

УДК 621.316.546

## Коммутация                      сильноточных                      электрических                      цепей в                      экстремальных                      условиях

**В. В. Кирик**

Институт электродинамики Національної академії наук України, Київ

*Надійшла до редакції 17.01.00*

---

Розглянуто основні характеристики рідиннометалевих контактів. Подано конструкцію рідинно-металевого комутаційного приладу, що забезпечує комутацію струмів до ста тисяч ампер в умовах підвищених температур незалежно від положення у просторі.

---

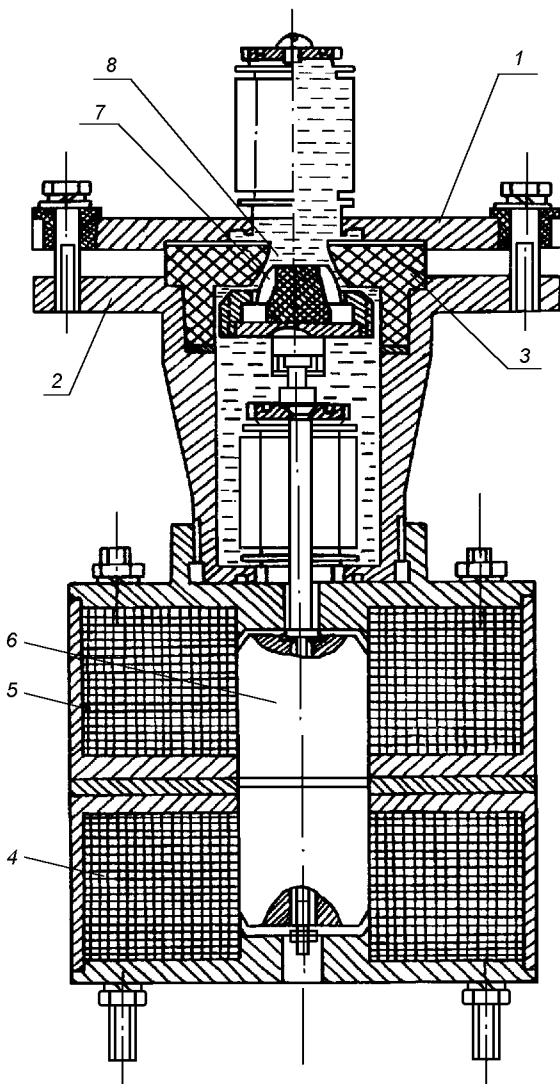
При проектировании орбитальной станции «Мир», которая в своем составе имела ядерную энергетическую установку, предполагалось использовать в качестве коммутационной и защитной электрической аппаратуры силовых цепей термоэмиссионного генератора жидкометаллические коммутационные устройства. Применение жидкого металла в качестве электрических контактных элементов было необходимо для исключения их «холодной сварки» в условиях невесомости и повышенных температур (до 600 °С), которая присуща твердометаллическим коммутационным аппаратам.

Жидкометаллические контакты (ЖМК) имеют малое и стабильное переходное сопротивление, которое состоит из сопротивления поверхностной пленки между твердым электродом и жидким металлом, а также сопротивления жидкого металла или образующихся интерметаллических сплавов и соединений. С точки зрения стабильности сопротивления выбирается такая контактная пара металлов, чтобы жидкий металл смачивал твердый. При этом воздух не может проникнуть в зону контакта, и в силу этого окисная пленка не может образовываться на твердой поверхности. Малое переходное сопротивление позволяет достичь в ЖМК плотностей тока, превышающих десятки и сотни ампер на квадратный миллиметр. В ЖМК нет необходимости в контактной нажатии. Они открывают возмож-

ность создания приводов с использованием для коммутации энергии самой разрываемой цепи. Свойство текучести жидкого металла позволяет избавиться механической вибрации, сваривания и залипания контактов. Температурные режимы ЖМК определяются свойствами используемых металлов. Необходимое превышение температуры жидкого металла над температурой его плавления определяется свойствами металла и конструкцией устройства. В ЖМК открывается возможность создания дополнительного конвективного теплообмена. Достижение больших плотностей тока открывает возможность миниатюризации контактных устройств. Кроме всего сказанного, в ЖМК нет необходимости применения драгметаллов.

Совокупность перечисленных выше свойств позволила разработать коммутационные устройства и самовосстанавливающиеся предохранители на большие токи при напряжении 100 В и выше. При отключении используется энергия самой разрываемой цепи с реализацией таких явлений, как джоулево тепловыделение и пинч-эффект. Необходимо только спровоцировать эти процессы в нужном месте. Характерно, что чем выше ток отключения, тем лучше условия коммутации.

В основу сильноточных жидкометаллических коммутационных аппаратов (коммутаторов) большой силы положено клапанное запорное устройство



Коммутационное устройство: 1, 2 — токоподводы; 3 — керамическая шайба; 4, 5 — электромагнитные соленоиды; 6 — сердечник соленоида; 7 — керамический клапан; 8 — жидкий металл

пережимного типа, на основе которого разработана серия коммутационных устройств. В качестве жидкого металла использовались легкоплавкие щелочные металлы (Ga, In, Na, Sn) и их эвтектики с температурой плавления выше  $10^\circ\text{C}$ .

На рисунке представлено одно из устройств [1]. Коммутационное устройство содержит герметичный корпус с токоподводами 1 и 2. В токоподвод 2 впрессована керамическая шайба 3. Коммутационное устройство содержит также соленоиды 4 и 5, предназначенные для включения и отключения устройства. К сердечнику 6 соленоида посредством тяги подсоединен бочкообразный клапан 7.

Внутренняя полость коммутационного устройства заполнена вакуумированным жидким металлом 8.

Для включения коммутатора на катушку 4 соленоида подается напряжение, в результате чего сердечник отодвигает клапан от шайбы, давая возможность металлу заполнить зазор между ними. Через жидкий металл замыкаются контакты токоподводов силовой цепи. Для приведения коммутационного аппарата в отключенное состояние подается напряжение на катушку 5 соленоида.

Отключение электрической цепи с номинальным током и ниже происходит после соприкосновения клапана с шайбой за счет испарения пленки металла в микронеровностях пережимных поверхностей. Следует отметить, что после первого спада тока к нулю возникают повторные замыкания, вызванные локальными подтоками жидкого металла по микронеровностям. Металл испаряется и выбрасывается из них. Повторные замыкания продолжаются до тех пор, пока металл не будет удален на такое расстояние, когда силы поверхностного натяжения смогут удерживать его от слияния. Поэтому керамика не должна смачиваться жидким металлом. Поскольку подтоки металла являются локальными, и их сечение меньше начального сечения пленки после соприкосновения пережимных поверхностей, а разрывной ток тот же, то выталкивание металла происходит с большей силой и быстрее, поэтому длительность повторных замыканий меньше, чем время от момента соприкосновения клапана с шайбой до первого спада тока к нулю. Время отключения токов ниже номинального составляет от 0.15 с до нескольких секунд и находится в обратной квадратической зависимости от тока коммутации, т. е. для аппарата является оптимальным режим коммутации токов выше номинального значения.

При коммутации аварийных токов, превышающих более чем в десять раз номинальное значение, отключение цепи происходит до соприкосновения пережимных поверхностей клапана и шайбы. Оно вызывается как вскипанием жидкого металла, так и воздействием электромагнитных сил. Причем тепловой процесс является преобладающим при плотности тока в зазоре, не превышающих  $240\text{ А/мм}^2$ . Разрыв цепи за счет пинч-эффекта может происходить только при резком броске тока и при плотности тока в зазоре, превышающей  $240\text{ А/мм}^2$ . Время отключения цепи в аварийном режиме ( $I_n < I < 10I_n$ ) находится в интервале от 0.005 до 0.1 с. Чем выше ток, тем меньше время разрыва цепи. При коммутации наблюдается резкое уменьшение тока к нулю, что говорит о практически бездуговой коммутации. Подтверждением этому является и состояние рабочих поверхностей

клапана и шайбы, которые были изъяты и подвергнуты осмотру после нескольких циклов коммутации. Рабочие поверхности в месте соприкосновения были гладкими, но окрашенными в черный цвет по круговой зоне шириной в 2—2.5 мм. Черный «порошок» на рабочих поверхностях вызван образованием и осаждением на поверхности мелкодисперсных капель жидкого металла и окислов, которые образуются при испарении металла и интенсивном его движении в рабочей зоне. Дуговые процессы в зазоре наблюдаются при разрушениях на рабочей поверхности керамики. Возникновение дуги приводит к сильному оплавлению поверхностей и образованию протока, соизмеримого с диаметром проходного отверстия в шайбе. Поэтому керамика должна хорошо выдерживать ударные нагрузки.

Бездуговая коммутация, характеризуемая резкими перепадами тока, приводит к перенапряжениям в цепи. Разрывной промежуток между поверхностями жидкого металла в зоне пережата не превышает 2—2.5 мм, поэтому максимальное напряжение коммутации составляет 100 В. Существенного различия в работе аппарата при постоянном и переменном токах не наблюдается. Удельное поверхностное переходное контактное сопротивление между жидким металлом и твердометаллическим электродом составляло  $0.0028 \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$  (без специальной обработки стальных контактных поверхностей). Максимальное количество циклов коммутации аварийного тока не превышает 200 раз на керамике АБН-1. При использовании алюмоборонитридной керамики с большим усилием на сжатие и при обеспечении шероховатости поверхности порядка 0.5—5 мкм возможно увеличение ресурса

аппарата по количеству отключений в несколько раз.

Испытания коммутационных аппаратов проводились в наземных условиях при температурах от 30 до 600 °С. Работоспособность аппаратов сохраняется в указанном интервале температур и не зависит от их ориентации в пространстве. Максимальный вес экспериментального образца при токе 50 кА составил 8.1 кг. Проведенные исследования электрических коммутационных аппаратов с жидкометаллическим рабочим телом показывают, что надежность их работы определяется термической стойкостью пережимных и каналобразующих керамических материалов, а также их химической стойкостью жидким металлам. Использование жидкого металла в качестве контактного элемента наделяет коммутационные устройства положительными дополнительными свойствами, позволяющими обеспечить их надежную работу в экстремальных условиях.

1. Пивняк Г. Г., Липковский К. А., Кирик В. В. Электрические силовых контакты, устройства регулирования и защиты с жидкометаллическим рабочим телом. — Киев: Изд-во НАН Украины, 1996.—150 с.

---

#### COMMUTATION POWER OF ELECTRICAL CIRCUITS IN EXTREME CONDITIONS

V. V. Kyryk

The basic characteristics of liquid-metal contacts are considered. The design of a liquid-metal switch ensuring commutation of currents up to one hundred of thousands of amperes in conditions of high temperatures and irrespective of position in space is presented.