

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ УКАЗАТЕЛЯ ТОКА КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

*Шлепнёв С.В., Бершадский И.А., Елиософ В.А., аспиранты,
Молодая Л.П., Андриенко А.М., студенты*

При прохождении тока короткого замыкания (КЗ) по кабельной линии или по проводу воздушной линии ферропорошок, находящийся в рабочей камере феррогидродинамического указателя тока КЗ (ФУТКЗ), перемещается вверх [1]. Таким образом, происходит движение частиц в парамагнитной жидкости в неоднородном магнитном поле. Рассматриваются следующие задачи: составить уравнение движения зерен ферромагнитного материала, получить оценочные зависимости пути, проходимого частицей в процессе подъема, и скорости ее движения от времени. При этом следует учесть, что частицы, находящиеся в разных слоях порошка, имеют разные начальные условия. Поэтому все дальнейшие рассуждения относятся к верхнему слою порошка.

Баланс сил при движении частиц ферропорошка вверх (вертикальная координата у совмещена с осью рабочей камеры, $y=0$ – соответствует верхнему срезу магнитопровода [1]) имеет вид

$$-F_A + F_T + F_C - F_{\text{Э}} + F_{\text{ИН}} = 0, \quad (1)$$

где $F_A = (\pi d_3^3 / 6) g \rho_{\text{ж}} / k_{\text{сф}}^{1,5}$ – сила Архимеда;

$F_T = (\pi d_3^3 / 6) g \rho_{\text{ф}} / k_{\text{сф}}^{1,5}$ – сила тяжести;

$F_C = 3\pi \eta d_3 k_{\text{сф}}^{0,5} dy/dt$ – сила сопротивления;

$F_{\text{Э}} = (\pi d_3^3 / 6 k_{\text{сф}}^{1,5}) \mu_0 \chi_{\text{ф}} \rho_{\text{ф}} H(y) \text{grad} H(y, t)$ – электромагнитная сила;

$F_{\text{ИН}} = (\pi d_3^3 / 6 k_{\text{сф}}^{1,5}) \rho_{\text{ф}} d^2 y / dt^2$ – сила инерции;

d_3 – эквивалентный диаметр феррочастицы; g – ускорение свободного падения; $\rho_{\text{ж}}$, $\rho_{\text{ф}}$, $\rho_{\text{нф}}$ – плотности жидкости, ферропорошка и добавки соответственно; y – вертикальная координата; $k_{\text{сф}}$ – коэффициент сферичности феррочастиц; η – динамическая вязкость жидкости; t – время; μ_0 – магнитная постоянная; $\chi_{\text{ф}}$ – удельная магнитная восприимчивость, C_0 – начальная концентрация ферропорошка; $y_{\text{н}}$, $y_{\text{к}}$ – начальная и конечная координаты; $V_{\text{ф}}$, $V_{\text{нф}}$ – объемы ферропорошка и добавки. После подстановки значений сил в (1) получим

$$\begin{aligned} \frac{d^2 y}{dt^2} = & (\mu_0 \chi_{\text{ф}} \rho_{\text{ф}} H(y, t) \frac{dH}{dy}(y, t) - k_{\text{нф}} g (\rho_{\text{ф}} - \rho_{\text{ж}}) - \\ & - \frac{18\eta k_{\text{нф}}}{d_3^2} (1 - C_0 \frac{y_{\text{к}}}{y_{\text{н}}})^3 \frac{dy}{dt}) / (k_{\text{нф}} \rho_{\text{ф}}), \end{aligned} \quad (2)$$

где $k_{нф} = (V_{нф}\rho_{нф} + V_{ф}\rho_{ф}) / V_{ф}\rho_{ф}$.

Рассмотрим изменение электромагнитной силы в функции координаты и времени. В ФУТКЗ “толчковая” зона, в которой находится верхний слой порошка в момент срабатывания, расположена в пределах $y=45-55$ мм при высоте магнитной системы – 50 мм (в зависимости от угла “раскроя” полюсов). Из-за краевых эффектов, вызванных выпучиванием потока, максимум силы приходится на указанную область. Поэтому магнитное поле в случае клиновидных полюсов нельзя считать ни изодинамическим ($F_{э}=\text{const}$), ни возрастающим пропорционально с расстоянием ($F_{э}=Ky$) [2]. В связи с этим, исходя из расчетно-экспериментальных данных [4], были выполнены кусочно-регрессионные аппроксимации действующего значения напряженности магнитного поля $H(y)$ и $\text{grad}H(y)$ в зазоре электромагнита при токе КЗ 2000 А (рис. 1, 2). Математическое обеспечение – функция `interp (cspline)` в системе программирования Mathcad 6.0+.

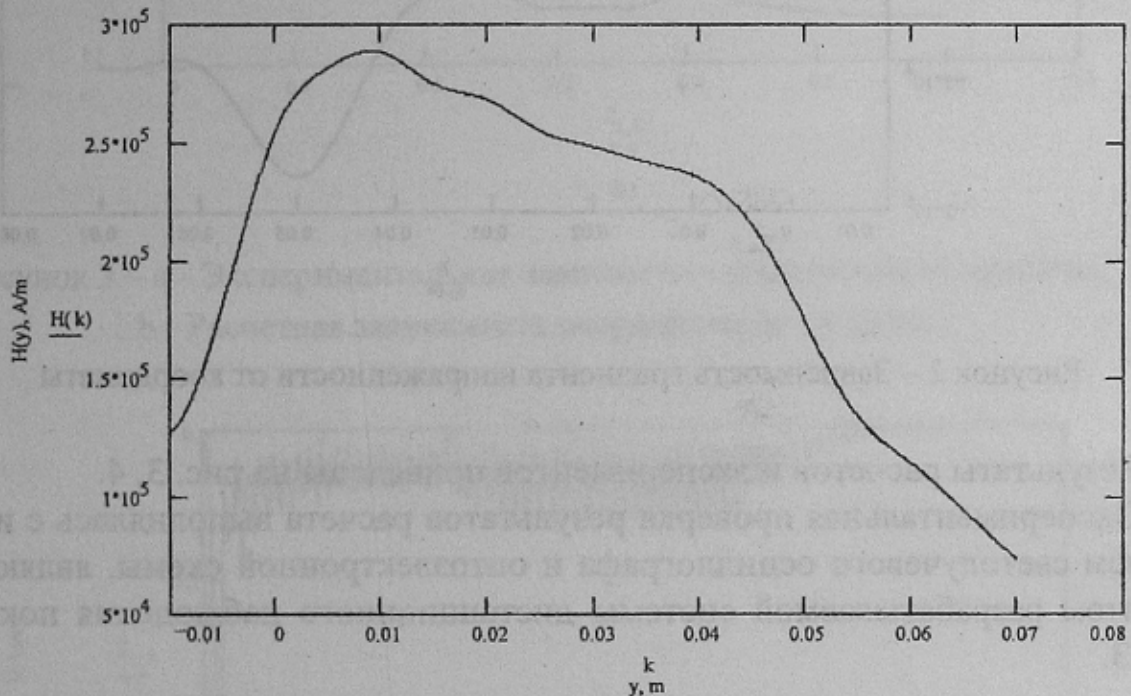


Рисунок 1 – Зависимость напряженности поля от координаты

Следует учесть, что срабатывание ФУТКЗ совпадает по времени с прохождением переходного процесса в линии. Согласно [3] рассматриваем максимальный случай затухания аperiodической составляющей тока КЗ, определяемой фазой включения α . Сделаем допущение, что ток КЗ и напряженность магнитного поля совпадают по фазе. Тогда в максимальном режиме ($\alpha=0^\circ$, $\varphi=90^\circ$)

$$H_{kt\max} = H_{n\max}(\sin(\omega t - 90) + \exp(-t/0,01)). \quad (3)$$

Решение уравнения (3) с учетом указанной зависимости выполнялось с помощью системы Mathcad 6.0+. Исходными данными являлись:

$V_{\phi}=1,5 \times 10^{-5} \text{ м}^3$, $V_{\text{нф}}=0,1V_{\phi}=1,5 \times 10^{-6} \text{ м}^3$, $K_{\text{нф}}=1,106$, $\rho_{\phi}=5000 \text{ кг/м}^3$,
 $\rho_{\text{нф}}=5300 \text{ кг/м}^3$, $K_{\text{сф}}=0,7$, $\rho_{\text{ж}}=1065 \text{ кг/м}^3$, $\chi_{\phi}=8 \times 10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг}$, $d_3=10^{-4} \text{ м}$,
 $\eta=3,92 \times 10^{-3} \text{ Нс/м}^2$, $C_0=0,1$, $\mu_0=4\pi \times 10^{-7} \text{ Гн/м}$, $\omega=314 \text{ с}^{-1}$. Начальные условия:
 $y(0)=0,045 \text{ м}$, $y'(0)=0$.

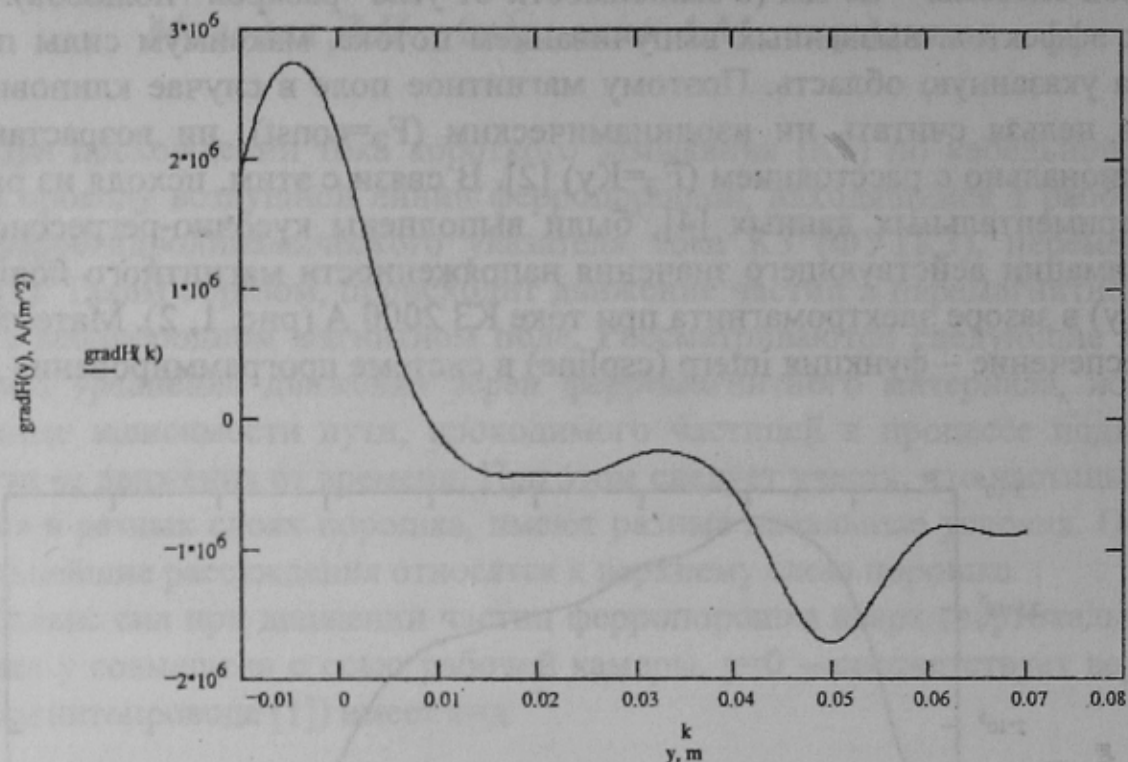


Рисунок 2 – Зависимость градиента напряженности от координаты

Результаты расчетов и экспериментов приведены на рис. 3, 4.

Экспериментальная проверка результатов расчета выполнялась с использованием светолучевого осциллографа и оптоэлектронной схемы, являющейся элементом разрабатываемой системы дистанционного наблюдения показаний ФУТКЗ.

Выводы:

1. Представлено решение уравнения динамики ФУТКЗ, учитывающее неоднородность магнитного поля, протекание переходного процесса в линии, коэффициенты формы частиц и изменение концентрации ферросuspензии при ее движении.

2. На основе сопоставления результатов аналитических и экспериментальных исследований разработана методика расчета динамики ФУТКЗ с использованием расчетно-экспериментальных зависимостей $H(y)$, $\text{grad}H(y)$.

3. Анализируя графические зависимости, представленные на рис. 3, 4, можно заключить, что максимальное расхождение между расчетом и экспериментом для интервала значений $t=0,08-0,24 \text{ с}$, не превышает 15%.

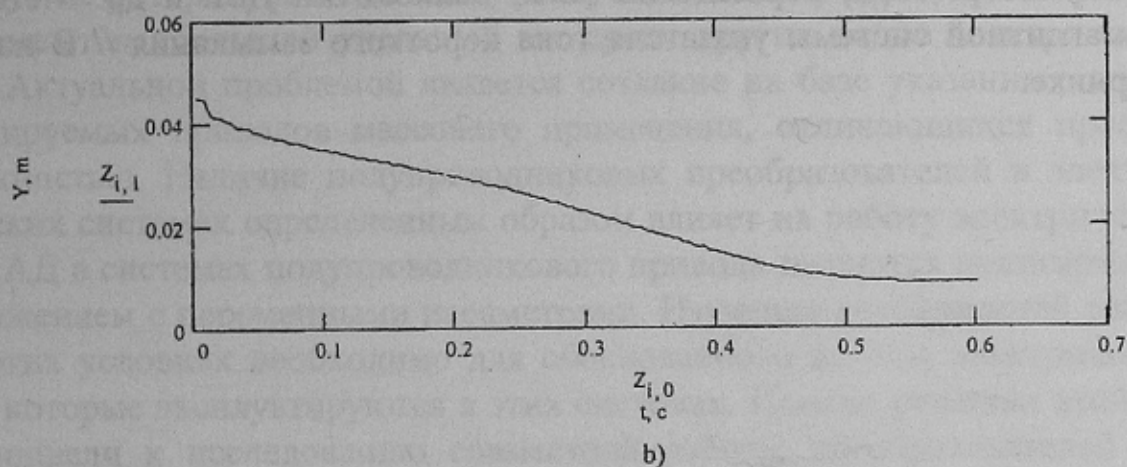
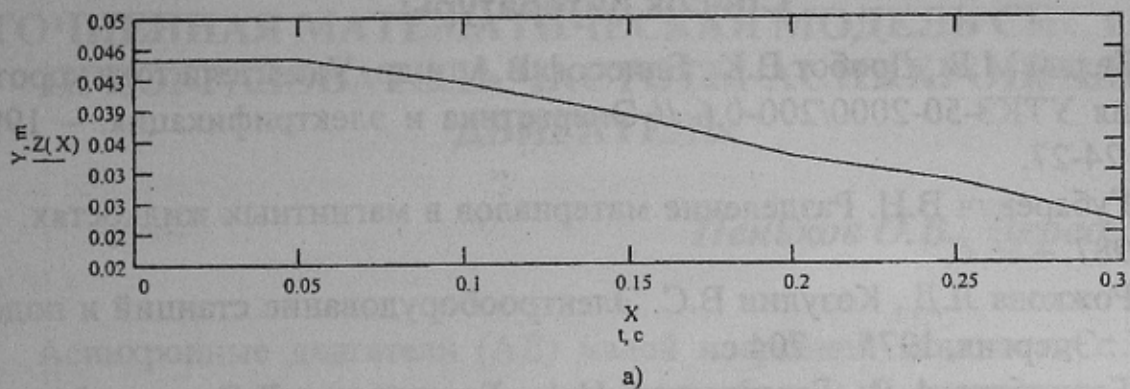


Рисунок 3 – а - Экспериментальная зависимость координаты от времени;
 б - Расчетная зависимость координаты от времени

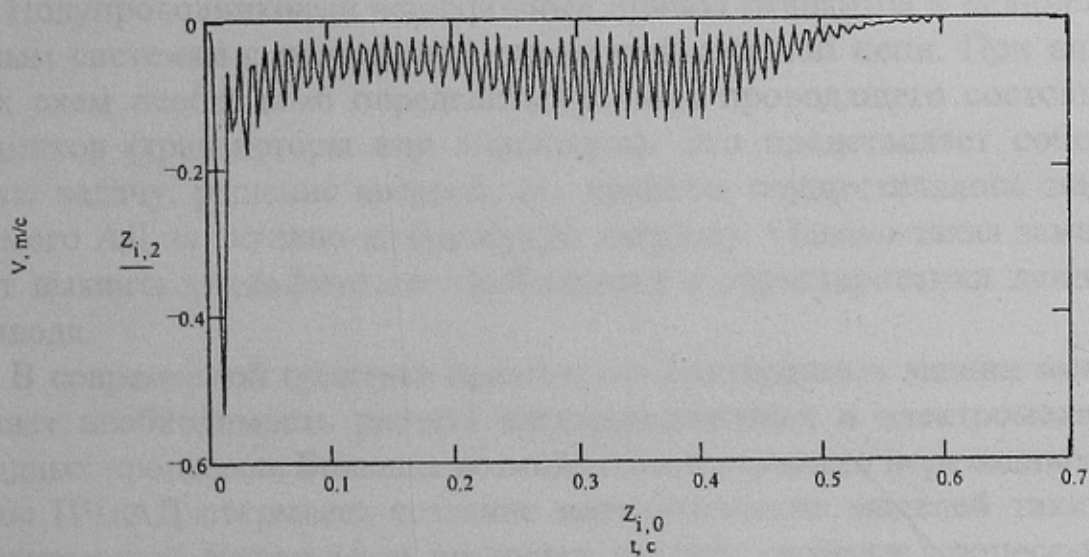


Рисунок 4 – Расчетная зависимость скорости от времени

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. Губаревич В.Н. Разделение материалов в магнитных жидкостях. – М.: Недра, 1987. – 86 с.
3. Рожкова Л.Д., Козулин В.С. Электрооборудование станций и подстанций. – М.: Энергия, 1975. – 704 с.
4. Баринберг А.Д., Бершадский И.А., Балховитин Д.Л. и др. Методика расчета магнитной системы указателя тока короткого замыкания // В настоящем сборнике.

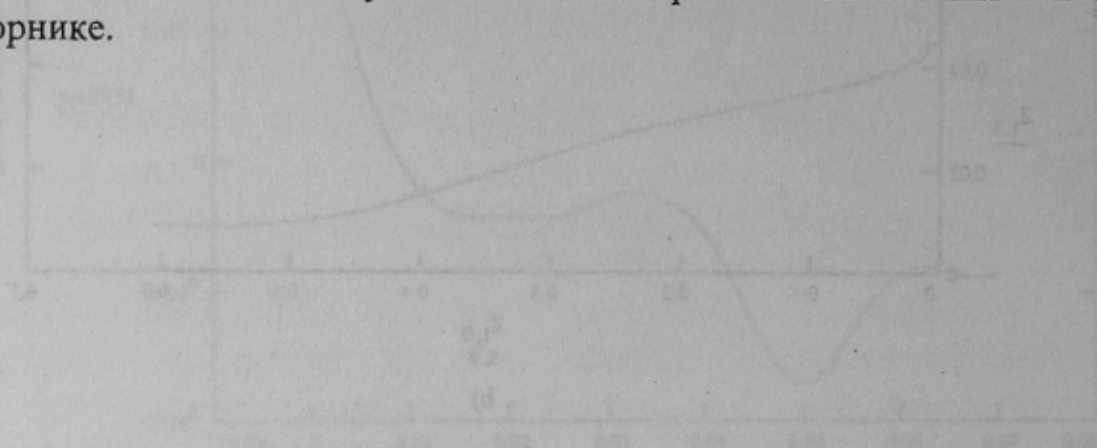
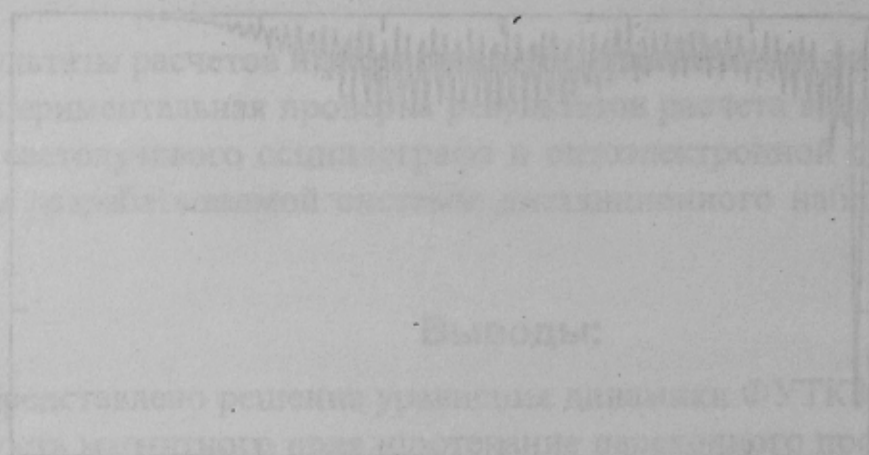


Рисунок 3 – а – Электронный указатель тока короткого замыкания
 б – Расчетная зависимость показателя от времени



Выводы

Представлено решение уравнения динамики УТКЗ, учитывающее влияние магнитной системы на процесс в цепи. Показано, что в цепи с индуктивной нагрузкой процесс в цепи имеет характер затухающих колебаний. Результаты аналитических и экспериментальных исследований процесса в цепи УТКЗ-50-2000/200-0.6 приведены на рис. 3, 4. Показано, что в цепи с индуктивной нагрузкой процесс в цепи имеет характер затухающих колебаний. Результаты аналитических и экспериментальных исследований процесса в цепи УТКЗ-50-2000/200-0.6 приведены на рис. 3, 4.