

УДК 621.311.1 (575.2) (04)

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В СЕТЯХ С РЕЗОНАНСНЫМ ТОКООГРАНИЧИВАЮЩИМ УСТРОЙСТВОМ

Д.А. Апышев – канд. техн. наук, и.о. проф.

А.Б. Бакасова – канд. техн. наук

The mathematical model for research of transients in electric systems with resonant current-limiting device is proposed. The model was compared with experimental data. The result has shown that the resonant current-limiting device effectively restricts currents of short circuit, including surge current.

Развитие электроэнергетических систем приводит к непрерывному увеличению токов короткого замыкания. Это обстоятельство определяет, с одной стороны, необходимость разработки выключателей на все большие номинальные токи отключения, а с другой, открывает реальную возможность использования резонансных токоограничивающих устройств [1]. В общем виде такая возможность показана в [2]. Однако при этом рассматривается только установившийся режим короткого замыкания без анализа переходных процессов, сопровождающих возникновения короткого замыкания.

В данной статье предлагается математическая модель для исследования переходных процессов в сетях с резонансным токоограничивающим устройством (РТУ), основанном на методе припасовывания. Рассмотрим однофазную схему выдачи мощности от источника энергии в сеть (рис. 1).

На рис.2 представлена вебер-амперная характеристика нелинейного реактора, аппроксимированная тремя участками прямых. Каждая из них представлена в виде:

$$i_d = a_j \psi + b_j, \quad (1)$$

где j – номер участка.

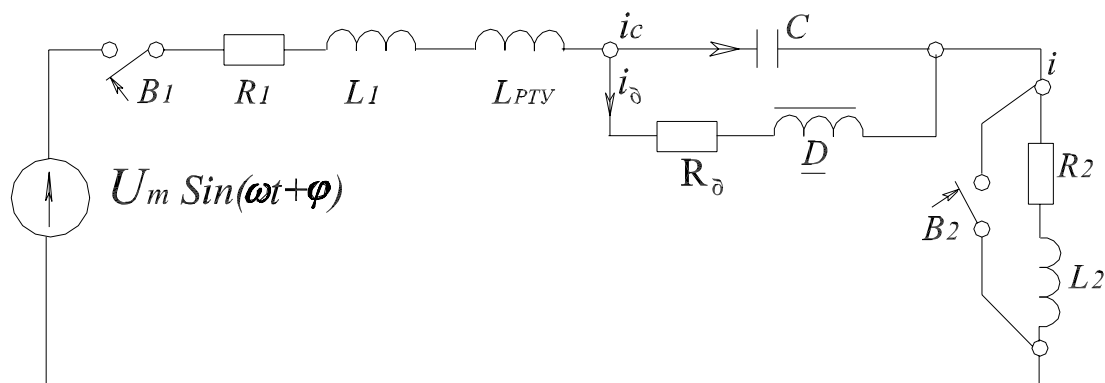


Рис. 1. Цепь с резонансным токоограничивающим устройством.

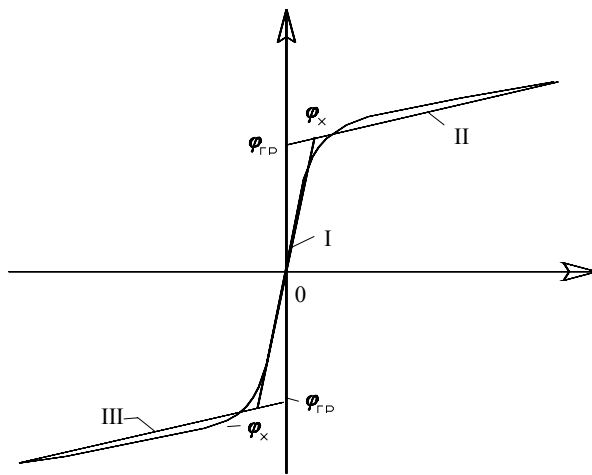


Рис. 2. Вебер-амперная характеристика нелинейного реактора.

Процессы в цепи описываются системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned} U_m \sin(\omega t + \varphi) &= iR + L \frac{di}{dt} + u_c; \\ u_c &= \frac{d\psi}{dt} + i_d R_d; \\ i_c &= C \frac{du_c}{dt}; \\ i &= i_c + i_d; \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где $R=R_1+R_2$; $L=L_1+L_2+L_{ггУ}$

Использование метода припасовывания к одному уравнению n -го порядка несколько упрощает вычисления по сравнению со случаем, когда процессы в цепи описываются n -уравнениями первого порядка [3].

Поэтому из (1) и (2) получаем

$$\begin{aligned} \frac{d^3 \psi}{dt^3} + \frac{(CR + CLR_d a_j)}{LC} \cdot \frac{d^2 \psi}{dt^2} + \\ + \frac{(CRR_d a_j + La_j + 1)}{LC} \cdot \frac{d\psi}{dt} + \frac{a_j(R + R_d)}{LC} \cdot \psi = \\ = \frac{U_m}{LC} \sin(\omega t + \varphi) - \frac{\epsilon_j(R + R_d)}{LC}. \end{aligned} \quad (3)$$

Общее решение неоднородного дифференциального уравнения (3) имеет вид:

$$\psi = K_1 e^{\gamma_1 t} + K_2 e^{\gamma_2 t} \cos \omega_2 t + K_3 e^{\gamma_3 t} \sin \omega_2 t + \alpha_j \cos \omega t + \beta_j \sin \omega t + \epsilon_j. \quad (4)$$

Постоянные интегрирования K_1, K_2, K_3 определяются припасовыванием решений на

границе интервалов в момент $t = t_n$, где t_n – момент попадания изображающей точки в начале $j+1$ -го участка.

Неизвестные коэффициенты частного решения уравнения (3) $\alpha_j, \beta_j, \epsilon_j$ определяются методом неопределенных коэффициентов, сравнивая коэффициенты $\cos \omega t, \sin \omega t$ при равных степенях t .

Следует отметить, что величины $\alpha_j, \beta_j, \epsilon_j$ являются постоянными для каждого участка j , а величины K_1, K_2, K_3 с каждым переходом изображающей точки с одного участка на другой вычисляются заново.

Рассмотренная математическая модель послужила основой для разработки расчета переходных процессов в цепях с резонансным токоограничивающим устройством. Для проверки адекватности математической модели и разработанной программы проведены испытания на экспериментальной электроустановке МЭИ, принципиальная схема которой приведена на рис. 3.

Резонансное устройство включено между секциями собственных нужд учебной электростанции. Параметры его элементов определены по методу гармонической линеаризации с учетом параметров учебной электростанции и требований к токоограничивающему эффекту устройства.

Непосредственным многократным осциллографированием было найдено, что ток трехфазного короткого замыкания (к.з.) на секции

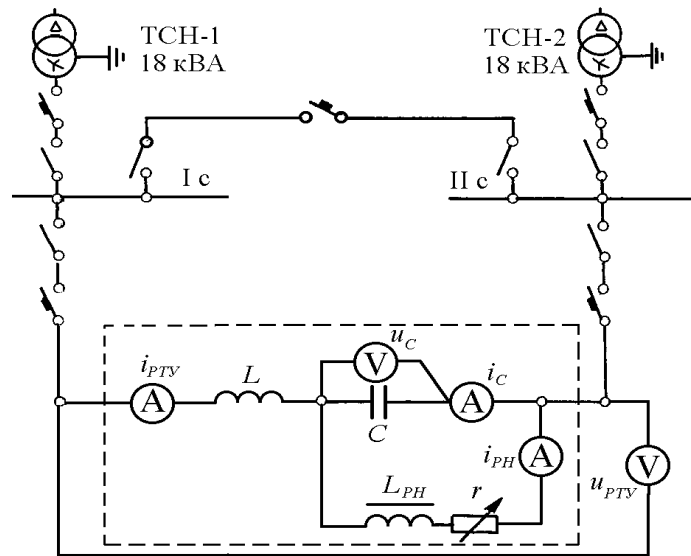


Рис. 3. Схема экспериментальной установки и измерительных цепей.

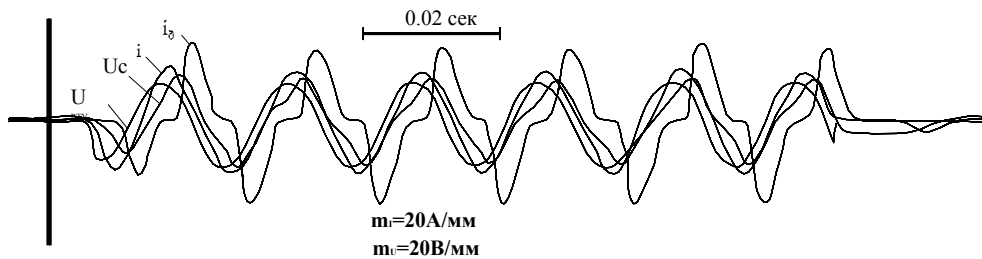


Рис. 4. Осциллограммы переходных процессов при однофазном к.з.

собственных нужд 220 В учебной электростанции при питании через один трансформатор собственных нужд составляет 830 А, т.е. $I_{к.з.}^{(3)} = 830 \text{ А}$.

К установке с РТУ были предъявлены следующие требования:

- номинальный ток $I_{ном} = 50 \div 80 \text{ А}$;
- граничный ток $I_{гр} = 60 \div 100 \text{ А}$;
- ток трехфазного к.з. после ограничения $I_{к.з.}^{(3)} = 100 \div 130 \text{ А}$;
- потери мощности и напряжения на РТУ в нормальном режиме – по возможности минимальные.

Элементы смонтированного РТУ имеют следующие параметры:

- ◇ конденсаторная батарея $C = 3380 \text{ мкФ}$, $X_C = 0,95 \text{ Ом}$;

- ◇ линейный реактор $L = 3,02 \text{ мГн}$, $X_L = 0,95 \text{ Ом}$;
- ◇ нелинейный реактор $X_{рненас} \approx 10 \text{ Ом}$, $X_{рнас} \approx 0,8 \text{ Ом}$;
- ◇ резистор $R = 0,1 \div 0,75 \text{ Ом}$.

На рис. 4 приведены осциллограммы переходных процессов при однофазном к.з. на секции собственных нужд учебной электростанции, на рис. 5 – графики, построенные по результатам изложенной выше математической модели.

Сравнение экспериментальных осциллограмм с графиками, полученными теоретически, свидетельствует о хорошем качественном и количественном совпадении теоретических результатов с экспериментальными. Как видно из осциллограммы, ток в цепи с РТУ при к.з. не превышает 80-120 А, причем в выходной цепи РТУ ток практически синусоидален.

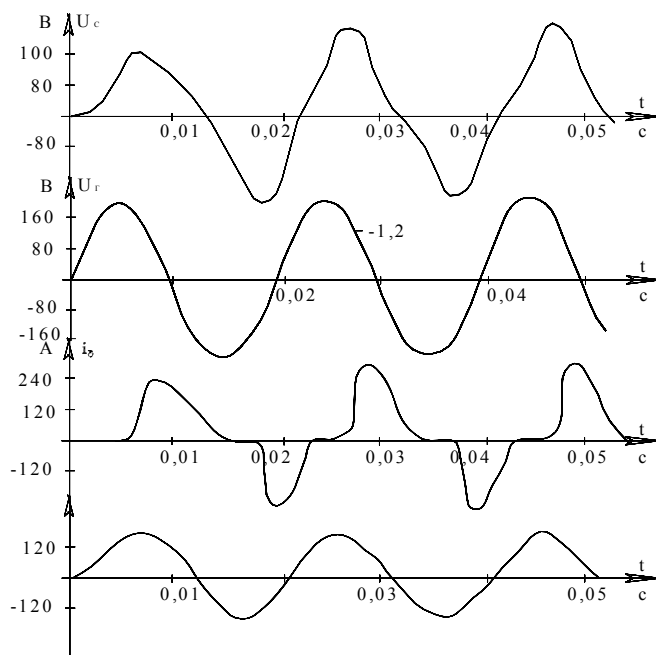


Рис. 5. Кривые токов и напряжений, рассчитанные на ЭВМ.

Время установления стационарного режима в цепи в большей степени зависит от величины R_0 . При ее выборе необходимо учитывать следующие факторы:

- допустимое напряжение на конденсаторе при к.з;
- скорость установления стационарного режима;
- содержание высших гармоник при к.з.

При этом следует стремиться к тому, чтобы напряжение на конденсаторе и содержание высших гармоник при к.з. были минимальными, а скорость установления стационарного режима – максимальной. Также следует стремиться к устранению причин возникновения феррорезонансных скачков и субгармонических колебаний.

На основании изложенного выше, установлено, что резонансное токоограничивающее устройство эффективно ограничивает то-

ки короткого замыкания, включая ударный ток. Сравнительный анализ результатов аналитического расчета с экспериментальными данными показал хорошее их совпадение и свидетельствует об обоснованности и эффективности предложенной математической модели.

Литература:

1. Александров Г.Н., Смоловик С.В. Переходные процессы в сетях с резонансным токоограничивающим устройством // *Электричество*. – 2002. – № 1. – С. 15–19.
2. Неклепаев Б.Н. Координация и оптимизация токов короткого замыкания в электрических системах. – М.: Энергия, 1978. – 152 с.
3. Лисицкая И.Н., Сеницкий Л.А., Шумков Ю.М. Анализ электрических цепей с магнитными и полупроводниковыми элементами. – Киев: Наукова думка, 1969. – 440 с.