

УДК 621.311.17:621.313

Гусев Юрий Павлович

ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»
Кафедра «Электрические станции»
Россия, Москва
Заведующий кафедрой
Кандидат технических наук, доцент
E-Mail: gusevyp@mail.ru

Тимонин Илья Александрович

ОАО «ВНИИР»
Россия, Москва
Главный специалист отдела региональных консультантов
E-Mail: TimoninIA@gmail.com

Сравнение эффективности и выбор устройств защиты от перенапряжений в системах оперативного постоянного тока

Аннотация: Система оперативного постоянного тока является важной частью любой электрической станции и подстанции напряжением 110-750 кВ.

Известно, что до 10% случаев ложной работы устройств релейной защиты и автоматики происходит по причине нарушения условий по электромагнитной совместимости в системе оперативного постоянного тока энергообъектов. Такие сбои в работе могут приводить к серьезным авариям в энергосистеме.

Изменение состава электроприемников постоянного тока, связанное с внедрением устройств микропроцессорной релейной защиты и автоматики, приводит к необходимости пересмотра требований к устройствам защиты от перенапряжений. В настоящее время, в России, появилась не всегда оправданная тенденция к использованию зарубежных средств защиты и необоснованному отказу от проверенных практикой отечественных защитных устройств. Решить эти проблемы может разработка научно обоснованных рекомендаций по выбору способов и средств защиты от перенапряжений с учетом современных требований к качеству электропитания.

В данном исследовании был освещен вопрос эффективности и выбора устройств защиты от перенапряжений: выпрямительных диодов и варисторов.

Исследование показало преимущество диодной защиты по сравнению варисторами. Напряжения среза варистора в 2-3 раза выше напряжения среза диодной защиты, а способность к поглощению энергии в несколько раз ниже, чем у диодов.

Сформулированы рекомендации по выбору устройств защиты от перенапряжений в системах постоянного оперативного тока. Рекомендовано в щите постоянного тока применять диодную защиту, вследствие большей её эффективности для режекции импульсов перенапряжений полюс - земля, а также возможных импульсов при отключении соленоидов включения высоковольтных выключателей. Даны рекомендации по выбору параметров и конструкции диодов и защиты их от сверхтоков.

Ключевые слова: Защита от перенапряжений; система оперативного постоянного тока; микропроцессорные защиты; ложные срабатывания; надежность работы релейной защиты.

Идентификационный номер статьи в журнале 139TVN613

Gusev Yury
National Research University "Moscow Power Engineering Institute"
Russia, Moscow
gusevyp@mail.ru

Timonin Ilya
PLC "VNIIR"
Russia, Moscow
TimoninIA@gmail.com

Efficiency comparison and selecting process of overvoltage protection devices in auxiliary direct current supply systems

Abstract: Auxiliary direct current supply system is important part of each power station and substation with voltage level from 110 -750 kV.

As known, up to 10% of relay protection and automation misoperation cases is caused by electromagnetic compatibility failures at auxiliary direct current supply systems of power objects. Such misoperations may cause serious grid failures.

Implementation of new microprocessor devices of relay protection and automation changes an electric consumer structure of auxiliary direct current supply systems, it requires revision of overvoltage protection devices requirements. There is a new baseless tendency of foreign overvoltage protection devices application which appeared in Russia recently instead of conventional domestic devices To solve this problems science based selecting recommendations of such devices are needed. These recommendations should take into account advanced power quality requirements.

An efficiency comparison and selecting process of overvoltage protection devices are presented in the article. Rectifying diodes and varistors are considered.

The results of the research proved the advantages of diode protection. Varistor`s limiting voltage level is 2-3 times higer than diode`s one, power dissipation level of varistor is several times lower.

Selecting recommendations of overvoltage protection devices are given in this work. Diode protection is recommended to be installed in direct current distribution board because of its higher efficiency of cophased overvoltages limiting, and overvoltages caused by switching-off solenoids commutations of high voltage circuit breakers. Parameters, construction and overcurrent protection selecting of that devices are given in the article.

Keywords: Overvoltage protection; auxiliary direct current supply system; microprocessor relay protection; relay misoperation; reliability of relay protection.

Identification number of article 139TVN613

Опыт эксплуатации низковольтных электроустановок постоянного тока на электростанциях (ЭС) и подстанциях (ПС) свидетельствует о периодически возникающих случаях появления перенапряжений в этих электроустановках. Ранее, когда релейная защита (РЗ) выполнялась на базе электромеханических реле, перенапряжения не вызывали существенных проблем. С внедрением микропроцессорной техники, на несколько порядков более чувствительной к перенапряжениям, опасность повреждений, ложных срабатываний РЗ и сбоев автоматизированных систем управления ЭС и ПС существенно возросла. Это, в свою очередь, может вызывать системные аварии в энергосети.

Как известно [1, 2], до 10% случаев ложной работы устройств релейной защиты происходит по причине нарушения условий по электромагнитной совместимости на стороне систем оперативного постоянного тока (СОПТ). На рис. 1 приведён график, иллюстрирующий требования современной микропроцессорной техники к качеству напряжения.

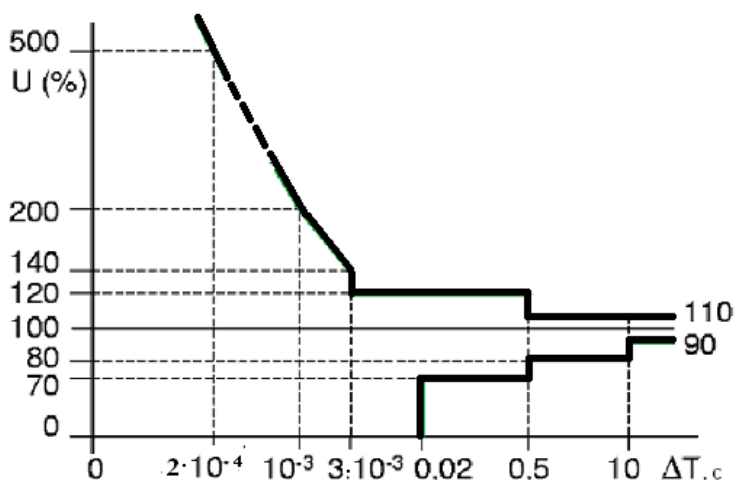


Рис. 1. Требования микропроцессорной техники к отклонениям и провалам напряжения

Автором была разработана математическая модель возникновения перенапряжения при отключении коротких замыканий (КЗ) в СОПТ плавкими предохранителями, реализованная в программной среде *EMTP-RV*. Модель предохранителя представляет собой отдельный блок расчетной схемы, созданный с использованием встроенного в *EMTP-RV* языка программирования (рис. 2).

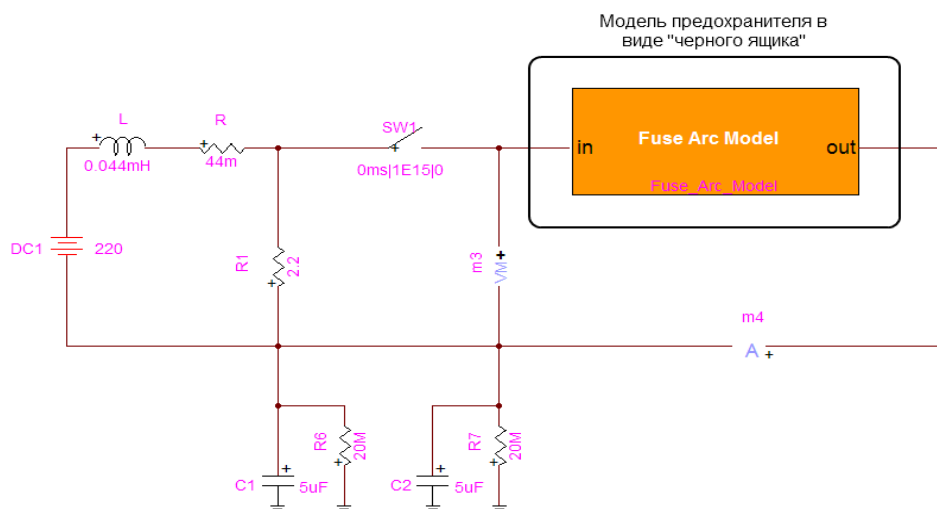


Рис. 2. Расчетная схема с моделью предохранителя в программе *EMTP-RV*

Второе уравнение Кирхгофа для сети, состоящей из источника напряжения E [В], сопротивления R [Ом], индуктивности L [Гн] и коммутационного аппарата с напряжением на дуге U_a [В] имеет вид:

$$E = i \cdot R + U_a + L \frac{di}{dt}. \quad (1)$$

Преддуговые процессы, развивающиеся при срабатывании быстродействующих плавких предохранителей, в значительной степени определяют характер процессов инициирования и развития дуги. Они существенно влияют также на значение интеграла Джоуля отключения. В качестве основного количественного параметра, характеризующего преддуговые процессы, используется преддуговой интеграл Джоуля.

Основные соотношения были выведены из уравнения теплового баланса в предположении отсутствия теплоотдачи с поверхности плавкого элемента, т.е. при его адиабатическом нагреве. Допускается, что при протекании через предохранитель тока КЗ имеет место кратковременный процесс нагрева (не более 10 мс), при котором можно пренебречь теплопередачей, как с внешней поверхности, так и внутрь предохранителя и считать с погрешностью примерно 2% нагрев адиабатическим.

При возникновении короткого замыкания в момент времени $t=0$ в течении преддугового времени ток проходит по нагреваемому металлу проводящей плавкой вставки предохранителя (в преддуговом этапе дуги ещё не существует, поэтому $u_a(t) = 0$) и возрастает по закону:

$$i(t) = I_p \cdot \left(1 - \exp\left(\frac{-t}{\tau}\right) \right), \quad (2)$$

где $I_p = E/R$ – ожидаемый ток короткого замыкания [А], $\tau = L/R$ – постоянная времени сети [с], E – ЭДС аккумуляторной батареи [В], R – активное сопротивление цепи КЗ [Ом], L – индуктивность цепи КЗ [Гн].

В модели было использовано эмпирическое представление спада тока [3-5] с помощью степенной функцией вида:

$$i(t) = I_C \cdot \left(1 - \left(\frac{t - t_p}{t_t} \right)^n \right) \quad (3)$$

где I_C – пропускаемый ток или ток, ограниченный предохранителем [А], t_p – момент зажигания дуги [с], t_t – момент погасания дуги [с].

Такую форму представления спада тока допустимо использовать ввиду независимости дугового интеграла Джоуля (при рассматриваемых кратностях отключаемого тока по отношению к номинальному току предохранителя) от параметров схемы на рассматриваемом временном интервале отключения – порядка 1-3 мс.

При параметризации модели задаются: показатель степени спада тока n , начальное сопротивление предохранителя R_0 , преддуговой и общий интегралы Джоуля – K_p и K_t . Последние две величины заимствованы из каталогов фирм производителей предохранителей.

Общий интеграл Джоуля K_t требует пересчета в случае использования предохранителя с номинальным напряжением, значительно превышающим напряжение сети. Пересчет ведется согласно «формуле Генри Тернера» [6]:

$$K_{t_{-U_r}} = \left(\frac{K_{t_{-U_t}}}{K_p} \right)^{U_r/U_t} \times K_p \quad (4)$$

где $K_{t_{-U_t}}$ – интеграл Джоуля отключения, определенный при тестовом (номинальном) напряжении предохранителя [$A^2 \cdot c$], $K_{t_{-U_r}}$ – интеграл Джоуля отключения при пониженном напряжении сети [$A^2 \cdot c$], K_p – преддуговой интеграл Джоуля [$A^2 \cdot c$].

Внутреннее устройство модели представлено на рис. 3. Схему можно условно разделить на пять ветвей, которые частично связаны между собой посредством входных и выходных сигналов. Имена сигналов показаны над выводами элементов.

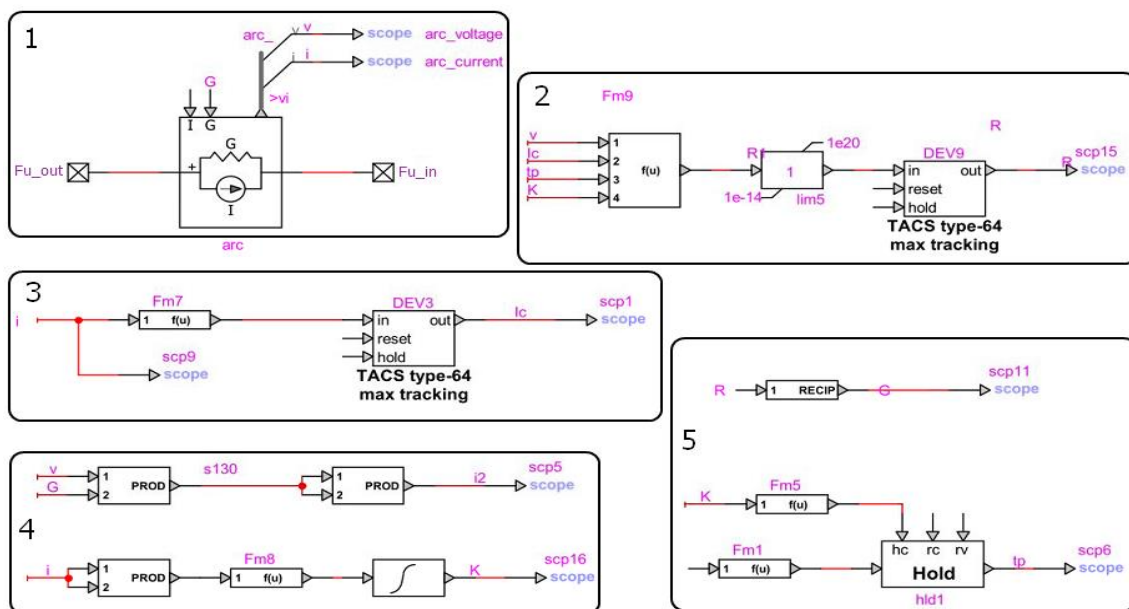


Рис. 3. Схемы макромоделей предохранителя в программе EMTP-RV

Автором было произведено сравнение осциллограмм тока и напряжения на предохранителе $gG 500 V$ с номинальным током 40 А (рис. 4) в процессе отключения короткого замыкания в расчетной схеме (рис. 1) с параметрами, указанными в таблице 1, полученных при моделировании в программе EMTP-RV и в результате аналитического расчета в среде Mathcad.

Таблица 1

Параметры расчетной схемы отключения КЗ предохранителем

№ опыта	$U_{сети}, В$	$L, мкГн$	$R, мОм$	$K_p, A^2 \cdot c$	$K_t, A^2 \cdot c$
1	=220	44	44	4700	6750
2		76	25		

С увеличением постоянной времени цепи τ увеличивается амплитуда и длительность импульса перенапряжения, также растет длительность фронта импульса и его энергия. При

отключении КЗ с помощью предохранителей в СОПТ наблюдаются перенапряжения, представляющие опасность для МПРЗА.

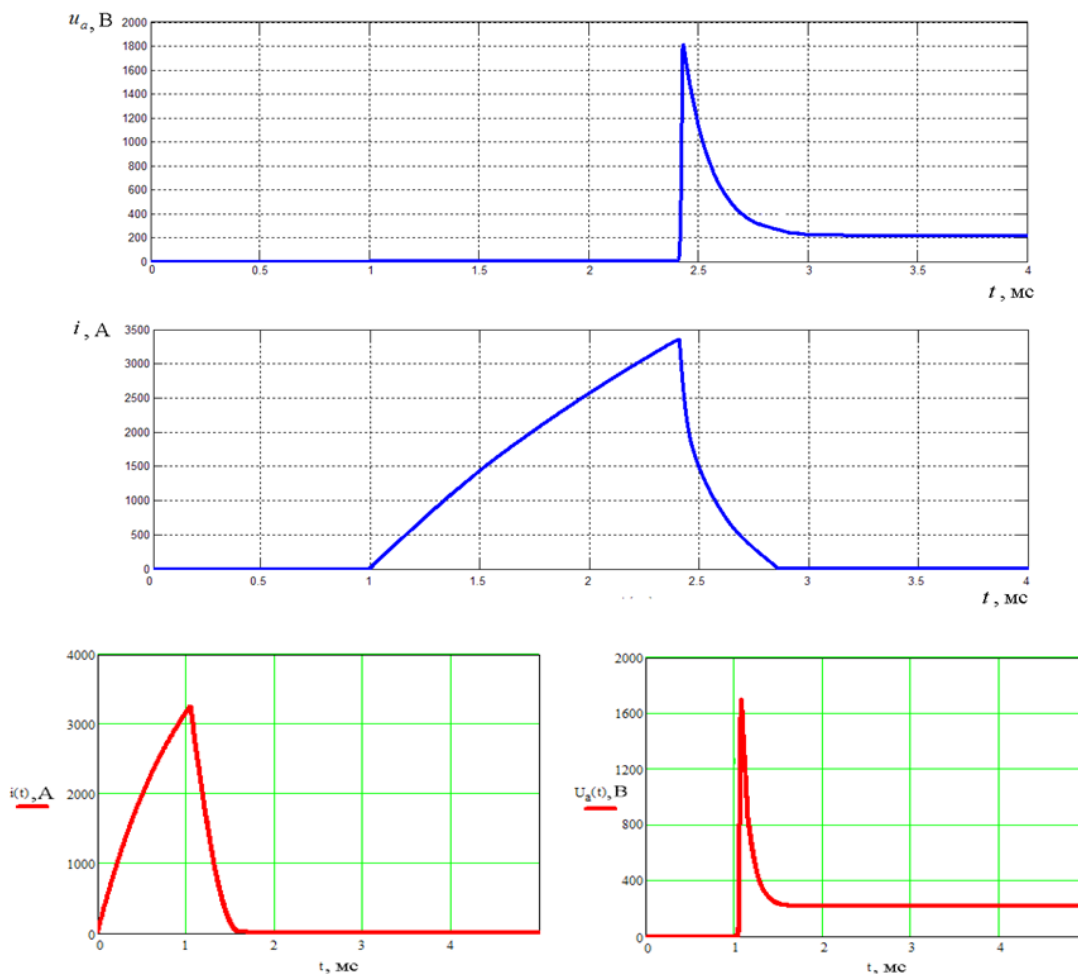


Рис. 4. Осциллограммы напряжения на дуге $u_a(t)$ и тока предохранителя $i(t)$ gG 500 V с номинальным током 40 A, полученные в результате моделирования в программе EMTP-RV (сверху) и Mathcad (снизу) при постоянной времени сети $\tau = 1$ мс и ожидаемом токе $I_p = 5,0$ кА

Распространенными устройствами для защиты от перенапряжений в установках постоянного тока являются диоды и варисторы [7, 8]. Автором произведено сравнение эффективности ограничений перенапряжений между полюсом и землей с помощью диодной защиты и устройств защиты от импульсных перенапряжений (УЗИП) ограничивающего типа на основе варисторов. Рассмотрен случай возникновения перенапряжений при отключении в аварийных условиях соленоида включения высоковольтных выключателей У-110 и У-220, выполнено сравнение эффективности режекции возникающих при этом перенапряжений варисторами и диодами [9]. Моделирование проводилось с использованием программы EMTP-RV. В качестве источника коммутационных перенапряжений был выбран привод серии ШПЭ-44VI включения высоковольтного выключателя. Питание соленоида отключается с помощью контактора постоянного тока серии МК со временем отключения 40÷70 мс. Был рассмотрен случай, когда цепь шунтирующего резистора, установленного в шкафу привода, оказалась разорванной, из-за неисправности или окисления контактов. Катушка соленоида оказалась соединенной с землей.

При выполнении расчетов использовались следующие параметры элементов расчетной схемы: напряжение аккумуляторной батареи $E_{AB} = 220 \text{ В}$, активное сопротивление участка сети от АБ до соленоида включения привода $R = 65 \text{ мОм}$, индуктивность того же участка $L = 5 \text{ мкГн}$, индуктивность соленоида включения $L_{ЭВ} = 100 \text{ мГн}$, активное сопротивление соленоида включения $R_{ЭВ} = 120 \text{ мОм}$, распределенная емкость полюсов кабельной сети $C_{КС} = 5 \text{ мкФ}$. Модель дуги, используемая для моделирования процесса отключения контактора МК, основана на уравнениях Мейера-Касси. Датчики $U_{МП}$, U_+ и U_- использовались для регистрации межполюсного напряжения на стороне соленоида привода и напряжений полюсов сети СОПТ относительно земли (рис. 5).

Для приведенной схемы рассчитаны три переходных процесса: 1) процесс отключения соленоида без использования устройств защиты от перенапряжений, 2) с диодной защитой и 3) с защитой на металл-оксидных варисторах. В случае без использования средств защиты от перенапряжений, максимальное мгновенное напряжение полюса относительно земли достигло 1,4 кВ при продолжительности около 45 мс (рис. 6).

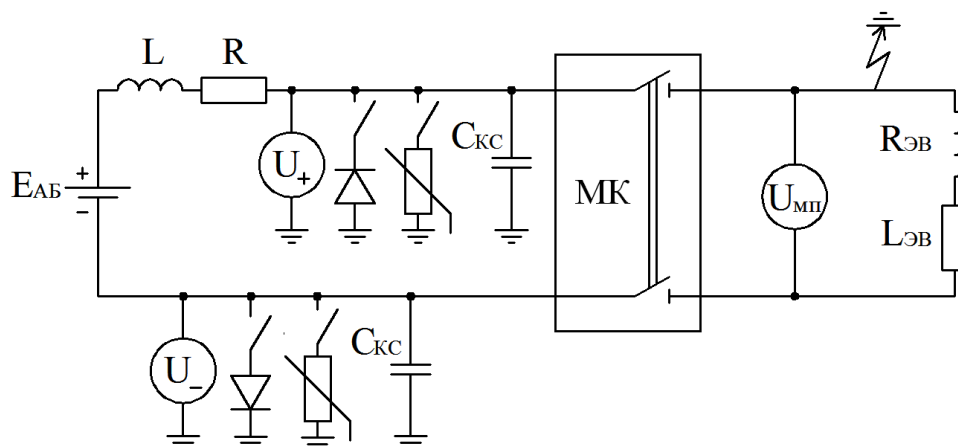


Рис. 5. Расчетная схема для моделирования процесса отключения соленоида включения привода выключателя

При использовании диодной защиты, напряжение полюсов относительно земли не превысило напряжения АБ (рис. 7). При использовании варисторов, напряжение полюсов относительно земли достигает трех крат от напряжения АБ (Рис. 8). При построении осциллограмм за начальное (установившееся) значение тока соленоида бралось его максимальное значение за время отключения контактором, т.е. на осциллограмме не показан участок возрастания тока до максимального значения после включения контактора.

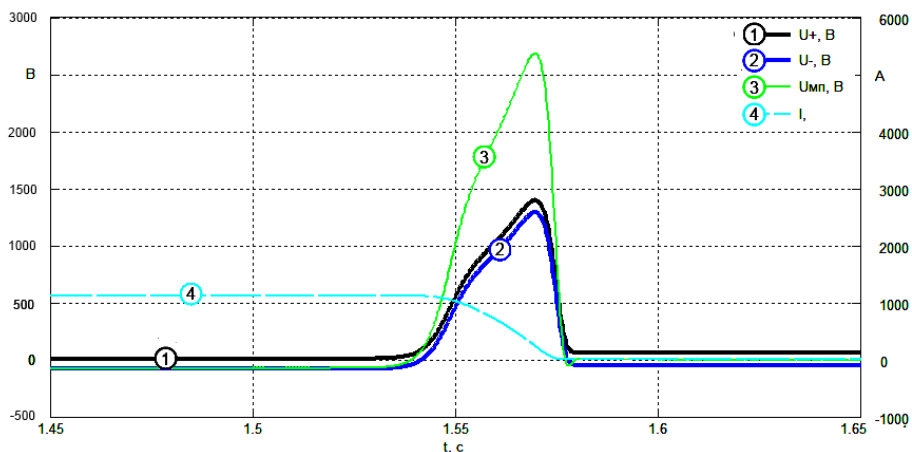


Рис. 6. Осциллограммы напряжения полюсов сети СОПТ относительно земли, межполюсного напряжения и тока соленоида без использования устройств защиты от перенапряжений

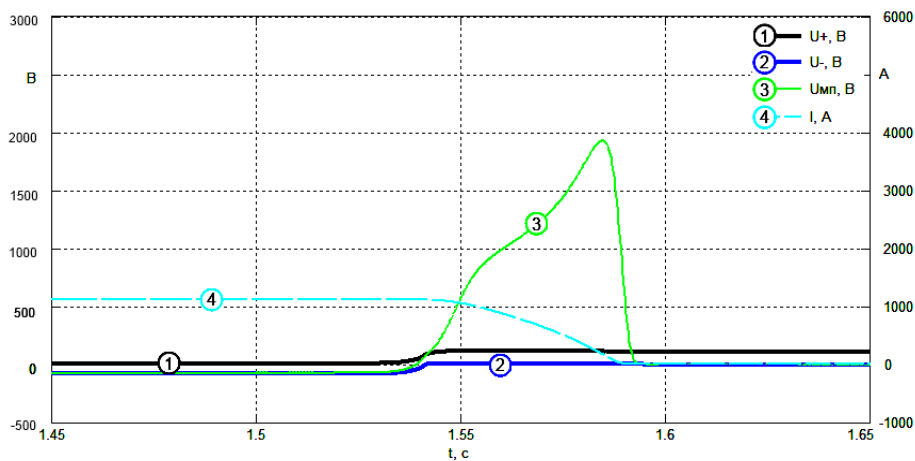


Рис. 7. Осциллограммы напряжения полюсов относительно земли, межполюсного напряжения и тока соленоида при использовании диодной защиты от перенапряжений

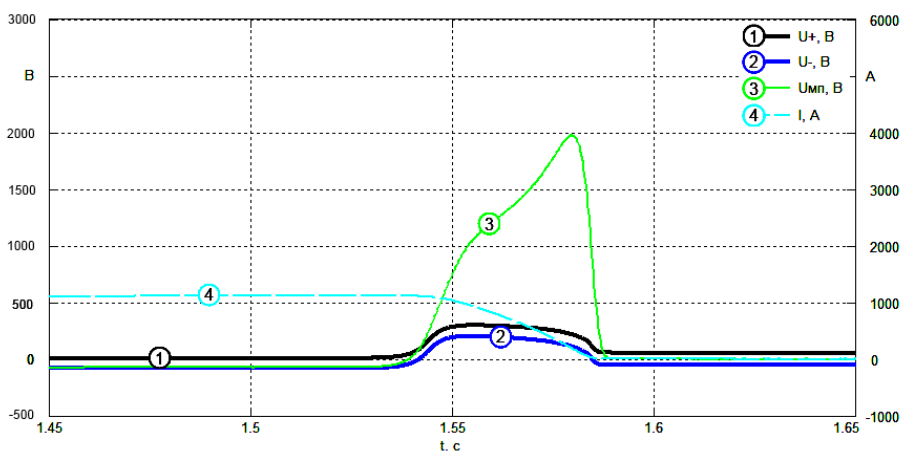


Рис. 8. Осциллограммы напряжения полюсов относительно земли, межполюсного напряжения и тока соленоида при использовании варисторов

Диодная защита ограничивает напряжение полюсов сети СОПТ относительно земли на уровне напряжения АБ. При использовании варисторов напряжения на полюсах в три раза больше. Для изоляции это является допустимым, но такие импульсы перенапряжений могут вызвать ложное срабатывание МПРЗА [10]. На рис. 8 приведены рассеиваемые диодом и варистором мощности в процессе режекции перенапряжения.

Благодаря тому, что диоды пропускают ток коммутационного импульса в открытом состоянии, напряжение на них не превысило нескольких вольт. Напряжения на варисторах при режекции перенапряжения оказалось в сотни раз больше, равно как и рассеиваемая ими мощность. В рассматриваемом случае, надежность УЗИП оказывается ниже надежности диодов. Дополнительным недостатком варисторов является деградация их защитных характеристик в процессе эксплуатации. Необходимо контролировать ток через варистор при номинальном напряжении и, при его возрастании, своевременно заменять. Варисторы в УЗИП ограничивающего типа постоянно находятся под напряжением, поэтому, срок их службы намного меньше, чем у УЗИП комбинированно типа. У последних напряжение к варистору прикладывается только после пробоя разрядника, что позволяет увеличить срок службы, но ухудшает защитную характеристику, т.к. увеличивается напряжение среза.

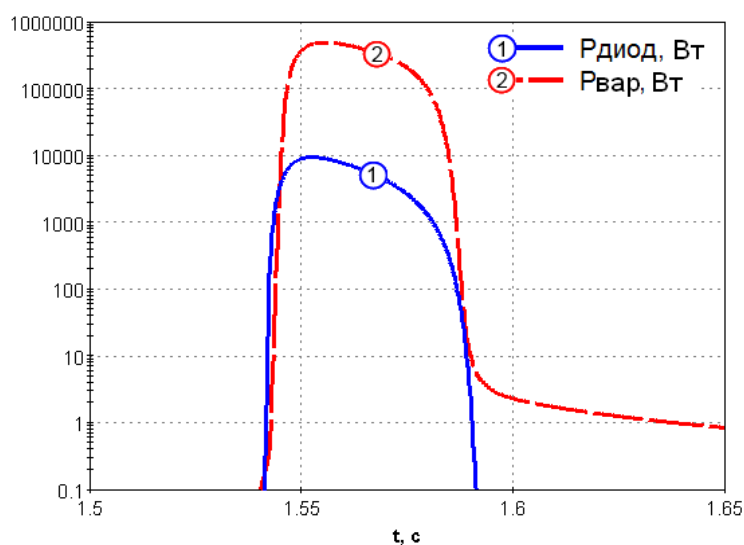


Рис. 9. Мощность, выделяемая на защитных устройствах в процессе ограничения перенапряжения

В щите постоянного тока (ЩПТ) для защиты от перенапряжений рекомендовано использовать силовые диоды, подключаемые через плавкие предохранители между полюсами сети постоянного тока и землей. Величина тока утечки устройства защиты от перенапряжений в течение срока эксплуатации объекта не должна превышать допустимое значение по сопротивлению полюсов сети относительно земли. Необходимо обеспечить контроль за исправностью устройства защиты от перенапряжений.

Выбор диода для цели защиты от перенапряжений в СОПТ производится по максимально допустимому прямому току, ударному прямому току, постоянному обратному напряжению, повторяющемуся импульсному напряжению и интегралу Джоуля.

В случае использования диода в качестве ограничителя перенапряжения в СОПТ, прямой ток через него проходит исключительно в виде одиночного или серии повторяющихся импульсов, соответственно, при таком режиме работы нет необходимости в использовании охладителя и тем более систем принудительного охлаждения.

Ударный прямой ток I_{FSM} – это максимально допустимое мгновенное значение амплитуды одиночного импульса прямого тока полусинусоидальной формы длительностью 10 мс, причем по окончании импульса тока обратное напряжение к диоду не прикладывается.

В процессе режекции перенапряжений ток, протекающий через диод более 10 мс не должен превышать значение ударного тока:

$$I_{VD} < I_{FMS\ 10ms}, \quad (5)$$

При выборе диодов также необходимо рассматривать основные параметры обратной вольтамперной характеристики.

Постоянное обратное напряжение U_R не должно превышать 60 % от напряжения класса:

$$U_R < 0,6 U_{RRM}, \quad (6)$$

Для напряжения сети $U_{сети} = 220$ В, повторяющееся импульсное напряжение $U_{RRM} > 220 / 0,6 = 367$ В.

Неповторяющееся импульсное напряжение U_{RSM} - наибольшее допустимое мгновенное значение напряжения, прикладываемого к диоду однократно или с частотой ниже рабочей. Для надежной работы диодов рекомендуется прикладывать рабочее импульсное напряжение U_{RWM} не более 80 % от напряжения класса ($U_{RWM} < 0,8 U_{RRM}$). При возможных импульсах перенапряжений с амплитудой 2,7 кВ на каждый полюс придется амплитуда порядка 1,4 кВ, что дает значение U_{RRM} порядка $1,4 / 0,8 = 1,75$ кВ. Таким образом, рекомендовано выбирать диоды с классом по обратному восстанавливаемому напряжению не ниже 18.

Интеграл Джоуля тока, проходящего через силовые диоды в процессе режекции перенапряжений не должен превышать допустимого интеграла Джоуля диодов (защитного показателя):

$$\int i^2 dt < \int i_{VD}^2 dt. \quad (7)$$

Согласно результатам моделирования интеграл Джоуля может достигать $0,15 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$. Такому значению защитного показателя соответствуют диоды со средним прямым током не ниже 200 А.

В СОПТ рекомендованы следующие марки выпрямительных диодов, предназначенных для применения в электротехнических и радиоэлектронных устройствах в цепях постоянного и переменного тока частотой до 500 Гц: Д161-200, Д161-250, Д161-320. Преимуществами отечественных низкочастотных диодов серий Д1ХХ является хорошо отработанная технология, достаточная надежность и сравнительная дешевизна. Автором был проведен анализ зарубежных аналогов, в результате чего были найдены схожие по характеристикам диоды: SKN 240/18 (SEMİKRON International GmbH, Германия), SW18PHN30 (Westcode semiconductors, Великобритания), R700_18_03 (Powerex, Франция), рекомендованные к установке в СОПТ.

Диоды должны быть защищены от сверхтоков быстродействующими плавкими предохранителями класса gR . Номинальный ток плавкого предохранителя не должен превышать значение среднего прямого тока диода:

$$I_{n_FU} \leq I_{FAV}. \quad (8)$$

Рабочие значения защитного показателя выбранного предохранителя должны быть ниже, чем у защищаемого полупроводника:

$$\int i_{FU}^2 dt < \int i_{VD}^2 dt. \quad (9)$$

Ниже приведена таблица соответствия указанных выше марок диодов и защищающих их плавких вставок по условию соответствия номинального тока и защитного показателя вставки характеристикам диода (табл. 2).

При выборе плавких вставок для защиты диодов также необходимо учитывать селективность их работы с головными предохранителями, установленными на ЩПТ

Таблица 2

Соответствие параметров диодов и защищающих их плавких вставок класса gR

Марка диода	I_{FAV}, A	I_{n_FU}, A	$\int i_{VD}^2 dt, \kappa A^2 \cdot c$	$\int i_{FU}^2 dt, \kappa A^2 \cdot c$
Д161-200	200	200	0,15	0,04
Д161-250	250	250	0,20	0,06
Д161-320	320	315	0,28	0,08
SKN 240/18	240	200	0,18	0,04
SW18PHN320	320	315	0,08	0,08
R700_18_03	300	250	0,20	0,06

Плавкие вставки должны входить в состав устройства предохранитель – разъединитель, сочетающего в себе функцию рубильника, для возможности выведения диодной защиты из работы с осуществлением видимого разрыва. В предохранителе-разъединителе также должна быть предусмотрена функция контроля срабатывания плавких вставок с передачей сигнала в системы управления.

Таким образом, в статье сформулированы рекомендации по выбору устройств защиты от перенапряжений в СОПТ. Рекомендовано в ЩПТ применять диодную защиту, вследствие большей её эффективности для режекции импульсов перенапряжений полюс - земля, а также возможных импульсов при отключении соленоидов включения высоковольтных выключателей. Даны рекомендации по выбору параметров и конструкции диодов и защиты их от сверхтоков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Matsumoto T., Kurosawa Y., Usui M., Yamashita K., Tanaka T. Experience of Numerical Protective Relays Operating in an Environment with High-Frequency Switching Surge in Japan // IEEE Transactions On Power Delivery. Vol. 21. No. 1. 2006.
2. Борисов Р. К. Невнимание к проблеме ЭМС может обернуться катастрофой // Новости электротехники. 2001. №6 (12).
3. Намитоков К.К., Ильина Н.А., Шкловский И.Г. Аппараты для защиты полупроводниковых устройств [Текст]: учеб. пособие / К.К. Намитоков, Н.А. Ильина, И.Г. Шкловский.— М.: ЭнергоАтомИздат, 1988. 280 с.
4. Cassie A.M. Arc rupture and circuit severity: a new theory. Proceedings of Conference Internationale des Grands reseaux Electriques a Haute Tension, Paris, France, 1932, pp. 1-14.
5. Mayr O., “Beitrage zur Theorie des Statischen und des Dynamischen Lichthogens”, Archiv fËur Elektrotechnik, vol. Band 37, no. Heft 12, pp. 588-608, 1943.
6. A.Wright, P.G. Newbery. Electric Fuses // IET Power and Energy series 49 // 3rd Edition. 2004. – 251 p.
7. Дьяков А.Ф., Максимов Б.К., Борисов Р.К., Кужекин И.П., Жуков А.В. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике. – М.: Энергоатомздат, 2003. 768 с.
8. Электромагнитная совместимость электрической части атомных электростанций [Текст]: монография / Э.В. Вершков, А.В. Калеников, Д.А. Козлов, И.П. Кужекин, С.Л. Кужеков, Б.К. Максимов, О.В. Сарылов, Л.В. Ярных. – М.: Знак, 2006. 280 с.
9. Гусев Ю.П., Тимонин И.А. Защита систем оперативного постоянного тока от коммутационных перенапряжений // Энергоэксперт. 2011, №6 (29). – с. 44-48.
10. Гусев Ю.П., Монаков Ю.В., Чо Г.Ч. Предотвращение срабатываний дискретных входов микропроцессорных релейных защит при замыканиях на землю в системах оперативного постоянного тока // Энергоэксперт. 2011, № 5.

REFERENCES

1. Matsumoto T., Kurosawa Y., Usui M., Yamashita K., Tanaka T. Experience of Numerical Protective Relays Operating in an Environment with High-Frequency Switching Surge in Japan // IEEE Transactions On Power Delivery. Vol. 21. No. 1. 2006.
2. Borisov R. K. Nevnimanie k probleme JeMS mozhet obrnut'sja katastrofoj // Novosti jelektrotehniki. 2001. №6 (12).
3. Namitokov K.K., П'ina N.A., Shklovskij I.G. Apparaty dlja zashhity poluprovodnikovyh ustrojstv [Tekst]: ucheb. posobie / K.K. Namitokov, N.A. П'ina, I.G. Shklovskij.— М.: JenergoAtomIzdat, 1988. 280 s.
4. Cassie A.M. Arc rupture and circuit severity: a new theory. Proceedings of Conference Internationale des Grands reseaux Electriques a Haute Tension, Paris, France, 1932, pp. 1-14.
5. Mayr O., “Beitrage zur Theorie des Statischen und des Dynamischen Lichthogens”, Archiv fJour Elektrotechnik, vol. Band 37, no. Heft 12, pp. 588-608, 1943.
6. A.Wright, P.G. Newbery. Electric Fuses // IET Power and Energy series 49 // 3rd Edition. 2004. – 251 p.
7. D'jakov A.F., Maksimov B.K., Borisov R.K., Kuzhekin I.P., Zhukov A.V. Jelektromagnitnaja sovместimost' v jelektrojenergetike. – М.: Jenergoatomzdat, 2003. 768 s.
8. Jelektromagnitnaja sovместimost' jelektricheskoy chasti atomnyh jelektrostancij [Tekst]: monografija / Je.V. Vershkov, A.V. Kalenikov, D.A. Kozlov, I.P. Kuzhekin, S.L. Kuzhekov, B.K. Maksimov, O.V. Sarylov, L.V. Jarnyh. – М.: Znak, 2006. 280 s.
9. Gusev Ju.P., Timonin I.A. Zashhita sistem operativnogo postojannogo toka ot kommutacionnyh perenaprjazhenij // Jenergojekspt. 2011, №6 (29). – с. 44-48.
10. Gusev Ju.P., Monakov Ju.V., Cho G.Ch. Predotvrashhenie srbatyvanij diskretnyh vhodov mikroprocessornyh relejnyh zashhit pri замыkanijah na zemlju v sistemah operativnogo postojannogo toka // Jenergojekspt. 2011, № 5.