



ПРИМЕНЕНИЕ ЭВП И ГРП В АППАРАТУРЕ

УДК 621.316.925:621.385.6

В. И. Гуревич, П. И. Савченко

Высокоэффективная защита мощных электровакуумных приборов

Рассмотрены системы защиты высоковольтных электровакуумных приборов (ЭВП) от перегрузок по току. Предложена высокоэффективная защита на основе нового вида электрических аппаратов — геркотронов. Приведены результаты исследования геркотронов с регулируемым порогом срабатывания.

Мощные электровакуумные СВЧ-приборы являются весьма ответственными и дорогостоящими элементами радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), в связи с чем вопрос повышения эффективности их защиты от аварийных режимов имеет первостепенное значение.

Внутренние пробой в ЭВП как аварийные, так и «штатные», представляют опасность из-за возникающего в них сильноточного разряда, а также вызывают перегрузку выпрямителей источников питания. Поэтому в цепи питания ЭВП обязательно предусматривается максимальная токовая защита.

Известные виды токовых защит ЭВП условно можно разделить на три группы:

1. Защита на основе реле тока, включенных в низковольтную цепь источника питания и управляющих работой электромагнитного контактора. Такая защита отличается простотой и невысокой стоимостью, однако ее быстродействие оказывается явно недостаточным для эффективной защиты ЭВП [1]. Кроме того, эта защита не позволяет отличить внутренние пробой в ЭВП от других видов повреждений в системе питания; на нее также влияют внешние факторы: ток срабатывания зависит от состояния (сопротивления) цепей шин заземления и др.

2. Оптоэлектронная система защиты, контролирующая ток непосредственно в высоковольтной цепи ЭВП. Типичная структура такой системы [2]: датчик тока — формирователь — оптический передатчик на лазерном светодиоде — оптоволоконный высоковольтный световод — оптический приемник на фотодиоде — электронный усилитель — электромагнитное или электронное реле — отключающий аппарат. Стоимость такой системы довольно высока [3]. Надежность подобных систем часто оказывается неудовлетворительной из-за недостаточной надежности светоизлучающего элемента, мест сочленения оптических элементов, непостоянства оптических свойств световодов при воздействии неблагоприятных факторов внешней среды (колебаний температуры, пыли, морского тумана, транспортной тряски, ударов и вибраций). Все это требует существенного усложнения системы [4].

3. Защита на основе высоковольтных импульсных трансформаторов, включенных в цепь ЭВП. Из-за малой длительности сигнала на выходе импульсного трансформатора и малой его амплитуды приходится усложнять защиту, вводя дополнительные полупроводниковые и электромагнитные релейные элементы с RC-цепями [1]. Общее время срабатывания защиты [1] равно сумме времен срабатывания четырех последовательно действующих элементов — тиристора (~0,01 мс), зарядной RC-цепи (6 мс), промежуточного электромагнитного реле типа РЭС-22 (15 мс), отключающего контактора (~50 мс) — и соизмеримо с временем срабатывания токовой защиты по низковольтной цепи питания. Кроме того, при использовании выпрямителей с большим внутренним сопротивлением и соответственно малой кратностью тока короткого замыкания, а также небольшой скоростью его нарастания применять импульсные трансформаторы сложно. С другой стороны, при протекании в контролируемой цепи серии коротких (единицы микросекунд) импульсов рабочего тока большой амплитуды, обусловленного заданным режимом модуляции ЭВП, возникает опасность ложного срабатывания защиты вследствие намагничивания сердечника импульсного трансформатора.

Существенно повысить эффективность защиты ЭВП можно с помощью геркотронов — нового вида электрических аппаратов [5], впервые разработанных в СССР. Геркотроны по принципу действия представляют собой быстродействующие (1—3 мс) герконовые реле с высоковольтной изоляцией между входом (обмоткой возбуждения) и выходом (герконом). В настоящее время разработаны геркотроны второго поколения с регулируемым порогом срабатывания (рис. 1), позволяющим

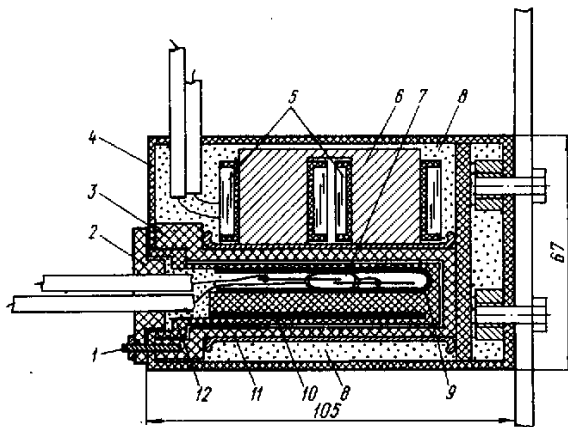


Рис. 1. Устройство геркотрона с регулируемым порогом срабатывания на рабочее напряжение 35 кВ:

1 — винт-фиксатор; 2 — лимб со шкалой; 3 — неподвижный изолятор; 4 — диэлектрический корпус; 5 — обмотка возбуждения (на двух каркасах); 6 — сердечник обмотки; 7 — геркон; 8 — эпоксидный компаунд; 9, 11 — алюминиевые экраны; 10 — ферромагнитная пластинка-экран; 12 — подвижный изолятор

компенсировать технологические разбросы параметров ЭВП и элементов блока питания и точно настраивать защиту в конкретной РЭА. Приборы такой конструкции рассчитаны на рабочее напряжение до 35 кВ и номинальный ток срабатывания от 0,005 до 10 А. Разброс порога срабатывания относительно зафиксированного уровня не превышает $\pm 0,3\%$. Регулирование порога срабатывания в предлагаемой конструкции обеспечивается поворотом подвижного изолятора посредством лимба на угол от 0 до 180°. При этом геркон плавно удаляется от полюсов сердечника обмотки возбуждения, а его место занимает ферромагнитный экран (рис. 2), что приводит к уменьшению чувствительности устройства. На рис. 2 заштрихованная зона изменения тока срабатывания обусловлена статистическим разбросом магнитодвижущей силы (м.д.с.) срабатывания герконов. К сожалению, определенную сложность при разработке подобных устройств создает большой разброс значений м.д.с. срабатывания герконов промышленных типов, что требует использования вероятностных методов оценки параметров срабатывания.

Для герконов, используемых в данной конструкции, выполнен расчет вероятностных ха-

рактеристик м.д.с. срабатывания. Чтобы проверить гипотезу о нормальном законе распределения значений м.д.с. срабатывания, применялся критерий согласно Шапиро—Уилка [6] как наиболее мощный при ограниченном объеме выборки.

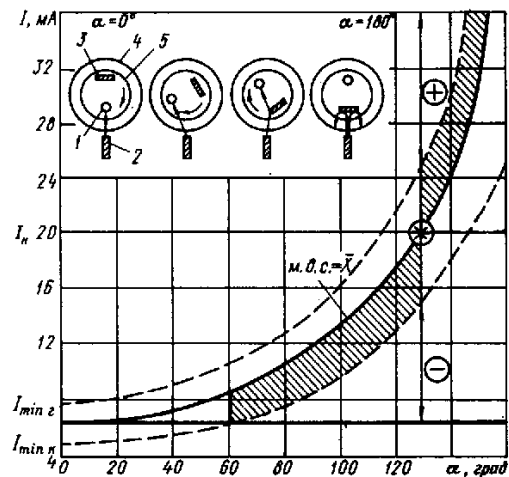


Рис. 2. Схема регулирования порога срабатывания и регулировочная характеристика геркотрона (для номинального значения тока I_n показан гарантируемый диапазон регулирования порога срабатывания «+» и «-»):

1 — геркон; 2 — полюс сердечника; 3 — ферромагнитный экран; 4 — неподвижный изолятор; 5 — подвижный изолятор

Исходные данные представлены в табл. 1. Результаты расчета, приведенные в табл. 2 подтверждают соответствие эмпирического распределения нормальному закону. Вычисление статистических характеристик м.д.с. срабатывания герконов проводилось в доверительном интервале $\pm 3\sigma$. Диапазон изменения м.д.с. срабатывания $I_{срб}$ относительно номинального значения составляет

$$I_{срб} = I_n^{+22\%}_{-28\%}$$

Таблица 1

Исходные данные

Вариационный ряд измеренных м.д.с. срабатывания герконов типа МКС-27103Б, А					
<i>i</i>	м.д.с.	<i>i</i>	м.д.с.	<i>i</i>	м.д.с.
1	80,92	11	74,80	21	70,04
2	79,90	12	74,12	22	69,70
3	78,20	13	73,78	23	69,70
4	77,52	14	73,78	24	69,36
5	77,18	15	73,44	25	69,02
6	76,84	16	73,10	26	68,68
7	76,84	17	72,42	27	66,30
8	76,50	18	72,08	28	62,90
9	76,50	19	71,06	29	60,52
10	76,16	20	70,72	30	59,84

Таблица 2

Результаты расчета

Наименование расчетного параметра	Расчетная формула	Результат расчета
Коэффициенты статистики критерия	$S^2 = \sum_{i=1}^n X_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n X_i \right)^2$	794,0
	$b = \sum_{i=1}^k a_{n-i+1} (X_{n-i+1} - X_i)$	27,42
Критерий Шапиро—Уилка	где $k = n/2$; a — табличные значения $W = b^2/S^2$	0,947
Принятая доверительная вероятность	α	0,95
Критическое значение критерия	W_α	0,927
Условие соответствия распределения нормальному закону	$W > W_\alpha$	0,947; 0,927

Исследование геркотрона предлагаемой конструкции позволило установить следующее (см. рис. 2):

1. В рассматриваемой конструкции может быть обеспечено регулирование порога срабатывания в пределах $\pm 50\%$ от номинального тока срабатывания I_n .

2. Для обеспечения такого диапазона регулирования значение номинального тока срабатывания должно быть выбрано с трехкратным запасом относительно минимального тока, обеспечиваемого данной конструкцией $I_{\min k}$, т. е. $I_n \approx 3I_{\min k}$.

3. Гарантируемое значение минимального тока срабатывания $I_{\min г}$ должно быть примерно на 30% больше значения $I_{\min k}$.

4. Гарантируемая эффективная зона регулирования порога срабатывания обеспечивается при повороте лимба на угол не менее 85° (от 60 до 149°).

5. Верхняя граница тока срабатывания устройства определяется практически допустимой плотностью тока для обмоточного провода и, в принципе, может быть значительно расширена за счет применения термостойкого провода, например марки ПНЭТ-имид.

Геркотроны хорошо сочетаются с бесконтактными коммутаторными устройствами [5], что позволяет в полной мере реализовывать их достоинства (рис. 3).

Схема работает следующим образом. В нормальном режиме при замкнутых контактах К протекающий по обмотке геркотрона Е рабочий ток ЭВП создает магнитное поле, не способное вызвать срабатывание геркона. Кратковременные броски рабочего тока, обусловленные режимом модуляции ЭВП, не способны вызвать срабатывание геркона, так как их дли-

тельность на 2—3 порядка меньше времени, необходимого для срабатывания геркона. При этом цепи управления тиристорных бесконтактных ключей V1—V3 замкнуты, тиристоры открыты и напряжение на обмотке реле К1 близко к нулю.

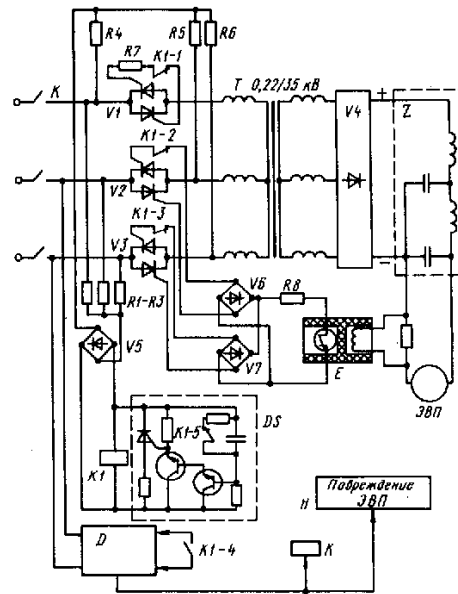


Рис. 3. Принципиальная схема устройства защиты мощного ЭВП на основе геркотрона с тиристорным ключом

При возникновении частичных пробоев в ЭВП возрастает ток в цепи обмотки геркотрона Е, геркон срабатывает (размыкается), разрывая через диодные мосты V6 и V7 цепи управления тиристорных ключей V2 и V3. При первом же прохождении синусоидального переменного тока через нулевое значение тиристоры ключей V2 и V3 запираются, обесточивая первичную обмотку трансформатора Т.

Таким образом, даже в самом неблагоприятном случае максимальное время полного отключения питания не превышает длительности одного полупериода. После этого ток в цепи ЭВП начинает плавно спадать (за счет энергии реактивных элементов дросселя Z), предотвращая необратимое повреждение ЭВП и элементов источника питания. После запираания тиристорных ключей V2 и V3 в нулевой точке «звезды», образованной резисторами R4—R6, возникает фазное напряжение, а в нулевой точке второй «звезды» R1—R3 оно по-прежнему равно нулю. Разность этих напряжений вызывает срабатывание промежуточного электромагнитного реле К1, контакты К1—1 ... К1—3 которого производят дополнительный разрыв цепей управления тиристорных ключей, предотвращая повторное включение питания после разрядки элементов фильтра Z и возвращения геркона в исходное состояние. Одновременно замыкается контакт К1—4 этого реле, посылая входной импульс на счетчик

срабатываний D , и размыкается контакт $K1-5$, дешунтирующий конденсатор времязадающей цепи реле времени DS . Через время $\tau = RC$, выбранное с таким расчетом, чтобы пробитый промежуток в ЭВП успел полностью восстановить свою электрическую прочность (порядка 0,5 с), тиристор реле времени DS отпирается, шунтируя обмотку промежуточного реле $K1$. Реле $K1$ выключается, возвращая контакты $K1-1$, $K1-2$ и $K1-3$ в исходное замкнутое состояние. При этом тиристоры ключей $V1-V3$ отпираются, вновь подавая питание на трансформатор, фильтр и ЭВП. В нулевой точке «звезды», образованной резисторами $R4-R6$, напряжение исчезает. Замкнувшийся контакт $K1-5$ выключившегося реле $K1$ разряжает времязадающую емкость, подготавливая схему к следующему включению. Схема возвращается в рабочее состояние за исключением счетчика, запомнившего поступление одного импульса.

Если повреждение в ЭВП не самоустранилось за время отключенного состояния, повторно срабатывает защита по аналогичной схеме. При этом в счетчик импульсов посылается второй сигнал. После накопления заданного количества импульсов с выхода счетчика поступает сигнал на выключение электромагнитного контактора и включение транспаранта «Повреждение ЭВП».

Помимо высокого быстродействия и надежности в схеме отсутствуют перенапряжения при отключении первичной обмотки силового

трансформатора (разрыв цепи происходит при нулевом значении синусоидального тока) и существенно уменьшается мощность отключающего электромагнитного контактора K , который не отключает ток короткого замыкания. Стендовые испытания подтвердили высокую эффективность схемы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Силкин Н. П., Смирнов А. В. Повышение эффективности релейной защиты электронных приборов. — Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ, 1975, вып. 10, с. 91—93.
2. Пат. 2833606 (ФРГ). Vorrichtung zur Überwachung der Sperrfähigkeit von Dioden [Siemens AG]/Bardahl N.
3. Silverman K. B. Low cost optical isolation systems. — Proc. 8th Symp. on Eng. Probl. of Fusion Research., 1979, v. 4, p. 1917—1921.
4. Смирнов Г. В. Лазерная система управления аппаратами высокого напряжения с избыточным излучением. — Электротехническая промышленность. Сер. Аппараты высокого напряжения, трансформаторы, силовые конденсаторы, 1976, вып. 8(64), с. 11—13.
5. Гуревич В. И., Савченко П. И. Геркotrony — новые устройства дистанционного управления высокопотенциальными цепями. — Электронная техника. Сер. 4. Электровакуумные и газоразрядные приборы, 1984, вып. 4(103), с. 57—59.
6. Хан Г., Шапиро С. Статистические модели в инженерных задачах. Пер. с англ./Под ред. В. В. Налимова. — М.: Мир, 1969, — 395 с.

Статья поступила после доработки в апреле 1986 г.