

В.М. БОЕВ, М.Я. ПЕТРЕНКО, В.І. РЕВУЦЬКИЙ

МЕТОДИКА ЗАСТОСУВАННЯ АНАЛІТИЧНОГО ЗАПИСУ КУСОЧНО-ЛІНІЙНОЇ АПРОКСИМАЦІЇ КРИВОЇ НАМАГНІЧУВАННЯ НА ПРИКЛАДІ РОЗРАХУНКУ ПІК-ТРАНСФОРМАТОРА

Мета. Метою статті є розробка методики застосування аналітичного запису кусочно-лінійної апроксимації кривої намагнічування для розрахунків нелінійного електричного кола, що містить трансформатор, який працює в режимі насичення магнітопроводу. Методика. При розробці методики кусочно-лінійна апроксимація й нелінійне диференціальне рівняння електричного кола записувалося з використанням одиничних розривних функцій. Розрахунки нелінійної задачі для пошуку струму в трансформаторі були аналогічні нелінійній задачі для визначення напруженості магнітного поля у ферромагнетикі з кусочно-лінійною апроксимацією кривої намагнічування. Результати. Розроблена методика розрахунків струмів і напруг трансформатора, що працює в режимі насичення, на основі аналітичного запису кусочно-лінійної апроксимації кривої намагнічування магнітопроводу. Наукова новизна. Уперше стосовно до характеристики намагнічування пік-трансформатора використано аналітичний запис кусочно-лінійної апроксимації. Практичне значення. Запропонована методика може бути безпосередньо використана для електромагнітних розрахунків варіантів пік – трансформатора в складі загального (керованого) електротехнічного пристрою на стадії проектування й оптимізації.

Ключові слова: крива намагнічування, пік-трансформатор, магнітне насичення, кусочно-лінійна апроксимація.

В.М. БОЕВ, Н.Я. ПЕТРЕНКО, В.И. РЕВУЦКИЙ

МЕТОДИКА ПРИМЕНЕНИЯ АНАЛИТИЧЕСКОЙ ЗАПИСИ КУСОЧНО-ЛИНЕЙНОЙ АПРОКСИМАЦИИ КРИВОЙ НАМАГНИЧИВАНИЯ НА ПРИМЕРЕ РАСЧЕТА ПИК-ТРАНСФОРМАТОРА

Цель. Целью статьи является разработка методики применения аналитической записи кусочно-линейной аппроксимации кривой намагничивания для расчета нелинейной электрической цепи, содержащей трансформатор, работающий в режиме насыщения магнитопровода. Методика. При разработке методики кусочно-линейная аппроксимация и нелинейное дифференциальное уравнение электрической цепи записывались с использованием единичных разрывных функций. Расчет нелинейной задачи для нахождения тока в трансформаторе был аналогичен нелинейной задаче для определения напряженности магнитного поля в ферромагнетике с кусочно-линейной апроксимацией кривой намагничивания. Результаты. Разработана методика расчета токов и напряжений трансформатора, работающего в режиме насыщения, на основе аналитической записи кусочно-линейной аппроксимации кривой намагничивания магнитопровода. Научная новизна. Впервые применительно к характеристике намагничивания пик-трансформатора использована аналитическая запись кусочно-линейной аппроксимации. Практическое значение. Предлагаемая методика может быть непосредственно использована для электромагнитного расчета вариантов пик – трансформатора в составе общего (управляемого) электротехнического устройства на стадии проектирования и оптимизации.

Ключевые слова: кривая намагничивания, пик-трансформатор, магнитное насыщение, кусочно-линейная аппроксимация.

V.M. BOEV, N.I.PETRENKO, V.I. REVUTSKIY

METHOD OF APPLICATION OF ANALYTICAL SOLUTION OF THE PIECEWISE LINEAR APPROXIMATION OF MAGNETIZATION CURVE ON THE EXAMPLE OF CALCULATION THE PEAK-TRANSFORMER PARAMETERS

The purpose. Paper purpose is working out of a technique of the solution of nonlinear problems in an analytic form, namely a piecewise linear approximation of magnetization curve of a magnetic circuit by discontinuous functions, and the solution of the nonlinear differential equation for an electric circuit which contains this type of device. For an example of use of a technique the approximate calculation of the peak-transformer working in a regime of saturation of a magnetic circuit is resulted. Methodology. By working out of a technique of piecewise linear approximation in the capacity of the basic mathematical apparatus individual discontinuous functions were used. Calculation of a nonlinear problem for a current finding in the transformer was analogous to a nonlinear problem for magnetic field strength finding in a ferromagnetic. Results. The design procedure of currents and voltage of the transformer working in a regime of saturation, on the basis of analytical record of a piecewise linear approximation of magnetization curve of a magnetic circuit is developed. Originality. For the first time with reference to the characteristic of magnetization of the peak-transformer the method of piecewise linear approximation is applied. Practical value. The offered technique can be directly used for electromagnetic calculation of peak - transformer as a part of the general (operated) electrotechnical device at a design stage and optimization.

Keywords: a magnetization curve, peak-transformer, magnetic saturation, piecewise linear approximation.

Введение. Кусочно-линейная аппроксимация кривой намагничивания ферромагнетиков применяется в расчетах трансформаторов и других подобных устройств, работающих в режиме глубокого насыщения. При этом решается линейная задача для двух значений магнитной проницаемости (до и после точки перегиба кусочно-линейной аппроксимации). Затем эти решения согласовываются в точке перегиба. Но задача может быть решена как единое целое, если использовать аналитическую запись кусочно-линейной аппроксимации кривой намагничивания с

помощью разрывных функций [1-3]. Тогда в точке перегиба решение оказывается равным полусумме значений слева и справа (разрыв “нивелируется”).

Типичным примером использования кусочно-линейной аппроксимации являются пик-трансформаторы (рис. 1). Они применяются для преобразования синусоидального напряжения (или тока) в серию импульсов напряжения, используемых в качестве управляющих сигналов в устройствах промышленной электроники, радиотехнике, импульсной технике. Однако в настоящее время пик-

трансформаторы при автоматизации процессов все чаще вытесняются электронными устройствами, содержащими полупроводниковые преобразующие элементы.

Но импульсные системы управления на базе микроэлектронных устройств могут быть выведены из строя воздействием внешних помехонесущих электромагнитных импульсов, что приведет к нарушению работы управляемых устройств. Для повышения надежности в системах управления специальной техникой вместо микроэлектронных устройств могут быть использованы пик-трансформаторы. В силу этого усовершенствование методики расчета пик-трансформатора является актуальной задачей.

В последние годы появились работы, в которых кусочно-линейная аппроксимация используется для описания работы силовых трансформаторов в условиях геомагнитной активности [4, 5], когда в обмотках трансформаторов электроэнергетических систем наводятся квазипостоянные геоиндуцированные токи [6, 7]. Магнитная система силовых трансформаторов в этом случае подвергается одностороннему насыщению и использование кусочно-линейной аппроксимации становится целесообразным [8]. Таким образом, использование кусочно-линейной аппроксимации кривой намагничивания является востребованным методом расчета, и совершенствование его является актуальным.

Целью статьи является разработка методики применения аналитической записи кусочно-линейной аппроксимации кривой намагничивания для расчета нелинейной электрической цепи, содержащей трансформатор, работающий в режиме насыщения магнитопровода, на примере приближенного расчета пик-трансформатора, не учитывающего переходный процесс в точке излома кривой намагничивания (B_0, H_0).

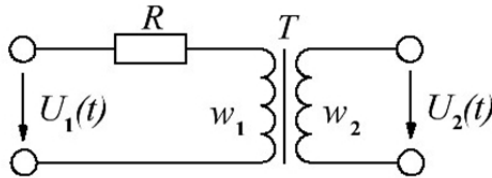


Рис. 1. Эквивалентная схема пик-трансформатора

Пик-трансформатор работает с глубоким насыщением магнитопровода и для описания его кривой намагничивания обычно используется кусочно-линейная аппроксимация, рис. 2.

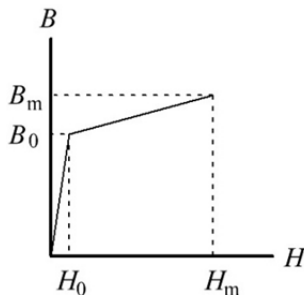


Рис. 2. Кусочно-линейная аппроксимация кривой намагничивания

Зависимость потокосцепления от тока $\Psi=f(i)$ будет такой же как, и $B=f(H)$, так как $\Psi=BSw_1$,

$i=Hl/w_1$, где S – поперечное сечение магнитопровода, w_1 – количество витков первичной обмотки, l – длина средней силовой линии магнитопровода.

Введем понятия коэффициентов само – и взаимоиנדукции для двух участков ломаной линии $B=f(H)$ (или $\Psi=f(i)$):

$$L_1 = \frac{\Psi_0}{I_0} = \frac{B_0 S w_1^2}{H_0 l};$$

$$L_2 = \frac{d\Psi}{di} = \frac{(B_m - B_0) S w_1^2}{(H_m - H_0) l};$$

$$M_1 = \frac{B_0 S w_1 w_2}{H_0 l}; M_2 = \frac{(B_m - B_0) S w_1 w_2}{(H_m - H_0) l}, \quad (1)$$

где $I_0 = \frac{H_0 l}{w_1}$; $\Psi_0 = B_0 S w_1$.

Запишем потокосцепления первичной и вторичной обмоток, используя единичные разрывные функции [1], которые на рис. 3 обозначены как f_1, f_2, f_3 :

$$f_1(i) = |i - I_0|; f_2(i) = \frac{df_1}{di} = \frac{|i - I_0|}{i - I_0};$$

$$f_3(i) = \frac{1}{2} \left(\frac{|i + I_0|}{i + I_0} - \frac{|i - I_0|}{i - I_0} \right).$$

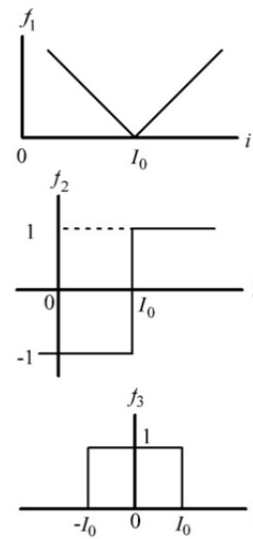


Рис. 3. Единичные разрывные функции

Кусочно-линейную аппроксимацию зависимости $\Psi(i)$ запишем по аналогии с зависимостью $B=f(H)$ [2, 3]:

$$\Psi_1 = L_2 i + \frac{L_1 - L_2}{2} (|i + I_0| - |i - I_0|),$$

$$\Psi_2 = M_2 i + \frac{M_1 - M_2}{2} (|i + I_0| - |i - I_0|)$$

Напряжение на вторичной обмотке равно:

$$u_2(t) = \frac{d\Psi_2}{dt} = M_2 \frac{di}{dt} + \frac{M_1 - M_2}{2} \left(\frac{|i + I_0|}{i + I_0} - \frac{|i - I_0|}{i - I_0} \right) \frac{di}{dt} \quad (2)$$

Дифференциальное уравнение для первичной цепи, питаемой от источника энергии синусоидальным

напряжением $u_1(t) = U_m \sin \omega t$, имеет вид:

$$Ri + \frac{d\Pi_1}{dt} = Ri + L_2 \frac{di}{dt} + \frac{L_1 - L_2}{2} \left(\frac{|i + I_0|}{i + I_0} - \frac{|i - I_0|}{i - I_0} \right) \frac{\partial i}{\partial t} = U_m \sin \omega t \quad (3)$$

Решение уравнения (3), состоящее из решений для каждого линейного участка кривой $B = f(H)$, будем искать в виде:

$$i(t) = i_2 + \frac{1}{2} \left(\frac{|i + I_0|}{i + I_0} - \frac{|i - I_0|}{i - I_0} \right) (i_1 - i_2) \quad (4),$$

где $i_1(t)$ - решение для $|H| < H_0, (|i| < I_0)$,

$i_2(t)$ - решение для $|H| > H_0, (|i| > I_0)$

Подставляем (4) в уравнение (3), получим:

$$\begin{aligned} & Ri_2 + R \frac{i_1 - i_2}{2} \left(\frac{|i + I_0|}{i + I_0} - \frac{|i - I_0|}{i - I_0} \right) + \\ & + L_1 \frac{1}{2} \left(\frac{|i + I_0|}{i + I_0} - \frac{|i - I_0|}{i - I_0} \right) \left(\frac{\partial i_1}{\partial t} - \frac{\partial i_2}{\partial t} \right) + \\ & + \left[L_2 + \frac{L_1 - L_2}{2} \left(\frac{|i + I_0|}{i + I_0} - \frac{|i - I_0|}{i - I_0} \right) \right] \times \\ & \times \frac{\partial i_2}{\partial t} + \frac{L_1 + L_2}{2} \times \\ & \times \left[\delta(i + I_0) \frac{\partial(i + I_0)}{\partial t} - \delta(i - I_0) \frac{\partial(i - I_0)}{\partial t} \right] \times \\ & \times (i_1 - i_2) = U_m \sin \omega t. \end{aligned}$$

Приравняем множители при одинаковых разрывных функциях:

$$1) \text{ при } |i| > I_0; \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{|i + I_0|}{i + I_0} - \frac{|i - I_0|}{i - I_0} \right) \right]:$$

$$Ri_2 + L_2 \frac{\partial i_2}{\partial t} = U_m \sin \omega t;$$

$$2) \text{ при } |i| < I_0; \frac{1}{2} \left(\frac{|i + I_0|}{i + I_0} - \frac{|i - I_0|}{i - I_0} \right):$$

$$Ri_1 + L_1 \left(\frac{\partial i_1}{\partial t} - \frac{\partial i_2}{\partial t} \right) + L_1 \frac{\partial i_2}{\partial t} = U_m \sin \omega t;$$

$$3) \text{ при } \delta(i - I_0): i_1(t_0) = i_2(t_0) = I_0;$$

$$4) \text{ при } \delta(i + I_0): i_1(t_1) = i_2(t_1) = -I_0.$$

Здесь t_0 и $t_1 = \frac{2\varphi_1}{\omega} - t_0$ - моменты времени, соответствующие точке (B_0, H_0) кривой намагничивания (рис. 4).

Первое и второе уравнения - это уравнения для каждого из линейных участков кривой намагничивания. Решение этих уравнений известно:

$$i_1(t) = I_{1m} \sin(\omega t - \varphi_1) + C_1;$$

$$I_{1m} = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + (\omega L_1)^2}}; \varphi_1 = \arctg \frac{\omega L_1}{R};$$

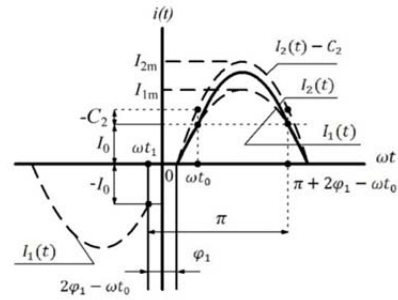


Рис. 4. Кривая тока

$$i_2(t) = I_{2m} \sin(\omega t - \varphi_2) + C_2;$$

$$I_{2m} = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + (\omega L_2)^2}}; \varphi_2 = \arctg \frac{\omega L_2}{R}.$$

Здесь $I_{1m} < I_{2m}; \varphi_1 > \varphi_2$;

C_1, C_2 - постоянные интегрирования;

R - активное сопротивление первичной обмотки трансформатора;

ω - круговая частота напряжения источника питания.

При $t=t_0$:

$$i_1(t_0) = I_{1m} \sin(\omega t_0 - \varphi_1) + C_1 = I_0; C_1 = 0.$$

$$i_1(t_0) = i_2(t_0) = I_{2m} \sin(\omega t_0 - \varphi_2) + C_2.$$

Отсюда

$$\begin{aligned} C_2 &= I_{1m} \sin(\omega t_0 - \varphi_1) - I_{2m} \sin(\omega t_0 - \varphi_2) = \\ &= I_0 - I_{2m} \sin(\omega t_0 - \varphi_2). \end{aligned}$$

В точках (B_0, H_0) , т.е. при $t=t_0$, должно соблюдаться согласование фазы: $\omega t_0 - \varphi_2 = \omega t_0 - \varphi_1$, т.е. φ_2 следует брать равным φ_1 ; при этом ωt_0 и

$\varphi_1 + \pi - (\omega t_0 - \varphi_1) = \pi + 2\varphi_1 - t_0\omega$ - углы, соответствующие $i(t_0)=I_0$. На рис. 4 представлены: $i_1(t); i_2(t) - C_2 = I_{2m} \sin(\omega t - \varphi_1); i_2(t) = I_{2m} \sin(\omega t - \varphi_1) + C_2$.

Суммарная кривая $i(t)$ ($i_1(t)$ - до I_0 , $i_2(t)$ - при $i > I_0$) будет заостренной. Чтобы ток $i(t)$ был близок к синусоидальному, следует брать $R \gg \omega L_1$ и, тем более, $R \gg \omega L_2$. Тогда для одного полупериода, от $(2\varphi_1 - \omega t_0)$ до $(\pi + 2\varphi_1 - \omega t_0)$ (рис. 4):

$$i(t) = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{|t - t_0|}{t - t_0} \right) i_1(t) + \frac{1}{2} \left(1 + \frac{|t - t_0|}{t - t_0} \right) i_2(t).$$

$$\text{Т. к. } I_0 = I_{1m} \sin(\omega t_0 - \varphi_1), \text{ то } \omega t_0 = \arcsin \frac{I_0}{I_{1m}} + \varphi_1 \quad (5)$$

Таким образом, для одного полупериода:

$$\begin{aligned} i(t) &= \frac{1}{2} \left(1 - \frac{|t - t_0|}{t - t_0} \right) I_{1m} \sin(\omega t - \varphi_1) + \frac{1}{2} \times \\ &\times \left(1 + \frac{|t - t_0|}{t - t_0} \right) [C_2 + I_{2m} \sin(\omega t - \varphi_1)] \quad (6) \end{aligned}$$

Мы здесь использовали методику расчета нелинейной задачи для тока в трансформаторе, аналогичную нелинейной задаче для напряженности магнитного поля в ферромагнетике с кусочно-линейной аппроксимацией кривой намагничивания [2, 3].

Напряжение на вторичной обмотке (2) (для одного полупериода):

$$u_2(t) = \frac{d\Pi}{dt} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{|t-t_0|}{t-t_0} \right) M_1 \frac{di_1}{dt} + \frac{1}{2} \left(1 + \frac{|t-t_0|}{t-t_0} \right) \times \\ \times M_2 \frac{di_2}{dt} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{|t-t_0|}{t-t_0} \right) M_1 I_{1m} \omega \cos(\omega t - \varphi_1) + \\ + \frac{1}{2} \left(1 + \frac{|t-t_0|}{t-t_0} \right) \cdot M_2 I_{2m} \omega \cos(\omega t - \varphi_1). \quad (7)$$

$$\text{При } t=t_0: u_2(t_0) = \frac{M_1 I_{1m} + M_2 I_{2m}}{2} \cos(\omega t_0 - \varphi_1).$$

В качестве примера применения предлагаемой методики используем задачи по расчету пик-трансформатора, изложенные в [9], где приведен расчет тока и выходного напряжения пик-трансформатора, который имеет следующие данные: $w_1=2000$, $w_2=400$, $S = 2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$; $l = 0,1 \text{ м}$.

На первичную обмотку подается ток $i(t) = 0,6 \sin 10^3 t$. Кривая намагничивания сердечника описывается ломаной линией (рис. 2) с параметрами: $B_0 = 1,5 \text{ Тл}$; $H_0 = 2 \cdot 10^3 \text{ А/м}$; $B_m = 2 \text{ Тл}$; $H_m = 1,2 \cdot 10^4 \text{ А/м}$. Соответственно для зависимости $\Pi(i)$: $\Pi_0 = 6 \cdot 10^{-2} \text{ Вб}$; $I_0 = 0,1 \text{ А}$; $\Pi_m = 8 \cdot 10^{-2} \text{ Вб}$; $I_m = 0,6 \text{ А}$.

В [9] получены напряжения на вторичной обмотке трансформатора для случаев, когда кривая намагничивания сердечника соответствует первому или второму участкам ломаной линии (рис. 2).

$$(u_2 = 72 \cos 10^3 t \text{ и } u_2 = 4,8 \cos 10^3 t)$$

Но это не реальные напряжения, они должны быть объединены в один полупериод и согласованы в точке перегиба ломаной линии, что и реализовано в предлагаемой методике. В [9] это выполнено качественно, графически. В формуле (6) для этого случая следует положить:

$$C_2 = 0; \varphi_1 = 0; I_{2m} = I_{1m} = 0,6.$$

По формулам (1) определяем коэффициенты $M_1 = 0,12$; $M_2 = 0,008$.

Тогда, в соответствии с уравнением (7)

$$u_2(t) = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{|t+t_0|}{t+t_0} \right) 72 \cos 10^3 t + \\ + \frac{1}{2} \left(1 + \frac{|t-t_0|}{t-t_0} \right) 4,8 \cos 10^3 t \quad (8)$$

Момент согласования (5):

$$t_0 = \frac{1}{\omega} \arcsin \frac{I_0}{I_{1m}} = \frac{1}{10^3} \arcsin \frac{0,1}{0,6} = 0,167 \cdot 10^{-3} \text{ с}.$$

Подставляя в (8), получим

$$u_2(t_0) = \frac{72 + 4,8}{2} \cos 10^3 t_0 = 38,4 \cos 9,57^\circ = 37,85.$$

По этим данным строим кривую $u_2(t)$ (рис. 5).

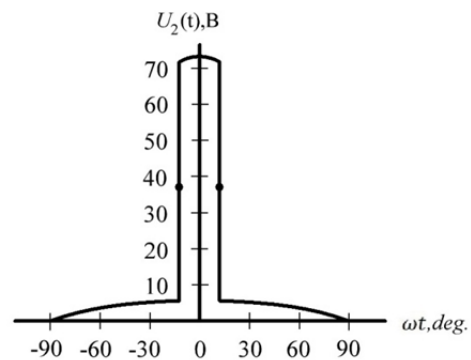


Рис. 5. Напряжение на выходе пик-трансформатора

В [9] приведено также построение кривой тока, когда на первичную обмотку трансформатора подается синусоидальное напряжение $u_1(t) = 80 \cos 10^3 t$. Активное сопротивление первичной обмотки принято равным нулю.

Подставляя в (6):

$$L_1 = \frac{\Pi_0}{I_0} = 0,6; L_2 = \frac{d\Pi}{di} = 0,04;$$

$$I_{1m} = \frac{U_m}{\omega L_1} = 0,133; I_{2m} = \frac{U_m}{\omega L_2} = 2; \varphi_1 = \varphi_2 = 90^\circ,$$

получим:

$$i(t) = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{|t-t_0|}{t-t_0} \right) 0,133 \sin 10^3 t + \\ + \frac{1}{2} \left(1 + \frac{|t-t_0|}{t-t_0} \right) (C_2 + 2 \sin 10^3 t)$$

Здесь учтено, что

$$u_1(t) = 80 \cos 10^3 t = 80 \sin(10^3 t + 90^\circ)$$

и, следовательно, аргумент синусов в (6) следует увеличить на 90° . Временной угол, соответствующий точке перегиба кривой намагничивания, равен:

$$\omega t_0 = \arcsin \frac{0,1}{0,133} = 0,27\pi = 48,75^\circ,$$

постоянная интегрирования

$$C_2 = I_0 - I_{2m} \sin \omega t_0 = 0,1 - 2 \sin 48,75^\circ = -1,4.$$

Зависимость $i(t)$ показана на рис. 6.

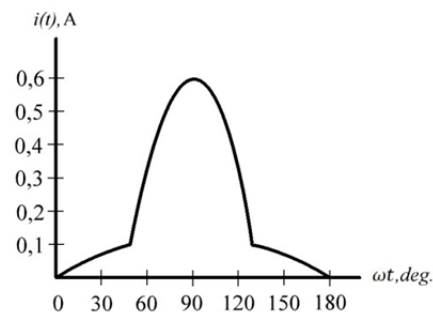


Рис. 6. Кривая тока на первичной обмотке пик-трансформатора

Выводы.

1. Таким образом, использование разрывных функций позволяет аналитически описывать кусочно – линейную аппроксимацию кривой намагничивания

магнітопровода трансформатора и вести решение подобных нелинейных задач в аналитической форме. При этом условия согласования решений для линейных участков кривой намагничивания в точке перегиба (B_0 , H_0) следуют, из подстановки общего вида решения (4) в нелинейное дифференциальное уравнение (3), записанное с использованием разрывных функций.

2. Разработана методика расчета тока и напряжения трансформатора, работающего в режиме насыщения, на основе аналитической записи кусочно-линейной аппроксимации кривой намагничивания магнітопровода.

3. Предлагаемая методика может быть непосредственно использована для электромагнитного расчета вариантов пик-трансформатора в составе общего (управляемого) электротехнического устройства на стадии проектирования и оптимизации.

Список литературы

1. Иванов А.А. Начала аналитической теории разрывных функций и расчет нелинейных электрических цепей. // *Электричество*. – 1960 - №9, с. 23-39.
2. Боев В.М. Расчет распределения поля в ферромагнитном пространстве с учетом нелинейности кривой намагничивания. // *Электронное моделирование*. – 1999, т.23-№1 - с. 27-38.
3. Боев В.М. Расчет электромагнитного поля в двухслойном нелинейном пространстве // *Техническая электродинамика*. – 1998. - №3 – с. 3-9.
4. Kappenman J.G. Space weather and vulnerability of electric power grids. – Effect of space weather on technology infrastructure, 2004.
5. Boteler D.H. Geomagnetically induced currents: present knowledge and future research. – *IEEE Transactions and Power Delivery*, vol.9, 1994, №50.
6. Pirjola R., Viljanen A., Amm O., Pulkkinen A. Power and pipelines (ground systems). - Finnish Meteorological Institute, Geophysical Research Division P. O. Box .503, FIN-00101 Helsinki, Finland.
7. Селиванов В.Н., Данилин А.Н., Колобов В.В., Сахаров Я.А., Баранник М.Б. Результаты длительных регистраций токов в нейтралах силовых трансформаторов // *Труды Кольского научного центра РАН. «Энергетика»*, 2010(1), №1, вып.1, с.84 - 90.
8. Пропускная способность межсистемных электропередач в условиях геомагнитной активности / Кувшинов А. А. [и др.] // *Электричество*. - 2016. - № 9. - С. 4-14.
9. Сборник задач и упражнений по теоретическим основам электротехники: учебное пособие для ВУЗов/под ред. проф. П.Я. Ионкина. – М.: Энергоиздат, 1982 – 768 с.

References (transliterated)

1. Ivanov A.A. Basis of the analytical theory of discontinuous functions and the calculation of nonlinear electrical circuits. *Elektrichestvo*. - 1960 – No 9, p. 23-39. (Rus).
2. Boyev V.M. Calculation of the field distribution in the ferromagnetic media, taking into account the nonlinearity of the magnetization curve. *Elektronnoe modelirovanie*. - 1999, v.23- No 1- p. 27-38. (Rus).
3. Boyev V.M. Calculation of the electromagnetic field in a two-layer nonlinear media. *Tekhnicheskaya elektrodinamika*. - 1998. – No 3 - p. 3-9. (Rus).
4. Kappenman J.G. Space weather and vulnerability of electric power grids. – Effect of space weather on technology infrastructure. Series II: Mathematics, Physics and Chemistry – 2004, Vol. 176. pp. 257-286.
5. Boteler D.H. Geomagnetically induced currents: present knowledge and future research. – *IEEE Transactions and Power Delivery*, vol.9, 1994, №50.
6. Pirjola R., Viljanen A., Amm O., Pulkkinen A. Power and pipelines (ground systems). – Finnish Meteorological Institute, Geophysical Research Division P. O. Box .503, FIN-00101 Helsinki, Finland.
7. Selivanov V.N., Danilin A.N., Kolobov V.V., Sakharov Ya.A., Barannik M.B. Results of long-term registration of currents in the neutrals of power transformers. *Proceedings of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. "Energy"*, 2010 (1), No 1, vol.1, p.84-90. (Rus).
8. Kuvshinov A. A. [and others] Capacity of intersystem electricity transmissions under conditions of geomagnetic activity. *Elektrichestvo*. – 2016. – No 9. – p. 4-14.
9. Collection of tasks and exercises on the theoretical Fundamentals of Electrotechnics: a training manual for universities / ed. prof. P.I. Ionkina. – Moscow: Energoizdat, 1982 – 768 p. (Rus).

Поступила (received) 26.03.2019

Відомості про авторів / Сведения про авторов / About the authors

Боев Вячеслав Михайлович (Боев Вячеслав Михайлович, Boev Vyacheslav Mikhailovich) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», д.т.н., професор, кафедра теоретичні основи електротехніки; м. Харків, Україна.

Петренко Николай Яковлевич (Петренко Микола Якович, Petrenko Mikola Yakovich) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», к.т.н., доцент, кафедра електричні машини; м. Харків, Україна.

Ревуцкий Виталий Игоревич (Ревуцький Віталій Ігоревич, Revutsky Vitaliy Igorevich) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; e-mail: vitrev@gmail.com