ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 621.318.6

ОБОБЩЕННАЯ МОДЕЛЬ И ПАРАМЕТРЫ ПАССИВНЫХ НЕЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Алимов Анвар Акбарович
окончил 1984 год, Ташкентский политехнический институт.
В настоящее время является доцентом кафедры
«Электротехника» Ташкентского государственного технического университета.
Домашний адрес: 100014, Ташкент,
Шайхантахурский район, массив Ибн Сино-1, дом 16, кв. 12
Тел. (97) 707-30-37
Носирова Дилдора Анваровна
окончила в 2006 г. Национальный университет Узбекистана.
В настоящее время является ассистентом кафедры
«высшая математика» Ташкентского государственного технического университета.
Домашний адрес: 100014, Ташкент,
Шайхантахурский район, массив Ибн Сино-1, дом 16, кв. 12
Тел. (97) 725-35-95
Таирова Нигора Джахангировна
окончила в 1995 г. Ташкентский государственный технический университет.
В настоящее время является ассистентом кафедры
«Электротехника» Ташкентского государственного технического университета.
Домашний адрес: 100014, Ташкент,
Юнусабадский район, кв. 13, дом 50, кв. 6
Тел. (97) 463-91-22

GENERALIZED MODEL AND PARAMETERS OF PASSIVE NONLINEAR ELEMENTS OF ELECTRIC POWER SYSTEMS

A.A. Alimov, D.A. Nosirova, N.D. Tairova

АННОТАЦИЯ

В статье рассматривается обобщённая модель, динамические характеристики и параметры пассивных нелинейных элементов электроэнергетических систем. На основе обобщённой модели нелинейной индуктивности рассматривается методика определения её эквивалентных параметров, в частности, электромагнитной ёмкости, индуктивности рассеивания и активного сопротивления в аналитической форме.

ABSTRACT

In the article generalized models, dynamic features and parameters passive nonlinear element power systems are considered. The methods of the determination its equivalent parameters, based on generalized model of nonlinear inductance, in particular, electromagnetic capacity, inductances of the diffusing and active resistance in analytical form are considered.

Ключевая слова: нелинейная индуктивность, нелинейная ёмкость, нелинейное резистивное сопротивление, обобщенная модель, эквивалентных параметров, потокосцепления, магнитная индукция

Key words: nonlinear inductance, nonlinear capacitance, nonlinear resistive resistance, generalized model, equivalent parameters, flux linkage, magnetic induction

Пассивные нелинейные элементы- нелинейная индуктивность L (i), нелинейная ёмкость C(u) и нелинейное резистивное сопротивление R(i) широко применяются в энергосберегающих электроэнергетических системах.

В частности, использованию этих элементов в современных системах вторичных источников электропитания повышенной частоты придается повышенный интерес. По этому создание их обобщенных моделей в широком диапазоне изменения частоты источника питания и методика определения их эквивалентных параметров имеет теоретическое и практическое значения.

Рассмотрим методику определения эквивалентных параметров пассивных нелинейные элементов на основе обобщенной модели нелинейные индуктивности.

Как известно, зависимость магнитной индукции ***b*** от напряженности поля ***h*** при быстрых изменениях поля, когда существенное влияние оказывают не только поверхностный эффект, но и динамические свойства вещества, может быть выражена дифференциальным уравнением:

$$b = F_1\left(h, \frac{dh}{dt}, \ldots, \frac{db}{dt}, \frac{d^2b}{dt^2}, \ldots\right). \quad (1)$$

На практике часто пользуются зависимостью тока i от потокосцепления ψ в нелинейной индуктивности (НИ). При этом, если не учитывать производные высшего порядка, формула (1) примет следуюший вид:

$$i = F_2\left(\psi, \frac{d\psi}{dt}, \frac{d^2\psi}{dt^2}\right) \quad (2)$$

Уравнение (2) в общем случае описывает схему замещения НИ, приведенную на рисунке 1.

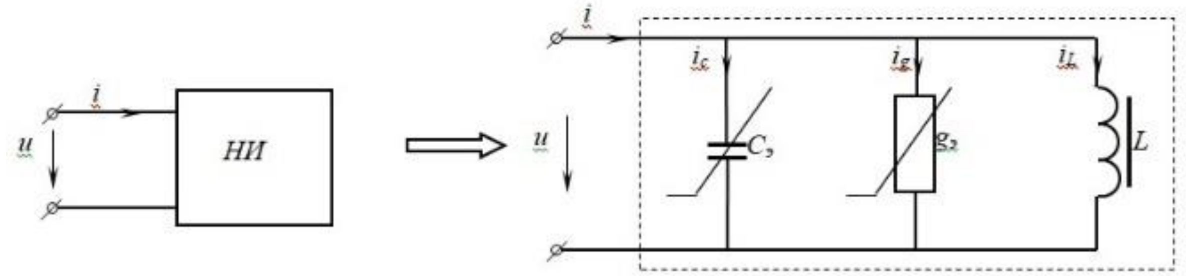

Рис. 1. Обобщенная модель нелинейной индуктивности

Если в этой схеме допустим, что эквивалентные параметры L_s, $C_э$ и $g_э$ для конкретного случая постоянны, то получим

$$i = i_c + i_g + i_L = C_э\frac{d^2\psi}{dt^2} + g_э\frac{d\psi}{dt} + a\psi + b\psi^3 \quad (3)$$

где: $i_L = a\psi + b\psi^3$ — известная аппроксимация Вебер-Амперной характеристики НИ, полученная на основе кривой намагничивания $B = f(H)$;

$C_э$ — эквивалентная электромагнитная емкость НИ;

$g_э = \frac{1}{R_э}$ - эквивалентная активная проводимость НИ;

Допустим, что напряжение на индуктивности $u = U_m Cos\omega t$. Тогда

$$\begin{cases} \psi = \frac{U_m}{\omega}\sin\omega t = \Psi_m \sin\omega t; \\ i_c = C_э\frac{d^2\psi}{dt^2} = -\omega^2 C_э\Psi_m \sin\omega t = -I_{Cm}\sin\omega t; \\ i_g = \frac{1}{R_э}\cdot\frac{d\psi}{dt} = \frac{\Psi_m\omega}{R_э}\cos\omega t = I_{gm}\cos\omega t. \end{cases} \quad (4)$$

Из (4) с учетом принятой аппроксимации следует:

$$\begin{cases} i_c = -\frac{I_{cm}}{\Psi_m}\psi; \\ i_g = \pm\frac{I_{gm}}{\Psi_m}\sqrt{\Psi_m^2 - \psi^2}; \\ i_L = a\psi + b\psi^3. \end{cases} \quad (5)$$

на основе системы (5) можно построить для НИ зависимость, которая представляет собой петлю гистерезиса (рис. 2).

Из (5) с учётом (3) имеем:

$$i = \left(a - \frac{I_{cm}}{\Psi_m}\right)\psi + b\psi^3 \pm \frac{I_{gm}}{\Psi_m}\sqrt{\Psi_m^2 - \psi^2} \tag{6}$$

Выражение (6) является вебер-амперной характеристикой НИ. Здесь знак «+» при квадратном корне соответствует восходящей, а знак «-» - нисходящей ветви петли гистерезиса.

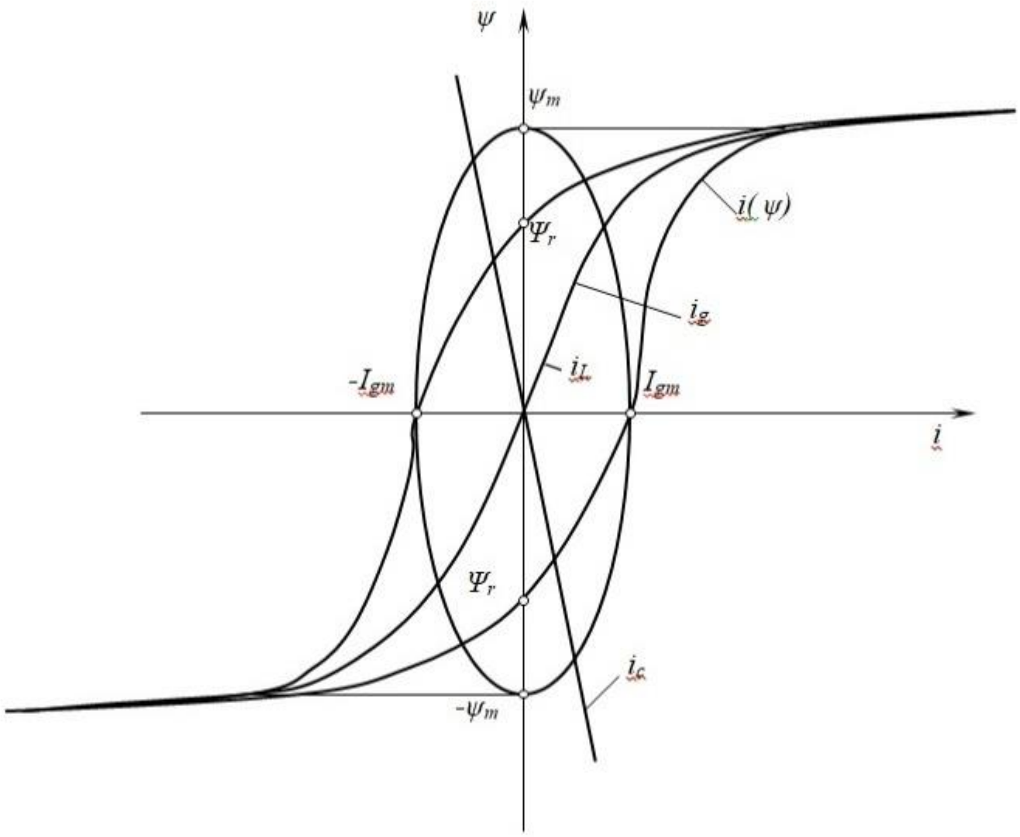

Рис. 2 Динамические Вебер-Амперные характеристики элементов обобщенной модели НИ.

Значение тока I_{gm} определяется динамической коэрцитивной силой магнитного материала.

Как известно, динамическая коэрцитивная сила H_{cd} сердечника, когда индукция изменяется по синусоидальному закону, равна:

$$H_{cd} = H_c + 0{,}125\omega\sigma d^2 B_s\sqrt{2\varepsilon - 1}\,, \tag{7}$$

где: B_s - индукция насыщения;

H_c - коэрцитивная сила;

d - толщина магнитного материала;

ε - удельная электропроводность магнитного материала;

$\varepsilon = \dfrac{B_m}{B_s}$ - коэффициент модуляции сердечника.

Если учесть, что

$$\frac{U}{R} = \frac{H_{cd}l}{w} = \frac{l}{w}\left(H_c + 0{,}125\omega\sigma d^2 B_s\sqrt{2\varepsilon - 1}\right),$$

то имеем:

$$R_э = \frac{Uw}{l\left(H_c + 0{,}125\omega\sigma d^2 B_s\sqrt{2\varepsilon - 1}\right)} = \frac{\omega w^2 SB}{l\left(H_c + 0{,}125\omega\sigma d^2 B_s\sqrt{2\varepsilon - 1}\right)} \quad (8)$$

где: w — число витков обмотки;

l — средняя длина магнитопровода.

Величину эквивалентной электромагнитной емкости можно вычислить из следующего условия: если

$$\psi = \Psi_r = wSB_r$$

то $i = 0 \Rightarrow i_L + i_c + i_g = 0$ где B_r - остаточная магнитная индукция.

Тогда из (6) получим

$$C_э = \frac{a\Psi_r + b\Psi_r^3 - \frac{1}{R_э}\sqrt{U_m^2 - \Psi_r^2\omega^2}}{\omega^2\Psi_r} = \frac{a\psi_r + b\psi_r^{\ 3} - \frac{\omega}{R_э}\sqrt{\Psi_m^2 - \Psi_r^2}}{\omega^2\Psi_r} \quad (9)$$

Таким образом, параметры $R_э$ и $C_э$ НИ зависят от многих факторов, приведенннх в (8) и (9).

Можно убедиться, что параметры НИ зависят не только от электрических и геометрических параметров НИ, но и от её магнитных параметров.

Эквивалентная электромагнитная емкость, определенная по предложенной методике, практически совпадает с экспериментальными данными (рис.3).

Определим выражение для мгновенных значений тока, мощности и других величин.Если учесть, что $\psi = \Psi_m \sin\omega t$, то для тока восходяшей ветви петли гистерезиса будет иметь место следующее выражение:

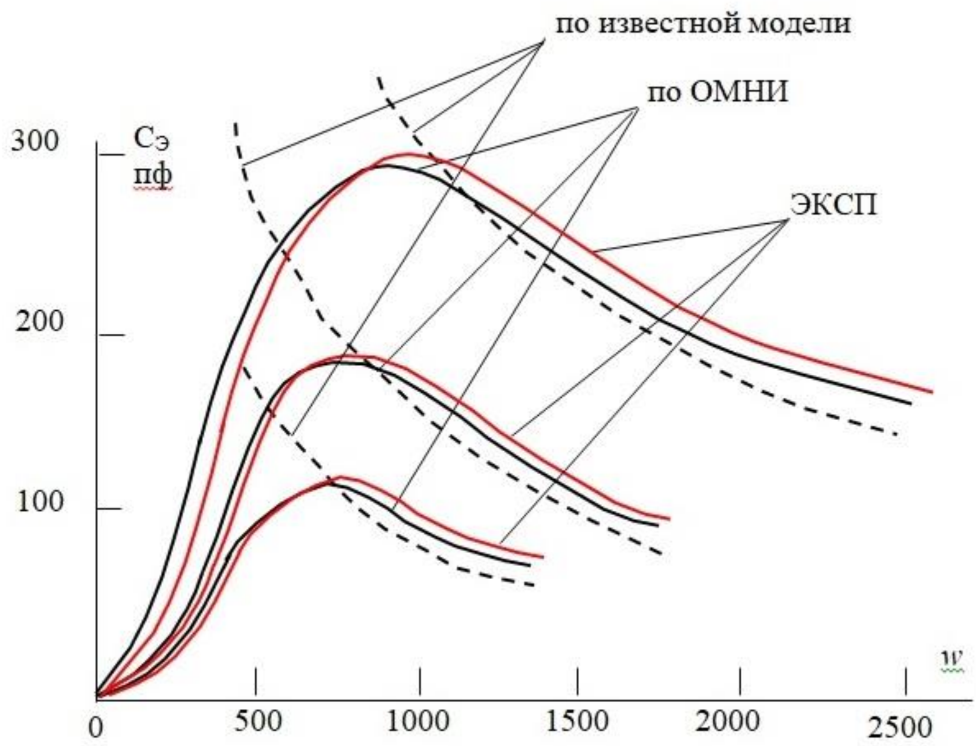

Рис. 3. Экспериментальные зависимости эквивалентной емкости НИ от числа витков

$$i = \left(a\Psi_m - I_{cm}\right)\sin\omega t + I_{gm}\cos\omega t + b\Psi_m^3\left(\frac{3}{4}\sin\omega t - \frac{1}{4}\sin 3\omega t\right) =$$
$$= \left(a\Psi_m + \frac{3}{4}b\Psi_m^3 - I_{cm}\right)\sin\omega t + I_{gm}\cos\omega t - \frac{b}{4}\Psi_m^3\sin 3\omega t = \tag{10}$$
$$= I_{1m}\sin(\omega t + \alpha) - \frac{b}{4}\Psi_m^3\sin 3\omega t,$$

где,

$$I_{1m} = \sqrt{\left(a\Psi_m + \frac{3}{4}b\Psi_m^3 - I_{cm}\right)^2 + I_{gm}^2}; \tag{11}$$

$$\alpha = arctg\frac{I_{gm}}{a\Psi_m + \frac{3}{4}b\Psi_m^3 - I_{cm}}. \tag{12}$$

Если учесть, что мгновенная мощность в НИ равна:

$$p = ui = U_m I_{1m}\cos\omega t\sin(\omega t + \alpha) - \frac{b}{4}U_m\Psi_m^3\cos\omega t\sin 3\omega t; \tag{13}$$

Тогда активная мощность в ней определяется из следующего выражения:

$$P = \frac{1}{T}\int_0^T pdt = \frac{1}{T}\left[\int_0^T U_m I_{1m}\cos\omega t\sin(\omega t + \alpha)dt - \int_0^T \frac{b}{4}\Psi_m^3 U_m\cos\omega t\sin 3\omega t dt\right] =$$
$$= U^2\sqrt{\left(\frac{a}{\omega} + \frac{3b}{2\omega^3}U^2 - C_э\omega\right)^2 + \frac{1}{R_э^2}}\cdot\sin\alpha.$$

Таким образом:

$$P = U^2\sqrt{\left(\frac{a}{\omega} + \frac{3b}{2\omega^3}U^2 - C_э\omega\right)^2 + \frac{1}{R_э^2}}\cdot\sin\alpha. \tag{14}$$

Если учесть (12) то (14) примет следующий вид:

$$P = U^2 Y(\omega)\sin arctg\frac{I_{gm}}{a\Psi_m + \frac{3}{4}b\Psi_m^3 - I_{cm}} \tag{15}$$

где

$$Y(\omega) = \sqrt{\left(\frac{a}{\omega} + \frac{3b}{2\omega^3}U^2 - C_э\omega\right)^2 + \frac{1}{R_э^2}}.$$
$$I_{gm} = \frac{U_m}{R_э}; \qquad I_{Cm} = \omega C_э U_m$$

Тогда с учетом (8) и других последних обозначений для потерь в НИ получим:

$$P = U^2 Y(\omega) \sin arctg \frac{U_m}{R_э} : \left(\frac{aU_m}{\omega} + \frac{3bU_m^3}{4\omega^3} - \omega C_э U_m \right) \quad (16)$$

Из (16) следует, что

$$P = U^2 Y(\omega) \sin arctg \frac{1}{R_э} : \left(\frac{a}{\omega} + \frac{3bU_m^2}{4\omega^3} - \omega C_э \right) \quad (17)$$

Если учесть, что $b = K\omega^3; \quad a = \frac{1}{L_л},$ то из (17) получим

$$P = U^2 \sqrt{\left(\frac{1}{\omega L_л} + \frac{3}{2} KU^2 - C_э \omega \right)^2 + \frac{1}{R_э^2}} \sin arctg \frac{1}{R_э} : \left(\frac{1}{L_л \omega} + \frac{3}{2} KU^2 - \omega C_э \right) \quad (18)$$

или

$$P = \frac{w^2 S^2 \omega^2 B_m^2}{2} \sqrt{\left(\frac{1}{\omega L_л} + \frac{3}{2} KU^2 - C_э \omega \right)^2 + \frac{1}{R_э^2}} \sin \cdot arctg \frac{1}{R_э} : \left(\frac{1}{L_л \omega} + \frac{3}{2} KU^2 - \omega C_э \right) \quad (19)$$

при условии $\frac{1}{L_л \omega} + \frac{3}{2} KU^2 - \omega C_э = 0$ тогда

$$P = \frac{w^2 S^2 \omega^2 B_m^2}{2} \cdot \frac{1}{R_э} = 2\pi^2 w^2 S^2 f^2 \sigma B_m^2 \quad (20)$$

где $\sigma = \frac{1}{R_э}$ - удельная электропроводимость.

Выражение (19) отличается достаточной высокой точностью по сравнению с известными формулами расчёта потерь в дросселях и трансформаторах. Это выражение позволяет определить потери в нелинейной индуктивности без дополнительных поправочных коэффициентов в широком диапазоне изменения частоты и действующего значения напряжения.

Таким образом, предложенные модели пассивных нелинейных элементов позволяют, аналитически описывать их нелинейные вебер-амперную, кулоно-вольтную и вольт-амперную характеристики в базисе мгновенных величин и определять их эквивалентные параметры с достаточно высокой точностью по сравнению с известными моделями.

Литература

1.Абдуллаев Б.А., Алимов А.А. Источники вторичного электропитания с улучшенными энергосберегающими свойствами./Тезисы докладов международной научно-технической и практической конференции «Проблемы энерго- и ресурсосбережения» - Т., 2003. С.98-101.

2.B.A. Abdullaev, A.A. Alimov, D.A. Xalmanov. To the problem of the calculation capacity of the nonlinear inductance. /Seventh World Conference on Intelligent Systems for Industrial Autamation. – Tashkent.: 2012. – P. 112-115.

3.Каримов А.С., Абдуллаев Б.А., Бегматов Ш.Э., Алимов А.А. Обобщенная модель нелинейной индуктивности. Ежемесячный научно-технический журнал «Энергетика» - Минск.: 1992. – С. 55-59.

4.Филиппов Е. Нелинейная электротехника. – М.: Энергия, 1968 – 502 с.