

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ НА ЭВМ ДУГОГАСИТЕЛЬНЫХ КАМЕР В ЗАКРЫТОМ КОРПУСЕ УСТАНОВОЧНЫХ АВТОМАТИЧЕСКИХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ

Горшков Ю.Е.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВПО «Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова», Чебоксары, Россия (428015, г. Чебоксары, Московский проспект, д. 15), e-mail: chnk@mail.ru

Построена математическая модель, учитывающая определяющие параметры дугогасительной камеры. Важнейшими параметрами выбраны те из них, от которых целевая функция зависит сильно, т.е. производные от этих параметров относительно велики. Установлено, что на величину напряжения дуги влияют как геометрические размеры дугогасительной решетки, так и дуговые и газокинетические параметры. За основные параметры оптимизации дугогасительной решетки приняты: число пластин решетки  $n$ ; расстояние между пластинами решетки  $b$ . В качестве третьего основного параметра оптимизации дугогасительной камеры выбран объем воздуха  $V$  в ней, тогда толщина пластин решетки является функцией выбранных параметров оптимизации. Максимальная величина давления  $P_m$  в камере является одним из ограничений на область допустимых значений. Выбрав, таким образом, управляемые параметры ( $n$ ,  $b$ ,  $V$ ) и ограничение, сформулировали задачу оптимизации параметров дугогасительной камеры.

Ключевые слова: проектирование, управляемые параметры, ограничения, дугогасительная камера, автоматический выключатель.

## STATEMENT OF THE PROBLEM COMPUTER DESIGN ARC CHAMBER IN A SEALED ENCLOSURE INSTALLATION OF CIRCUIT BREAKERS

Gorshkov Y.E.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>I.N. Ulyanov's Chuvash State University Cheboksary, Russia (428015, Cheboksary, Moscow prospect, 15), e-mail: chnk@mail.ru

Was build the mathematical model, that takes into consideration the parameters of arc extinguishing camera. As the most important parameters were taken such ones on what the target-orient function depends much, i.e. the derivatives of these parameters are relatively great. Was revealed out that the size of the voltage of the arc is influenced by the geometrical dimensions of the arc extinguishing grill as well as by the parameters of the arc and gas kinematical ones. As basic parameters of optimization of arc extinguishing grill were taken: the numbers of plates of the grill –  $n$ ; the distance between the plates of the grill –  $b$ . As the third basic parameter of the arc extinguishing chamber was solved the volume of the air in it, then the thickness of the grill's plates becomes the function of the chosen optimization parameters. The maximal value of the pressure in the chamber  $P_m$  is one of the restrictions toward the area of allowed values. Having chosen so the controllable values ( $n$ ,  $b$ ,  $V$ ) and the restriction, was formulated the problem of arc extinguishing chamber's parameters optimization.

Keywords: design, controlled parameters, constraints, arc chamber, circuit breaker, optimization method.

### Введение

Основной целью проектирования является создание электрического аппарата, полностью удовлетворяющего технико-экономическим показателям, требованиям современной технологии и организации производства и другим. Наиболее полно удовлетворить этим, нередко противоречивым, требованиям можно, применяя методы оптимального проектирования электрических аппаратов.

В данной статье сделана попытка постановки оптимизационной задачи по определению основных параметров закрытых дугогасительных камер (ДК) с решетками и реализации её на современных ЭВМ.

Основными задачами являются:

1. Постановка задачи по оптимизации основных параметров дугогасительной камеры с решеткой в закрытом корпусе установочных автоматических выключателей.
2. Разработка алгоритма и программы расчета оптимальных параметров дугогасительных камер с решеткой.
3. Разработка методики расчета геометрических размеров дугогасительной решетки и камеры в целом.
4. Реализация на ЭВМ метода расчета оптимальных геометрических размеров дугогасительной решетки камеры для установочных автоматических выключателей переменного напряжения до 1000 В.

### **Постановка задачи по оптимизации основных параметров дугогасительной камеры**

В самом общем случае процесс постановки и решения инженерной оптимизационной задачи можно разделить на следующие характерные этапы:

- 1) анализ возникшей проблемы;
- 2) создание соответствующих математических моделей физических процессов в проектируемом устройстве;
- 3) постановка экстремальной (оптимизационной) задачи на основе разработанных математических моделей;
- 4) выбор метода оптимизации;
- 5) разработка алгоритма поставленной задачи и составление программы расчета ее на ЭВМ;
- 6) решение задачи оптимизации на ЭВМ.
- 7) анализ полученных данных на ЭВМ с экспериментальными результатами.

Базой для постановки оптимизационной задачи являются математические модели процессов горения и гашения дуги в дугогасительных камерах с дугогасительными решетками для условий отключения токов короткого замыкания, разработанных в [9].

Постановка оптимизационной задачи на основе математической модели состоит из следующих элементов [16]:

- 1) определение целевой функции (критерия качества);
- 2) выбор важнейших параметров, подлежащих оптимизации управляемых параметров;
- 3) формулировка задачи оптимизации в виде:

$f(x) \rightarrow \min(\max)$

$$D = \{x \in E^n \mid \begin{aligned} h_j(x) &= 0, j=1, \dots, m, \\ g_i(x) &> 0, i=1, \dots, p, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $f(x)$  - целевая функция; вектор  $x$  – вектор управляемых параметров,  $h_j(x)$ ,  $g_i(x)$  ограничения, накладываемые на область решения;  $m$  – общее число ограничений типа равенства;  $p$  – число ограничений типа неравенства.

### **Определение целевой функции**

Автоматический выключатель предназначен для отключения электрических цепей при аварийных режимах - появление в цепи токов короткого замыкания и токов перегрузки выше допустимого значения. Кроме того, автомат должен коммутировать номинальные токи.

При отключении токов короткого замыкания возможно разрушение как контактной системы, так и дугогасительной камеры автоматического выключателя в связи с недопустимым возрастанием энерговыделения, давления и температуры газа в камере. В режиме же тока перегрузки и номинальных токов дуга может устойчиво гореть между контактами под дугогасительной решеткой, не входя в нее из-за недостаточных электродинамических сил, действующих на дугу.

Рационально выбранные параметры дугогасительной системы должны обеспечивать гашение дуги в вышеуказанных режимах работы за минимальное время. Однако, учитывая, что главной задачей автомата является отключение токов короткого замыкания, необходимо оптимизировать параметры дугогасительной камеры в этом режиме, а затем проверить работоспособность выбранной камеры в номинальном режиме и режиме перегрузки. В случае неудовлетворительной работы выбранной камеры в этих режимах необходимо скорректировать ее параметры с целью получения оптимальных сочетаний их во всех вышеуказанных режимах.

Таким образом, для повышения предельной коммутационной способности автоматического выключателя необходимо минимизировать энерговыделение в дугогасительной камере. Поэтому в качестве целевой функции принимается энергия дуги отключения в режиме токов короткого замыкания.

Энергия дуги  $W_{\partial}$ , выделившаяся за время ее горения в дугогасительной камере, определяется по формуле:

$$W_{\partial} = \int_0^{t_2} U_{\partial}(I_{\partial m}, p_m, n, \delta) * i_{\partial}(U_{\partial}, t) dt, \quad (2)$$

где  $t_2$  - время существования дуги, с;  $U_{\partial}$  - напряжение на дуге в дугогасительной решетке в функции максимальных значений тока дуги  $I_{\partial m}$  и давления  $p_m$ , числа пластин решетки  $n$  и расстояния между пластинами  $b$ ,  $i_{\partial}$  - ток дуги в функции напряжения на дуге и времени ее горения, А.

В общем случае энергия дуги зависит как от параметров отключаемой сети, так и от параметров контактно-дугогасительной системы автомата. В данной работе рассматриваются

вопросы минимизации энерговыделения в ДК в зависимости от ее параметров при отключении цепи переменного тока низкого напряжения.

### **Выбор управляемых параметров оптимизации**

Оптимизация дугогасительной камеры по всем ее геометрическим параметрам представляет собой задачу оптимизации большого числа параметров, численное решение которой встречает серьезные трудности. Поэтому на первых этапах оптимизации особенно важно построить простейшую модель, учитывающую лишь основные (определяющие) параметры. В том случае, если при оптимизации важнейших параметров будет получен положительный эффект, можно учесть влияние других важнейших из неучтенных параметров. Важнейшими параметрами являются те из них, от которых целевая функция зависит сильно, т.е. производные от этих параметров относительно велики. Следовательно, формально важность параметров можно определить, оценивая производные рассматриваемой функции. Однако для сложных задач такая оценка трудоемка и не всегда возможна, в таких случаях характеристика параметров дается по более наглядному критерию [1].

Основным назначением дугогасительной камеры является ограничение тока дуги вследствие существенного повышения напряжения на дуге и улучшения условия гашения ее за счет уменьшения условного угла сдвига фаз между напряжением источника и током дуги, а также увеличения восстанавливающейся прочности межконтактного промежутка. На величину напряжения дуги влияют как геометрические размеры дугогасительной решетки, так и дуговые и газокинетические параметры:

$$u_{dm} = f_1(u_s, n) + f_2(I_{dm}, p_m, n, \bar{b}), \quad (3)$$

где  $f_1(u_s, n)$  - функция, определяющая сумму приэлектродных падений напряжения на дуге и зависящая от приэлектродного падения напряжения одной пластины решетки и числа этих пластин;

$f_2(I_{dm}, p_m, n, \bar{b})$  - функция падения напряжения на столбах частичных дуг в решетке, зависящая от максимального значения тока дуги  $I_{dm}$ , максимального значения давления в камере  $P_m$ , числа пластин решетки  $n$  и расстояния между пластинами  $\bar{b}$ .

За основные параметры оптимизации дугогасительной решетки принимаются:

- 1) число пластин решетки  $n$ ;
- 2) расстояние между пластинами решетки  $\bar{b}$ .

Максимальное значение давления в камере зависит от мощности дуги  $P$ , объема воздуха  $V$  в ней и площади выходных отверстий:

$$\frac{dp}{dt} = \frac{Rr}{V} * \left\{ \frac{P'}{Cv} - A * p * \Psi * \sqrt{\frac{2}{R_r * T}} * [(x+1) * T - x * T_o] \right\}, \quad (4)$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{Rr * T}{p * V} * \left\{ \frac{P'}{Cv} - A * p * \Psi * \sqrt{\frac{2}{R_r * T}} * x * (T - T_o) \right\}, \quad (5)$$

$$P(t) = u_{\partial}(t) * i_{\partial}(t); P' = c * P(t), \quad (6)$$

$$\Psi = \sqrt{\frac{x}{x-1} * \sqrt{\left(\frac{P_o}{P}\right)^{2/x} - \left(\frac{P_o}{P}\right)^{\frac{x+1}{x}}}}; x = \frac{Cp}{Cv}, \quad (7)$$

где  $p$  - давление в дугогасительной камере, кгс· см<sup>2</sup>;  $t$  - текущее время, с;  $R_2$  - газовая постоянная воздуха, ккал\*кг<sup>-1</sup>\*град<sup>-1</sup>;  $V$  - объем воздуха в камере, см<sup>3</sup>;  $P'$  - доля мощности, расходуемая на повышение температуры и давления в камере, Вт;  $Cv$  - теплоемкость при постоянном объеме, ккал/(кг град);  $A$  - безразмерная;  $T$  - температура воздуха в камере,  $T_0$  - начальная температура, ° K;  $x$  - коэффициент;  $Cp$  - теплоемкость при постоянном давлении, ккал/(кг· град);  $P$  - мощность дуги, Вт;  $U_{\partial}$  - напряжение дуги, В;  $i_{\partial}$  - ток дуги, А;  $C$  - коэффициент, учитывающий долю мощности, расходуемую на повышение температуры  $T$  и давления  $p$  в камере.

В качестве третьего основного параметра оптимизации дугогасительной камеры выбирается объем воздуха  $V$  в ней, тогда толщина пластин решетки является функцией выбранных параметров оптимизации.

Максимальная величина давления  $P_m$  в камере не должна превышать допустимых значений  $P_{дон}$ . Это условие является одним из ограничений на область допустимых значений. Выбрав, таким образом, управляемые параметры ( $n$ ,  $b$ ,  $V$ ) и ограничение, сформулируем задачу оптимизации параметров дугогасительной камеры:

$$W_{\partial} \rightarrow \min$$

$$D = \{\bar{x} \in E^n : \begin{aligned} n_1 &\leq x_1 \leq n_2, \\ \bar{b}_1 &\leq x_2 \leq \bar{b}_2, \\ V_1 &\leq x_3 \leq V_2, \\ P_m &\leq P_{дон}, \end{aligned}$$

где  $W_{\partial}$  - энергия дуги отключения, Вт· с;  $x$  - вектор параметров оптимизации;  $x_1$  - число пластин решетки;  $x_2$  - расстояние между пластинами, мм;  $x_3$  - объем воздуха в камере, м<sup>3</sup>;  $n_1$ ,  $\bar{b}_1$ ,  $V_1$  - нижние границы управляемых параметров оптимизации;  $n_2$ ,  $\bar{b}_2$ ,  $V_2$  - верхние границы

для тех же параметров;  $P_m$  - максимальное значение давления в камере;  $P_{\text{доп}}$  - допустимое значение давления в камере автоматического выключателя, Па.

### **Выводы**

Поставленная выше задача оптимизации параметров дугогасительной камеры относится к классу задач условной нелинейной оптимизации. Для решения такой задачи могут быть использованы различные методы оптимизации. Ниже приводится краткий анализ методов оптимизации с целью выбора наилучшего из них применительно к условиям сформулированной выше задачи оптимизации параметров дугогасительной камеры.

### **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. Математическая модель движения подвижного контакта автоматического выключателя // Компьютерные технологии и моделирование : сб. науч. тр. Вып. 9. - Чебоксары, 2013. - С. 76-77.
4. Горшков Ю.Е. Математическое моделирование влияния давления в дугогасительной камере на напряжение дуги в автоматических выключателях // Компьютерные технологии и моделирование : сб. науч. тр. Вып. 9. - Чебоксары, 2013. - С. 63-65.
5. 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.
6. Горшков Ю.Е. Математическое моделирование дуговых процессов автоматических выключателей // Компьютерные технологии и моделирование : сб. науч. тр. Вып. 9. - Чебоксары, 2013. - С. 49-50.
7. Горшков Ю.Е. Особенности моделирования контактной системы токоограничивающего выключателя // Компьютерные технологии и моделирование : сб. науч. тр. Вып. 9. - Чебоксары, 2013. - С. 87-88.
8. Горшков Ю.Е. Расчет параметров контактно-дугогасительной камеры автоматического выключателя // Труды Моск. энерг. ин-та. – 1980. - Вып. 424. - С. 21-24.

9. Разработка математических моделей, алгоритмов и программ их расчета на ЭВМ и методики проектирования дугогасительных решеток автоматических выключателей и синхронных аппаратов // Отчет 140/77, инв. № Б779933 / МЭИ; Таев И.С. - М., 1979. - 55 с.
10. Таев И.С., Горшков Ю.Е., Попова Е.П. Методика оптимизационного расчета основных параметров дугогасительной камеры автоматических выключателей // Изв. вузов. Электромеханика (Новочеркасск). – 1981. - № 10.
11. Таев И.С., Горшков Ю.Е., Попова Е.П. Оптимизационный расчет показателей контактно-дугогасительной системы токоограничивающих выключателей : тезисы докладов IV Всесоюзной НТК «Состояние перспективы развития низковольтного аппаратостроения» (Гомель). – 1981. - С. 1.
12. Таев И.С., Горшков Ю.Е., Попова Е.П. Постановка задачи по оптимизации дугогасительных устройств автоматических выключателей // Труды Моск. энерг. ин-та. – 1981. - 552 с.
13. Таев И.С., Горшков Ю.Е., Рагулин И.А., Попова Е.П. Математическая модель отключения токов короткого замыкания в автоматических выключателях с дугогасительной камерой // Труды Моск. энерг. ин-та. - 1982. - Вып. 502. - С. 1.
14. Таев И.С., Егоров Е.Г., Горшков Ю.Е. Исследование восстанавливающейся электрической прочности электрических аппаратов // Электротехника. – 1982. - № 3.
15. Таев И.С., Егоров Е.Г., Горшков Ю.Е., Попова Е.П. Оптимизация параметров дугогасительной камеры электрического аппарата // Эл. техн. пром., сер. «Аппараты низкого напряжения». – 1981. – 1 (92).
16. Таев И.С., Пархоменко С.В., Горшков Ю.Е., Рагулин И.А. Математическая модель для расчета на ЭВМ дуговых процессов в автоматических выключателях // Изв. вузов. Электромеханика (Новочебоксарск). – 1980. - № 3. - С. 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.