

УДК 621.3.013

СХЕМНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Канов Л.Н.

Севастопольский национальный технический университет

Студгородок г. Севастополь, Украина, 99053

Предложен метод численного расчета режимов нелинейных электрических и электронных цепей, основанный на построении схемных моделей с управляемыми источниками.

Традиционно применяемые методы расчета режимов переменного тока в нелинейных электрических цепях основаны на использовании графического или аналитического представления вольт-амперных характеристик нелинейных элементов. В предположении синусоидальности токов и напряжений, что справедливо, например, для резистивных цепей, нелинейность которых обусловлена тепловой инерцией, или для индуктивных цепей в случае пренебрежения малым влиянием высших гармоник, используются вольт-амперные характеристики для действующих значений. В этих условиях анализ режима сводится либо к составлению и решению систем нелинейных уравнений для комплексных действующих значений токов и напряжений, либо же выполняется

итерационно-графическими методами [1]. Ниже предлагается метод численного расчета подобных цепей с использованием схемных моделей их элементов.

Для линейного комплексного сопротивления Z (рисунок 1, а) справедливо соотношение $(r + jx)(I' + jI'') = U' + jU''$, где r , x – активное и реактивное сопротивление, I' , U' – вещественные части комплексных действующих значений тока и напряжения; I'' , U'' – мнимые части. Это уравнение легко представляется двумя

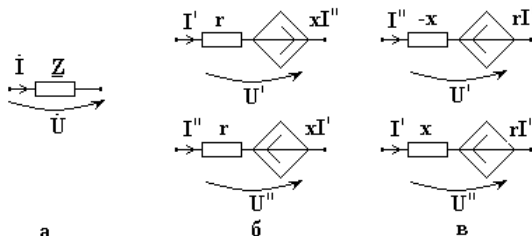


Рисунок 1 – Схемные модели линейного комплексного сопротивления:

а – линейное комплексное сопротивление;

б – модель на основе активного сопротивления;

в – модель на основе реактивного сопротивления

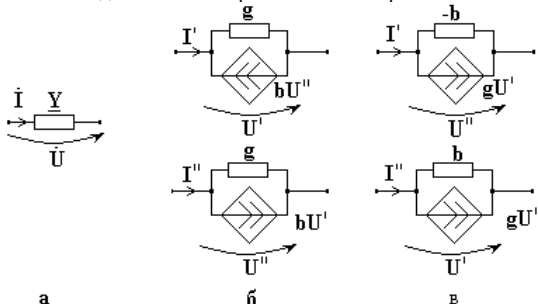


Рисунок 2 – Схемные модели линейной комплексной проводимости:

а – линейная комплексная проводимость;

соотношениями для мнимой и вещественной частей $rI' - xI'' = U'$; $rI'' + xI' = U''$. Эти соотношения можно моделировать двумя парами схем, состоящих из резисторов и источников напряжения, управляемых токами (ИНУТ). В основу модели, показанной на рисунке 1,б, положен резистор, равный активному сопротивлению r , и ИНУТ с коэффициентом управления, численно равным реактивному сопротивлению x . В схемной модели на рисунке 1,в за основу взят резистор, численно равный реактивному сопротивлению (сначала с противоположным знаком, затем с исходным), и ИНУТ с коэффициентом управления r . Выбор той или иной схемной модели определяется структурой и составом электрической цепи.

Аналогично для комплексной проводимости Y имеем $(g + jb)(U' + jU'') = I' + jI''$, откуда $gU' - bU'' = I'$; $gU'' + bU' = I''$. Схемные модели, соответствующие двум последним уравнениям, показаны на рисунке 2.

Элемент с нелинейной вольт-амперной характеристикой вида $I = f(U)$ на основании принципа компенсации [1] удобно представить нелинейным источником тока, вещественная и мнимая части которого зависят от вещественной и мнимой частей напряжения на нем: $I' = f_1(U', U'')$;

$I'' = f_2(U', U'')$. Для получения функций f_1, f_2 запишем комплексную мощность элемента

$$S = (U' + jU'')(I' - jI'') = U'I' + U''I'' + j(U'I'' - U''I') = P + jQ.$$

Для индуктивного элемента $Q > 0, P = 0$, откуда нетрудно заключить, что знаки I' и U'' совпадают, а знаки I'' и U' противоположны. Для емкостного элемента $Q < 0, P = 0$, откуда заключаем, что совпадают знаки I'' и U' , а знаки I' и U'' противоположны. Очевидно, что для нелинейного резистора совпадают знаки U' и I' и знаки U'' и I'' . Представляя действующее значение через сумму квадратов вещественной и мнимой частей, получаем для вольт-амперной характеристики

$$\sqrt{(I')^2 + (I'')^2} = f(\sqrt{(U')^2 + (U'')^2}).$$

Для реактивных элементов $U'I' + U''I'' = 0$, и поэтому для f_1, f_2 получаем выражения $I' = \pm \frac{U''}{U} f(U)$; $I'' = \pm \frac{U'}{U} f(U)$, причем для индуктивного элемента в первой формуле выбирается знак плюс, а во второй – минус. Для емкостного элемента знаки выбираются наоборот. Для резистивного нелинейного элемента $P > 0, Q = 0$, и выражения для вещественных и мнимых частей нелинейного источника тока приобретают вид:

$I' = \frac{U'}{U} f(U)$; $I'' = \frac{U''}{U} f(U)$. Например, для нелинейной

индуктивности с полиномиальной аппроксимацией вольт-амперной характеристики $I = a_1 U + a_3 U^3$ получаем выражения для вещественной и мнимой частей нелинейного управляемого источника тока:

$$I' = U'' \{ a_1 + a_3 [(U')^2 + (U'')^2] \}, \quad I'' = -U' \{ a_1 + a_3 [(U')^2 + (U'')^2] \}.$$

В задачах расчета электрических сетей часто встречается источник заданной комплексной мощности, подсоединенный к узлу сети: $\underline{S} = P + jQ = \underline{U} I^*$. Этот источник также может быть замещен нелинейным управляемым источником тока, зависящим от вещественных и мнимых составляющих напряжения в узле:

$$\underline{I} = \frac{\underline{S}}{\underline{U}^*} = \frac{(P - jQ)(U' + jU'')}{U^2}, \quad \text{откуда}$$

получаем $I' = \frac{PU' + QU''}{U^2}$; $I'' = \frac{PU'' - QU'}{U^2}$. Очевидно, что активная и реактивная мощности в узле сети и сами могут быть функциями напряжения: $P = P(U', U'')$; $Q = Q(U', U'')$.

При задании вольт-амперной характеристики в виде зависимости напряжения от тока $U = \varphi(I)$ совершенно аналогично возникает два нелинейных управляемых источника напряжения. Эти же результаты легко обобщить на случай графического задания вольт-амперной характеристики.

С помощью полученных таким образом схемных моделей линейных и нелинейных элементов можно построить схемную модель цепи переменного тока. Эта модель представляется двумя нелинейными, гальванически несвязанными цепями постоянного тока, объединенными лишь управляемыми источниками тока или напряжения. Она может быть рассчитана с помощью любой современной программы автоматизированного расчета нелинейных цепей постоянного тока относительно вещественных и мнимых частей токов и напряжений исходной нелинейной цепи переменного тока. При этом отпадает необходимость составления систем нелинейных комплексных уравнений и организации их решения.

В качестве примера рассмотрим последовательный феррорезонансный контур с нелинейной катушкой индуктивности, показанный на рисунке 3. При построении схемной модели конденсатора

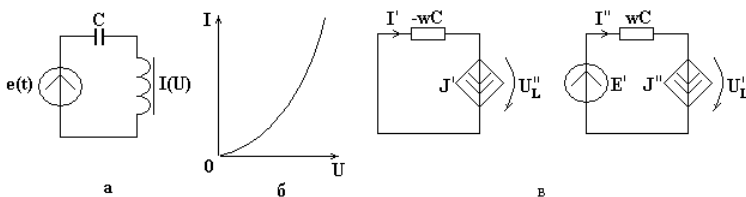


Рисунок 3 – Последовательный резонансный контур

а – схема; б – характеристика нелинейной индуктивности; в – схемная модель

использованы схемы рисунка 2в; так как активная проводимость конденсатора $g = 0$, а линейные управляемые источники тока отсутствуют. Индуктивность с аппроксимацией вольт-амперной характеристики полиномом третьего порядка заменена двумя нелинейными управляемыми источниками тока, описанными выше, при $a_1 = 0,5$; $a_3 = 1$. Емкостное сопротивление принято равным $x_C = 0,22$ Ом. При $E = 0,5$ В и соответствующем выборе начальных условий с помощью расчета схемной модели получены все три возможные режимы цепи: два устойчивых ($U_L = 0,68$ В; $I = 0,55$ А и $U_L = 2,24$ В; $I = 12,4$ А) и один неустойчивый соответствующий падающему участку общей вольт-амперной характеристики цепи $U_L = 1,62$ В; $I = 5,09$ А.

Предлагаемый метод схемного моделирования показал свою эффективность и при расчете более сложных нелинейных цепей и электрических систем переменного тока.

Библиографический список

1. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи / Л.А.Бессонов. — М.: Изд-во «Гардарики», 2000. — 638 с.

Поступила в редакцию 21.01.2002 г.