

УДК 51-74

## ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ НА ДУГОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В ДУГОГАСИТЕЛЬНЫХ КАМЕРАХ

Горшков Ю.Е., Желтов П.В.

ФГБОУ ВПО «Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова»,  
Чебоксары, e-mail: chnk@mail.ru

Проведены исследования на ЭВМ влияния параметров электрической цепи на дуговые и газокинетические процессы в дугогасительных камерах автоматических выключателей низкого напряжения. Исследовались влияния фазы включения на ток короткого замыкания, напряжения сети на дуговые и газокинетические процессы. При изучении зависимости максимального значения тока дуги  $I_{dm}$ , ограниченного сопротивлением дуги, возникающей в дугогасительной камере, и коэффициента токоограничения  $K$  ( $K = I_m/I_{dm}$ ) от максимального значения тока металлического к.з. выявлено, что при меньших значениях коэффициента мощности максимальное значение тока дуги больше и, следовательно, коэффициент  $K$  меньше. При изучении зависимости параметров дуговых и газокинетических процессов от максимального значения тока дуги  $I_{dm}$  выявлено, что при меньших значениях  $\cos\phi$  значения максимального напряжения дуги  $U_{dm}$ , энергии дуги отключения  $W(t)$ , времени дуги  $t_p$ , а также давление в камере и температура воздуха в ней выше.

**Ключевые слова:** эксперимент, функциональная зависимость, параметры электрической цепи, дугогасительная камера, автоматический выключатель

## INFLUENCE OF PARAMETERS OF ELECTRIC CIRCUIT TO ARC PROCESS IN ARC CHAMBER

Gorshkov Y.E., Zheltov P.V.

I.N. Ulyanov's Chuvash State University, Cheboksary, e-mail: chnk@mail.ru

Computer examinations were carrying out (realized) on the influence of parameters of electric circuit to arc and gas kinetic process in arc turning cameras with automatic switch cut out of low tension. The influence of phase of turning on the current short circuit electric system to arc and gas kinetic process were studied. While studying dependence of parameters of arc and gas kinetic process from maximum importance of arc current it was found out that when meanings of  $\cos\phi$  of arc are less then meanings of maximal voltage of arc  $U_{dm}$ , the  $W(t)$  disconnect arc energy, the  $t_p$  time of arc, as well as the pressure in camera and air temperature are higher. While studying the dependence of maximum values of arc current ( $I_{dm}$ ) which is limited by arc resistance rising in arc turning camera and coefficient of limited current  $K$  ( $K = I_m/I_{dm}$ ) from maximum meanings of current of short circuit, it was found out that the arc current  $I_{dm}$  is higher on smaller by absolute value  $\Psi_{sh.c.}$ . Lesser values of coefficient power, the maximum meaning of arc current is more and as it follows the coefficient  $K$  is less.

**Keywords:** experiment, functional dependence, electrical circuit parameters, arc chamber, circuit breaker

Одним из дальнейших направлений по интенсивному развитию производства электрических аппаратов низкого напряжения является широкое применение методов теоретической и прикладной математики и средств электронной вычислительной техники для их исследования, проектирования и конструирования. Вопросы совершенствования и разработки дугогасительных устройств автоматических выключателей тесно связаны с исследованием динамических процессов, протекающих в них при отключении автоматическими выключателями токов короткого замыкания (к.з.).

В соответствии с математическими моделями дуговых и газокинетических процессов в дугогасительной камере, включающих в себя процессы движения контактной системы, движения дуги по контактам и дугогасительным рогам, входящая в дугогасительную решетку и ее гашения, разработаны алгоритмы расчета на ЭВМ параметров этих процессов, происходящих в дугогасительных камерах небыстродействующих автоматических выключателей

на токи короткого замыкания 30 кА. Разработаны программы расчета параметров этих процессов на алгоритмическом языке «Фортран-4» для ЭВМ для двух разновидностей автоматических выключателей: МОДЕЛ1 и МОДЕЛ2. По программе МОДЕЛ1 рассчитывались параметры дуговых и газокинетических процессов, протекающих в закрытых дугогасительных камерах автоматических выключателей серии АЗ100 отклонении ими токов короткого замыкания до 30 кА, а по программе МОДЕЛ2 – в дугогасительных камерах с отверстиями для выхода газов токоограничивающих автоматических выключателей серии АЗ700В с предельным значением ударного тока короткого замыкания до 300 кА [1, 2, 3, 4].

### Начальные условия и варьируемые параметры вычислительного эксперимента

Исследования процессов, происходящих в закрытых дугогасительных камерах небыстродействующих автоматических выключателей, произведены для токов короткого замыкания до 30 кА для сетей

низкого напряжения до 380 В. Другие исходные данные для расчета параметров дуговых и газокинетических процессов приведены в табл. 1.

**Таблица 1**

Исходные данные для расчета параметров дуговых и газокинетических процессов, происходящих в дугогасительной камере автоматического выключателя серии А3120

№ п/п	Исходные данные	Обозн. в тексте	Единица изм.	Значения данных	Примечания
1	Номинальный ток	$I_n$	А	100	Варьируемый параметр
2	Максимальный ток короткого замыкания	$I_m$	А	5000...30000	Варьируемый параметр
3	Коэффициент мощности	cosφ	–	0,1...0,3	Варьируемый параметр
4	Фаза включения на ток к.з.	$\Psi_{к.з.}$	рад.	0...– $\Phi_0$	Варьируемый параметр
5	Номинальное напряжение сети	$U_m$	В	220, 380	Варьируемый параметр
6	Объем воздуха в камере	$V$	см <sup>3</sup>	25,0; 50,0; 75,0	
7	Площадь выходных отверстий	$A$	см <sup>2</sup>	0, 3, 5, 7	
8	Длина камеры по ходу контакта	$d$	см	5, 5	
9	Длина пластин решетки	$h_p$	см	4, 5	
10	Толщина пластин решетки	$\Delta$	см	1,5; 2,5; 4,0	
11	Расстояние между пластинами	$\delta$	см	2; 4; 7	
12	Число пластин решетки	$n$	шт.	5...20	
13	Угол расхождения пластин решетки	$\alpha_n$	рад.	0	
14	Коэффициент, учитывающий долю мощности на повышение давления	$C$	–	0,1	
15	Электропроводность материала пластин решетки	$\sigma$	1/(Ом·м)	$6,86 \cdot 10^6$	
16	Относительная магнитная проводимость пластин решетки	$\mu$	–	30	
17	Ширина контактов	$S$	см	1; 1,5; 2,5	
18	Максимальный угол расхождения подвижного контакта	$\alpha_m$	рад.	0,785	
19	Длина шины от оси вращения до контакта	$l_k$	см	3,8	
20	Длина шины от контакта до рога	$l_1$	см	0,8	
21	Угол между шиной и рогом	$\alpha_p$	рад.	0,75	
22	Длина рога	$l_p$	см	2,0	
23	Общее время расхождения подвижного контакта	$t_k$	с	$(5...10) \cdot 10^{-3}$	
24	Длина жидкометаллического мостика	$l_{min}$	см	0,3	
25	Электродинамический коэффициент	$K_{эду}$	Н/А <sup>2</sup>	–	
26	Расстояние от контакта до пластин решетки	$l_n$	см	3,6	

При исследованиях этих процессов варьировались параметры электрической сети. К варьируемым параметрам электрической сети отнесены:

а) максимальное значение установившегося тока короткого замыкания  $I_m$ ;

б) коэффициент мощности электрической цепи cosφ;

в) фаза включения на ток короткого замыкания  $\Psi_{к.з.}$ , отсчитываемая от момента перехода тока через ноль;

г) максимальное значение напряжения сети,  $U_m$ .

### Исследование влияния параметров электрической цепи на параметры дуговых и газокинетических процессов

При изучении зависимости максимального значения тока дуги  $I_{om}$ , ограниченного сопротивлением дуги, возникающей в дугогасительной камере, и коэффициента токоограничения  $K$  ( $K = I_m / I_{om}$ ) от максимального значения тока металлического к.з. выявлено, что при меньших значениях коэффициента мощности максимальное значение тока дуги больше и, следовательно, коэффициент  $K$  меньше. При изучении зависимости параметров дуговых и газокинетических процессов от максимального значения тока дуги  $I_{om}$  выявлено, что при меньших значениях  $\cos\varphi$  значения максимального напряжения дуги  $U_{om}$ , энергии дуги отключения  $W(t)$ , времени дуги  $t_p$ , а также давление в камере и температура воздуха в ней выше. Это можно объяснить тем, что в режиме отключения токов к.з. переходный процесс при малых значениях затягивается. Таким образом, выявлено, что отключение электрической цепи с относительно высокими значениями индуктивного сопротивления (малые значения  $\cos\varphi$ ) предъявляет повышенные требования к дугогасительной системе автоматического выключателя.

#### Влияние фазы включения на ток короткого замыкания

При изучении зависимости максимального значения тока дуги  $I_{om}$  и коэффициента токоограничения  $K$  от максимального значения тока короткого замыкания (без дуги) выявлено, что ток дуги  $I_{om}$  выше при меньших по абсолютной величине  $\Psi_{к.з.}$ . Меньшие значения тока дуги получены при несимметричном случае короткого замыкания  $\Psi_{к.з.} = -\varphi_0$ . Это можно объяснить тем, что производная тока дуги в начальный период отключения меньше по сравнению со случаем  $\Psi_{к.з.} = 0$  (симметричный ток короткого замыкания). Отсюда можно сделать вывод, что чем больше по абсолютной величине фаза включения  $\Psi_{к.з.}$ , тем меньше ограничен дугой ток  $I_{om}$ . Следовательно, симметричный случай тока короткого замыкания предъявляет повышенные требования к быстройдействию контактной системы.

Наименьшие значения максимального напряжения на дуге  $U_{om}$ , энергии дуги  $W$ , времени горения дуги  $t_2$  получены при симметричном случае тока короткого замыкания ( $\Psi_{к.з.} = 0$ ). Соответственно энергии дуги значения газокинетического давления и температуры воздуха в дугогасительной камере имеют меньшие значения также при симметричном случае ( $\Psi_{к.з.} = 0$ ). Наибольшие их значения получены при несимметричном

случае ( $\Psi_{к.з.} = -\varphi_0$ ). Это объясняется тем, что время отключения (а значит, и время горения дуги) и энергия дуги выше при больших по модулю  $\Psi_{к.з.}$ . Чем больше параметр  $\Psi_{к.з.}$  по абсолютной величине, тем выше значения энергии дуги и времени ее горения. Этот факт может быть объяснен тем, что с увеличением по модулю  $\Psi_{к.з.}$  увеличивается аперидическая составляющая тока переходного процесса при коротком замыкании.

С увеличением максимального значения тока дуги время ее горения уменьшается. Это можно объяснить следующим образом. С увеличением тока дуги увеличивается скорость ее движения по контактам, следовательно, увеличиваются значения напряжения на дуге и давления в камере. Это приводит к уменьшению времени вхождения дуги в решетку и к увеличению напряжения на частичных дугах. Все это способствует более интенсивному гашению дуги за счет большого ограничения тока дуги и уменьшения условного угла сдвига фаз между напряжением сети и током дуги.

Таким образом, для дугогасительной камеры наиболее тяжелым из рассмотренных выше случаев является несимметричный случай короткого замыкания ( $\Psi_{к.з.} = -\varphi_0$ ), при котором получаются наибольшие значения времени горения, энергии электрической дуги, давления и температуры газов в камере.

Приведенные выше результаты расчетов на ЭВМ, где в качестве параметра была взята неконтролируемая и заранее непредсказуемая величина фазы включения на ток короткого замыкания  $\Psi_{к.з.}$ , позволили выявить тяжелый для дугогасительной камеры режим работы.

#### Влияние напряжения сети

Для определения степени влияния напряжения сети на дуговые и газокинетические процессы, происходящие в ДК при отключении токов короткого замыкания, проведены вычислительные эксперименты для двух номинальных значений напряжения сети: 220 и 380 В.

При этих исследованиях другие варьируемые параметры электрической сети и контактно-дугогасительной системы автоматического выключателя имели следующие значения:  $\cos\varphi_0 = 0,2$ ;  $\Psi_{к.з.}$ ;  $\varphi_{к.з.} = -\varphi_0$ ;  $n = 13$ ;  $\delta = 0,25$  см;  $V = 500$  см<sup>3</sup>;  $\Delta = 0,25$  см;  $S = 1,0$  см.

Результаты исследований приведены в табл. 2. Проведенные на ЭВМ результаты исследований показывают, что при увеличении напряжения сети увеличиваются все параметры дуговых и газокинетических процессов, происходящих в закрытых ДК автоматических выключателей. Ниже приводится сравнительная оценка параметров

дуговых и газокинетических процессов для вышеуказанных значений напряжения сети:

1. Максимальное значение тока дуги при 380 В выше тех же значений тока дуги при 220 В на 6% (при  $I_M = 30$  кА);

2. Превышение максимального значения напряжения дуги при 380 В по сравнению с 220 В достигает до 15%;

3. Энергия дуги при 380 В выше энергии дуги при 220 В на 30%;

4. Максимальные значения давления в камере и температуры воздуха при 380 В превышают соответствующие значения при 220 В до 45% (максимальные значения);

5. Время горения дуги при 220 В меньше времени горения ее при 380 В на 8% при  $I_M = 30$  кА. При малых значениях тока короткого замыкания эта разница меньше и составляет чуть больше 2%.

**Таблица 2**

Расчетные максимальные значения параметров дуговых и газокинетических процессов при разных величинах напряжения сети

№ п/п	$I_M$ , кА	$I_{дм}$ , кА		$U_{дм}$ , В		$W$ , кВт с		$p_M$ , Па $10^5$		$T_M$ , °К		$t_r$ , с	
		220 В	380 В	220 В	380 В	220 В	380 В	220 В	380 В	220 В	380 В	220 В	380 В
1	5	3,2	3,5	287	342	1,4	2,3	0,50	0,73	350	470	13,8	14,1
2	10	4,3	5,4	305	357	1,9	3,2	0,98	1,68	450	730	12,9	13,0
3	15	6,6	7,8	316	368	3,5	6,2	1,30	2,63	660	1000	11,2	11,4
4	20	7,5	9,9	328	380	5,1	8,0	1,80	3,20	750	1150	10,0	10,6
5	25	8,9	9,2	345	392	6,0	8,5	2,20	3,80	820	1320	9,7	10,5
6	30	9,2	9,8	360	405	7,2	10,0	2,60	4,20	1030	1480	9,4	10,2

**Выводы**

Разработаны методы расчета на ЭВМ параметров дуговых и газокинетических процессов, происходящих в дугогасительных камерах с закрытым корпусом и в камерах с выходными отверстиями при отключении токов короткого замыкания до 30 кА для установочных и до 300 кА для токоограничивающих автоматических выключателей. Проведены вычислительные эксперименты на ЭВМ по характеристикам и параметрам дуговых и газокинетических процессов в режиме отключения токов короткого замыкания, результаты которого позволили выявить степень влияния параметров электрической сети на дуговые и газокинетические процессы в дугогасительной камере автоматических выключателей. Алгоритмы и программы расчета параметров дуговых и газокинетических процессов МОДЕЛ1 и МОДЕЛ2 предназначаются для использования при проектировании дугогасительных устройств с решеткой автоматических выключателей.

**Список литературы**

1. Горшков Ю.Е. Аналитические модели газокинетических процессов в автоматических выключателях // Компьютерные технологии и моделирование: сб. науч. тр. – Вып. 9. – Чебоксары, 2013. – С. 28–29

2. Горшков Ю.Е. Исследование на ЭВМ дуговых и газокинетических процессов в закрытых дугогасительных камерах // Компьютерные технологии и моделирование: сб. науч. тр. – Вып. 9. – Чебоксары, 2013. – С. 89–91

3. Горшков Ю.Е. Математическое моделирование газокинетических процессов в дугогасительных камерах автоматических выключателей // Компьютерные технологии и моделирование: сб. науч. тр. – Вып. 9. – Чебоксары, 2013. – С. 58–60.

4. Горшков Ю.Е. Математическое моделирование дуговых процессов автоматических выключателей // Компьютерные технологии и моделирование: сб. науч. тр. – Вып. 9. – Чебоксары, 2013. – С. 49–50.

5. Таев И.С., Пархоменко С.В., Горшков Ю.Е., Рагулин И.А. Математическая модель для расчета на ЭВМ дуговых процессов в автоматических выключателях. – Новочебоксарск: Изв. Вуз. Электромеханика, 1980. – № 3. – С. 308–315.

**References**

1. Gorshkov Yu.E. Analiticheskie modeli gazokineticheskikh processov v avtomaticheskikh vykljuchateljah – Komp’juternye tehnologii i modelirovanie: sb. науч. tr., no. 9, Cheboksary, 2013, pp. 28–29.

2. Gorshkov Yu.E. Issledovanie na JeVM dugovyh i gazokineticheskikh processov v zakrytyh dugogasitel’nyh kamerah – Komp’juternye tehnologii i modelirovanie: sb. науч. tr., no. 9, Cheboksary, 2013, pp. 89–91.

3. Gorshkov Yu.E. Matematicheskoe modelirovanie gazokineticheskikh processov v dugogasitel’nyh kamerah avtomaticheskikh vykljuchatelej – Komp’juternye tehnologii i modelirovanie: sb. науч. tr., no. 9, Cheboksary, 2013, pp. 58–60.

4. Gorshkov Yu.E. Matematicheskoe modelirovanie dugovyh processov avtomaticheskikh vykljuchatelej – Komp’juternye tehnologii i modelirovanie: sb. науч. tr., no. 9, Cheboksary, 2013, pp. 49–50.

5. Taev I.S., Parhomenko S.V., Gorshkov Yu.E., Ragulin I.A. Matematicheskaja model’ dlja rascheta na JeVCM dugovyh processov v avtomaticheskikh vykljuchateljah. – Novocheboksarsk: Izv. Vuzov. Jelektromehaniка, no. 3, 1980, pp. 308–315.

**Рецензенты:**

Артемьев И.Т., д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой математического и аппаратного обеспечения информационных систем, ФГБОУ ВПО «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова», г. Чебоксары;

Охоткин Г.П., д.т.н., профессор, декан факультета радиоэлектроники и автоматики ФГБОУ ВПО «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова», г. Чебоксары.

Работа поступила в редакцию 25.12.2013.