

УДК 621.316.717.027.2-213.34

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НАГРЕВА РУДНИЧНОГО ВЗРЫВОЗАЩИЩЕННОГО АППАРАТА

Карась С.В., докт. техн. наук, проф., Кардаш В.В, аспирант,
Донецкий государственный технический университет

Рассмотрен синтез и верификация математической модели нагрева рудничного взрывозащищенного аппарата с учетом величины нагрузки, продолжительности включения, частоты включений-отключений нагрузки. В основу верификации полученной математической модели положен многофакторный эксперимент при широком диапазоне варьирования определяющих воздействующих факторов.

In the article synthesis and verification of a mathematical model of heat of the miner explosion-proof device subject to values of a load, duration of inclusion, frequency of switching on-off of a load are considered. In a basis of verification of an obtained mathematical model there is the many-factorial experiment with wide range of a variation of the defining effecting factors.

Одним из необходимых условий повышения эффективности экономики топливно-энергетического комплекса, связанного с добычей полезных ископаемых в сложных горно-технологических условиях, взрывоопасных по газу и угольной пыли, является создание современных и надежных электрических аппаратов управления и защиты.

Рудничные взрывобезопасные аппараты (РВА) по условиям эксплуатации в угольных шахтах, в силу своих конструктивных особенностей создают внутри оболочки микроклимат: изменение влажности, температуры и концентрации продуктов дугогашения в закрытом, ограниченном объеме [1].

Для определения теплового состояния РВА исследуем степень влияния различных факторов, характерных для эксплуатации электроприводов горных машин различного назначения, в том числе подключенной нагрузки. Наиболее существенными факторами, влияющими на нагрев РВА, являются: величина тока нагрузки (I , А), продолжительность включения ($ПВ$, %) и частота циклов включения-отключения (N , ВО/час) [2]. В качестве обобщающего параметра нагрева РВА принята температура воздуха внутри его оболочки.

Для определения степени влияния отмеченных факторов был проведен многофакторный статистически спланированный эксперимент. В связи с поставленной в исследованиях задачей аппроксимации функции была выбрана широкая зона изменения факторов, исходя из данных эксплуатации, нормативно-технической документации и технической литературы. Основные уровни и интервалы варьирования факторов приведены в табл.1.

Таблица 1 - Основные уровни и интервалы варьирования факторов

Воздействующий фактор	Условное обозначение	Верхний уровень фактора (+)	Нижний уровень фактора (-)	Интервал варьирования
Ток подключенной нагрузки I , А	X_1	250	120	130
Частота включений-отключений N , ВО/час	X_2	600	300	300
Продолжительность включений ПВ, %	X_3	95	5	90

Для эксперимента принят план полного многофакторного эксперимента ПФЭ типа 2^K . План многофакторного эксперимента и результаты приведены в табл.2.

Таблица 2 - План многофакторного эксперимента 2^3

№ опыта	Факторы, взаимодействие факторов								Отклик			
	X_0	X_1	X_2	X_3	X_{12}	X_{13}	X_{23}	X_{123}	Y_1	Y_2	Y	\bar{Y}
1	+	+	+	+	+	+	+	+	75	66	70,5	71,56
2	+	-	+	+	-	-	+	-	31	33	32,0	34,06
3	+	+	-	+	-	+	-	-	55	68	61,5	60,04
4	+	-	-	+	+	-	-	+	24	26	25,0	22,94
5	+	+	+	-	+	-	-	-	40	42	41,0	37,30
6	+	-	+	-	-	+	-	+	21	20	20,5	20,92
7	+	+	-	-	-	-	+	+	19	26	22,5	26,20
8	+	-	-	-	+	+	+	-	12	9	10,5	9,94

Для исключения методических ошибок, вызванных внешними условиями, проведена рандомизация двух параллельных экспериментов при помощи таблицы случайных чисел. При исследовании обеспечивался контроль и поддержание всех факторов на заданном уровне с погрешностью $\pm 5\%$; продолжительность одного эксперимента составляла 8 часов.

Обработка результатов эксперимента проводилась с использованием метода наименьших квадратов. Общий вид функции [3]:

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_{12} X_1 X_2 + b_{13} X_1 X_3 + b_{23} X_2 X_3. \quad (1)$$

Коэффициенты регрессии определялись по следующим зависимостям:

$$b_0 = \frac{\sum_{i=1}^N Y_i}{N}; \quad b_j = \frac{\sum_{i=1}^N Y_i X_{ij}}{N}; \quad b_{uj} = \frac{\sum_{i=1}^N Y_i X_{ij} X_{uj}}{N}. \quad (2)$$

Воспроизводимость экспериментов определялась по критерию Кохрена:

$$G = \frac{S_{\max}^2}{\sum_{i=1}^N S_{ui}^2}, \quad (3)$$

где S_{\max} – максимальная дисперсия в эксперименте;

S_u – сумма дисперсии;

$$S_u^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{j=1}^N (Y_{uj} - \bar{Y}_u)^2; \quad (4)$$

m – число дублируемых экспериментов.

Для откликов согласно табл.2 получены следующее значение критерия Кохрена:

$$S_u^2 = 141,75; \quad G = 0,5961.$$

Табличное значение критерия Кохрена $G_{\text{табл}}$ для числа экспериментов $N = 8$, $m = 2$ и $\alpha = 0,95$ составляет 0,6798. Поскольку расчетное значение критерия Кохрена не превышает табличное, то нет оснований отвергать воспроизводимость опытов.

Определим значения коэффициентов регрессии:

$$b_0 = 35,4; \quad b_1 = 13,4; \quad b_2 = 5,56; \quad b_3 = 11,8;$$

$$b_{12} = 1,31; \quad b_{13} = 5,31; \quad b_{23} = 1,56.$$

Значимость полученных коэффициентов определялась по расчетному критерию Стьюдента [3]:

$$t_i = \frac{|b_i|}{\sqrt{S^2\{b_i\}}}; \quad t_{ij} = \frac{|b_{ij}|}{\sqrt{S^2\{b_{ij}\}}}, \quad (5)$$

где

$$S^2\{b_i\} = S^2\{b_{ij}\} = \frac{S^2\{Y\}}{\sum_{u=1}^N n_u}. \quad (6)$$

Дисперсия воспроизводимости определялась по формуле:

$$S^2\{Y\} = \frac{S_e}{f_e} = \frac{\sum_{u=1}^N \sum_{j=1}^m (Y_{uj} - \bar{Y}_u)^2}{N \cdot (m-1)} = \frac{S_u^2}{N \cdot (m-1)};$$

$$S^2\{Y\} = \frac{141,75}{8} = 17,72;$$

$$\sqrt{S^2\{b_i\}} = \sqrt{\frac{17,72}{16}} = 1,052.$$

Значимость коэффициентов определялась из выражения:

$$t_0 = \frac{|b_0|}{\sqrt{S^2\{b_i\}}} = \frac{35,4}{1,052} = 33,65;$$

$$t_1 = 12,70; \quad t_2 = 5,28; \quad t_3 = 11,20;$$

$$t_{12} = 1,20; \quad t_{13} = 5,05; \quad t_{23} = 1,48.$$

Табличное значение критерия Стьюдента для числа степеней свободы

$$f_e = N \cdot (m-1) = 8 \cdot (2-1) = 8$$

при доверительной вероятности $\alpha = 0,95$ согласно [3] получено равным $t_{\text{табл}} = 2,31$.

Исключив незначимые коэффициенты b_{12} и b_{23} , можно получить следующее уравнение:

$$Y = 35,4 + 13,4 \cdot X_1 + 5,56 \cdot X_2 + 11,8 \cdot X_3 + 5,31 \cdot X_1 \cdot X_3. \quad (8)$$

Для проверки адекватности математической модели определялась дисперсия адекватности:

$$S_{ад} = \frac{S_{LE}}{f_{LE}} = \frac{m \cdot \sum_{u=1}^N (\bar{Y}_u - \hat{Y}_u)^2}{N - \lambda}, \quad (9)$$

где λ – число членов регрессионного уравнения;

\bar{Y} – значение отклика, рассчитанное по модели.

$$S_{ад} = 26,49.$$

Расчетный критерий Фишера определялся по формуле:

$$F_{ад} = \frac{S_{ад}^2}{S^2\{Y\}} = \frac{26,49}{17,72} = 1,49. \quad (10)$$

По таблице критериев Фишера для $f_1 = 3$ и $f_2 = 8$ получено значение $F_{табл} = 4,03$. Поскольку расчетное значение критерия $F_{ад}$ не превышает табличного $F_{табл}$, то математическая модель адекватна экспериментальным данным.

Преобразуем полученную модель в натуральные факторы по формуле:

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^{\lambda} b_i \frac{X_i - X_{i\text{ср}}}{\Delta X_i}, \quad (11)$$

где $X_{i\text{ср}}$ – средний уровень фактора;

ΔX_i – половина интервала варьирования.

$$Y = -15,8 + 0,116 \cdot X_1 + 0,037 \cdot X_2 - 0,071 \cdot X_3 + 0,0018 \cdot X_1 \cdot X_3. \quad (12)$$

Полученное регрессионное уравнение позволяет моделировать нагрев воздуха в оболочке РВА от теплового выделения элементов при изменении параметров нагрузки. На рис. 1 приведены графики зависимости температуры перегрева воздуха внутри оболочки от каждого из воздействующих факторов при фиксированных значениях двух других.

Наибольшее влияние на величину температуры воздуха внутри оболочки оказывает величина подключенной нагрузки I и продолжительность включения ПВ. В меньшей степени оказывает влияние частота операций ВО.

Полученная модель была экспериментально проверена при испытаниях пускателей в категории применения АС-4 для пускателя ПВИР-250. Испытания проводились при среднеквадратичном токе нагрузки $I = 620 \text{ А}$ и частоте циклов $N = 600 \text{ ВО}_{\text{час}}$ с ПВ = 3,3%.

При этом время работы $t_{p1} = 20 \text{ мин}$ и $t_{p2} = 40 \text{ мин}$ чередовалось с паузами, равными соответственно $t_{n1} = 40 \text{ мин}$ и $t_{n2} = 20 \text{ мин}$. При испытании контролировалась температура в верхней части оболочки (в месте установки блоков управления и защиты), где температура нагрева воздуха наиболее высокая. Температура контрольных точек составила 34, 38, 39, 41, 33 °С при продолжительности времени работы $t_{p1} = 20 \text{ мин}$ и 52, 61, 69, 61, 55 °С при продолжительности времени работы $t_{p2} = 40 \text{ мин}$.

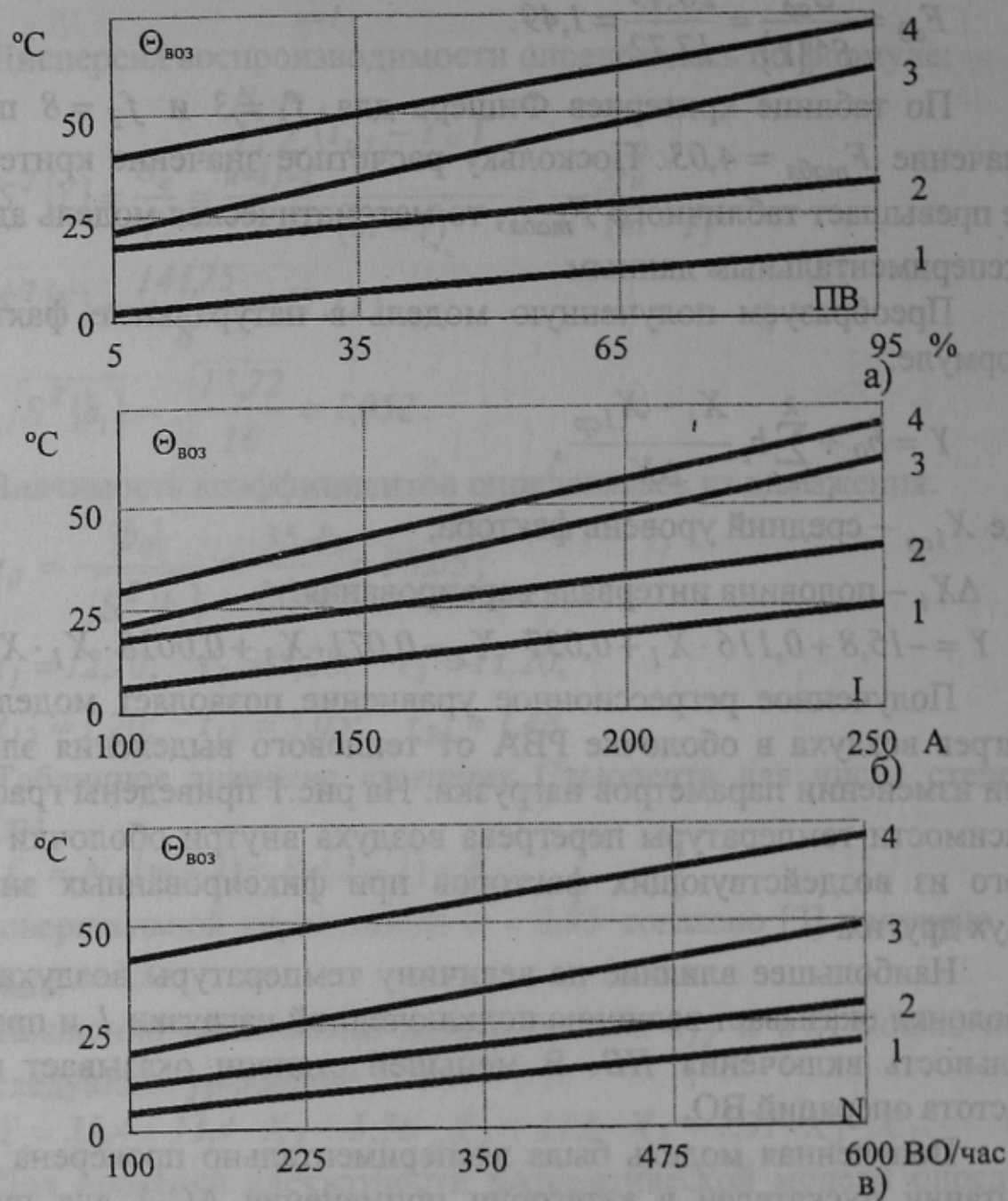


Рис. 1 – Зависимость перегрева воздуха $\Theta_{\text{воз}}$ внутри оболочки РВА в функции продолжительности включения ПВ (а), тока нагрузки I (б), частоты включения N (в)

На рис. 1а приведены зависимости $\Theta_{603} = f(\text{ПВ})$:

1 – для $N|_{I=100A} = 100 \text{ ВО/час}$; 2 – для $N|_{I=100A} = 600 \text{ ВО/час}$;
3 – для $N|_{I=250A} = 100 \text{ ВО/час}$; 4 – для $N|_{I=250A} = 600 \text{ ВО/час}$.

На рис. 1б приведены зависимости $\Theta_{603} = f(I)$:

1 – для $N|_{\text{ПВ}=5\%} = 300 \text{ ВО/час}$; 2 – для $N|_{\text{ПВ}=95\%} = 300 \text{ ВО/час}$;
3 – для $N|_{\text{ПВ}=5\%} = 600 \text{ ВО/час}$; 4 – для $N|_{\text{ПВ}=95\%} = 600 \text{ ВО/час}$.

На рис. 1в приведены зависимости $\Theta_{603} = f(N)$:

1 – для $I|_{\text{ПВ}=5\%} = 100A$; 2 – для $I|_{\text{ПВ}=95\%} = 100A$;
3 – для $I|_{\text{ПВ}=5\%} = 250A$; 4 – для $I|_{\text{ПВ}=95\%} = 250A$.

Расчет по модели (12) при $X_1 = 620 \cdot \sqrt{\frac{t_p}{t_p + t_n}}$, А; $X_2 = 220$ и 440 циклов ВО в час и $X_3 = 3,3\%$ дал следующие результаты: средние значения $Y_1 = 37^\circ\text{C}$, $Y_2 = 60,6^\circ\text{C}$; погрешность

$$\delta Y_i = \left| \frac{Y_i - \bar{Y}_i}{\bar{Y}_i} \right| \cdot 100\%; \quad (13)$$

составляла соответственно

$$\delta Y_1|_{\bar{Y}_1=37^\circ\text{C}} = 2,7\%; \quad \delta Y_2|_{\bar{Y}_2=60^\circ\text{C}} = 2,2\%.$$

Полученная математическая модель позволяет моделировать нагрев воздуха внутри оболочки пускателей как обобщающий параметр РВА в зависимости от величины нагрузки и режима работы управляемого (защищаемого) двигателя электропривода горных машин и механизмов различного технологического назначения.

Список источников.

1. Надежность взрывозащищенного и рудничного оборудования / А.И. Быков, Б.Н. Ванеев, А.Д. Главный и др. – М.: Недра, 1979. – 312 с.
2. Кардаш В.В. Исследование влияния режима работы нагрузок на температуру воздуха и концентрацию окислов азота внутри оболочки электромагнитного пускателя ПВИ-250 // Взрывозащищенные электрические аппараты: Сборник научных трудов ВНИИВЭ. – Донецк, 1984, С.82-86.
3. ОСТ 16.0.800.778-80. Оборудование электротехническое взрывозащищенное и рудничное на напряжение до 1200 В. Надежность. Методика обеспечения надежности. – Введ. С 25.09.80. – ВНИИВЭ, 1980. – 80 с.