

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ФЕРРО-ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО УКАЗАТЕЛЯ ТОКА КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

*Шленнёв С.В., аспирант,
Ожерельев И.Д., к.х.н.,
Мухомад О.В., студентка*

На работу феррогидродинамического указателя тока короткого замыкания (ФУТКЗ) [1] в режиме короткого замыкания (КЗ) влияет ряд факторов. В связи с этим возникла необходимость построения математической модели работы ФУТКЗ с применением теории планирования эксперимента. При экспериментальных исследованиях ось рабочей камеры устройства была совмещена с вертикальной координатой y , $y=0$ соответствует верхнему срезу магнитопровода. В качестве выходной переменной приняли уровень затемнения индикаторного знака рабочей камеры ФУТКЗ после трех часов с момента срабатывания — $y_{(3)}$. Наиболее существенно на $y_{(3)}$ влияют следующие факторы: массы засыпок первого (z_1 , г) и второго (z_2 , г) порошков в рабочую камеру устройства, положение рабочей камеры ФУТКЗ по координате y (z_3 , мм), концентрация водного раствора рабочей жидкости (z_4 , %), угол между полюсами магнитной системы (z_5 , град.).

Оценка области изменения выбранных факторов проведена по результатам предварительно поставленных опытов с учетом особенностей режимов срабатывания и возврата ФУТКЗ в исходное состояние с течением времени и технологии заполнения рабочей камеры устройства. В результате установили следующую область определения факторов: $0,6 \leq z_1 \leq 7,8$ (г); $0,06 \leq z_2 \leq 0,76$ (г); $30 \leq z_3 \leq 75$ (мм); $20 \leq z_4 \leq 80$ (%); $12 \leq z_5 \leq 32$ (град.).

Планирование эксперимента выполнили, используя симплексный метод [2, 3]. По составленной матрице планирования эксперимента в натуральных величинах пересчетом получили безразмерный план эксперимента с учетом отбрасывания худших точек (кантования симплекса) для достижения "почти стационарной" области. Коэффициенты уравнения регрессии определили по методу наименьших квадратов [2]. Таким образом, полученная математическая модель в безразмерной форме имеет вид

$$\begin{aligned} \hat{y} = & 27 - 69x_1 + 62,9x_2 + 96,3x_3 + 48,6x_4 - 20,4x_5 - 272x_1^2 + 201x_2^2 - 287x_3^2 - \\ & - 23,7x_4^2 + 189x_1x_2 + 604x_1x_3 - 275x_1x_4 + 61,3x_1x_5 + 136x_2x_3 - 2,5x_2x_4 - \\ & - 395x_3x_4 - 186x_3x_5 - 312x_4x_5. \end{aligned} \quad (1)$$

Статистический анализ полученного уравнения регрессии выполнен в соответствии с методикой, изложенной в [3].

Если математическую модель привести к натуральной форме, то уравнение (1) примет следующий вид

$$\begin{aligned} \dot{y} = & -1311 - 92,3Z_1 - 540Z_2 + 19,9Z_3 + 16,2Z_4 + 40,3Z_5 - 11,8Z_1^2 + 306Z_2^2 - \\ & - 0,12Z_3^2 - 0,142Z_5^2 + 48,6Z_1Z_2 + 2,57Z_1Z_3 - 0,755Z_1Z_4 + Z_1Z_5 + \\ & + 3,4Z_2Z_3 - 0,85Z_2Z_4 - 0,106Z_3Z_4 - 0,29Z_3Z_5 - 0,319Z_4Z_5. \end{aligned} \quad (2)$$

Оптимизацию полученной модели (1) выполнили, применив симплексный метод Нелдера-Мида [4], при условии существования КЗ в течение $t_{\text{cp}} = 0,5$ с и возврате ФУТКЗ в исходное состояние в течение трех-четырёх часов с момента его срабатывания [1]. Следовательно, задача сводится к нахождению условий, при которых уровень затемнения индикаторного знака ФУТКЗ через три часа будет максимальным.

Результаты оптимизации в кодированной и натуральной формах приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты оптимизации

Кодированные величины	Натуральные величины
$x_1 = -0,0555; x_2 = -0,115; x_3 = 0,0834;$	$z_1 = 2,73 \text{ г}; z_2 = 0,44 \text{ г}; z_3 = 64 \text{ мм};$
$x_4 = -0,262; x_5 = 0,319$	$z_4 = 48\%; z_5 = 24^\circ$
Ограничение при оптимизации – $y_{(3)} = 30 \text{ мм}$	

Полученный в качестве уравнения регрессии (1) и (2) полином второй степени хорошо согласуется с принятыми ранее предпосылками: движение частиц первого и второго порошков (факторы 1 и 2) в рабочей камере ФУТКЗ описывается законом Стокса [5]; изменение градиента магнитного поля по координате y (фактор 3), а также изменения этого поля, вызванные изменением угла между полюсами магнитопровода (фактор 5), существенно нелинейны.

Для проверки полученных оптимальных условий работы ФУТКЗ, приведенных в таблице 1, поставили контрольные опыты. В результате получили:

- а) расчетное значение уровня затемнения индикаторного знака ФУТКЗ по уравнению (2) – $\dot{y} = 30 \text{ мм}$;
- б) средний уровень затемнения индикаторного знака ФУТКЗ по параллельным опытам – $\dot{y} = 29,7 \text{ мм}$.

Таким образом, расхождение между экспериментом и расчетом составляет 1% и поэтому условия, приведенные в таблице 1, целесообразно использовать при серийном производстве ФУТКЗ.

Список литературы

1. Белый М.В., Дробот В.К., Елиософ В.А. и др. Указатели тока короткого замыкания УТКЗ-50-2000/200-0.6 // Энергетика и электрификация. – 1996. – №1. – С. 24-27.
2. Кафаров В.В. Методы кибернетики в химии и химической технологии. – М.: Химия, 1985. – 448 с.
3. Бондарь А.Г., Статюха Г.А., Потяженко И.А. Планирование эксперимента при оптимизации процессов химической технологии. – К.: Вища школа, 1980. – 264 с.
4. Банди Б. Методы оптимизации. – М.: Радио и связь, 1988. – 128 с.
5. Кизевальтер Б.В. Теоретические основы гравитационных процессов обогащения. – М.: Недра, 1979. – 285 с.