

# КОММУТАЦИИ В ГИБРИДНЫХ ГЕНЕРАТОРНЫХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЯХ

АВТОРЫ:

Р.Н. ШУЛЬГА, К.Т.Н.

Т.С. СМЕРНОВА  
ВЗИ-ФИЛИАЛ ФГУП  
«РФЯЦ-ВНИИТФ»

**Г**енераторные выключатели предназначены для коммутации электрических цепей при нормальных и аварийных режимах в сетях переменного тока. Они необходимы для:

- повышения надежности электроснабжения собственных нужд (СН) энергоблока, и в первую очередь АЭС и ТЭЦ;

- отключения коротких замыканий, если они возникают на генераторном напряжении;
- снижения объема повреждения и предотвращения развития аварии в случае возникновения короткого замыкания в обмотке низшего напряжения трансформатора блока;
- повышения гибкости в управлении энергоблоком.

**Ключевые слова:** коммутация; гибридный генераторный выключатель; главный контакт; вакуумный выключатель.

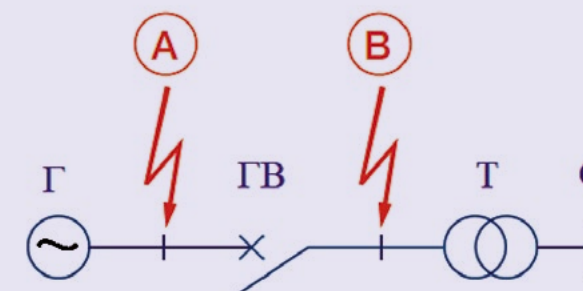
Проблема создания современных генераторных выключателей (ГВ) больших разрывных мощностей для генераторов мощностью свыше 1000 МВт носит комплексный характер и связана с освоением новых материалов, технологий, конструкций, производства и испытаний. Отсутствие отечественного задела по элегазовым ГВ и невозможность применить вакуумные ГВ, заменяющие существующие морально и физически устаревшие масляные и воздушные ГВ, заставляют искать пути разработки и применения гибридных ГВ (ГГВ), например, описанных в двух работах Р.Н. Шульги и соавт. [8, 9]. В ГОСТ Р 52565-2006 [1], IEC/IEEE 62271-37-013 [13], Technical Application Paper № 22 [14], справочнике «Элегазовые генераторные распределительные устройства НЕС» [12] приведены стандарты и процедуры коммутационных испытаний ГВ, в статьях Р.Н. Шульги и соавт. [7, 10, 11] описаны процедуры коммутационных испытаний ГГВ.

## ИСХОДНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

На рис. 1 приведена расчетная схема трехфазного короткого замыкания (КЗ) для ГВ. На рис. 2 дана наиболее перспективная схема ГГВ из трех ветвей [9]. Рисунок 2 соответствует однолинейной схеме ГГВ с вакуумным управляемым разрядником (Р), причем в части вакуумного выключателя (ВВ) и Р предполагается при необходимости сборка из составных элементов.

Предлагаемая схема при отключении работает следующим образом: в режиме нормального электроснабжения главные контакты (ГК) и ВВ замкнуты и ток протекает через них; контакты Р находятся в разомкнутом состоянии.

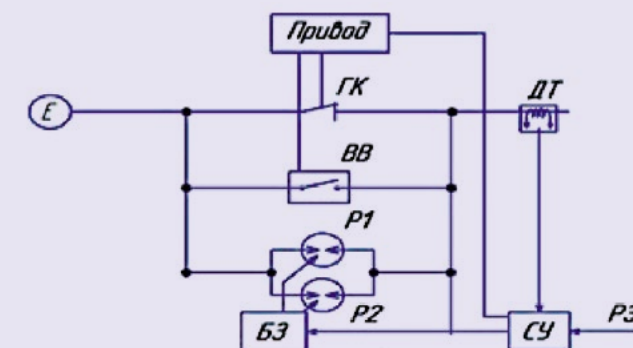
## РАСЧЕТНАЯ СХЕМА ТРЕХФАЗНОГО КЗ ДЛЯ ГВ



Обозначения: Г — генератор; ГВ — генераторный выключатель; Т — трансформатор; С — сборные шины; А — КЗ на шинах генератора; В — КЗ между генераторным выключателем и трансформатором [9].

Рис. 1

## ОДНОЛИНЕЙНАЯ СХЕМА ГГВ С ВАКУУМНЫМ РАЗРЯДНИКОМ



Обозначения: E — генератор электрической энергии; ГК — главные контакты; ВВ — вакуумный выключатель; Р — вакуумный управляемый разрядник; БЗ — блок запуска; ДТ — датчик тока; СУ — система управления ГГВ; РЗА — релейная защита и автоматика [8].

Рис. 2

При возникновении со стороны нагрузки КЗ на выходе датчика тока (ДТ) появляется сигнал, соответствующий режиму КЗ, который поступает в систему управления (СУ) ГГВ и от него на привод, который отключает ГК. При этом происходит размыкание контактов и ток переходит в цепь предварительно включенного ВВ, контакты

которого механически связаны с ГК и начинают размыкаться через время, достаточное для полного восстановления прочности межконтактного промежутка ГК. На контактах ВВ при их размыкании загорается электрическая дуга. При этом падение напряжения на контактах ВВ измеряется датчиком напряжения, и сигнал

$$U_1 = a + E \cdot v \cdot t,$$

$$I_{\text{ком}} = 3 \cdot (L_1 + L_2) / (R_1 + R_2),$$

$$i_1 + i_2 = i_0 = i_a + i_n,$$

$$i_n = I_m \sin(\omega t + \varphi - \phi),$$

$$i_a = I_m \sin(\varphi - \phi) \cdot e^{-t/\tau},$$

$$U_n = R \cdot I_n = 0,61 \cdot 20 \cdot 10^3 = 12,2 \text{ МВ}$$

$$L_{\text{гк}} = M_0 \cdot l / 2\pi \cdot \ln(r/\tau_{\text{гк}}),$$

$$\frac{I_{\text{accs}}}{\sqrt{2}}$$

$$T = 2\pi\sqrt{LC}$$

$$As_{\text{cs}} = \frac{I_{\text{accs}}}{I_{\text{accs}}} 100\%,$$

$$U_c = k_{\text{pp}} \cdot k_{\text{af}} \cdot U_r \cdot \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}},$$

Создание современных генераторных выключателей — это комплексная проблема, связанная с освоением новых материалов, технологий, конструкций и производства



## ВИД ГЛАВНОЙ КОНТАКТНОЙ СИСТЕМЫ (КОНТАКТЫ ГК ЗАМКНУТЫ, СМ. РИС. 2)

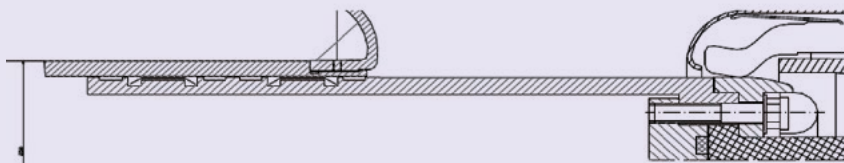


Рис. 3

## ВИД РОЗЕТКИ ГЛАВНЫХ КОНТАКТОВ С ОБОЗНАЧЕНИЕМ ЛАМЕЛЕЙ MULTI-CONTACT И РОЗЕТОК W-CU (СМ. НИЖЕ)

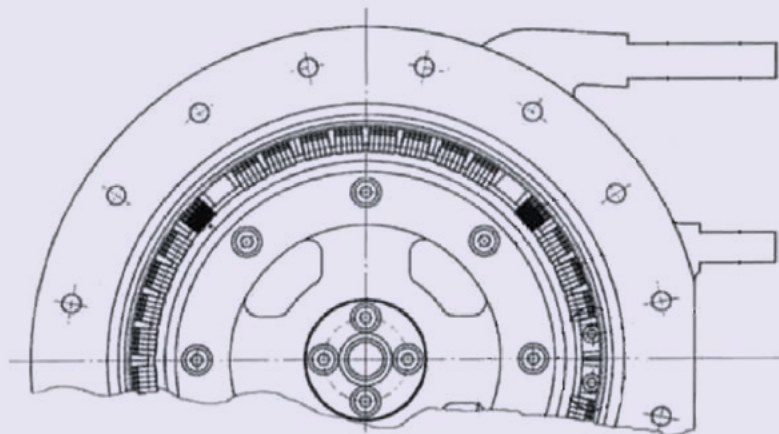


Рис. 4

## СКОЛЬЗЯЩИЕ КОНТАКТЫ ФИРМЫ MULTI-CONTACT

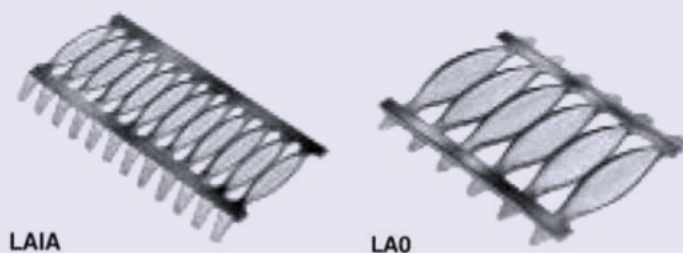


Рис. 5

от него передается в систему управления, которая формирует управляющий сигнал на выключение Р, как только падение напряжения на контактах ВВ достигнет величины порядка 100...200 В.

Во время отключения тока основной дуговой разряд возникает на контактах ВВ, при этом время горения дуги ограничено временем от момента замыкания контактов ВВ до момента включения Р, что составляет доли миллисекунды, а отключение тока осуществляется Р при первом переходе тока через ноль (естественная коммутация), после полного отключения ГК и ВВ.

### ГЛАВНЫЕ КОНТАКТЫ

Система ГК проектируемого выключателя состоит из скользящего контакта и размыкающегося ламельного контакта. На рис. 3 показан вид главной контактной системы ГК (рис. 2) в замкнутом состоянии, на рис. 4 показана розетка ГК с обозначением ламелей Multi-Contact и розеток W-Cu (см. ниже) [5, 6]. Ламели выполняются из бериллиево-бронзовых лент фирмы Multi-Contact, а число розеток из сплава W-Cu выбирается по условиям коммутации в заданном интервале времени.

С учетом целесообразности уменьшения радиальных размеров конструкции ГВ в последнее время широко используются скользящие контакты из бериллиево-бронзовых лент фирмы Multi-Contact (рис. 5) [2].

В табл. 1 представлены основные параметры контактов-«лесенок» фирмы Multi-Contact для контактов большого диаметра.

В табл. 2 представлено сравнение характеристик материалов контактов.

## ПАРАМЕТРЫ СКОЛЬЗЯЩИХ КОНТАКТОВ LAO И LAO-G ФИРМЫ MULTI-CONTACT [13]

Тип мультиконтакта	Диаметр, мм	Примечание	Размеры			Механические данные		
			Ширина $b$ , мм	Толщина полосы $S$ , мм	Контактное расстояние $r$ , мм	Контактное усилие $F_k$ , Н	Сила трения, $F_{тр}$ , Н	
LAO	LAO/0,15	>25	Выключатели, разъединители, заземлители, скользящие контакты	26	0,15	5	3	1,05
	LAO/0,20	>25		26	0,2	5	8,5	3
	LAO/0,25	>25		26	0,25	5	15	5,25
	LAO/0,30	>25		26	0,3	5	17	6
LAO-G	LAO-G/0,25	>25	Выключатели, разъединители, заземлители	25	0,25	2,5	9	3,15

Таблица 1

Качество соединения может быть оценено путем измерения падения напряжения при номинальном токе (постоянный ток) в точке контакта. Допустимые значения падения напряжения в точке контакта, полученные на основании практического опыта, приведены в табл. 3.

### ВТЫЧНЫЕ КОНТАКТЫ (НАСАДКИ И РОЗЕТКИ W-Cu)

Для того чтобы осуществить бездуговую коммутацию между размыкающимися контактами ГК и ВВ (рис. 2), необходимо на последней стадии размыкания организовать достаточное падение напряжения между контактами ГК, осуществив перевод до 95% исходного тока. Это может быть достигнуто путем использования втычных контактов (насадки и розетки из сплава W-Cu) [3] или ему подобного сплава (ранее из кирита), показанных на рис. 6 с характеристиками, приведенными в табл. 4.

Точки нагрева розетки на рис. 6 показаны желтым цветом и обусловлены катодными пятнами возникающей дуги. Для предотвращения перегрева указанного контакта возможно применение индуктора в виде полувитка обмотки, по которому протекает отключаемый ток. Реализация такого индуктора аналогична выполняемой в вакуумной камере в составе ВВ и приведена на рис. 7.

Индуктор создает продольное магнитное поле, которое растягивает по спирали дугу и одновременно вращает катодные пятна, не допуская перегрева контакта. Дуга растягивается при вращении, удлиняется и, касаясь стенок камеры, охлаждается, создавая дополнительное падение на-

пряжения на дуге, что ускоряет коммутацию в ГВВ.

Для отключения токов КЗ в традиционных элегазовых и вакуумных ГВ конструкция дугогасительных контактов должна удовлетворять ряду требований:

- достаточный запас материала в контактах, обеспечивающий работу выключателя в течение расчетного срока службы

с учетом выгорания контактов под действием экстремальных условий плазменной среды;

- минимальная скорость дуговой эрозии металла, с тем чтобы свести к минимуму загрязнение объема, ведущее к ухудшению изолирующих свойств элегаза;
- стойкость к большим механическим нагрузкам, сопровождающим коммутационные

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ, МЕХАНИЧЕСКИЕ И ТЕРМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ КОНТАКТОВ

Материал	Термическая удельная электропроводность, Вт/м К	Твердость	Пределное изгибающее усилие, Н/мм <sup>2</sup>	Максимальная рабочая температура, °С	Приложение
CuZn Медь-цинк	121	150-180	>290	85	Контакт-«лесенка»
CuSn <sub>6</sub> Пружинная бронза	75	160-220	370	125	Розетка контактов
CuBe <sub>2</sub> Бериллиевая медь	113	450	1050	200	Точки спайки
CuNi <sub>18</sub> Zn <sub>20</sub>	33	170-200	>390	125	Части выключателя
CuNi <sub>9</sub> Sn <sub>2</sub>	48	160-190	>440	125	Материал подложки
NiBe Никель-бериллий	38	440-510	1600	350	Для высоких температур
Cu Медь	380-390	60-120	250	-	Данные меди в целях сравнения

Таблица 2

операции, а также вызываемым действием электродинамических сил;

силы притяжения) траекторий прохождения тока;

- гарантированно низкое омическое сопротивление и низкое падение напряжения примерно на уровне 10 мВ (см. табл. 4, п. 1, 2).

Для ГГВ, где организуется перевод тока на замкнутые контакты

ВВ (рис. 2), требования к дугогашению снижаются, что повышает надежность ГК.

## ПАРАМЕТРЫ ГК ДЛЯ ГГВ

Параметры ГК для ГГВ таковы:  $I_n = 20\,000\text{ А}$  — номинальный ток;  $I_{он} = 160\text{ кА}$  — ток отключения;  $I_{тс} = 160\text{ кА}$  — ток термической стойкости (трехсекундный ток  $I_{он}$ );  $I_{дс} = 3 \cdot I_{он} = 480\text{ кА}$  — ток динамической стойкости (3  $I_{он}$  в течение 10 мс);  $I_1$  — соответствующий ток для одной «лесенки».

В соответствии с табл. 1 для контакта LA0/0,25 принимаем  $b = 26\text{ мм}$ ,  $r = 5\text{ мм}$ ,  $S = 0,3\text{ мм}$ . Усилия трения  $F_{тр1} = 10,5\text{ Н}$ ,  $I_1 = 45\text{ А}$  — соответствующий номинальный ток для одной «лесенки».

Для 1 контакта-«лесенки» токи КЗ разной длительности составляют: 1 с — 0,78 кА; 2 с — 0,46 кА; 3 с — 0,34 кА; ток динамической стойкости — 4 кА. Контактное сопротивление одной «лесенки»  $R_1 = 0,29\text{ мОм}$ .

Число лесенок  $n$  выбирается по трем значениям вышеуказанных токов КЗ с учетом наличия двух элементов в контакте.

Наибольшим значением  $n$  является заданное для токов отключения и термической стойкости, которые равны 160 кА. Тогда

$$n = I_{тс} / I_{тс1} = 160 / (0,34 \cdot 2) = 236.$$

Для номинального тока число «лесенок» меньше и составляет 223, а для тока динамической стойкости еще меньше — 49.

Усилия трения в ГК равно:

$$F_{тр} = F_{тр1} \cdot n = 10,5 \cdot 236 = 2478\text{ Н}.$$

## ДОПУСТИМЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ПАДЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ В ТОЧКЕ КОНТАКТА

Категория	Падение напряжения, мВ	Оценка
1	<5	Очень хороший
2	5-12	Хороший
3	13-25	Годный к употреблению
4	26-50	Ненадежный
5	51-100	Плохой
6	>100	Непригодный

Таблица 3

Минимальный диаметр цилиндра ГК составляет

$$D = r_n / \pi = 5 \cdot 236 / 3,14 = 376\text{ мм}.$$

Тогда полное активное сопротивление ГК составит

$$R = R_1 / n = 0,29 / (236 \cdot 2) = 0,61\text{ мкОм}.$$

Падение напряжения на ГК при номинальном токе равно

$U_n = R \cdot I_n = 0,61 \cdot 20 \cdot 10^3 = 12,2\text{ мВ}$ , а при токе отключения КЗ, равном 160 кА, — 97,6 мВ, т. е. в соответствии с табл. 4 контакт ГК считается хорошим.

Конечное сопротивление ГК должны определять контакты сплава W-Cu, которые обусловят длительность коммутации между ГК и ВВ менее 5 мс.

Собственную индуктивность ГК можно рассчитать по формуле для определения индуктивности цилиндра:

$$L_{гк} = \mu_0 \cdot l / 2\pi \cdot \ln(r / r_{гк}),$$

где, задаваясь параметрами: длина  $l = 300\text{ мм}$ , радиус обратного провода  $r = 300\text{ мм}$ , внешний радиус ГК  $r_{гк} = 190\text{ мм}$ , получим  $L_{гк} = 40\text{ нГн}$ .

## ХАРАКТЕРИСТИКИ СПЛАВА W-CU [3]

Материал	VFG10	VFG20	VFG30
W, масс. %	90	80	70
Cu, масс. %	10	20	30
Размер зерна, мкм	4	84	84
Электропроводность, м/Ом·мм <sup>2</sup>	22	25	30
Плотность, г/см <sup>3</sup>	16,5	15,2	14
Твердость по Виккерсу	220	210	130
Содержание O <sub>2</sub> , ppm	≤50	≤50	≤50
Содержание N <sub>2</sub> , ppm	≤20	≤20	≤20
Содержание H <sub>2</sub> , ppm	≤5	≤5	≤5

Таблица 4

## ВТЫЧНОЙ КОНТАКТ В ВИДЕ РОЗЕТКИ И НАСАДКИ ИЗ СПЛАВА W-CU [3]

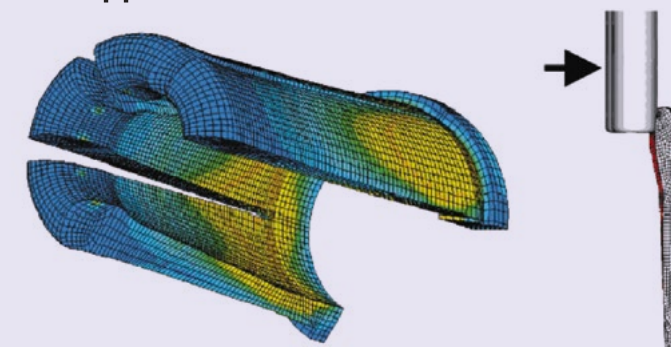


Рис. 6

## ЗАВИСИМОСТЬ $t_{\text{КОММУТ}}$ , МКС ОТ $U_{\text{ДУГИ}}$ И $I_{\text{ОТКЛ}}$ ПРИ $nR, nL$

$U_{\text{ДУГИ}}, \text{В}$	$I_{\text{ОТКЛ}}, \text{КА}$	$nR, nL$	20	160
50		3R, 3L	49	386
		5R, 5L	800	6400
100		3R, 3L	25	193
		5R, 5L	400	3200
200		3R, 3L	13	97
		5R, 5L	200	1600
1000		3R, 3L	3	20
		5R, 5L	40	320

Таблица 5

## РЕАЛИЗАЦИЯ ИНДУКТОРА В ВИДЕ ПОЛУВИТКИ ОБМОТКИ В ВАКУУМНОЙ КАМЕРЕ В СОСТАВЕ ВВ

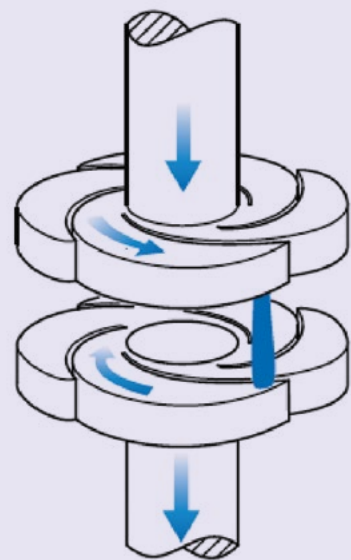


Рис. 7

## ПАРАМЕТРЫ ВВ

В первом приближении следующие параметры ВВ: активное сопротивление  $R_{\text{ВВ}} = 4R = 3,05 \text{ мкОм}$ , индуктивность ВВ и токопровода  $4L_{\text{ГК}} = 200 \text{ нГн}$ . Общее сопротивление контура коммутации составляет до  $5R$  и  $5L$ .

## ПЕРЕХОД ТОКА ИЗ ГК В ВВ

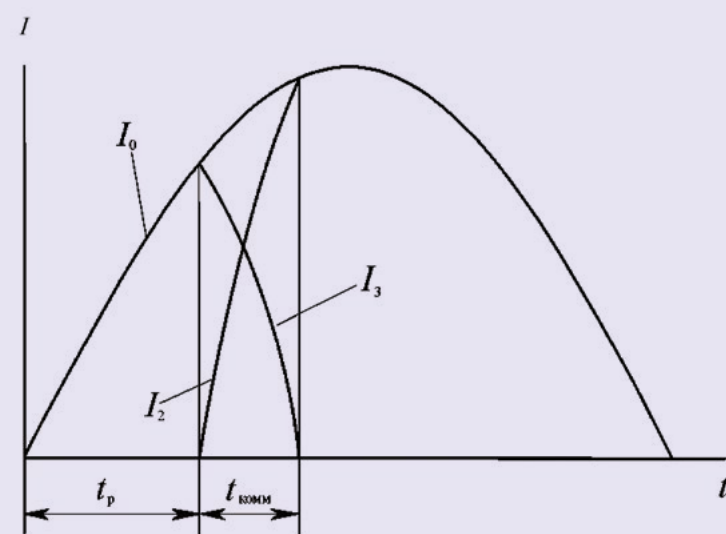
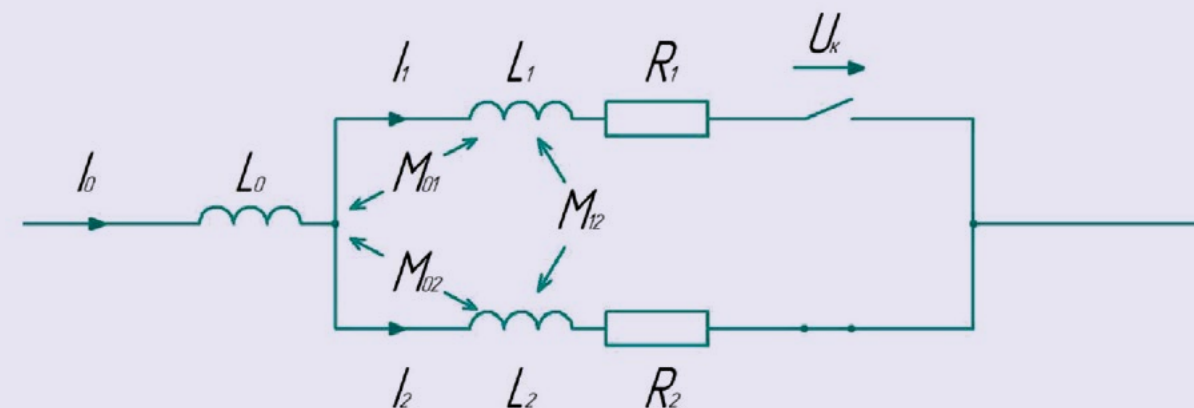


Рис. 8

## ПРОЦЕСС КОММУТАЦИИ ТОКА ИЗ ГК В ВВ

Процесс коммутации тока из ГК в ВВ иллюстрируется на рис. 8 и протекает по схеме замещения на рис. 9. Время изменения тока от данного значения до нуля при размыкании контактов определяется электромагнитными процессами, сопровождающими размыкание одной из параллельных цепей. Для удобства рассмотрения этих процессов можно считать, что размыкание ГК не сказывается на величине общего тока  $I_0$  через рассматриваемый полюс аппарата, падение напряжения на ГК все время остается постоянным, сопротивление параллельной цепи ВВ остается неизменным. Общий характер изменения токов в ветвях показан на рис. 8, где  $I_2$  — ток ГК,  $I_3$  — ток ВВ,  $t_p$ ,  $t_{\text{комм}}$  — соответственно время начала и длительности коммутации.

## СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ЦЕПЕЙ ПОЛЮСА ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ ДЛЯ ГК И ВВ



Обозначения:  $L_0$  — индуктивность токопровода;  $L_1, L_2, R_1, R_2$  — параметры ГК;  $L_2, L_2, R_2$  — параметры ВВ

Рис. 9

На рис. 9 приведена схема замещения параллельных цепей полюса выключателя для ГК и ВВ. Взаимными индуктивностями  $M$  можно пренебречь. Падение напряжения на ГК ( $U_1$ ) существенно различается для элегазового и воздушного выполнения ГК.

Для элегазового ГК напряжение на дуге определяется как

$$U_1 = a + E \cdot v \cdot t,$$

где  $a$  — падение напряжения в промежутке анод — катод;  $E$  — напряженность поля (среднее значение  $5 \text{ В/мм}$ );  $v$  — скорость размыкания ГК (примерно  $5\text{--}6 \text{ м/с}$ ). По данным экспериментов среднее значение  $U_1$  в элегазе превышает  $1 \text{ кВ}$  [14].

Для воздушного ГК значение  $U_1$  определяется падением напряжения на конечном сопротивлении  $R_1$ , которое для выполнения условия  $t_{\text{комм}} = 5 \text{ мс}$  равно

$$t_{\text{комм}} = 3 \cdot (L_1 + L_2) / (R_1 + R_2).$$

Тогда, исходя из значения 95% перевода тока,

$$(R_1 + R_2) = 3 \cdot (L_1 + L_2) / t_{\text{комм}} = 144 \text{ мкОм},$$

которые должны быть реализованы контактами W-Cu. Падение напряжения на ГК зависит от уровня тока  $I_0$  и изменяется от 3 до 24 В (соответственно для 20 и 160 кА).

Если ток КЗ содержит апериодическую составляющую  $I_a$  и периодическую составляющую  $I_n$ , баланс токов в схеме на рис. 9 примет вид:

$$i_1 + i_2 = i_0 = i_a + i_n.$$

Периодическая составляющая тока равна

$$i_n = I_{m0} \sin(\omega t + \phi - \phi),$$

апериодическая составляющая равна

$$i_a = I_{m0} \sin(\phi - \phi) \cdot e^{-t/T},$$

где  $\phi$  — начальная фаза напряжения;  $\phi$  — фазовый сдвиг между током и напряжением;  $T = L/R$  — постоянная времени затухания апериодической составляющей тока КЗ (постоянная времени цепи), где  $L = (L_1 + L_2)$ ,  $R = (R_1 + R_2)$ .

Изменение тока КЗ зависит от фазы напряжения в момент возникновения КЗ, а значит, и от фазы КЗ  $\phi_k = \phi - \phi$ , а также от постоянной времени цепи  $T$ . Апериодическая составляющая к моменту размыкания ГК может не учитываться благодаря применению полюсного привода со средней скоростью  $5 \text{ м/с}$ .

Результаты расчетов приведены в табл. 5 в виде зависимости  $t_{\text{комм}}$  (мкс) от  $U_{\text{ДУГИ}}$  и  $I_{\text{ОТКЛ}}$  при  $nR, nL$  ( $n$  варьируется от 3 до 5). Параметры контура коммутации принимаются равными:  $3R = 1,83 \text{ мкОм}$ ,  $3L = 120 \text{ нГн}$ ,  $R = 3,05 \text{ мкОм}$ ,  $5L = 200 \text{ нГн}$ . Среднее падение напряжения на дуге  $U_{\text{ДУГИ}}$  зависит от среды и конструкции дугогасящего устройства: воздух, решетки

## ОБЩИЙ ВИД И ТЕРМОГРАММА НАРУЖНОГО КОРПУСА ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ КАГ-24

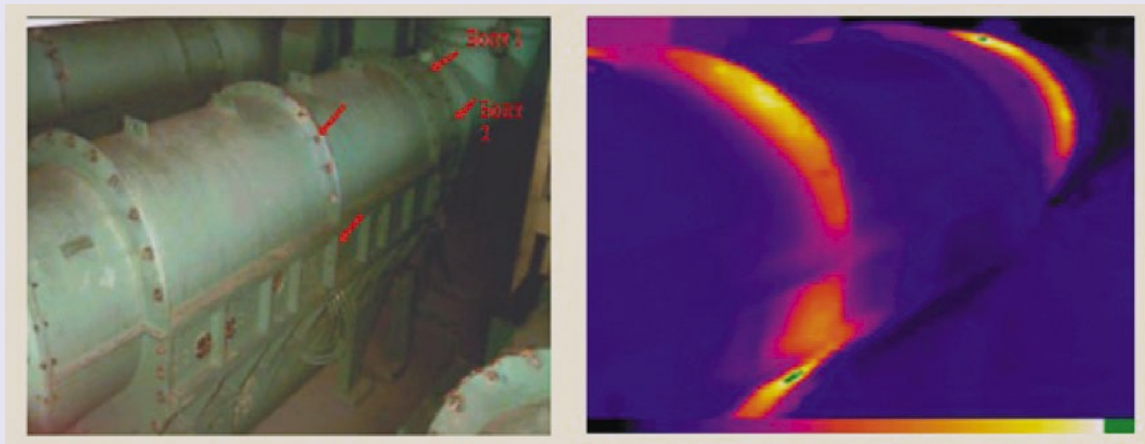


Рис. 10

### ИЗ ГОСТ Р 52565–2006. «ВЫКЛЮЧАТЕЛИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА НА НАПРЯЖЕНИЕ ОТ 3 ДО 750 КВ»

- 4.1. Выключатели подразделяют по следующим признакам.
- 4.1.11. По пригодности выключателя для работы при автоматическом повторном включении (АПВ):
- предназначенные для работы при АПВ;
  - не предназначенные для работы при АПВ.
- 4.1.12. По пригодности выключателя для коммутации:
- предназначенные для коммутации конденсаторных батарей;
  - не предназначенные для коммутации батарей.
- 4.1.13. По пригодности выключателя для коммутации токов шунтирующих реакторов:
- предназначенные для коммутации токов шунтирующих реакторов;
  - не предназначенные для коммутации этих токов.

и щели — 50 В; воздух, растягивание дуги и охлаждение — 100 В; вакуумная камера, спиральное вращение дуги с помощью индуктора — 200 В; элегазовая камера с автодутьем — 1000 В [4].

## РЕАЛИЗАЦИЯ ГЛАВНЫХ КОНТАКТОВ В ГГВ НА ОС- НОВЕ ОПЫТА ПРЕДШЕ- СТВУЮЩИХ РАЗРАБОТОК

Предшествующие разработки ГВ в виде генераторного выключателя КАГ-24 производства ОАО «Электроаппарат» с током нагрузки и отключения 30 кА были выполнены с реализацией ГК ламельного типа, описанного в начале статьи. Такая реализация ГК даже при номинальном токе 30 кА, не говоря уже о необходимости отключения сверхтоков, испытывает перегрев контактов и тем более не может создать требуемое для коммутации напряжение между расходящимися контактами. Предлагаемая в ГК добавка втычных твердосплавных контактов с индук-

тором должна повысить указанное коммутационное напряжение путем удлинения дуги и ее охлаждения о стенки камеры и применения воздушного дутья, одновременно разгружая ламельные контакты от тока, не допуская их перегрева. Указанная реализация возможна с помощью создания макета ГК на основе опыта разработки и эксплуатации ГВ типа КАГ-24.

На рис. 10 показан внешний вид и термограмма кожуха КАГ-24. с током нагрузки 30 кА [4]. На термограмме хорошо просматриваются повышенные нагревы контактных соединений элементов корпуса генераторного выключателя. Поскольку по экранам корпуса выключателя текут значительные токи, они вызывают нагрев мест стыковки корпуса с повышенными переходными сопротивлениями, которые маскируют нагрев ламелей выключателя. Для решения задачи прямого доступа к основным токоведущим частям выключателя в зоне их расположения были выполнены оптические окна.

Для тепловизионного контроля в работе контактных групп (ламелей) генераторных выключателей

## ОБЩИЙ ВИД КОНТАКТОВ ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ КАГ-24 (А), ТЕРМОГРАММЫ НАГРЕВА ЛАМЕЛЕЙ ДО ПРОВЕДЕНИЯ РЕМОНТА (Б) И ПОСЛЕ РЕМОНТА (В)

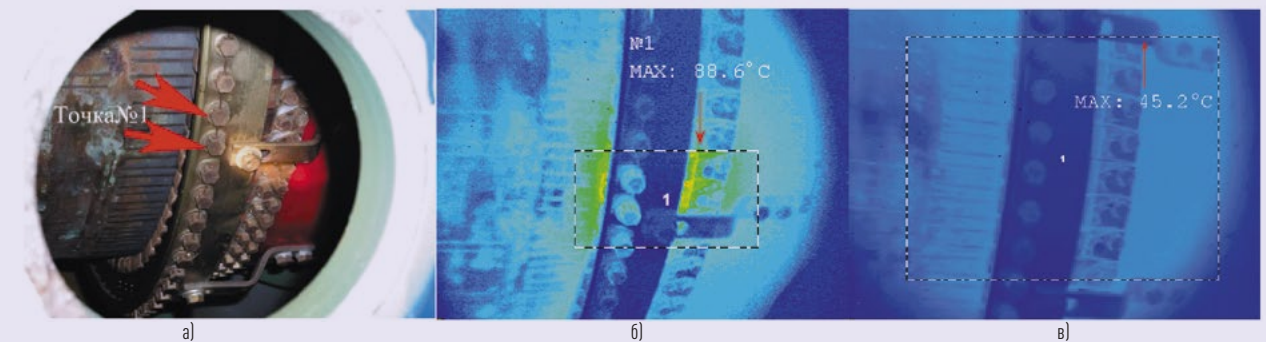


Рис. 11

КАГ-24 в экранированных корпусах выключателей были выполнены окна для прямого оптического доступа к токоведущим конструктивным элементам выключателя. Результаты обследования (локальные нагревы отдельных ламелей, выделяющиеся области из общего фона) фиксировались при подготовке к проведению ремонта на вскрытом оборудовании.

На основе тепловизионного контроля были введены новые регламентные работы по проведению планово-предупредительных работ. После пуска блока при выходе на мощность проводится обследование контактных групп (ламелей) генераторных выключателей КАГ-24. Были внедрены дополнительные измерения переходных сопротивлений главных контактов генераторных выключателей КАГ-24 в ходе ремонта.

Данные измерения не были предусмотрены заводом-изготовителем, и поэтому нормативы были определены опытным путем (не более 50 мкОм для одной ламели). В дальнейшем завод-изготовитель подтвердил возможность использования вышеуказанного норматива для контроля контактов КАГ-24 в ходе ремонта. Благодаря данным измерениям выявляются

конкретные дефектные контакты. Этот процесс довольно трудоемкий (так как всего ламелей более 1000 шт., а для измерения одной ламели нужно проводить изоляцию всех остальных), но является достоверным. По результатам тепловизионного контроля стало заметно значительное снижение нагрева этих контактных соединений, показанное на рис. 11 а-в.

## ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ Р 52565–2006. Выключатели переменного тока на напряжение от 3 до 750 кВ. Общие технические условия.
2. Каталог фирмы Multi-Contact. 2002. № 6. [Электронный ресурс]: <http://www.plansee.com> (дата обращения 05.09.2019).
3. Каталог фирмы Plansee. Насадки и розетки W-Cu. [Электронный ресурс]: <http://www.plansee.com> (дата обращения 05.09.2019).
4. Кондратов О.И., Завидей В. И. Выключатели — коммутационные аппараты в электроустановках (сетях) трехфазного переменного тока частотой 50 Гц номинальным напряжением выше 1 кВ. Учеб. пособие. М.: Изд-во МЭИ, 2020.
5. Тонконогов Е.Н. Конструкции электрических аппаратов. Элегазовые выключатели высокого напряжения: Учеб. пособие. СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2008.
6. Тонконогов Е.Н. Электрические и электронные аппараты. Выключатели высокого напряжения. Ч. 1. Учеб. пособие. СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2012.
7. Шульга Р.Н., Лавринович В.А., Иванов В.П., Сидоров В.А., Смирнова Т.С. Гибридный генераторный выключатель и испытательный стенд//Энергоэксперт. 2019. № 3, июнь–июль. С. 14–20.
8. Шульга Р.Н., Лавринович В.А., Иванов В.П., Сидоров В.А., Смирнова Т.С. Исследования и разработка гибридного генераторного выключателя// Энергия единой сети. 2019. № 3 (45), июнь–июль. С. 63–72.
9. Шульга Р.Н., Лавринович В.А., Иванов В.П., Сидоров В.А., Смирнова Т.С. Разработка гибридного генераторного выключателя для АЭС//Электричество. 2020. № 9. С. 17–22.
10. Шульга Р.Н., Смирнова Т.С., Глушков Д.А. Стандарты и коммутационные испытания генераторных выключателей//Энергия единой сети. 2020. № 6 (49). С. 56–64.
11. Шульга Р.Н., Смирнова Т.С. Коммутационные испытания генераторных выключателей//Энергоэксперт. 2020. № 1 (73). С. 34–39.
12. Элегазовые генераторные распределительные устройства НЭС. [Электронный ресурс]: <http://www.new.abb.com> (дата обращения 05.09.2019).
13. IEC/IEEE 62271–37–013. High Voltage Alternating Current-Breakers.
14. Technical Application. Paper № 22. Medium voltage generator circuit-breaker. [Электронный ресурс]: <https://www.library.e.abb.com/public/2017.03/pdf> (дата обращения 05.09.2019).