

# Защита трансформаторов тока от работы в режиме с разомкнутой вторичной цепью

Хорошо известно, что режим работы конвенционального трансформатора тока (ТТ) с разомкнутой вторичной обмоткой недопустим, поскольку связан с опасностью появления высокого напряжения на этой обмотке.

При разомкнутой вторичной обмотке ток в ней, размагничивающий сердечник, становится равным нулю, а намагничивающий ток

$$I_1 = I_2 k_1 = 3 \times 240 = 720$$

где:

$k_1 = 1200/5 = 240$  - коэффициент трансформации ТТ;

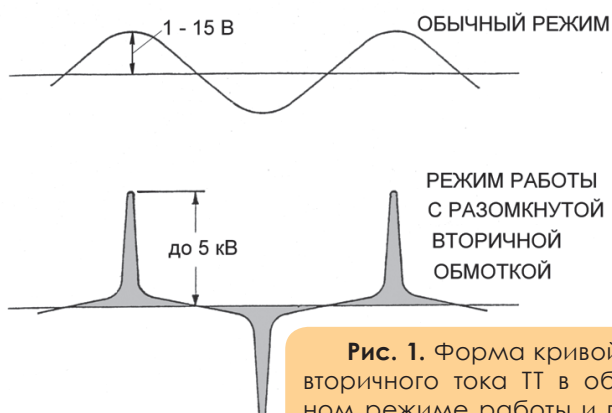
$I_2 = 3\text{ А}$  - ток, протекающий в данный момент времени во вторичной цепи ТТ остается прежним. Поэтому магнитный поток, а следовательно, э.д.с. во вторичной обмотке трансформатора увеличатся примерно в  $k_1$  раз, т.е.

$$E_2 = I_2 Z_2 k_1 = 3 \times 3 \times 240 = 1440\text{ В}$$

где:

$Z_2 = 3\text{ Ом}$  - полное сопротивление вторичной цепи ТТ.

Приведенные выше соотношения относятся к действующим значениям. Если же учесть, что кривая магнитного потока ТТ в таком режиме становится несинусоидальной (уплощается) из-за насыщения магнитопровода и так называемый крест-фактор (отношение максимального напряжения к действующему) часто получается равным 2 — 2,5, а не  $\sqrt{2}$ , как при синусоидальной кривой напряжения, то станет понятным, что амплитудное (максимальное) значение напряжения может достигать очень высоких значений (в нашем примере - 3,5 кВ, а при больших токах и до 5 кВ, рис. 1).



**Рис. 1.** Форма кривой вторичного тока ТТ в обычном режиме работы и при разомкнутой вторичной обмотке.

Обычно, негативные последствия разомкнутой вторичной обмотки связывают с опасностью поражения персонала высоким напряжением. Действительно, как показано выше, при первичном токе, достигающем уже

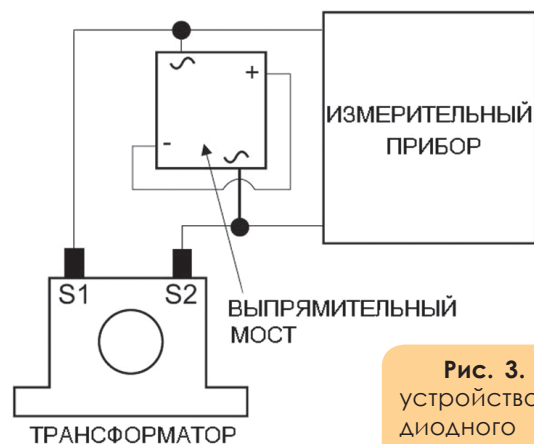
60% номинального, в мощных ТТ напряжение на разомкнутой обмотке может достигать весьма опасных значений. Однако, как показывает практика, опасными такие напряжения являются не только для персонала, но и для самого ТТ. Известны случаи взрывов ТТ в результате накопления водорода в конструкции ТТ под действием частичных разрядов в низковольтной изоляции при длительном нахождении ТТ в состоянии с разомкнутой вторичной обмоткой [1].

Такой режим может возникнуть в процессе эксплуатации ТТ как в его измерительной обмотке, так и в обмотке, предназначенной для подключения реле защиты, поскольку далеко не все реле защиты контролируют целостность цепи тока.

Особую опасность представляют неиспользуемые вторичные обмотки ТТ, замкнутые перемычками. Такие перемычки иногда просто выпадают из клеммников и в изоляции ТТ возникают частичные разряды, приводящие к трагическим последствиям, рис. 2.



**В. Гуревич, канд. техн. наук**



**Рис. 3.** Защитное устройство на базе диодного выпрямительного моста [3].

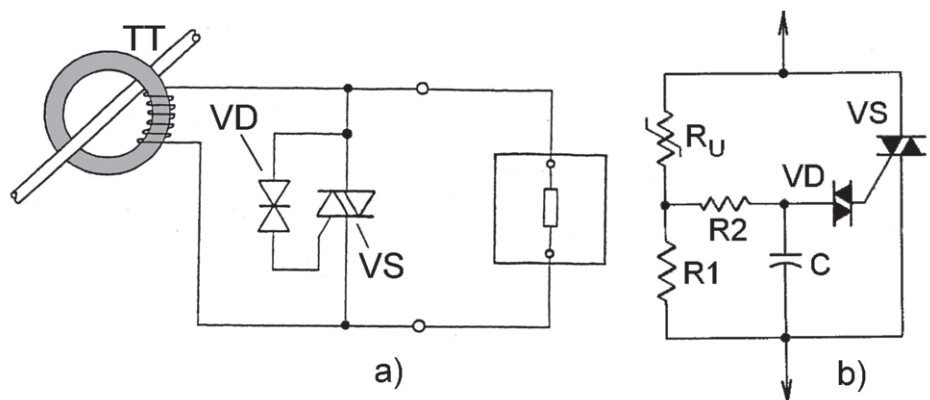


**Рис. 2.** Повреждения ТТ в результате накопления газов под действием частичных разрядов [2].

Известно немало различных технических решений, направленные на защиту ТТ от работы в режиме с разомкнутой вторичной обмоткой. Для маломощных измерительных ТТ, характеризующихся низким напряжением на вторичной обмотке в нормальном рабочем режиме, может быть использован обычный диодный мост на кремниевых силовых диодах, имеющих напряжение отпирания около 0.7 В, рис. 3. При этом, выводы переменного тока моста включаются параллельно вторичной обмотке ТТ, а выводы постоянного тока закорачиваются. При таком соединении, параллельно вторичной обмотке ТТ оказываются включенными в прямом направлении два последовательно соединенных диода на каждой полуволне переменного напряжения. Диоды отпираются и шунтируют вторичную обмотку ТТ в том случае, когда напряжение на ней превышает 1.2 – 1.4 В.

Для ТТ, предназначенных для работы с релейной защитой, такое устройство не подходит, так как сопротивление вторичной цепи тока в этом случае намного больше и рабочее напряжение на вторичной обмотке ТТ при коротких замыканиях в цепи первичного тока может достигать десятков, а иногда и сотен вольт. В таких случаях применяют более сложные устройства, рис. 4.

Оба эти устройства, в принципе, однотипны и выполнены по известной схеме порогового элемента на симметричном тиристоре (симисторе или триаке) VS и сидака (двунаправленного динистора) VD [6]. Некоторые дополнительные элементы в схеме рис. 4б (конденсатор, резисторы, варистор) играют второстепенную роль.



**Рис. 4.** Устройства для защиты ТТ, предназначенные для работы с релейной защитой. а) [4]; б) [5].

В исходном состоянии (при малом напряжении на входе схемы) все полупроводниковые элементы заперты. При появлении на входе схемы повышенного напряжения сидак VD отпирается и пропускает через себя импульс тока в цепь управляющего электрода симистора VS. Симистор открывается и шунтирует вторичную обмотку ТТ. Поскольку напряжение, прикла-

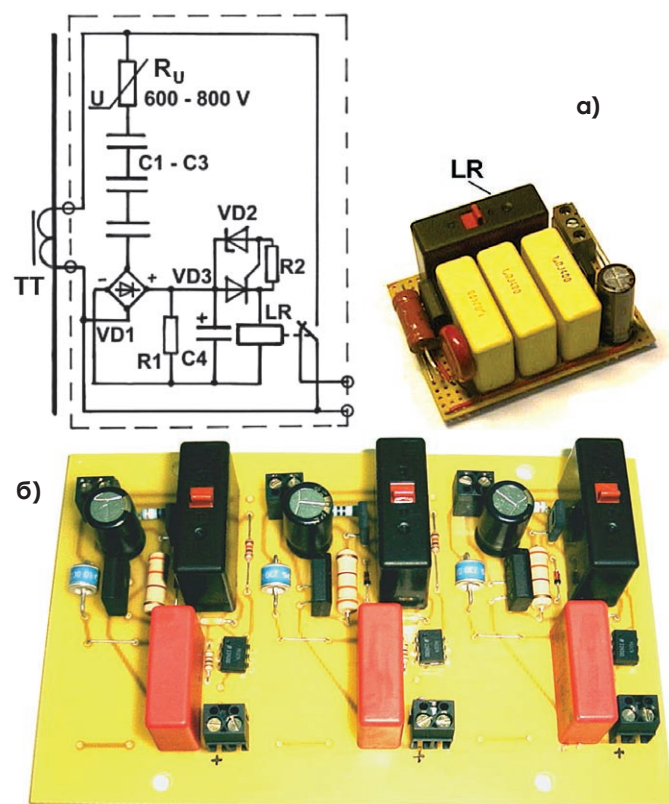
дываемое ко входным зажимам схемы переменное, то при переходе синусоиды тока через нулевое значение симистор запирается, а с началом новой полуволны вновь открывается. Этот процесс повторяется до тех пор, пока напряжение на входе схемы выше напряжения отпирания сидака, то есть, пока вторичная цепь ТТ разомкнута.

Понятно, что при шунтировании вторичной обмотки ТТ амплитуда напряжения на ней не будет превышать порогового значения напряжения отпирания шунтирующих полупроводниковых элементов.

Серьезным недостатком схем, работающих на этом принципе является сильный разогрев симистора (диодного моста) при длительном протекании через него тока 2 – 3 А и выше. Чтобы снизить нагрев придется применять или симистор большой мощности (то есть крупный по размерам и дорогой) или устанавливать его на радиаторе, что также приведет к значительному увеличению габаритов устройства.

В связи с этим, нами были предложены варианты защитного устройства, работающие на похожем принципе, но свободные от недостатка известных устройств [7].

В разработанных нами устройствах полупроводниковые нелинейные элементы не включены непосредственно параллельно защищаемой обмотке, как



**Рис. 5.** Варианты защитных устройств с использованием нелинейных полупроводниковых элементов, шунтируемых контактами двухпозиционного поляризованного реле LR **а)** одноцепного; **б)** трехцепного

в известных, а разряжают на обмотку специального двухпозиционного поляризованного реле (LR) с ручным возвратом, предварительно заряженный конденсатор (C4). Контакты этого реле шунтируют вторичную обмотку трансформатора тока.

Принципиальное отличие разработанных устройств от известных заключается в том, что после их однократного срабатывания двухпозиционное реле остается в замкнутом состоянии и вторичный ток ТТ протекает уже не через полупроводниковые элементы, вызывая их нагрев, а через замкнутые контакты реле. Трехцепный (трехканальный) вариант устройства (рис. 5б) является более совершенным и содержит дополнительный оптрон в каждом из независимых каналов, предназначенный для включения в цепь сигнализации. Эти устройства были успешно испытаны и находились в опытной эксплуатации около двух лет.

К сожалению, эти устройства оказались не достаточно дешевыми и не достаточно малогабаритными и поэтому большого распространения не получили.

Дальнейшие наши усилия были направлены на существенное упрощение и удешевление защитного устройства и на уменьшение его габаритов.

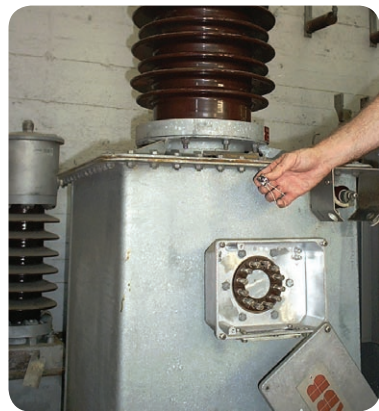
В соответствии с поставленной задачей нами было предложено устройство, содержащее всего два небольших элемента: двунаправленный диод и термоконтакт, рис. 6 [8].

В нормальном режиме работы ТТ через запертый в обоих направлениях диод протекает лишь ток утечки, составляющий микроамперы и устройство не оказывает никакого влияния на цепи релейной защиты и измерения. При обрыве вторичной цепи и возрастании напряжения на вторичной обмотке до напряжения пробоя двунаправленного диода, последний пробивается (сначала один его р-п переход, потом другой) и через пробитые переходы начинает протекать ток. При этом напряжение на вторичной обмотке ТТ мгновенно снижается до нескольких вольт и начинается разогрев внутренней структуры пробитых р-п переходов. При токе 2 – 3 А пробитые диодные структуры быстро нагреваются до температуры срабатывания термоконтакта (70°C). Сработавший термоконтакт шунтирует и обмотку ТТ и диод, после чего последний остывает до температуры среды и в работе уже не участвует. Термоконтакт (типа JW6-III) выбран с достаточно большой коммутирующей способностью (10 А, 250В) и с большим гистерезисом (температура размыкания контакта: менее минус 5°C). В холодном климате возможно применение термоконтактов (например, типа T1/11-111A22 и др.) с более низким порогом температуры возврата и с гистерезисом, который можно заказать в пределах от 5 до 150°C непосредственно у производителя (Foshan Tianpeng Thermostats Co.). Возможно

также применение термоконтакта с фиксатором положения и ручным возвратом.

В качестве двонаправленного диода в опытных образцах устройства использовался диод типа SF301C (с напряжением пробоя 50В, для защиты измерительных ТТ) и типа SF307C (с напряжением пробоя 600В, для защиты ТТ, предназначенных для релейной защиты).

Известно, что резервирование электронных компонентов может осуществляться как параллельным, так и последовательным их соединением в зависимости от условий эксплуатации и статистически установленного вида повреждений. В соответствии со статистикой 90% повреждений диодов составляют короткие замыкания и лишь 10% случаев повреждений – внутренние обрывы. Если короткие замыкания связаны с пробоем р-п перехода обратным напряжением, то обрывы обусловлены разбрызгиванием и испарением материала перехода при протекании очень больших токов через полупроводниковую структуру. Диоды указанной выше серии рассчитаны на длительный

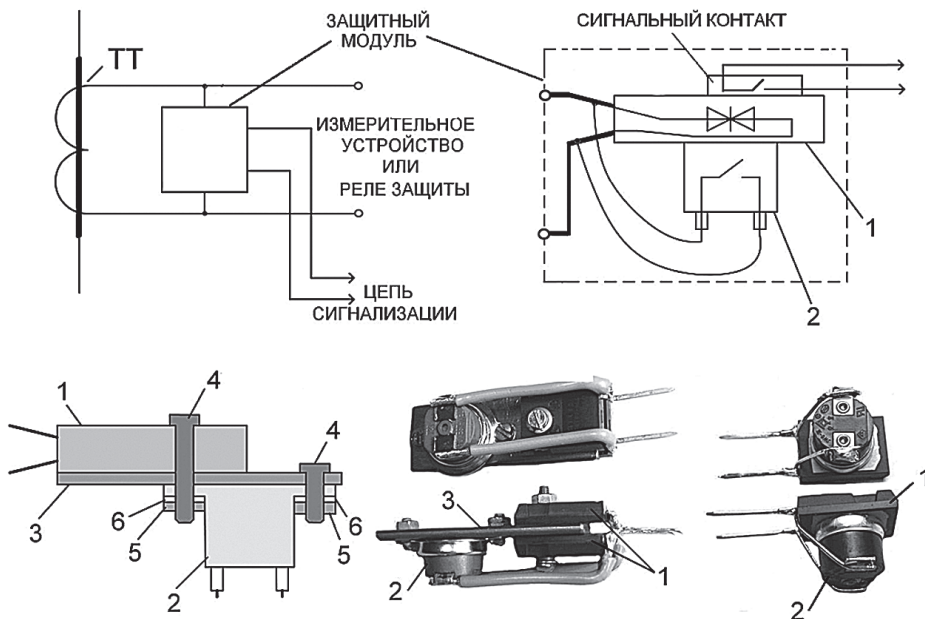


**Рис. 7.** Внешний вид защитного модуля на фоне ТТ на напряжение 160 кВ с открытой клеммной коробкой.

максимальный прямой ток 30А и импульсный (длительностью 8.3 мс) ток 300А. То есть имеют р-п переход достаточно большой площади. При пробое такого перехода напряжением открытой вторичной обмотки ТТ с сопровождающим током до 5 - 20 А разрушение перехода однозначно имеет характер не разрыва, а короткого замыкания.

Из описания работы защитного модуля

понятно, что оно является одноразовым, однако, учитывая, что случаи обрыва вторичной цепи ТТ случаются не каждый день, а стоимость диода (несколько долларов) и термоконтакта (менее 1 доллара) весьма незначительны, применение одноразовых устройств (по принципу предохранителя) вполне оправдано.



**Рис. 6.** Простое малогабаритное устройство защиты ТТ (защитный модуль)

1 – двонаправленный диод или два обычных диода, включенные встречно-последовательно; 2 – замыкающийся (нормально разомкнутый) термоконтакт; медная пластинка; 4 – скрепляющие винты; 5 – гайки; 6 – пружинные шайбы

В дополнение к основному термоконтакту в модуле может быть использован дополнительный миниатюрный термоконтакт любого типа на несколько меньшую температуру срабатывания (например, на 60°C), используемый в качестве сигнального, рис. 6.

Отдельной задачей является надежный способ подключения защитного модуля к выводам ТТ, особенно, когда речь идет о многообмоточных ТТ. Однако, этот способ зависит от конкретной конструкции ТТ и наилучшим образом, по нашему мнению, может быть реализован непосредственно на предприятии-изготовителе ТТ. Малые размеры модуля, рис. 7, облегчают эту задачу.

### Литература

1. Shkolnik A., Grisar M. Explosion of HV current transformers in operation. – XIII-th International Symposium on High Voltage Engineering, Netherlands, 2003, p. 439.
2. Shkolnik A., Gurevich V. Open circuit in secondary winding protection for current transformers. – Israel Electric Corp., Transmission and Distribution Division, October 28, 2008.
3. Spark & CT Protection. Slimline, Rhomberg Catalogue, Section J, p. 134.
4. Stephen Day. Current transformer meters. – UK Patent 2183049A, G01R1/36, 1987.
5. Richard J. Moran, Norbert J. Reis (McGraw-Edison Company) Open circuit current transformer protection circuit. – Patent USA 4,446,039, H02H7/04, 1984.
6. Gurevich V. Electronic Devices on Discrete Components for Industrial and Power Engineering. – CRC Press, Boca-Raton-London-New York, 2008, 420 p.
7. Гуревич В. И. Устройства для защиты трансформаторов тока от обрыва вторичной цепи. – «Промышленная энергетика», 2002, N 11, с. 15 – 16.
8. PCT International Application WO 2009/047742 A2. Open Circuit in Secondary Winding Protection for Current Transformers/ V. Gurevich, A. Shkolnik, 2009.