качества и с большим запасом (пятикратным) по рабочему напряжению (таблица 4).

В качестве делителя напряжения выбраны три последовательно включенных стабилизатора с напряжением стабилизации 15 В, мощностью 10 Вт каждый. При очень небольшом собственном потреблении схемы большой запас по мощности обеспечивает отсутствие нагрева стабилизаторов и повышение надежности их работы, а также способности поглощать импульсы перенапряжения большой энергии. Параметры наиболее подходящих для этой цели стабилизаторов приведены в таблице 5.

В качестве динистора VD1 (рис. 3) с напряжением отпирания 24–36 В и пропускаемым током 1–2 А могут быть рекомендованы приборы

ТАБЛИЦА 3. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ НЕКОТОРЫХ ТИПОВ ГЕРКОНОВ С ПЕРЕКЛЮЧАЮЩИМ КОНТАКТОМ

Параметр	Тип и производитель	GC 1917 Comus	HSR-830R Hermetic Switch	HSR-834 Hermetic Switch	HSR-V933W Hermetic Switch
	Мах. коммутируемая мощность, Вт		60	25	100
Мах. коммутируемое напряжение, В		400	250	500	500
Мах. коммутируемый ток, А		1	1	3	3
Пробивное напряжение, В		1000	1000	1000	1500
Время замыкания, мс		4,0	3,6	2,0	4,2
Время размыкания, мс		0,15	4,2	1,0	3,7
Размеры баллона, мм		D = 5,6	D = 5,3	D = 5,3	D = 5,3
		L = 36	L = 32	L = 34	L = 33

ТАБЛИЦА 4. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ НЕКОТОРЫХ ТИПОВ ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННЫХ КОНДЕНСАТОРОВ ДЛЯ ВРЕМЯЗАДАЮЩЕЙ ЦЕПОЧКИ

Тип конденсатора	Производитель	Емкость и напряжение	Габаритные размеры, мм	Диапазон рабочих температур, °С
B43504B2477M	EPCOS	470 мкФ, 250 В	Ø30×30	-40...+105
B43505A2477M	EPCOS		Ø30×35	-40...+105
EETHC2E471CA	Panasonic		Ø25×30	-40...+105
MAL215933471E3	Vishay		Ø25×40	-25...+105
MCHPR250V477M25X41	Multicomp		Ø25×41	-25...+105
381LQ471M250J022	Cornell Dublier		Ø25×30	-40...+105

ТАБЛИЦА 5. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ НЕКОТОРЫХ ТИПОВ СТАБИЛИТРОНОВ МОЩНОСТЬЮ 10 Вт С НАПРЯЖЕНИЕМ СТАБИЛИЗАЦИИ 15 В

Параметр	Тип	NTE5191A	1N2979
P_D , Вт			10
V_Z , В			15
I_{ZM} , mA			560
I_{ZT}			170
Z_{ZT} , Ω			3
I_R , mA		10	5
T_{OPR} , °С		-65...+175	
Тип корпуса		DO-4	

следующих типов: NTE6407, DB3, BR100/03, CT-32, HT-32 и др. А в качестве электромагнитного реле Rel (рис. 3) — герметичные нейтральные электромагнитные реле (в англоязычной технической литературе они называются Full Size Cristal Can Relays) с двумя переключающими контактами (два нормально замкнутых контакта используются для повышения надежности), коммутирующими ток 2–5 А, с обмоткой на 24 В постоянного тока. В качестве примера можно привести реле серий: РЭН33, РЭН34, РЭК134, РЭС48, 782ХДХН, Н782, В07, FW, SF, G2A-434ADC24, HGPRM-B4C05ZC, 2B-7506 и др.

Никакой особо точной настройки порога срабатывания этого устройства не требуется. Важно лишь, чтобы оно срабатывало всегда раньше МУРЗ, при любом подозрительном режиме в контролируемой цепи, поскольку излишние срабатывания устройства в результате неточной настройки не влияют на поведение защищаемого этим устройством МУРЗ.

Использование в предлагаемом устройстве высоконадежных ком-

понентов, выбранных с многократными запасами по току, напряжению и мощности, допускающих работу в широком интервале температур, очень ограниченное количество этих компонентов, высокий уровень гальванической развязки, а также дублирование наиболее ответственных элементов позволяют обеспечить высокую надежность МУРЗ при воздействии мощных электромагнитных помех, кибератак и ПЭДВ, соответствующих надежности и устойчивости электротехнических реле.

Защищенные с помощью описанного устройства МУРЗ могут быть включены на параллельную работу для защиты особо ответственных объектов электроэнергетики. При использовании описанного устройства возможно также и включение параллельно МУРЗ дополнительных ЭМРЗ с задержкой на 0,1 с [8].

Очевидно, что конкретные схемотехнические решения могут и отличаться от описанных в данной статье, однако предложенный подход к решению проблемы безусловно будет способствовать повышению надежности релейной защиты на основе МУРЗ.

Простота описанного устройства делает возможным быстрое освоение его выпуска на любом предприятии, имеющем опыт производства электронной аппаратуры. ●

ЛИТЕРАТУРА:

1. Гуревич В. И. Вопросы философии в релейной защите // Мир техники и технологии. 2013. № 1.
2. Саратова Н. Е. Анализ подходов к исследованию процессов протекания системных аварий // Системные исследования в энергетике. Материалы конф. молодых ученых. Иркутск: ИСЭМ. 2007.
3. Гуревич В. И. Микропроцессорные реле защиты. Устройство, проблемы, перспективы. М.: Инфра-Инженерия. 2011.
4. Гуревич В. И. Кибероружие против энергетики // ПРО Электричество. 2011. № 1.
5. Гуревич В. И. Проблема электромагнитных воздействий на микропроцессорные устройства релейной защиты. Ч. 1 // Компоненты и технологии. 2010. № 2.
6. Гуревич В. И. Проблема электромагнитных воздействий на микропроцессорные устройства релейной защиты. Ч. 2 // Компоненты и технологии. 2010. № 3, 4.
7. Ответ В. И. Гуревича оппонентам—релейщикам // Вести в электроэнергетике. 2009. № 1.
8. Щедриков Б. Д. Электромеханические устройства релейной защиты и автоматики в энергетике: настоящее и будущее // Релейная защита и автоматизация. 2010. Ноябрь.
9. Гуревич В. И. Нужна ли защита релейной защите? // Электроэнергия. Передача и распределение. 2013. № 2.
10. Гуревич В. И. Высокостабильное герконо-полупроводниковое реле тока с повышенным быстродействием // Энерго-Инфо. 2007. № 2.