

УДК 681.5:621.391.072.9

*В. П. Герасимов, В. И. Гуревич, А. Г. Нечаев,  
С. В. Промышляев, В. А. Скосарев*

**НОВЫЕ СХЕМНЫЕ РЕШЕНИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ  
ОБЪЕКТАМИ ПОД ВЫСОКИМ ПОТЕНЦИАЛОМ  
С ПРИМЕНЕНИЕМ ГЕРКОТРОНОВ**

Во многих электрофизических установках (ЭФУ), например в форинжекторах синхротронов, инжекторах нейтральных атомов дополнительного нагрева плазмы в токамаках, используются электрические

и электронные устройства, размещаемые на так называемых высоковольтных площадках под постоянным или импульсным потенциалом в десятки — сотни киловольт относительно земли.

Для управления этими устройствами (в дальнейшем — объекты под высоким потенциалом) необходимо организовать обмен командами и сообщениями между аппаратурой управления, находящейся под потенциалом земли, и объектами управления, находящимися на высоковольтных площадках. Ниже приводится классификация команд по назначению и направлению передачи; знаки  $\uparrow$  и  $\downarrow$  указывают соответственно на передачу с аппаратуры управления на объект и наоборот.

А. Команды «Включить» и «Выключить» ( $\uparrow$ ).

Б. Статусные одноразрядные сообщения ( $\downarrow$ ).

В. Команды запуска (импульсы синхронизации) «быстрых» объектов, например систем импульсного питания ( $\uparrow$ ).

Г. Аналоговые сигналы или цифровые сообщения для управления выходными параметрами объектов под высоким потенциалом (регулирование уставок) ( $\uparrow$ ).

Д. Аналоговые сигналы или цифровые сообщения, несущие информацию о выходных параметрах объектов под высоким потенциалом ( $\downarrow$ ).

Организация указанных видов обмена командами и сообщениями является функцией систем телемеханического обеспечения (СТМО) соответствующей ЭФУ. Выбор схмотехники СТМО зависит от конкретного содержания каждого вида сообщений, требуемого числа соответствующих информационных каналов и реальных условий эксплуатации.

Рассмотрим эти вопросы на примере часто встречающейся задачи — организации управления и контроля систем низковольтного питания источников частиц в высоковольтных инжекторах, а именно в инжекторах дополнительного нагрева в токамаке T-15.

Приведем конкретный перечень команд и сообщений для названной системы в соответствии с предложенной классификацией.

#### **Команды группы А ( $\uparrow$ ).**

1. Включить накал.
2. Выключить накал.
3. Включить силовое питание дуги.
4. Выключить силовое питание дуги.
5. Деблокировать сработавшие устройства защиты.
6. Включить управление накалом.
7. Включить управление дугой.
8. Включить управление клапаном.

Команды 1—5 передаются импульсами фиксированной длительности 10—50 мс, а команды 6—8 — сигналами состояний длительностью от 10 мс до 2 с.

#### **Сообщения группы Б ( $\downarrow$ ).**

1. Предупредительная сигнализация.
2. Аварийное отключение.
3. Готовность к рабочему режиму.
4. Готовность к импульсу.

Сообщения передаются сигналами состояний.

**Команда группы В ( $\uparrow$ ).** «Запустить модулятор дуги». Команда выполняется передачей по двум отдельным линиям связи двух сдвинутых относительно друг друга импульсов микросекундной длительности.

#### **Команды группы Г ( $\uparrow$ ).**

1. Изменить уставку напряжения накала-1.
2. Изменить уставку напряжения накала-2.
3. Изменить уставку тока дуги.

Команды выполняются передачей цифрового кода с разрядностью, соответствующей допустимой дискретности регулирования уставки на исполнительное цифро-аналоговое устройство.

**Сообщения группы Д(†).** Три сообщения этой группы выполняются путем линейной аналоговой передачи импульсных сигналов микро- и миллисекундной длительности с допустимой погрешностью  $\pm 5\%$ , а остальные пять — путем кодирования исходных аналоговых сигналов, имеющих частотный спектр 0—10 кГц, с допустимой погрешностью  $\pm 0,2\%$ .

Проект СТМО системы низковольтного питания установки Т-15 выполнен на базе современной микросхемотехники и оптоэлектроники, в частности с применением оптоэлектронных линий связи, имеющих большую электрическую прочность [1]. Со времени разработки упомянутого проекта существенно расширилась компонентная база оптоэлектроники за счет освоения промышленного выпуска квантово-электронных модулей (КЭМ) и оптических кабелей, а также комплектных оптоэлектронных линий связи для передачи цифровых и аналоговых сигналов [2, 3].

При проектировании СТМО новых ЭФУ целесообразно использовать промышленные линии связи для организации обмена командами группы А и сообщениями группы Б и 4—8 группы Д; модули КЭМ в комплекте с оптическими кабелями следует применять для передачи команды (импульсов запуска) группы В. Однако такое решение при всей его кажущейся очевидности страдает принципиальными недостатками, главные из которых:

ухудшение свойств оптических кабелей в условиях ионизирующих излучений, имеющих место при работе инжекторов;

вероятность выхода из строя интегральных микросхем и полупроводниковых приборов, составляющих элементную базу СТМО (включая промышленные линии связи), при пробоях с высоковольтной площадки на землю;

вероятность сбоев спусковых схемных элементов микросхемотехники, имеющих низкие уровни срабатывания, от воздействия импульсных помех со стороны силового оборудования ЭФУ; это в особенности относится к спусковым элементам, расположенным на высоковольтной площадке, например регистрам памяти, так как отсутствует физическая земля экранов электронных устройств и кабелей.

Вследствие этих причин было принято решение отказаться от применения цифроаналоговых преобразователей (ЦАП) для регулирования уставок (см. команды группы Г) в СТМО инжекторов Т-15. Альтернативным решением явилось применение на высоковольтных площадках многооборотных потенциометров, движки которых приводятся во вращение электроприводом через изолирующие валы. Понятно, что такое решение не является оптимальным из-за его сложности. Помехозащита при передаче команд группы А и сообщений группы Б обеспечивается применением в качестве элементов памяти электромеханических реле, не обладающих высоким быстродействием и, следовательно, нечувствительных к кратковременным импульсным помехам.

Однако сочетание элементов оптоэлектроники (линии связи) с электромеханическими компонентами требует дополнительных устройств согласования и не оптимально с точки зрения простоты и стоимости аппаратуры. Следует также заметить, что наличие одиночных сбоев в информационной части СТМО (эпизодические искажения сообщений группы Д) не является отказом, поскольку отдельные ошибочные результаты измерений могут быть обнаружены и отброшены при их обработке или подавлены аппаратным путем.

Возможность оптимального построения СТМО высоковольтных объектов инжекторов открывается с появлением нового электромеханического прибора — так называемого геркотрона.

Геркотрон [4] представляет собой простой электромагнитный аппарат, содержащий обмотку возбуждения и геркон, размещенный в зоне ее магнитного влияния, но отделенный от нее высоковольтной изоляцией, а также набор экранов для выравнивания градиента элект-

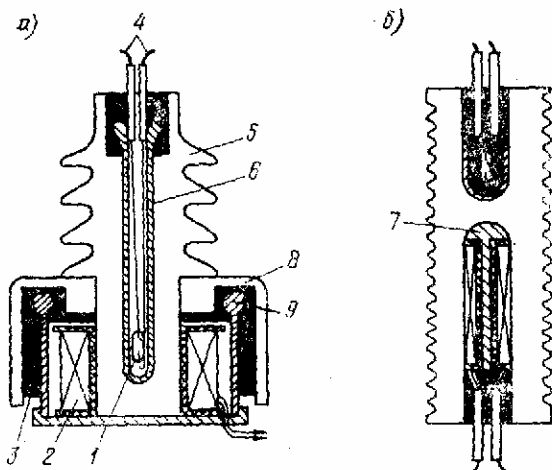


Рис. 1. Конструкции геркотронов коаксиального (а) и продольного (б) типа

1 — геркон; 2 — обмотка возбуждения; 3 — эпоксидный компаунд; 4 — выводы в высоковольтной изоляции; 5 — изолятор; 6 — антикоронирующая насадка; 7 — сердечник обмотки; 8 — дополнительный изолятор; 9 — ферромагнитный экран

рического поля и защиты от внешних электромагнитных полей (рис. 1).

В настоящее время разработаны различные типы этих аппаратов на рабочие напряжения до 100 кВ с использованием полимерной изоляции (полиэтилена высокой плотности) (рис. 2). Верхней границы рабоче-

го напряжения у этих аппаратов пока не установлено, однако можно ожидать, что они окажутся работоспособными и при гораздо более высоких напряжениях, а изолятором может служить вакуумная камера [5] (рис. 3). В этой конструкции все элементы вынесены из зоны вакуума, что исключает ухудшение его изоляционных свойств. Наряду с высокими напряжениями развязки цепей коммутации и управления геркотроны имеют достаточно малое время срабатывания (единицы миллисекунд) и приемлемые токи управления (минимальный — 5 мА). Толстостенный стальной экран исключает возможность ошибочного срабатывания контактов во внешних магнитных полях, например в полях рассеяния магнитных элементов ЭФУ.

Геркотроны на рабочее напряжение 30 кВ подготовлены к серийному производству, они снабжены переключающим герконом типа КЭМ-3 и будут выпускаться на токи срабатывания 5 мА; 150 мА; 0,5 А; 1 А. Эти геркотроны имеют регулируемый в пределах  $\pm 40\%$  порог срабатывания; их масса составляет 0,6 кг, а габариты —  $\varnothing 60 \times 130$  мм.

В настоящее время в НИИЭФА совместно с организацией — разработчиком геркотронов подготавливается рабочая конструкторская документация на опытные образцы геркотронов на рабочее напряжение 100 кВ, предусмотрено также изготовление и испытание опытных образцов этих приборов.

Следует также обратить внимание на возможность реализации геркотронов,

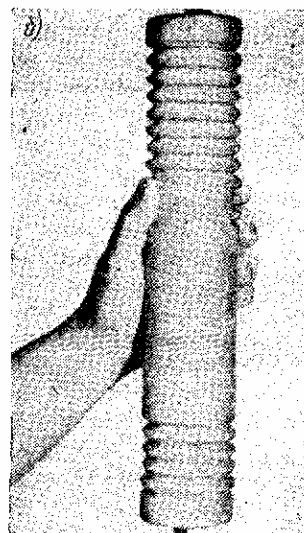
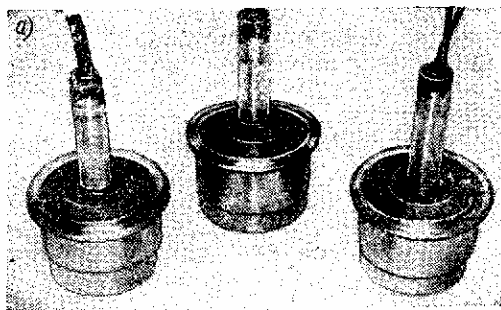
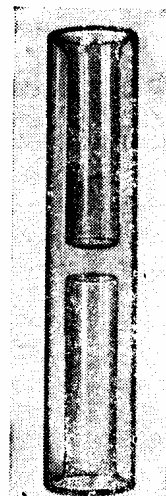


Рис. 2. Внешний вид геркотронов: а — коаксиального типа (К-типа) на рабочее напряжение до 20 кВ; б — продольного типа (II-типа) на рабочее напряжение 100 кВ

Рис. 3. Внешний вид вакуумной камеры для геркотрона на рабочее напряжение 100 кВ



содержащих постоянные магниты вблизи герконов, т. е. способных запоминать короткие импульсы управления.

При проектировании СТМО инжекторов, подобных инжекторам установки Т-15, целесообразно воспользоваться геркотронами прежде всего для передачи команд группы А и сообщений группы Б. Применительно к инжекторам Т-15 для этого потребовалось бы всего 12 геркотронов, что вполне приемлемо. Не требуется никаких дополнительных элементов в схеме соответствующей части СТМО, состоящей из 8 отдельных геркотронов с обмоткой управления под потенциалом земли и 4 таких приборов с обмоткой управления под высоким потенциалом.

Применение геркотронов позволяет решить задачу передачи команд группы Г (регулирование уставок). В самом деле, могут быть построены ЦАП с высоковольтной развязкой аналогового выхода и цифрового входа на базе матрицы резисторов  $R-2R$ , управление релейными двухпозиционными ключами разрядов в которой осуществлялось бы через геркотроны. При дискретности регулирования уставок примерно 1% число геркотронов в ЦАП будет равно 8, а в аппаратуре регулирования установок СТМО инжекторов — 24.

По-видимому, некоторое увеличение габаритов аппаратуры управления не является слишком дорогой ценой за высокую помехозащищенность, простоту и надежность аппаратуры передачи ответственных команд управления.

На этом возможности применения геркотронов в цепях управления системой низковольтного питания источников инжекторов исчерпываются, однако с их использованием оказываются защищенными от помех основные цепи управления, определяющие безаварийность работы инжекторов. Следует заметить также, что именно эти цепи обязательно содержат элементы памяти команд, размещенные под высоким потенциалом.

Понятно, что импульсы запуска по-прежнему будут транспортироваться средстами оптоэлектроники, обеспечивающими помехозащищенность линии; элементы же памяти или другие спусковые устройства здесь не используются.

Таким образом, предоставляется возможность существенно упростить систему телемеханического обеспечения инжекторов и повысить ее надежность, а кроме того, существенно уменьшить трудоемкость изготовления, наладки и эксплуатации системы управления.

В заключение следует указать другие области применения геркотронов в ЭФУ.

Геркотроны на соответствующее напряжение могут использоваться в высоковольтных делителях напряжения, выполненных по Н-схеме, для переключения диапазонов измерений, а также для управления секциями электромеханических размыкателей индуктивных накопителей энергии и т. д.

Существенную помощь окажут геркотроны при организации термо- и тензоизмерений в сверхпроводящих обмотках токамаков или других ЭФУ. С их помощью можно оперативно отключать измерительную аппаратуру от датчиков, оказывающихся под высоким потенциалом при аварийном выводе тока из сверхпроводящих обмоток (понятно, что геркон в приборе должен быть на соответствующее напряжение). Уже имеется некоторый опыт применения герконов типа МКА-52141, кроме того, благодаря очень высокой стабильности уровней срабатывания геркотронов (разброс порога срабатывания относительно зафиксиро-

рованного уровня не превышает  $\pm 0,3\%$ ) они могут применяться в качестве датчиков систем допускового контроля под высоким потенциалом.

Из изложенного следует, что в руках разработчиков электрофизической аппаратуры ныне имеется простое и надежное средство управления объектами под высоким потенциалом, органически сочетающееся с обслуживанием силовым оборудованием; следует настоятельно рекомендовать использование этого средства в новых разработках.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Системы телемеханического обеспечения инжектора термоядерной установки Т-10М/ В. П. Герасимов, В. Ф. Комвна, И. В. Мозин, В. А. Скосарев. — В кн.: Доклады Всесоюзной конференции по инженерным проблемам термоядерных реакторов. — Л.: НИИЭФА, 1977, т. III, с. 319—323.
2. Мультиплексированная оптоволоконная цифровая система передачи данных (ЦСПД) «Электроника МС 4101». Инф. листок ВИМИ № 83-11-93, 1983.
3. Оптоволоконные системы сбора и распределения аналоговых данных «Электроника МС 8201, МС 8401». Инф. листок ВИМИ № 83-11-94, 1983.
4. В. И. Гуревич, П. И. Савченко. Геркотроны — новые аппараты дистанционного управления высокопотенциальными целями. — Электронная техника. Сер. электровакуумных и газоразрядных приборов, 1984, вып. 4, с. 6—7.
5. А. с. № 836704. Высоковольтные вакуумные реле/ Авт. изобрет. В. И. Гуревич; Оpubл. в Б. И., 1981, № 21.