

Научная статья

УДК 621. 314.2

Код ВАК 4.3.2

Doi: 10.24412/2078-1318-2024-1-127-140

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ВКЛЮЧЕНИИ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ АПК НА ХОЛОСТОМ ХОДУ

А.С. Серебряков¹, Д.Е. Дулепов¹ ✉, В.Л. Осокин¹

¹Нижегородский государственный инженерно-экономический университет,
г. Княгинино, Нижегородская область, Россия

✉ dulepov.86@mail.ru

Реферат. В настоящее время основная часть сельскохозяйственных потребителей электроэнергии получает питание от объединенных энергосистем по сетям, которые предназначены также для питания электроэнергией промышленных предприятий, городов и электрифицированного транспорта железных дорог. Важным элементом сельских электрических сетей являются силовые трансформаторы разных классов напряжения. Многие трансформаторные подстанции в сельских электрических сетях работают в сложных условиях и ненормальных режимах: перегрузки, работа в недогруженном или неполнофазном режиме и другие аварийные и около аварийные режимы. Для обеспечения надёжной работы трансформаторов при проектировании релейной защиты от токов перегрузки, внутренних и внешних коротких замыканий и других повреждений силовых трансформаторов и питающих линий необходимо учитывать броски тока при включении трансформатора на холостом ходу. Броски тока при включении вызваны нелинейностью кривой намагничивания ферромагнитного сердечника трансформатора, связывающего его первичную и вторичную цепи. Математическая модель электромагнитных процессов в трансформаторе при его включении на холостом ходу включает в себя дифференциальные уравнения равновесия первичной электрической цепи. Переходные процессы в электрической цепи с нелинейным ферромагнитным сердечником рассмотрены на примере подключения двухобмоточного трансформатора в режиме холостого хода к синусоидальному питающему напряжению. Рассмотрен переходный режим подключения трансформатора без учёта потерь в стали и с учётом этих потерь. Программа расчёта переходного процесса при включении трансформатора на холостом ходу без учёта потерь и с учётом потерь в стали составлена с использованием дифференциальных уравнений в матричной форме и в форме Коши. Приведённая в статье методика позволяет провести точный анализ переходного процесса при включении трансформатора на холостом ходу, учесть возникающие броски тока намагничивания, их продолжительность и на основании этих данных разработать технические мероприятия для снижения негативных последствий от указанных явлений.

Ключевые слова: релейная защита силовых трансформаторов, нелинейная кривая намагничивания, ферромагнитный сердечник, магнитная цепь, режим холостого хода трансформатора, переходные процессы, электромагнитная схема, потери в стали

Цитирование. Серебряков А.С., Дулепов Д.Е., Осокин В.Л. Математическая модель электромагнитных процессов при включении силового трансформатора системы электроснабжения АПК на холостом ходу // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2024. – № 1 (75) – С. 127–140, doi: 10.24412/2078-1318-2024-1-127-140.

MATHEMATICAL MODEL OF ELECTROMAGNETIC PROCESSES
AT SWITCHING ON THE POWER TRANSFORMER OF THE POWER
SUPPLY SYSTEM OF THE AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX AT IDLE RUNA.S. Serebryakov¹, D.E. Dulepov¹ ✉, V.L. Osokin¹¹Nizhny Novgorod State Engineering and Economic University,
Knyaginino, Nizhny Novgorod region, Russian Federation,
✉ dulepov.86@mail.ru

Abstract. At present, the majority of agricultural electricity consumers are supplied from united power systems through networks that are also designed to supply electricity to industrial enterprises, cities and electrified railway transport. Power transformers of different voltage classes are an important element of rural power networks. Many transformer substations in rural power networks operate under difficult conditions and abnormal modes: overloads, underloaded or under-phase operation and other emergency and near-emergency modes. To ensure reliable operation of transformers, the design of relay protection against overload currents, internal and external short-circuits, and other faults of power transformers and supply lines must take into account the current inrush when the transformer is idling. Current inrush at switch-on is caused by the nonlinearity of the magnetisation curve of the transformer's ferromagnetic core connecting its primary and secondary circuits. The mathematical model of electromagnetic processes in the transformer during its idle switching on includes differential equations of equilibrium of the primary electric circuit. Transients in an electric circuit with a nonlinear ferromagnetic core are considered on the example of connecting a two-winding transformer in the no-load mode to a sinusoidal supply voltage. Transient mode of transformer connection without taking into account losses in steel and with taking into account these losses. The programme for calculating the transient at no-load connection of the transformer without taking into account the losses and with taking into account the losses in steel is made using differential equations in matrix form and in Cauchy form. The methodology presented in the article allows carrying out an accurate analysis of the transient process during transformer idling, to take into account the arising magnetising current surges, their duration and on the basis of these data to develop technical measures to reduce the negative consequences of these phenomena.

Keywords: relay protection of power transformers, nonlinear magnetization curve, ferromagnetic core, magnetic circuit, transformer idle run mode, transition processes, electromagnetic circuit, steel losses

Citation. Serebryakov A.S., Dulepov D.E., Osokin V.L. (2024) "Mathematical model of electromagnetic processes at switching on the power transformer of the power supply system of the agro-industrial complex at idle run", *Izvestiya of Saint-Petersburg State Agrarian University*, vol. 75, no. 1, pp. 127–140. (In Russ.), doi: 10.24412/2078-1318-2024-1-127-140.

Введение. В настоящее время основная часть сельскохозяйственных потребителей получает питание от объединенных энергосистем по сетям, которые предназначены также для питания промышленных предприятий, городов и электрифицированного транспорта. Важным элементом сельских электрических сетей являются силовые трансформаторы разных классов напряжения. Многие трансформаторные подстанции в сельских электрических сетях работают в ненормальных режимах: перегрузки, работа в недогруженном и неполнофазном режиме и других аварийных и около аварийных режимах. При проектировании и наладке релейной защиты от токов перегрузки, коротких замыканий и других внутренних повреждений силовых трансформаторов необходимо учитывать броски тока намагничивания при включении трансформатора на холостом ходу. Эти броски тока, вызванные

нелинейностью кривой намагничивания ферромагнитного сердечника трансформатора, можно обнаружить только при рассмотрении переходного процесса. В установившемся режиме такие броски тока не наблюдаются. Вот почему важно исследовать переходные процессы при включении трансформатора в режиме холостого хода. Именно в переходном режиме можно обнаружить некоторые особенности работы трансформатора и более объективно оценить его техническое состояние. Это позволяет повысить надёжность работы силовых трансформаторов в энергетических системах. Вопросами анализа и моделирования переходных процессов занимались многие отечественные [1–3] и зарубежные ученые [4, 5].

Цель исследования – рассмотреть основные положения расчета переходного процесса в электрической цепи, содержащей нелинейный ферромагнитный сердечник, составив в интегрированном пакете МАТНСАD математическую модель электромагнитных процессов при включении силового трансформатора в режиме холостого хода.

Особенности расчёта переходных процессов в электрической цепи с нелинейным ферромагнитным сердечником рассмотрены на примере подключения двухобмоточного трансформатора в режиме холостого хода к синусоидальному питающему напряжению [6].

Материалы, методы и объекты исследования. Сначала рассмотрим переходный режим при включении трансформатора без учёта потерь в стали (рис. 1). В режиме холостого хода вторичная обмотка трансформатора разомкнута, а первичная с помощью ключа Р подключается к питающему синусоидальному напряжению u_1 . Чтобы проанализировать процесс намагничивания трансформатора в этом режиме без учета потерь в стали, запишем уравнение для первичной обмотки, составленное по второму закону Кирхгофа. При этом учтем, что, согласно принципу Ленца, ЭДС, индуцированная за счет изменения тока, имеет направление, препятствующее изменению тока, вызывающего эту ЭДС, т. е. положительное направление ЭДС самоиндукции e_1 и ЭДС рассеяния $e_{\sigma 1}$ направлены против положительного направления тока i_1 (рис. 1).

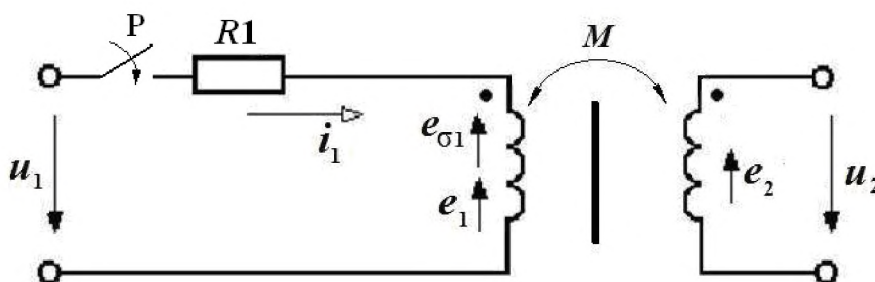


Рисунок 1. Расчетная электромагнитная схема однофазного двухобмоточного трансформатора в режиме холостого хода без учёта потерь в стали магнитопровода

Figure 1. Design electromagnetic circuit of single-phase two-winding transformer on idle run without taking into account losses in steel of magnetic circuit

Уравнение состояния для первичной цепи, составленное по второму закону Кирхгофа при холостом ходе, запишется:

$$R1 \cdot i_1 = u_1 - e_{\sigma 1} - e_1, \quad (1)$$

или, перенося выражения для ЭДС в левую часть, получим

$$R1 \cdot i_1 + e_{\sigma 1} + e_1 = u_1, \quad (2)$$

где $R1$ – активное сопротивление первичной обмотки трансформатора.

ЭДС e_1 первичной обмотки w_1 создается за счет изменения основного магнитного потока Φ , который замыкается по стальному магнитопроводу трансформатора:

$$e_1 = w_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad \dots(3)$$

ЭДС рассеяния $e_{\sigma 1}$ первичной обмотки w_1 создается за счет изменения магнитного потока рассеяния $\Phi_{\sigma 1}$, который замыкается по немагнитной среде (воздух, масло, медь или алюминий), имеющей постоянную магнитную проницаемость [7]. Вследствие этого поток рассеяния $\Phi_{\sigma 1}$ пропорционален току i_1 . Учитывая сказанное, ЭДС $e_{\sigma 1}$ определяем по формуле:

$$e_{\sigma 1} = w_1 \frac{d\Phi_{\sigma 1}}{dt} = L_{\sigma 1} \frac{di_1}{dt}, \quad (4)$$

где $L_{\sigma 1}$ – индуктивность рассеяния первичной обмотки.

Подставив значения ЭДС e_1 и $e_{\sigma 1}$ в уравнение (2), получим дифференциальное уравнение для электрической цепи, содержащей первичную обмотку трансформатора [7, 10, 11]:

$$Rl \cdot i_1 + L_{\sigma 1} \frac{di_1}{dt} + w_1 \frac{d\Phi}{dt} = u_1. \quad (5)$$

Уравнение для магнитной цепи в режиме холостого хода, когда ток во вторичной обмотке отсутствует, составим на основании закона полного тока (второго закона Кирхгофа для магнитной цепи):

$$Hl = w_1 i_1, \quad (6)$$

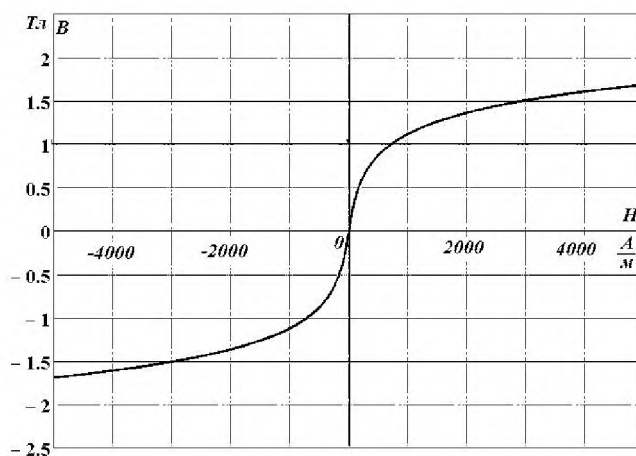
где H – напряженность магнитного поля в сердечнике трансформатора;

l – длина средней линии магнитного поля в сердечнике.

Напряженность H магнитного поля в сердечнике из ферромагнитного материала является нелинейной функцией магнитной индукции B (рис. 2), которую можно аппроксимировать, например, с помощью гиперболического синуса:

$$H = \alpha \sinh(\beta B), \quad (7)$$

где α и β – коэффициенты аппроксимации.



**Рисунок 2. Кривая намагничивания ферромагнитного сердечника трансформатора
без учета потерь в стали**

Figure 2. Magnetization curve of ferromagnetic core of transformer excluding losses in steel

Выразим магнитную индукцию B в сердечнике через магнитный поток Φ :

$$B = \frac{\Phi}{Q}, \quad (8)$$

где Q – площадь поперечного сечения сердечника трансформатора.

С учетом уравнений (7) и (8), уравнение (6) запишется:

$$\alpha l \sinh\left(\beta \frac{\Phi}{Q}\right) = w_1 i_1. \quad (9)$$

Продифференцируем уравнение (9), считая поток Φ и ток i_1 функциями времени t :

$$\alpha l \frac{\beta}{Q} \cosh\left(\beta \frac{\Phi}{Q}\right) \frac{d\Phi}{dt} = w_1 \frac{di_1}{dt}. \quad (10)$$

Обозначим $A = \alpha l \frac{\beta}{Q}$ и $b = \frac{\beta}{Q}$. Тогда уравнение (10) примет вид

$$A \cosh(b\Phi) \frac{d\Phi}{dt} = w_1 \frac{di_1}{dt}. \quad (11)$$

Математическая модель трансформатора без учёта потерь в магнитопроводе.

Запишем систему дифференциальных уравнений (5) и (11), описывающих процессы в трансформаторе в режиме холостого хода без учёта потерь в магнитопроводе, в канонической форме:

$$\begin{aligned} L_{\sigma 1} \frac{di_1}{dt} + w_1 \frac{d\Phi}{dt} &= u_1 - R1 \cdot i_1 \\ -w_1 \frac{di_1}{dt} + A \cosh(b\Phi) \frac{d\Phi}{dt} &= 0. \end{aligned} \quad (12)$$

Представим систему дифференциальных уравнений (12) в матричной форме:

$$\begin{bmatrix} L_{\sigma 1} & w_1 \\ -w_1 & A \cosh(b\Phi) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{di_1}{dt} \\ \frac{d\Phi}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1 - R1 \cdot i_1 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (13)$$

Из системы уравнений (13), решая её методом Крамера, получим выражения для производных величин тока i_1 и потока Φ , т. е. получим запись дифференциальных уравнений трансформатора в форме Коши:

$$\frac{di_1}{dt} = \frac{\Delta i_1}{\Delta} = \frac{(u_1 - R1 \cdot i_1) A \cosh(b\Phi)}{L_{\sigma 1} A \cosh(b\Phi) + w_1^2}, \quad (14)$$

$$\frac{d\Phi}{dt} = \frac{\Delta \Phi}{\Delta} = \frac{(u_1 - R1 \cdot i_1) w_1}{L_{\sigma 1} A \cosh(b\Phi) + w_1^2}. \quad (15)$$

Программа для решения дифференциальных уравнений (14) и (15) в интегрированном пакете МАТНСАД методом Рунге-Кутты четвёртого порядка [8, 9] представлена на рис. 3. Сечение Q сердечника задано в м^2 , длина его l задана в метрах. Индуктивность $L_{\sigma 1}$ (в программе обозначена просто $L1$) задана в генри, сопротивление $R1$ задано в омах, а

амплитуда питающего синусоидального напряжения U_m – в вольтах. Время t задано в секундах. Начальная фаза питающего напряжения принята равной нулю. Переменная тока i_1 обозначена в программе на рис. 3 как компьютерная переменная x_0 , а переменная магнитного потока Φ – как компьютерная переменная x_1 .

$$\begin{aligned}
 w1 &:= 600 & Q &:= 25 \cdot 10^{-4} & R1 &:= 2 & L1 &:= 5 \cdot 10^{-3} \\
 \alpha &:= 83 & \beta &:= 2.8 & l &:= 0.4 & A &:= \frac{\alpha \cdot \beta \cdot l}{Q} & b &:= \frac{\beta}{Q} \\
 t &:= 0, 0.00001 \dots 0.5 & U_m &:= 1200 & u1(t) &:= U_m \cdot \sin\left(314t + \frac{0\pi}{2}\right) \\
 x &:= \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} & D(t, x) &:= \begin{bmatrix} \frac{(u1(t) - R1 \cdot x_0) \cdot (A \cdot \cosh(b \cdot x_1))}{L1 \cdot A \cdot \cosh(b \cdot x_1) + w1^2} \\ \frac{(u1(t) - R1 \cdot x_0) \cdot w1}{(L1 \cdot A \cdot \cosh(b \cdot x_1) + w1^2)} \end{bmatrix} \\
 Z &:= \text{rkfixed}(x, 0, 0.5, 5000, D) & n &:= 0 \dots 5000 \\
 t_n &:= Z_{n,0} & i_{1n} &:= Z_{n,1} & \Phi_n &:= Z_{n,2}
 \end{aligned}$$

Рисунок 3. Программа решения системы нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих процессы в трансформаторе при включении его на синусоидальное напряжение в режиме холостого хода

Figure 3. Program for solving the system of nonlinear differential equations describing the processes in transformer when switching it on sinusoidal voltage on idle run

Начальные условия (НУ), т. е. значения искоемых переменных x_0 и x_1 в момент времени $t = 0$, заданные в виде вектора x , нулевые. Производные искоемых функций задаются в виде вектора $D(t, x)$. В скобках стандартной функции **rkfixed** решения дифференциальных уравнений методом Рунге-Кутты перечисляются через запятую: вектор начальных условий x , начальная 0 и конечная 0,5 точки интервала интегрирования, число точек 5000 (не считая нулевой точки) и вектор первых производных искоемых функций D .

Результаты решения уравнений (14) и (15) в интегрированном пакете MATHCAD по программе, представленной на рис. 3, получаются в виде матрицы Z , содержащей на 1 столбец больше количества уравнений. Первый столбец матрицы соответствует времени t , второй – первичному току i_1 , третий – магнитному потоку Φ в сердечнике трансформатора. На рис. 4 эти искоемые функции приведены в виде графиков.

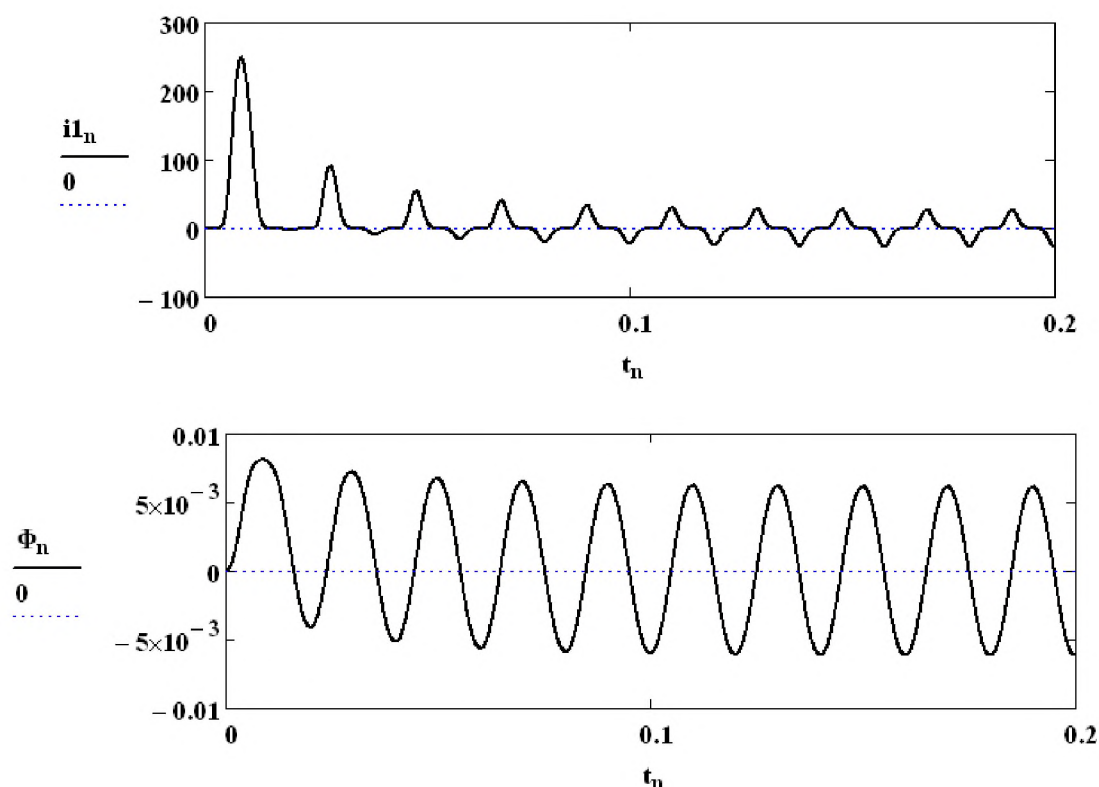


Рисунок 4. Зависимости тока i_1 и магнитного потока Φ от времени t в трансформаторе при включении его на холостом ходу

Figure 4. Dependence of current i_1 and magnetic flux Φ on time t in transformer when switching it on idle run

Заметим, что система дифференциальных уравнений (13) в матричной форме может быть решена в интегрированном пакете MATHCAD непосредственно без предварительного решения уравнения (13) методом Крамера для преобразования дифференциальных уравнений (13) в форму Коши. Для этого в программе (рис. 5) система дифференциальных уравнений (13) записывается с помощью обратной или обращённой матрицы:

$$Dd(t, x) := D(x)^{-1} \cdot E(t, x) . \quad (16)$$

```

t := 0, 0.00001 .. 0.5      Um := 1200      u1(t) := Um · sin(314t + 0 ·  $\frac{\pi}{2}$ )
x :=  $\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$       D(x) :=  $\begin{pmatrix} L1 & w1 \\ -w1 & A \cdot \cosh(b \cdot x_1) \end{pmatrix}$       E(t, x) :=  $\begin{pmatrix} u1(t) - R1 \cdot x_0 \\ 0 \end{pmatrix}$ 
Dd(t, x) := D(x)-1 · E(t, x)
Z := rkfixed(x, 0, 0.5, 5000, Dd)      n := 0 .. 5000
tn := Zn, 0      i1n := Zn, 1      Φn := Zn, 2

```

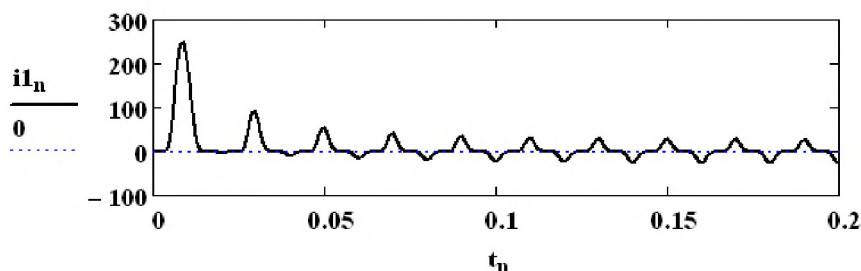


Рисунок 5. Программа решения системы нелинейных дифференциальных уравнений (13), описывающих процессы в трансформаторе при включении его на синусоидальное напряжение в режиме холостого хода с помощью обратной матрицы

Figure 5. The program for solving the system of nonlinear differential equations (13) describing the processes in transformer when switching it on sinusoidal voltage on idle run using the reverse matrix

Как видно из рис. 4 и рис. 5, результаты решения системы нелинейных дифференциальных уравнений (13) обоими методами совпадают.

Итак, при холостом ходе однофазного трансформатора, к первичной обмотке которого подведено синусоидальное напряжение, при допущении, что потери в сердечнике равны нулю, магнитный поток Φ в сердечнике практически синусоидальный (рис. 4). При этом кривая тока в первичной обмотке несинусоидальная (рис. 4 и рис. 5). В первый момент времени после подачи напряжения наблюдается бросок тока, причем значение его при начальной фазе напряжения, которая равна нулю, в несколько раз (до 7–8 раз) превосходит установившееся значение тока (рис. 4). Бросок тока отсутствует, если начальная фаза напряжения равна $\pi/2$. Это обстоятельство следует учитывать при проектировании релейной защиты трансформатора.

Уравнения состояния и математическая модель трансформатора с учётом потерь в магнитопроводе. Заметим, что потери в сердечнике трансформатора в режиме холостого хода и в нагрузочном режиме можно учесть, если параллельно первичной обмотке включить резистор $R2$ (рис. 5), который и будет учитывать потери в стальном сердечнике трансформатора.

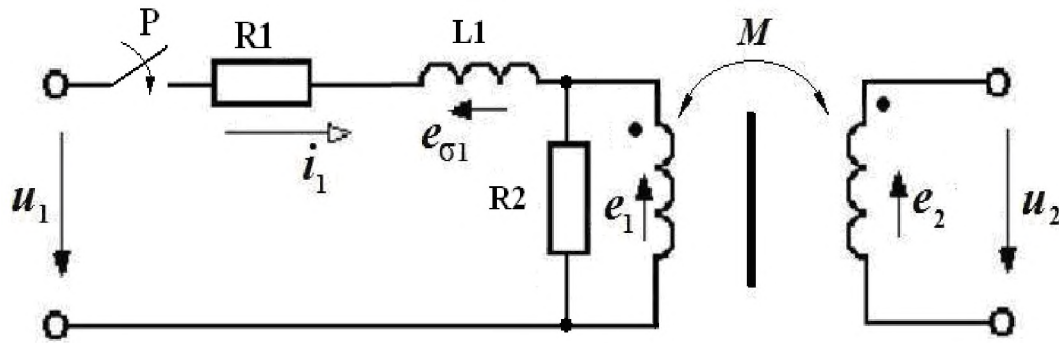


Рисунок 6. Расчетная электромагнитная схема однофазного двухобмоточного трансформатора в режиме холостого хода с учётом потерь в стали магнитопровода
Figure 6. Calculated electromagnetic circuit of single-phase two-winding transformer on idle mode, taking into account steel losses in magnetic circuit

Для схемы на рис. 6 уравнения, описывающие процессы в первичной обмотке трансформатора в режиме холостого хода, имеют вид:

$$R1 \cdot i_1 + L1 \frac{di_1}{dt} + w_1 \frac{d\Phi}{dt} = u_1, \quad (17)$$

$$Hl = \sum w_1 \cdot i = w_1 \left(i_1 - \frac{e_1}{R2} \right) = w_1 \left(i_1 - \frac{1}{R2} \cdot w_1 \frac{d\Phi}{dt} \right). \quad (18)$$

Уравнение (17) составлено на основании второго закона Кирхгофа, а уравнение (18) – на основании закона полного тока. Кривая намагничивания сердечника, как и ранее, аппроксимируется с помощью гиперболического синуса:

$$H = \alpha \sinh(\beta B).$$

Тогда уравнение (18) запишется:

$$Hl = \alpha \cdot \sinh\left(\beta \frac{\Phi}{Q}\right) \cdot l = w_1 \left(i_1 - \frac{e_1}{R2} \right) = w_1 \left(i_1 - \frac{1}{R2} \cdot w_1 \frac{d\Phi}{dt} \right). \quad (19)$$

Отсюда производная магнитного потока Φ выразится как:

$$\frac{d\Phi}{dt} = \frac{R2}{w_1^2} \left(w_1 i_1 - \alpha \cdot \sinh\left(\beta \frac{\Phi}{Q}\right) \cdot l \right). \quad (20)$$

Подставим значение производной потока из уравнения (20) в уравнение (17) и выразим из полученного уравнения производную тока i_1 :

$$\frac{di_1}{dt} = \frac{u_1 - R1 \cdot i_1 - \frac{R2}{w_1} \cdot \left(w_1 \cdot i_1 - \alpha \cdot \sinh\left(\beta \frac{\Phi}{Q}\right) \cdot l \right)}{L1}. \quad (21)$$

Программа расчёта переходного процесса при включении трансформатора на холостом ходу с учётом потерь в стали, составленная с использованием дифференциальных уравнений в форме Коши (20) и (21), приведена на рис. 7.

Результаты решения уравнений (20) и (21) приведены на рис. 8. Из рис. 7 видно, что в переходном режиме зависимость магнитной индукции B в сердечнике от тока намагничивания

i_1 представляет собой изменяющиеся во времени петли гистерезиса. Из-за потерь на перемагничивание сердечника изменение магнитной индукции (увеличение и уменьшение) происходит по несовпадающим кривым.

$$\begin{aligned}
 w_1 &:= 600 & Q &:= 25 \cdot 10^{-4} & R_1 &:= 1 & L_1 &:= 50 \cdot 10^{-3} \\
 \alpha &:= 83.834 & \beta &:= 2.833 & l &:= 0.4 & R_2 &:= 120 \\
 U_m &:= 1200 & t &:= 0, 0.00001 \dots 0.5 & u_1(t) &:= U_m \cdot \sin(314t) \\
 x &:= \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \\
 D(t, x) &:= \begin{bmatrix} \frac{u_1(t) - R_1 \cdot x_0 - \frac{R_2}{w_1} \cdot \left(w_1 \cdot x_0 - \alpha \cdot l \cdot \sinh\left(\frac{\beta \cdot x_1}{Q}\right) \right)}{L_1} \\ \frac{R_2}{w_1^2} \cdot \left(w_1 \cdot x_0 - \alpha \cdot l \cdot \sinh\left(\frac{\beta \cdot x_1}{Q}\right) \right) \end{bmatrix} \\
 Z &:= \text{rkfixed}(x, 0, 0.5, 50000, D) & n &:= 0 \dots 50000 & t_n &:= \frac{0.5}{50000} \cdot n \\
 t_n &:= Z_{n,0} & i_{1n} &:= Z_{n,1} & \Phi_n &:= Z_{n,2}
 \end{aligned}$$

Рисунок 7. Программа решения дифференциальных уравнений трансформатора с учётом потерь в стали

Figure 7. Program for solving differential equations of transformer on idle run taking into account losses in steel

Из рис. 8 и рис. 9 видно, что ток намагничивания в трансформаторе несинусоидальный. Причина несинусоидальности тока намагничивания трансформатора – нелинейность характеристики намагничивания стали, т. е. нелинейность зависимости $B = f(H)$.

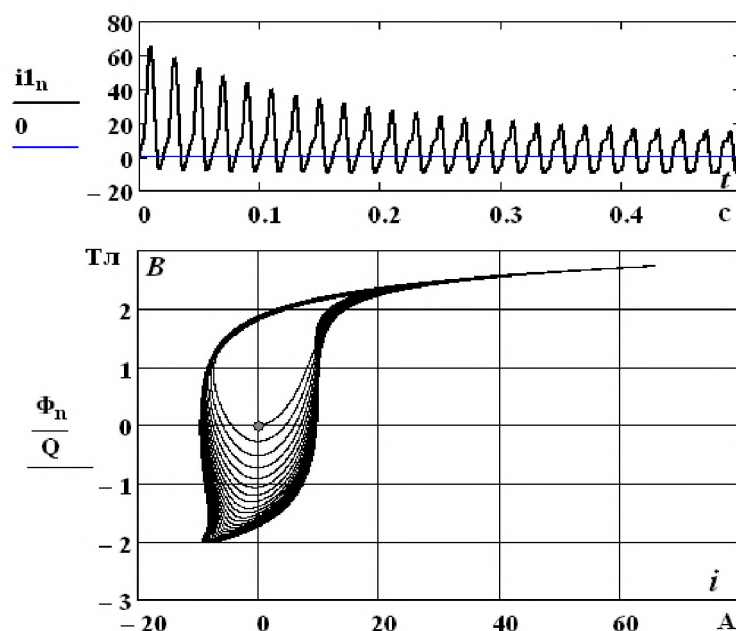


Рисунок 8. Переходный процесс при включении трансформатора на холостом ходу с учётом потерь в стали

Figure 8. Transition process when switching transformer on idle run taking into account losses in steel

На рис. 9 приведены гистерезисные петли намагничивания ферромагнитного сердечника трансформатора в переходном процессе при включении трансформатора на холостом ходу с

учёт потерь в стали при разном времени после включения: а) $t = 0,02$ с; б) $t = 0,04$ с; в) $t = 0,08$ с; г) $t = 0,2$ с.

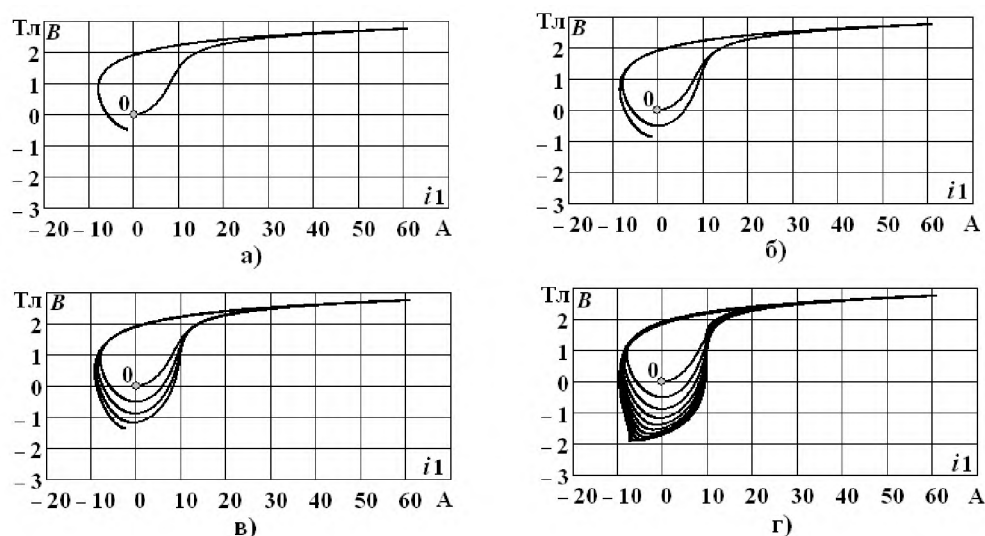


Рисунок 9. Кривые намагничивания сердечника трансформатора в переходном процессе при включении трансформатора на холостом ходу с учётом потерь в стали: а) $t = 0,02$ с; б) $t = 0,04$ с; в) $t = 0,08$ с; г) $t = 0,2$ с

Figure 9. Magnetization curves of transformer core in transition process when switching transformer on idle run taking into account losses in steel:
а) $t = 0,02$ s; б) $t = 0,04$ s; в) $t = 0,08$ s; д) $t = 0,2$ s

Закключение. Кривые переходного процесса характеризуют техническое состояние магнитной системы трансформатора более полно и более объективно по сравнению с кривыми установившегося режима. Поэтому важно знать, как протекают реальные процессы в переходном режиме и как они должны протекать в исправном трансформаторе. В частности, важно знать, как протекают процессы при включении трансформатора в режиме холостого хода.

На основании уравнений состояния предложена математическая модель для расчёта электромагнитных переходных процессов в трансформаторе с учётом потерь в магнитопроводе и нелинейности кривой намагничивания ферромагнитного сердечника. Исследована динамика изменений семейства петель гистерезиса при включении трансформатора на холостом ходу. Приведённая в статье методика позволяет провести точный анализ переходного процесса при включении трансформатора на холостом ходу, учесть возникающие броски тока намагничивания, их продолжительность и на основании этих данных разработать технические мероприятия для снижения негативных последствий от указанных явлений.

Результаты исследований могут быть использованы при проектировании и эксплуатации интеллектуальных систем релейной защиты и автоматики силовых трансформаторов, питающих сложную переменную нагрузку, например, системы тягового электроснабжения железных дорог, электрифицированных на переменном токе.

Результаты исследования могут быть также использованы при разработке ферромагнитных преобразователей параметров электрической энергии в системах электроснабжения АПК.

Список литературы

1. Халина, Т.М. Анализ возникновения бросков магнитного потока и намагничивающего тока при включении трансформатора на холостом ходу / Т. М. Халина, В. А. Овсепян, Е. Р. Богоутдинов // Энергетические системы. – 2022. – № 4. – С. 46–53. – DOI 10.34031/ES.2022.4.005. – EDN PUJPZL.
2. Моделирование режима холостого хода трансформатора с учетом эффектов гистерезиса и вихревых токов / Д. С. Ярымбаш, С. Т. Ярымбаш, М. И. Коцур, Т. Е. Дивчук // Проблемы региональной энергетики. – 2019. – № 1(39). – С. 12–21. – DOI 10.5281/zenodo.2650413. – EDN FCAXLN.
3. Лурье, А.И. Процесс включения трансформаторов на холостой ход и короткое замыкание / А. И. Лурье // Электротехника. – 2008. – № 2. – С. 2–18. – EDN LAFKRL.
4. Islam, M.M., Musil, M., Shohan, M.A. (2023) A review of modelling techniques of power transformers for digital real-time simulation. *J. Eng.*, pp. 1–16. <https://doi.org/10.1049/tje2.12221>.
5. Łukaniszyn, M., Baron, B., Kolańska-Płuska, J., Majka, Ł. (2023) ‘Inrush Current Reduction Strategy for a Three-Phase Dy Transformer Based on Pre-Magnetization of the Columns and Controlled Switching’, *Energies*, vol. 16, p. 5238, <https://doi.org/10.3390/en16135238>.
6. Серебряков, А.С. Уравнения состояния и математическая модель электромагнитных процессов в трансформаторе / А. С. Серебряков, В. Л. Осокин // Интеллектуальная электротехника. – 2019. – № 1. – С. 55–68. – DOI 10.46960/2658-6754_2019_1_55. – EDN ZAYVZZ.
7. Вихарев, Д.Ю. Аналитический расчет индуктивностей рассеяния на основе применения векторного потенциала магнитного поля / Д. Ю. Вихарев, И. С. Снитко, А. И. Тихонов // Моделирование систем и процессов. – 2021. – Т. 14, № 1. – С. 4–10. – DOI 10.12737/2219-0767-2021-14-1-4-10. – EDN POECVY.
8. Метод автоматического формирования систем линейных дифференциальных уравнений / А. Р. Баланцев, Н. Б. Баланцева, Н. А. Андреева, В. А. Киосова // Тенденции развития науки и образования. – 2022. – № 86 – С. 143–147. – DOI 10.18411/trnio-06-2022-388. – EDN COIPXD.
9. Чернявская, С.А. Численное решение дифференциальных уравнений методом Рунге-Кутты с использованием среды MathCad / С. А. Чернявская, К. Б. Матузаев // Перспективы науки. – 2022. – № 12(159). – С. 227–230. – EDN DGPKDL.
10. Моделирование электромагнитных процессов при работе силовых трансформаторов под нагрузкой и в режиме холостого хода / Д. С. Ярымбаш, М. И. Коцур, С. Т. Ярымбаш, И. М. Килимник // Проблемы региональной энергетики. – 2020. – № 1(45). – С. 1–13. – DOI 10.5281/zenodo.3713396. – EDN GWYNHT.
11. Фокеев, А.Е. Анализ режимов работы масляных силовых трансформаторов напряжением 10(6)/0,4 кВ / А. Е. Фокеев, И. Н. Тумаков // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. – 2021. – Т. 24, № 4. – С. 80–91. – DOI 10.22213/2413-1172-2021-4-80-91. – EDN ECMIWZ.

References

1. Khalina, T.M., Ovsepyan, V.A., Bogoutdinov E.R. (2022), ‘Analysis of the occurrence of magnetic flux surges and Magnetizing current when the transformer is turned on at idle’, *Energeticheskie sistemy*, vol. 4, pp. 46–53. (In Russ.). doi 10.34031/ES.2022.4.005. – EDN PUJPZL.
2. Yarymbash, D.S., Yarymbash, S.T., Kotsur, M.I., Divchuk, T.E. (2019), ‘Modeling of idle mode of the transformer taking into account the effects of hysteresis and eddy currents’, *Problemy regional'noj energetiki*, vol. 1, pp. 12–21. (In Russ.). doi 10.5281/zenodo.2650413. – EDN FCAXLN.

3. Lurie, A.I. (2008) 'Process of switching transformers on idle and short circuit / A. I. Lurie', *Elektrotehnika*, vol. 2, pp. 2–18. (In Russ.). – EDN LAFKRL.
4. Islam, M.M., Musil, M., Shohan, M.A. (2023) 'A review of modelling techniques of power transformers for digital real-time simulation', *J. Eng.* pp. 1–16. <https://doi.org/10.1049/tje2.12221>.
5. Łukaniszyn, M.; Baron, B.; Kolańska-Pluska, J.; Majka, Ł. (2023) 'Inrush Current Reduction Strategy for a Three-Phase Dy Transformer Based on Pre-Magnetization of the Columns and Controlled Switching', *Energies*, vol. 16, p. 5238. <https://doi.org/10.3390/en16135238>.
6. Serebryakov, A. S., Osokin, V. L. (2019) 'State equations and mathematical model of electromagnetic processes in transformer' *Intelligent electrical engineering*, vol. 1, pp. 55–68. doi 10.46960/2658-6754_2019_1_55. – EDN ZAYVZZ.
7. Vikharev, D.Yu., Snit'ko, I.S., Tikhonov A.I. (2021) 'Analytical calculation of leakage inductances based on the application of the vector potential of the magnetic field' *Modeling of systems and processes*, vol. 14, no 1, pp. 4–10. doi 10.12737/2219-0767-2021-14-1-4-10. – EDN POECVY.
8. Balantsev, A.R., Balantseva, N.B., Andreeva, N.A., Kiosova, V.A. (2022) 'The method of automatic formation of systems of linear differential equations', *Trends in the development of science and education*, vol. 86–8, pp. 143–147. (In Russ.). doi 10.18411/trnio-06-2022-388. – EDN COIPXD.
9. Chernyavskaya, S.A., Matuzaev, K.B. (2022) 'Numerical solution of differential equations by the Runge-Kutta method using MathCad environment', *Prospects of science*, vol. 12, no 159, pp. 227–230. (In Russ.). EDN DGPKDL.
10. Yarymbash, D.S., Kotsur, M.I., Yarymbash, S.T., Kilimnik, I.M. (2020) 'Modeling of electromagnetic processes during operation of power transformers underload and on idle mode' *Problems of regional energy*, vol. 1, no 45, pp. 1–13. (In Russ.). doi 10.5281/zenodo.3713396. – EDN GWYNHT.
11. Fokeev, A.E., Tumakov, I.N. (2021) 'Analysis of operating modes of oil power transformers with voltage of 10(6)/0.4 kV', *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikov*. vol. 24, no. 4, pp. 80–91. (In Russ.). doi 10.22213/2413-1172-2021-4-80-91. – EDN ECMIWZ.

Сведения об авторах

Серебряков Александр Сергеевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Электрификация и автоматизация», государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородский государственный инженерно-экономический университет», SPIN-код: 3422-1792, <https://orcid.org/0000-0002-7455-2348>; a.sereb@mail.ru.

Дулепов Дмитрий Евгеньевич, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электрификация и автоматизация», государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородский государственный инженерно-экономический университет», SPIN-код: 8021-0016, <https://orcid.org/0000-0003-1044-1865>; dulepov.86@mail.ru.

Осокин Владимир Леонидович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Электрификация и автоматизация», государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородский государственный инженерно-экономический университет», SPIN-код: 4573-1339, <https://orcid.org/0000-0001-8772-4252>; osokinvl@mail.ru.

Information about authors

Aleksandr S. Serebryakov, Doc. Sci (Eng.), Professor, Professor Of The Department «Electrification And Automation», State Budgetary Educational Institution Of Higher Education

«Nizhny Novgorod State Engineering And Economic University», SPIN-code: 3422-1792, <https://orcid.org/0000-0002-7455-2348>; a.sereb@mail.ru.

Dmitrij E. Dulepov, Cand. Sci (Eng.), Associate Professor, Head Of The Department «Electrification And Automation», State Budgetary Educational Institution Of Higher Education «Nizhny Novgorod State Engineering And Economic University», SPIN-code: 8021-0016, <https://orcid.org/0000-0003-1044-1865>; dulepov.86@mail.ru.

Vladimir L. Osokin, Cand. Sci (Eng.), Associate Professor, Associate Professor Of The Department «Electrification And Automation», State Budgetary Educational Institution Of Higher Education «Nizhny Novgorod State Engineering and Economic University», SPIN-code: 4573-1339, <https://orcid.org/0000-0001-8772-4252>; osokinvl@mail.ru.

Авторский вклад. Все авторы настоящего исследования принимали непосредственное участие в планировании, выполнении и анализе данного исследования. Все авторы настоящей статьи ознакомились и одобрили представленный окончательный вариант.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Author's contribution. All authors of this research paper have directly participated in the planning, execution, or analysis of this study. All authors of this paper have read and approved the final version submitted.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 13.12.2023; одобрена после рецензирования 13.02.2024; принята к публикации 26.02.2024.

The article was submitted 13.12.2023; approved after reviewing 13.02.2024; accepted for publication 26.02.2024.