

УДК 621.318.6.

**ОБОБЩЕННЫЕ МОДЕЛИ И ПАРАМЕТРЫ ПАССИВНЫХ
НЕЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ
СИСТЕМ**

Б.А. Абдуллаев

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

**GENERALISED MODELS AND PARAMETERS PASSIVE
NONLINEAR ELEMENT OF ELEKTRICAL POWER SYSTEMS**

B.A. Abdullaev

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.

**ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИК ТИЗИМЛАРИДАГИ ПАССИВ
НОЧИЗИҚЛИ ЭЛЕМЕНТЛАРНИНГ МОДЕЛЛАРИ ВА
ПАРАМЕТРЛАРИ**

Б.А. Абдуллаев

Мақолада электроэнергетик тизимларидаги пассив ночизиқли элементларнинг умумлаштирилган моделлари, динамик тавсифлари ва параметрлари келтирилган. Ночизиқли индуктивликнинг умумлаштирилган модели асосида унинг эквивалент параметрларини аниқлаш услубияти келтирилган ва шу жумладан, унинг электромагнит сизими, сочма индуктивлиги ва актив қаршилиги аналитик шаклида аниқланган.

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. Поэтому создание их обобщенных моделей в широком диапазоне изменения частоты источника питания и методика определение их эквивалентных параметров имеет теоретическое и практическое значения.

В связи с этим, в данной работе приводится методика анализа обобщенных моделей, характеристик и эквивалентных параметров пассивных нелинейных элементов (НЭ) (табл. 1).

Рассмотрим методику определения эквивалентных параметров пассивных НЭ на основе обобщенной модели нелинейной индуктивности.

Известно, что 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 [1]:

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

На практике часто пользуются зависимостью тока i от потокосцепления ψ в нелинейной индуктивности (НИ). При этом, если не учитывать производные высшего порядка, то формула (1) примет следующий вид [2]:

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

Уравнение (2) в общем случае описывает схему замещения НИ, которая является ее обобщенной моделью (рис.1)

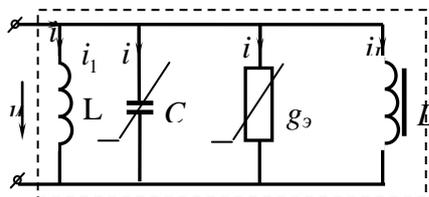


Рис. 1. Обобщенная модель нелинейной индуктивности

намагничивания $B = f(H)$, C_3 — эквивалентная электромагнитная емкость НИ, $g_3 = 1/R_3$ — эквивалентная активная проводимость НИ; L_s — индуктивность рассеивания НИ.

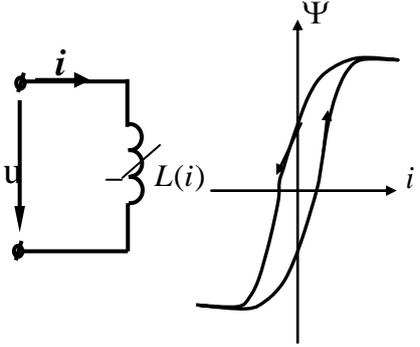
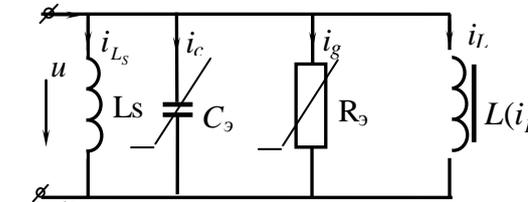
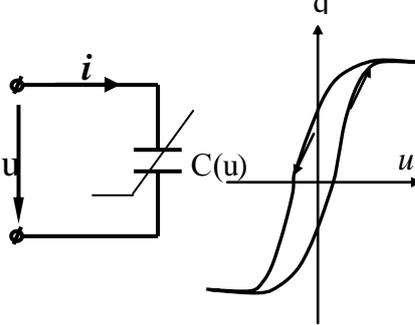
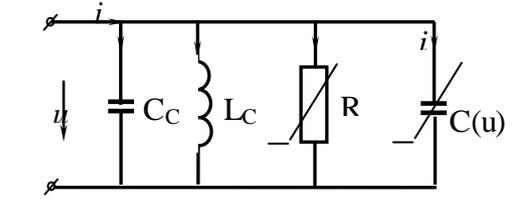
Если допустим, что эквивалентные параметры L_s , C_3 и g_3 в этой схеме постоянны, то получим

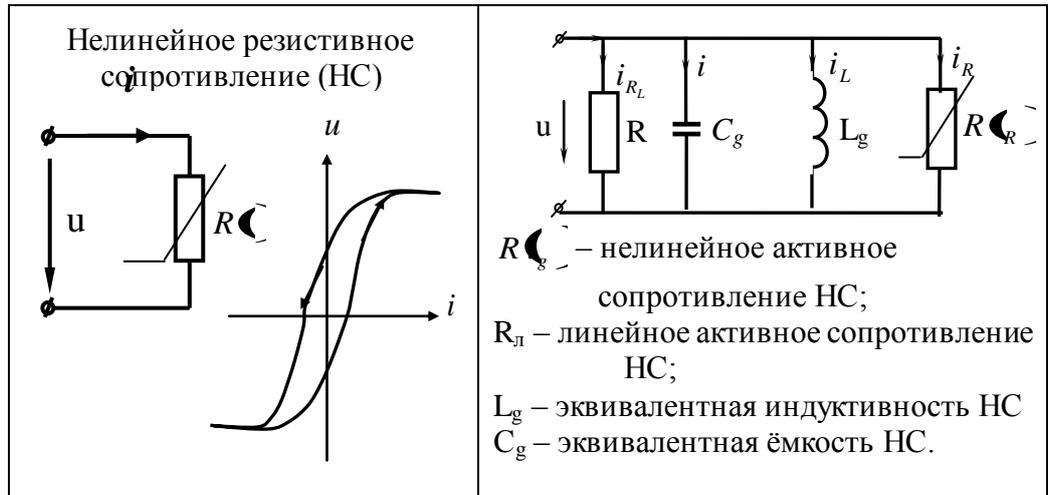
$$i = C_3 \frac{d^2\psi}{dt^2} + g_3 \frac{d\psi}{dt} + a\psi + b\psi^n + \frac{\psi}{L_s}; \quad (3)$$

где $i_L = b\psi^n$ — аппроксимация вебер-амперной характеристики НИ, полученная на основе кривой

Обобщенные модели и характеристики пассивных НЭ

Таблица 1.

Пассивные НЭ и их динамические характеристики	Обобщенные модели пассивных НЭ и их параметры
<p data-bbox="411 472 699 539">Нелинейная индуктивность (НИ)</p> 	 <p data-bbox="863 680 1391 954"> μ - магнитная проницаемость ферромагнитного материала; R_g - эквивалентное резистивное сопротивление НИ; C_g - эквивалентная электромагнитная ёмкость НИ L_g - индуктивность рассеивания </p>
<p data-bbox="427 1070 794 1104">Нелинейная ёмкость (НЁ)</p> 	 <p data-bbox="863 1256 1391 1480"> $\varepsilon(u)$ - диэлектрическая проницаемость диэлектрика; R_c - эквивалентное резистивное сопротивление НЁ; L_c - эквивалентная индуктивность НЁ C_c - линейная ёмкость НЁ. </p>



Допустим, что напряжение на индуктивности описывается уравнением $u = U_m \cos \omega t$. Тогда

$$\begin{cases}
 i_1 = \frac{\psi}{L_S} = a\psi; \text{ где } a = \frac{1}{L_S}; \\
 \psi = \frac{U_m}{\omega} \sin \omega t = \Psi_m \sin \omega t; \\
 i_c = C_g \frac{d^2\psi}{dt^2} = -\omega^2 C_g \Psi_m \sin \omega t = -I_{cm} \sin \omega t; \\
 i_g = \frac{1}{R_g} \cdot \frac{d\psi}{dt} = \frac{\Psi_m \omega}{R_g} \cos \omega t = I_{gm} \cos \omega t.
 \end{cases} \quad (4)$$

Из (4) с учетом принятой аппроксимации следует:

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

где $i_L' = i_1 + i_L$.

На основе системы (5) можно построить динамическую характеристику НИ, которая представляет собой ее петлю гистерезиса (рис. 2) [3]:

Из системы (4) также имеем

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

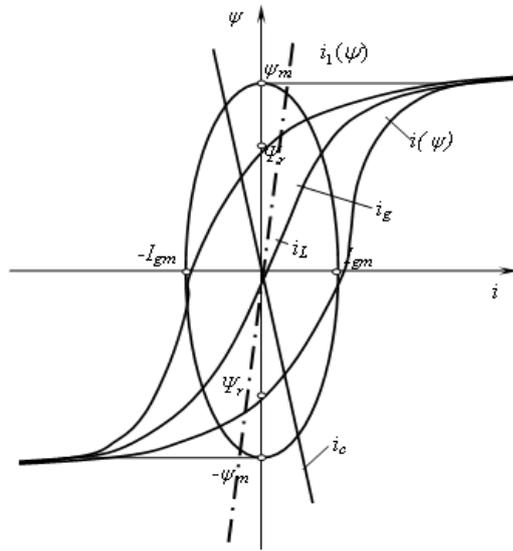


Рис. 2. Динамическая петля гистерезиса нелинейной индуктивности

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

$$H_{cd} = H_c + 0,125\omega\alpha d^2 B_s \sqrt{2\varepsilon - 1}, \quad (7)$$

где B_s - индукция насыщения;

H_c - коэрцитивная сила;

d - толщина магнитного материала;

ε - удельная электропроводность магнитного материала;

$$\sigma = \frac{B_m}{B_s} - \text{коэффициент}$$

модуляции сердечника.

Если учесть, что

$$\frac{U}{R} = \frac{H_{cd}l}{w} = \frac{l}{w} \left(H_c + 0,125\omega\alpha d^2 B_s \sqrt{2\varepsilon - 1} \right), \quad (8)$$

то имеем

$$R_{\varepsilon} = \frac{\omega w^2 S B}{l \left(H_c + 0,125\omega\alpha d^2 B_s \sqrt{2\varepsilon - 1} \right)} \quad (9)$$

где w — число витков обмотки;

l — средняя длина магнитопровода.

Величину эквивалентной электромагнитной емкости можно вычислить из следующего условия.

$$\text{Если } \psi = \Psi_r = w S B_r, \quad (10)$$

то

$$i = 0 \Rightarrow i_L + i_c + i_g = 0, \quad (11)$$

где B_r - остаточная магнитная индукция.

Тогда из (6) получим

$$C_{\varepsilon} = \frac{a\psi_r + b\psi_r^n - \frac{\omega}{R_{\varepsilon}} \sqrt{\Psi_m^2 - \Psi_r^2}}{\omega^2 \Psi_r} \quad (12)$$

$$L_s = \frac{\psi_r}{\frac{1}{\psi_m} \left(I_{cm} \psi_r + I_{gm} \sqrt{\psi_m^2 - \psi_r^2} \right) - b \psi_r^n} \quad (13)$$

Таким образом, согласно (10), (13) и (14) параметры R_s , C_s и L_s НИ зависят от многих факторов.

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 в восходящей ветви петли гистерезиса будет иметь место следующее выражение:

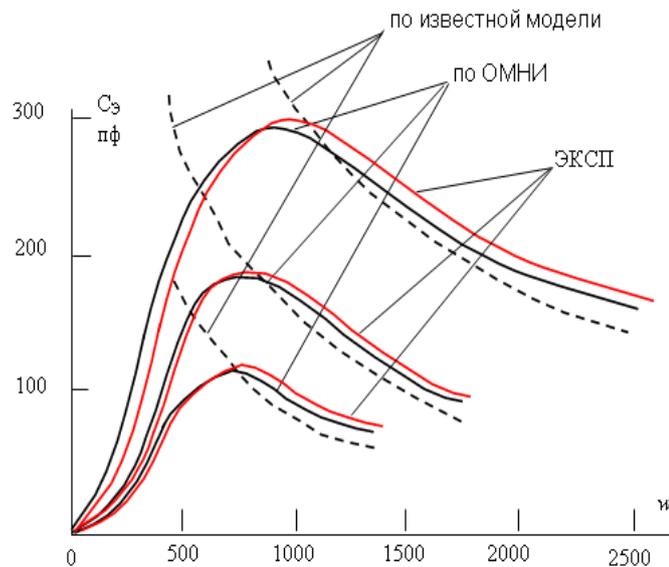


Рис. 3. Экспериментальные зависимости эквивалентной емкости НИ от числа витков

$$i = I_{1m} \sin \omega t + \alpha \frac{b}{4} \Psi_m^n \sin 3\omega t; \quad (14)$$

где:

$$I_{1m} = \sqrt{\left(a \Psi_m + \frac{3}{4} b \Psi_m^n - I_{cm} \right)^2 + I_{gm}^2}; \quad (15)$$

$$\alpha = \operatorname{arctg} \frac{I_{gm}}{a\Psi_m + \frac{3}{4}b\Psi_m^n - I_{cm}}. \quad (16)$$

Если учесть, что мгновенная мощность в НИ равна:

$$p = U_m I_{1m} \cos \omega t \sin (\omega t + \alpha) = \frac{b}{4} U_m \Psi_m^n \cos \omega t \sin 3\omega t; \quad (17)$$

то активная мощность в ней определяется из следующего выражения:

$$P = U^2 \sqrt{\left(\frac{a}{\omega} + \frac{3b}{2\omega^3} U^2 - C_3 \omega\right)^2 + \frac{1}{R_3^2}} \cdot \sin \alpha. \quad (18)$$

Если учесть (16), то (18) примет следующий вид,

$$P = U^2 Y \sin \operatorname{arctg} \frac{I_{gm}}{a\Psi_m + \frac{3}{4}b\Psi_m^n - I_{cm}}, \quad (19)$$

где

$$Y = \sqrt{\left(\frac{a}{\omega} + \frac{3b}{2\omega^3} U^2 - C_3 \omega\right)^2 + \frac{1}{R_3^2}}. \quad (20)$$

$$I_{gm} = \frac{U_m}{R}; \quad I_{cm} = \omega C_3 U_m. \quad (21)$$

Тогда с учетом (9) и других последних обозначений для потерь в НИ получим:

$$P = U^2 Y \sin \operatorname{arctg} \frac{U_m}{R_3} : \left(\frac{aU_m}{\omega} + \frac{3bU_m^n}{4\omega^3} - \omega C_3 U_m\right) \quad (22)$$

Из (20) следует, что

$$P = U^2 Y \sin \operatorname{arctg} \frac{1}{R_3} : \left(\frac{a}{\omega} + \frac{3bU_m^2}{4\omega^3} - \omega C_3\right) \quad (23)$$

Если учесть, что $b = K\omega^3$; $a = \frac{1}{L_l}$, то из (23) получим

$$P = \frac{w^2 S^2 \omega^2 B_m^2}{2} \sqrt{\left(\frac{1}{\omega L_l} + \frac{3}{2} K U^2 - C_3 \omega\right)^2 + \frac{1}{R_3^2}} \times \sin \operatorname{arctg} \frac{1}{R_3} : \left(\frac{1}{L_l \omega} + \frac{3}{2} K U^2 - \omega C_3\right) \quad (24)$$

При условии $\frac{1}{L_l \omega} + \frac{3}{2} K U^2 - \omega C_3 = 0$ то получим:

$$P = \frac{w^2 S^2 \omega^2 B_m^2}{2} \cdot \frac{1}{R_3} = 2\pi^2 w^2 S^2 f^2 \sigma B_m^2, \quad (25)$$

где $\sigma = \frac{1}{R_3}$ - удельная электропроводимость.

Выражение (24) отличается достаточно высокой точностью по сравнению с известными формулами расчета потерь в дросселях и трансформаторах [4]. Это выражение позволяет определить потери в

нелинейной индуктивности без дополнительных поправочных коэффициентов в широком диапазоне изменения частоты и действующего значения напряжения.

Таким образом, предложенные обобщенные модели пассивных нелинейных элементов (индуктивности, емкости и сопротивления) позволяют, аналитически описывать их нелинейные вебер-амперную, кулоно-вольтную и вольт-амперную характеристики в базисе мгновенных величин и определить их эквивалентные параметры достаточно высокой точностью по сравнению 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. Абдуллаев Б.А. Индуктивность рассеивания в обобщенной модели нелинейное индуктивности // Сборник научных статей республиканской научно-технической конференции // Современные проблемы энергетики и использование возобновляемых источников энергии. – Т. : 2010.-с.22-24.
3. В.А. Abdullaev, А.А. 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. – с. 112-115.
4. Филиппов Е. Нелинейная электротехника // М.: Энергия, 1968.- с.502.