

## ТЕХНОЛОГИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ В ПАКЕТЕ MATLAB

М.А. Прохорчик

Учреждение образования «Гомельский государственный технический  
университет имени П.О.Сухого», Республика Беларусь

Научный руководитель В.В. Кротенок

Имитационное моделирование – наиболее мощный и универсальный метод исследования и оценки эффективности статических и динамических систем.

Однако на пути создания модели может возникнуть следующая проблема – отсутствие необходимого элемента, восстановление которого может оказаться весьма трудоемким, а в некоторых программах и невозможным. Поэтому из множества программ схематического моделирования нужно выделить пакет MATLAB, содержащий в своем составе инструмент визуального моделирования Simulink, который в свою очередь включает библиотеку блоков SimPowerSystems. SimPowerSystems – содержит обширную библиотеку блоков для имитационного моделирования электротехнических устройств. При отсутствии в ней нужного элемента пользователь может сам создать нужную модель на основе блоков Simulink. Общая структура модели показана на рис. 1.

На схеме к управляемому источнику тока параллельно подключен измеритель напряжения. Между выходом измерителя напряжения и входом источника тока включена Simulink-модель, реализующая нужную вольтамперную характеристику устройства. Параллельно источнику также подключен развязывающий резистор. Его наличие обусловлено тем, что большое число блоков SPS выполнено на базе источников тока. При последовательном соединении таких блоков источники тока оказываются включенными последовательно, что недопустимо. Наличие же развязывающего резистора позволяет включать такие блоки последовательно. Величина сопротивления резистора должна выбираться достаточно большой, чтобы его влияние на характеристики создаваемого блока было минимально (обычно его величина для силовых электротехнических блоков выбирается в пределах 500–1000 Ом). Зажимами блока являются входной и выходной порты. Таким образом, для создания электротехнического блока пользователь, прежде всего, должен создать обычную Simulink-модель, входом которой является сигнал пропорциональный напряжению на зажимах устройства, а выходом сигнал пропорциональный току устройства, а затем использовать эту модель в схеме представленной на рис. 1.

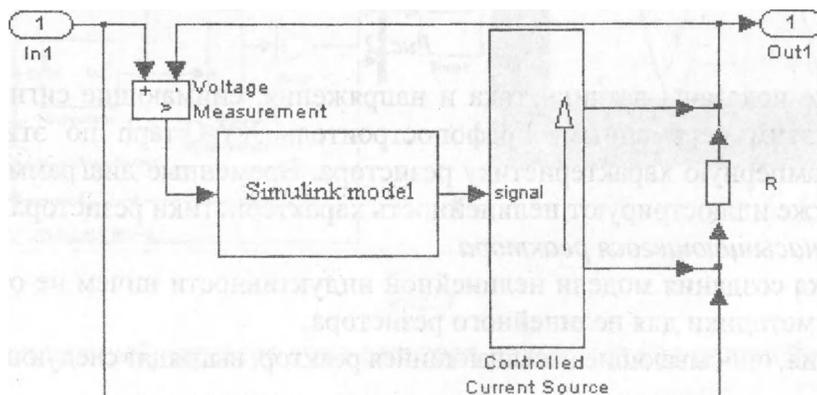


Рис. 1

### Модель нелинейного резистора

Пусть вольтамперная характеристика нелинейного резистора задана выражением:

$$i = I_0 \cdot \left( \frac{u}{U_0} \right)^\alpha,$$

где  $i$  и  $u$  – мгновенные значения тока и напряжения,  $U_0$  – пороговое значение напряжения;

$I_0$  – величина тока устройства при значении напряжения равном пороговому;

$\alpha$  – показатель степени, определяющий нелинейность вольт-амперной характеристики резистора (обычно лежит в пределах от 0 до 50).

Схема блока нелинейного резистора показана на рис. 2. Модель Simulink резистора реализована с помощью блока Fcn. Численные значения параметров приняты следующими:

$$U_0 = 110 \text{ кВ}, \quad I_0 = 500 \text{ А}, \quad \alpha = 25.$$

Схема всей модели и диаграммы ее работы показаны на рис. 2.

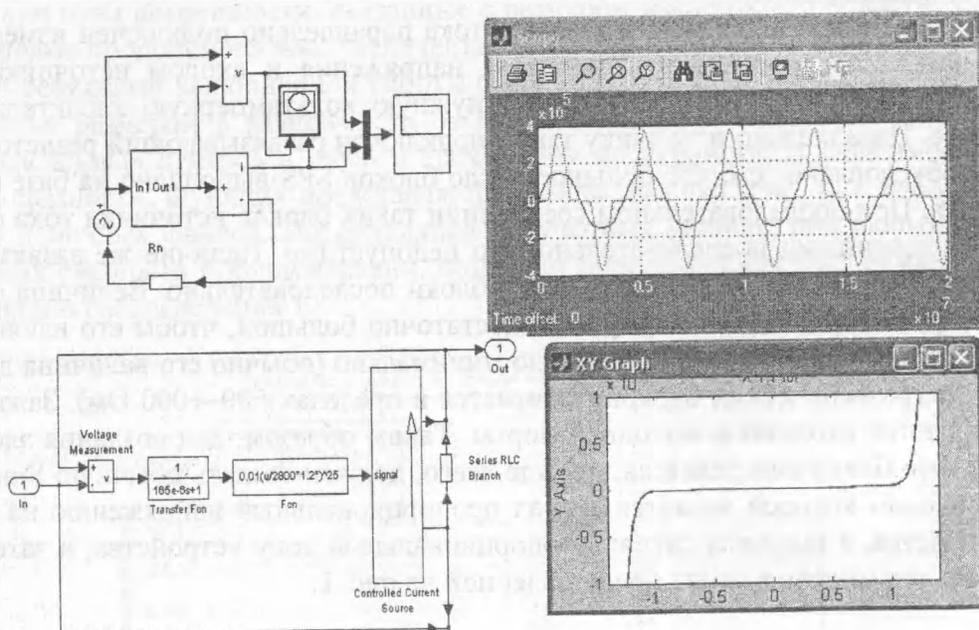


Рис. 2

На схеме показаны датчики тока и напряжения, снимающие сигналы пропорциональные этим переменным. Графопостроитель XY-Graph по этим сигналам строит вольтамперную характеристику резистора. Временные диаграммы тока и напряжения также иллюстрируют нелинейность характеристики резистора.

### Модель насыщающегося реактора

Методика создания модели нелинейной индуктивности ничем не отличается от аналогичной методики для нелинейного резистора.

Уравнения, описывающие насыщающийся реактор, выглядят следующим образом:

$$u = R \cdot i + \frac{d\psi}{dt}, \quad i = a \cdot \psi + b \cdot \psi^3,$$

где  $i, u, \psi$  – мгновенные значения тока, напряжения и потокосцепления;

$a, b$  – коэффициенты нелинейной зависимости между потокосцеплением и током.

Первое из уравнений есть дифференциальное уравнение для напряжения на реакторе, а второе алгебраическая зависимость между потокосцеплением и током реактора. Последнее уравнение может быть и другим, в зависимости от требований к точности аппроксимации нелинейности реактора.

Для создания Simulink-модели реактора требуется сначала перейти к операторной форме записи дифференциального уравнения для напряжения реактора:

$$u(p) = R \cdot i(p) + p \cdot \psi(p),$$

а затем получить передаточную функцию (ПФ), связывающую потокосцепление и напряжение:

$$\psi(p) = [u(p) - R \cdot i(p)] \frac{1}{p}.$$

Полученные передаточная функция и нелинейная зависимость между током и потокосцеплением дают возможность создать Simulink-модель реактора. Схема Simulink-модели показана на рис. 3.

На схеме величина активного сопротивления реактора принята равной 2 Ом, а коэффициенты  $a = 60$  и  $b = 40\,000$ . Далее, используя шаблон SPS-модели (рис. 3) не трудно создать модель насыщающегося реактора полностью. Схема всей модели, SPS-модель реактора и временные диаграммы работы модели показаны на рис. 3.

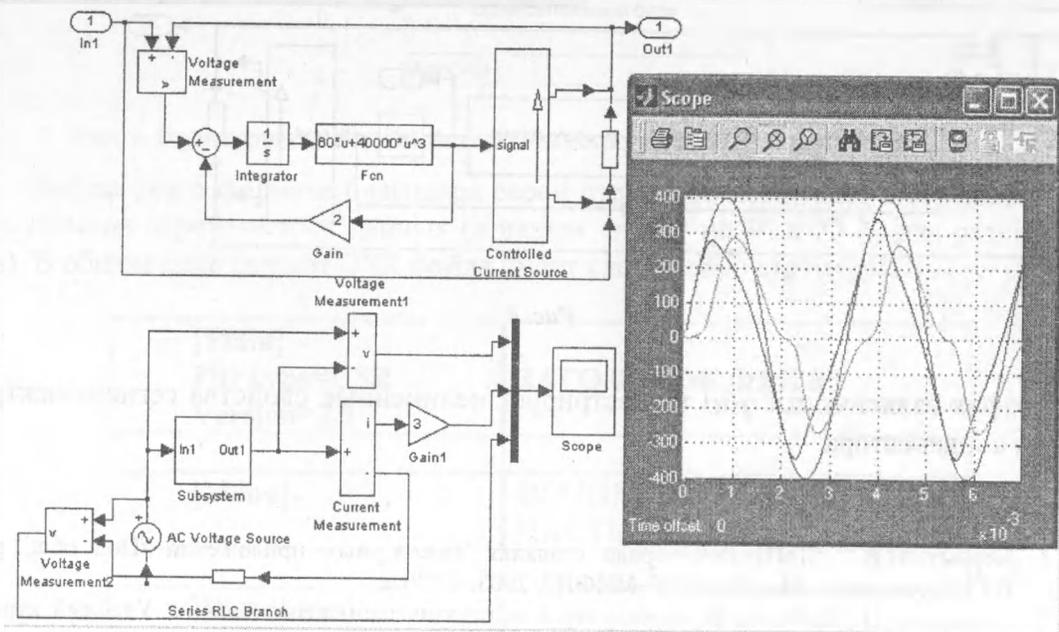


Рис. 3

Несинусоидальный характер тока реактора иллюстрирует нелинейные свойства реактора.

*Модель сегнетоэлектрического конденсатора*

Уравнения описывающие сегнетоэлектрический конденсатор выглядят следующим образом:

$$u = k \cdot i + \frac{q}{C},$$

$$q(u) = \frac{\sqrt[3]{(u + \sqrt{1+u^2})^2 - 1}}{\sqrt[3]{u + \sqrt{1+u^2}}},$$

где  $i, u, q, c$  – мгновенные значения тока, напряжения, заряда и емкости;

$k$  – коэффициент учитывающий диэлектрическую вязкость и тангенс диэлектрических потерь.

Simulink модель имеет вид, представленный на рис. 4.

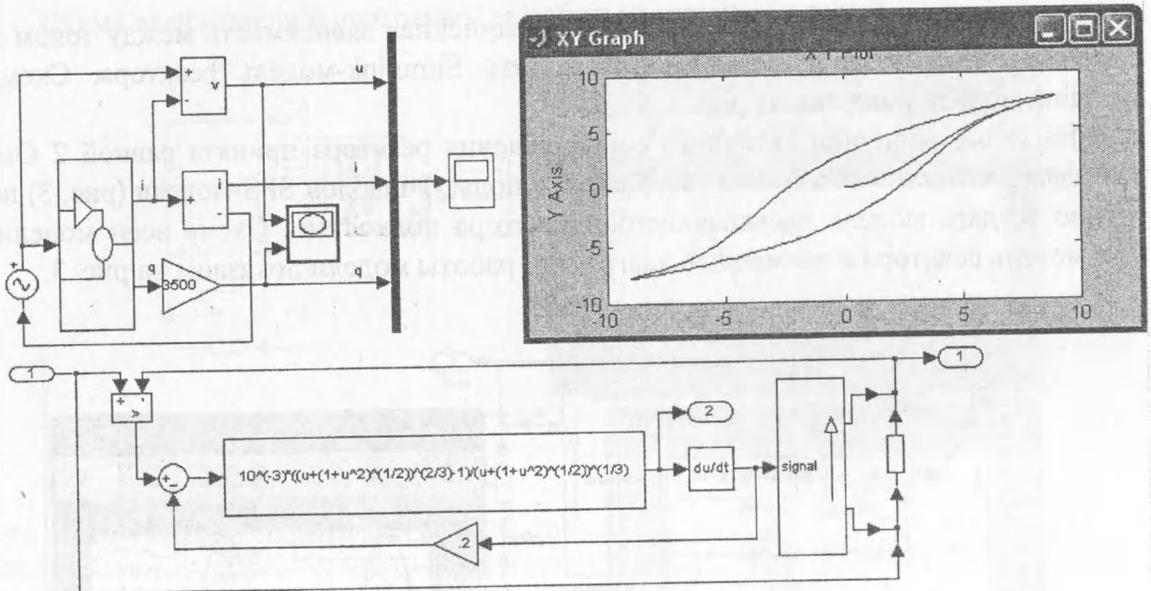


Рис. 4

График зависимости  $q(u)$  иллюстрирует нелинейные свойства сегнетоэлектрического конденсатора.

Литература

1. Черных И.В. SIMULINK: среда создания инженерных приложений / Под общ. ред. В.Г. Потемкина. – М.: ДИАЛОГ–МИФИБ, 2003. – 496 с.
2. Говорухин В., Цибулин В. Компьютер в математическом исследовании: Учебный курс. – СПб.: Питерб, 2001. – 624 с.