

УДК 621.316.313

UDC 621.316.313

05.20.00 Процессы и машины агроинженерных систем

Processes and machines of Agroengineering systems

ВЛИЯНИЕ НАЧАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ НА ПЕРЕХОДНЫЕ ТОКИ ТРАНСФОРМАТОРА

EFFECT OF INITIAL CONDITIONS ON TRANSFORMER TRANSIENT CURRENTS

Стрижков Игорь Григорьевич
д.т.н., профессор

Strizhkov Igor Grigorievich
Dr.Sci.Tech., professor

Чеснюк Евгений Николаевич
к.т.н., доцент

Chesnyuk Evgeniy Nikolaevich
Cand.Tech.Sci., associate professor

Кузнецов Максим Сергеевич
студент-магистрант

Kuznetsov Maxim Sergeevich
student

Чеснюк Сергей Евгеньевич
студент бакалавриата

Chesnyuk Sergey Evgenievich
student

Кубанский государственный аграрный университет, Краснодар, Россия

Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russia

В статье рассматриваются особенности протекания переходного процесса в обмотках трансформатора при ненулевых начальных условиях, характерных для режимов сушки трансформатора токами низкой частоты. Показано влияние ненулевых начальных условий на токи в обмотках

The article dwells on the features of the transition process in the transformer windings under non-zero conditions typical for the modes of drying the transformer with low frequency currents. The article also shows the effect of non-zero conditions on the currents in the windings and the heating of the windings

Ключевые слова: ТРАНСФОРМАТОР, ПЕРЕХОДНЫЙ ПРОЦЕСС, ТОКИ

Keywords: TRANSFORMER, TRANSIENT PROCESS, CURRENTS

Doi: 10.21515/1990-4665-142-001

Введение

Трансформаторы являются важнейшими элементами систем электроснабжения сельскохозяйственных объектов [1]. Вследствие особенностей сельскохозяйственного производства, таких как сезонность работы предприятий, открытая конструкция подстанций и др., их трансформаторы нередко нуждаются в сушке изоляции. Применяются различные способы сушки, и одним из наиболее эффективных является нагрев изоляции токами обмоток трансформатора. При этом трансформатор используется в режиме короткого замыкания и эффективно использование токов низкой частоты $0,1 \div 2$ Гц [2]. При таком способе нагреваются и первичная, и вторичная обмотки, что интенсифицирует процесс сушки [3, 4].

Примером подключения однофазного трансформатора или одной фазы трехфазного к источнику напряжения при токах низкой частоты может служить схема на рисунке 1. В схеме используется источник постоянного или выпрямленного напряжения, а переменный ток создается переключением полярности напряжения на первичной обмотке трансформатора переключателем К.

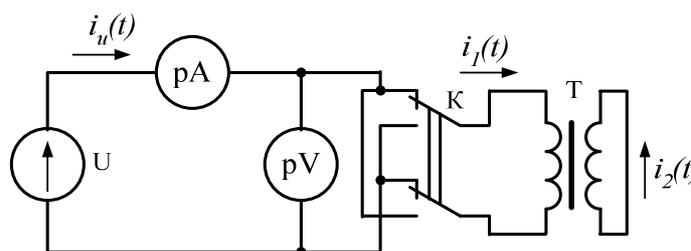


Рисунок 1 – Схема включения трансформатора при сушке токами низкой частоты

При формировании требований к источнику питания и режиму нагрева трансформатора принципиальное значение имеет определение переходных токов в его обмотках, являющихся источниками тепла. И если математическому анализу переходных токов в короткозамкнутом трансформаторе при подключении к источнику постоянного напряжения с нулевыми начальными условиями (при отсутствии тока в обмотках в момент подачи напряжения на трансформатор) в литературе уделено достаточно много внимания [5-8] и этот вопрос относят к классическим при изучении цепей со взаимной индукцией, то при ненулевых начальных условиях этот вопрос в литературе не рассматривается. Но именно ненулевые начальные условия имеют место при сушке трансформаторов токами переходного процесса и именно такие токи нуждаются в расчетном определении на стадии планирования сушки. Рассмотрим особенности указанного выше элек-

трического переходного процесса и расчетные уравнения переходных токов трансформатора при ненулевых начальных условиях.

Материалы и методы

Расчетной для рассмотрения переходного процесса в обмотках трансформатора является схема на рисунке 2.

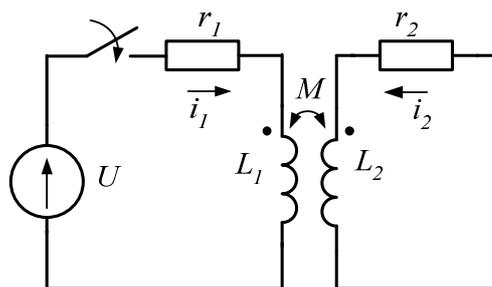


Рисунок 2 – Расчётная схема

Токи i_1 и i_2 первичной и вторичной обмоток трансформатора в функции времени описываются уравнениями Кирхгофа в дифференциальной форме:

$$r_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt} = U;$$

$$r_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt} = 0.$$

где r_1, r_2 – активные сопротивления первичной и вторичной обмоток трансформатора; L_1, L_2 – полные индуктивности соответствующих обмоток; M – взаимная индуктивность; U – напряжения источника питания (постоянное по роду и величине).

В операторной форме для изображений временных функций при ненулевых начальных условиях эти уравнения записываются в виде:

$$r_1 I_1 + pL_1 I_1 - L_1 i_1(0) + pMI_2 - Mi_2(0) = \frac{U}{p};$$

$$r_2 I_2 + pL_2 I_2 - L_2 i_2(0) + pMI_1 - Mi_1(0) = 0,$$

где p – оператор, т.е. комплексная переменная, вещественная часть которой имеет конечное значение; $I_{1,2}$ – изображение тока $i_{1,2}$; $i_{1,2}(0)$ – начальные значения тока $i_{1,2}$ (при $t = 0_+$).

Запишем их в более удобном для дальнейшего использования виде, с источниками ЭДС в правой части:

$$\begin{aligned} r_1 I_1 + pL_1 I_1 + pMI_2 &= \frac{U}{p} + L_1 i_1(0) + Mi_2(0); \\ r_2 I_2 + pL_2 I_2 + pMI_1 &= L_2 i_2(0) + Mi_1(0). \end{aligned} \quad (1)$$

Уравнениям (1) соответствует схема на рисунке 3а.

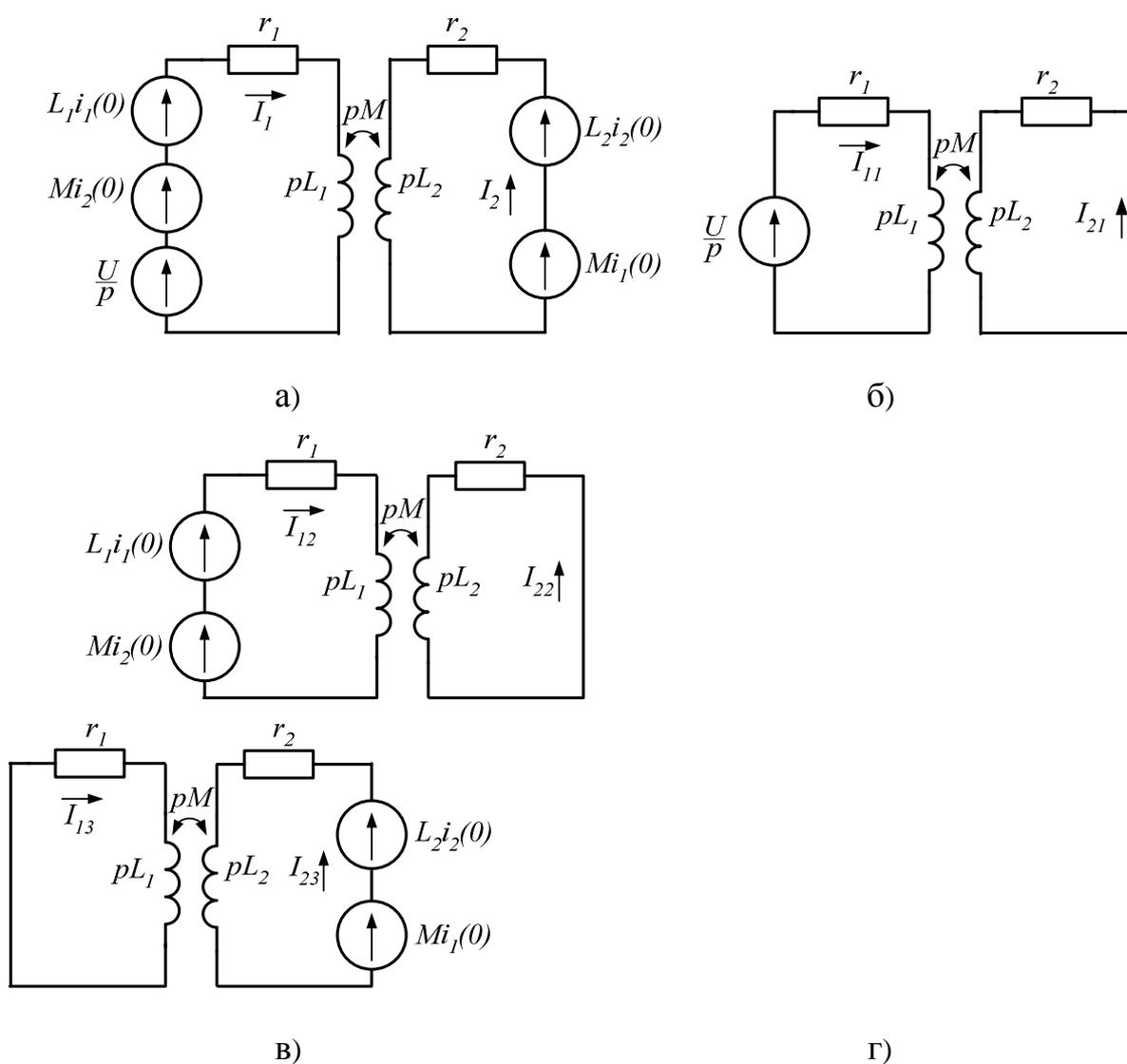


Рисунок 3 – Операторные схемы расчёта переходного процесса:
 а – исходная расчетная схема;
 б – при нулевых начальных условиях;

в – при действии ненулевых начальных условий в первичной цепи;
 г – при действии ненулевых начальных условиях во вторичной цепи.

В рассматриваемой задаче принимается допущение о линейности электрической цепи, поскольку для короткозамкнутого трансформатора используется напряжение существенно меньше номинального напряжения трансформатора. Операторные преобразования Лапласа линейны по определению, поэтому для анализа переходного процесса может применяться метод наложения (суперпозиции), когда задача решается в несколько этапов. Вначале решается задача включения трансформатора при нулевых начальных условиях. Этой задаче соответствует схема на рисунке 3б. Затем решается задача расчета токов переходного процесса от действия начальных ненулевых токов и соответствующих им ЭДС самоиндукции $L_1 i_1(0)$ и взаимной индукции $M i_2(0)$, действующие только в цепи первичной обмотки (по рисунку 3в), затем задача с ЭДС самоиндукции $L_2 i_2(0)$ и взаимной индукции $M i_1(0)$, действующие только в цепи вторичной обмотки (рисунок 3г) и затем результаты расчетов суммируются.

На первом этапе задачи по расчетной схеме на рисунке 3б решаются уравнения:

$$\begin{aligned} r_1 I_{11} + pL_1 I_{11} + pMI_{21} &= \frac{U}{p}; \\ r_2 I_{21} + pL_2 I_{21} + pMI_{11} &= 0. \end{aligned} \tag{2}$$

На втором этапе решаются уравнения, описывающие расчетную схему на рисунке 3в:

$$\begin{aligned} r_1 I_{12} + pL_1 I_{12} + pMI_{22} &= L_1 i_1(0) + M i_2(0); \\ r_2 I_{22} + pL_2 I_{22} + pMI_{12} &= 0. \end{aligned} \tag{3}$$

На третьем этапе решаются уравнения, описывающие расчетную схему на рисунке 3г:

$$\begin{aligned} r_1 I_{13} + pL_1 I_{13} + pMI_{23} &= 0; \\ r_2 I_{23} + pL_2 I_{23} + pMI_{13} &= L_2 i_2(0) + Mi_1(0). \end{aligned} \quad (4)$$

Первый этап решения задачи. Решение системы (2) относительно тока I_{11} (операторный ток первичной обмотки на первом этапе решения) получим методом уменьшения числа переменных. Из второго уравнения системы (2) имеем уравнение:

$$I_{21} = -\frac{pMI_{11}}{r_2 + pL_2},$$

после подстановки которого в первое уравнение системы (2) получим уравнение тока I_{11} вида:

$$I_{11} = \frac{U}{pz_1}, \quad (5)$$

где z_1 – операторное сопротивление контура тока i_{11} с учетом магнитной связи с контуром тока i_{21} .

Величина операторного сопротивления z_1 определяется выражением:

$$z_1 = r_1 + pL_1 - \frac{p^2 M^2}{r_2 + pL_2}$$

(6)

Подстановкой уравнения (6) в (5) получим:

$$I_{11} = \frac{U}{p} \cdot \frac{r_2 + pL_2}{(L_1 L_2 - M^2)p^2 + (r_1 L_2 + r_2 L_1)p + r_1 r_2}$$

(7)

Ведем обозначения:

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \leq 1; \quad \beta_1 = \frac{r_1}{L_1} = \frac{1}{T_1}; \quad \beta_2 = \frac{r_2}{L_2} = \frac{1}{T_2}$$

где $T_1 = L_1/r_1$ и $T_2 = L_2/r_2$ – постоянные времени соответственно первичного и вторичного контуров.

При введенных обозначениях уравнение (7) приобретет вид:

$$I_{11} = \frac{U}{pL_1} \cdot \frac{p + \beta_2}{(1 - k^2)p^2 + (\beta_1 + \beta_2)p + \beta_1\beta_2} = A_{11} \frac{F_1(p)}{pF_2(p)},$$

(8)

где $F_1(p), F_2(p)$ – функции оператора p ; $A_{11} = U/L_1$ - коэффициент.

Значения функций

$$F_1(p) = p + \beta_2;$$

$$F_2(p) = (1 - k^2) p^2 + (\beta_1 + \beta_2) p + \beta_1\beta_2 = 0$$

(9)

Очевидно, что одним из корней знаменателя уравнения (8) является $p = 0$. Корни квадратного уравнения $F_2(p)$ по уравнению (9) определяются уравнением

$$p_{1,2} = -\frac{\beta_1 + \beta_2}{2(1 - k^2)} \pm \sqrt{\left(\frac{\beta_1 + \beta_2}{2(1 - k^2)}\right)^2 - \frac{\beta_1\beta_2}{1 - k^2}}$$

(10)

Согласно свойству корней квадратного уравнения, имеем соотношение:

$$p_1 + p_2 = -\frac{\beta_1 + \beta_2}{1 - k^2} = -\frac{(T_1 + T_2)}{T_1 T_2 (1 - k^2)}; \quad p_1 \cdot p_2 = \frac{\beta_1 \cdot \beta_2}{1 - k^2} = \frac{1}{T_1 T_2 (1 - k^2)}$$

Введем новые обозначения:

$$T_3 = -\frac{1}{p_1} = \frac{1 + q}{2}(T_1 + T_2);$$

$$T_4 = -\frac{1}{p_2} = \frac{1 - q}{2}(T_1 + T_2),$$

(11)

где

$$q = \sqrt{1 - \frac{4\sigma T_1 T_2}{(T_1 + T_2)^2}},$$

σ - общий коэффициент рассеяния обмоток, значение которого определяют по следующим формулам:

$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 - \sigma_1\sigma_2 \approx \sigma_1 + \sigma_2;$$

$$\sigma_1 = \frac{L_1 - M}{L_1}; \quad \sigma_2 = \frac{L_2 - M}{L_2}.$$

Отношение между постоянными времени затухания T_3 и T_4 определяется выражением:

$$\frac{T_4}{T_3} = \frac{1 - q}{1 + q}.$$

Поскольку q является положительным числом, из выражений (11) вытекает, что $T_4 < T_3$ и это различие тем больше, чем меньше рассеяние обмоток трансформатора. В предельном случае при $\sigma = 0$ постоянная времени $T_4 = 0$, что физически означает отсутствие экспоненты с постоянной времени T_4 и возможность скачкообразного изменения токов i_{11} и i_{21} без нарушения закона коммутации.

После определения корней уравнение (9) можно написать в виде:

$$I_{11} = \frac{U}{pL_1(1-k^2)} \cdot \frac{p + \beta_2}{(p - p_1)(p - p_2)}$$

Применив к нему известную теорему разложения, получим уравнение тока $i_{11}(t)$ в функции времени

$$i_{11}(t) = \frac{U}{r_1} + \frac{U}{L_1(1-k^2)} \left[\frac{p_1 + \beta_2}{p_1(p_1 - p_2)} e^{p_1 t} - \frac{p_2 + \beta_2}{p_2(p_1 - p_2)} e^{p_2 t} \right]$$

(12)

или

$$i_{11}(t) = I_0 + i_{11m} + i_{11b} = I_0 + I_{11m} \exp(p_1 t) + I_{11b} \exp(p_2 t),$$

где I_0 – принужденный или установившийся ток первого контура в первой части задачи; i_{11m} – медленно затухающий свободный ток первичного кон-

тура в первой части задачи; i_{11b} - быстро затухающий свободный ток первого контура.

При этом ток I_0 не зависит от времени. Его значение и начальные значения токов i_{11m} и i_{11b} , соответственно I_{11m} и I_{11b} , определяются выражениями:

$$I_0 = \frac{U}{r_1};$$

$$I_{11m} = \frac{U}{L_1(1-k^2)} \cdot \frac{p_1 + \beta_2}{p_1(p_1 - p_2)};$$

$$I_{11b} = \frac{-U}{L_1(1-k^2)} \cdot \frac{p_2 + \beta_2}{p_2(p_1 - p_2)}.$$

Легко видеть, что отношение начальных токов I_{11m} и I_{11b} определяется выражением:

$$\frac{I_{11m}}{I_{11b}} = \frac{T_3 - T_2}{T_2 - T_4}.$$

Принимая во внимание нулевые начальные условия первой задачи, подстановкой $t = 0$ в уравнение (12), получим:

$$I_0 = -(I_{11m} + I_{11b})$$

Аналогично решая систему (2) относительно тока I_{21} , получим

$$I_{21} = \frac{-MU}{L_1 L_2 [(1-k^2)p^2 + (\beta_1 + \beta_2)p + \beta_1 \beta_2]} = \frac{A_{21}}{F_2(p)},$$

(13)

где $A_{21} = -MU/(L_1 L_2)$ – коэффициент.

Функция $F_2(p)$ в уравнении (13) повторяет соответствующую функцию уравнения (9) и имеет уже известные корни p_1 и p_2 . Производная от этой функции $F'(p) = 2(1-k^2)p + \beta_1 + \beta_2$.

Оригиналом тока $i_{21}(t)$ является выражение

$$i_{21}(t) = \frac{A_{21} \exp(p_1 t)}{2(1-k^2)p_1 + \beta_1 + \beta_2} + \frac{A_{21} \exp(p_2 t)}{2(1-k^2)p_2 + \beta_1 + \beta_2}$$

(14)

Из уравнения (14) видно, что принужденный ток во вторичной обмотке отсутствует, а свободные токи i_{21m} и i_{21b} определяются выражениями:

$$i_{21m} = \frac{A_{21} \exp(p_1 t)}{2(1-k^2)p_1 + \beta_1 + \beta_2};$$

$$i_{21b} = \frac{A_{21} \exp(p_2 t)}{2(1-k^2)p_2 + \beta_1 + \beta_2}.$$

Согласно уравнениям (12) и (14), ток $i_{11}(t)$ в течение переходного процесса стремится от нуля к своему принужденному значению, а ток $i_{21}(t)$ сначала от нуля возрастает по абсолютному значению в отрицательной области, достигая некоторого максимального значения, а затем затухает, стремясь к нулю. Максимум тока имеет место при выполнении условия $di_{21}/dt = 0$. Время t_{m1} , соответствующее экстремальному току, определяется известным выражением [5]:

$$t_{m1} = \frac{1}{p_1 - p_2} \ln \frac{p_2}{p_1}$$

(15)

Подстановкой (15) в уравнение (13) получим значение максимального тока вторичной обмотки в переходном процессе:

$$i_{21\max} = -\frac{MU}{L_1 L_2} \frac{T_1 T_2}{T_3 - T_4} \left[\exp\left(-\frac{t_{m1}}{T_3}\right) - \exp\left(-\frac{t_{m1}}{T_4}\right) \right].$$

Выделим следующие закономерности изменения экспоненциальных токов в обеих обмотках. На начальной стадии переходного процесса наибольшее влияние на процесс оказывают быстро затухающие свободные токи i_{11b} и i_{21b} , а в последующем их влияние ослабевает, поскольку они быстро приближаются к нулевому значению, и основным процессом ста-

новится медленно затухающий процесс изменения свободных токов. Ток намагничивания, определяемый суммой токов $i_{11}(t) + i_{21}(t)$, изменяется практически экспоненциально с постоянной времени T_3 , поскольку сумма быстро затухающих токов $i_{11b} + i_{21b}$ очень мала. Отметим, что при отсутствии рассеяния в идеализированном трансформаторе ($k = 1$) сумма этих токов равна нулю и, как отмечалось выше, токи i_1 и i_2 могут изменяться скачком.

Медленно затухающие свободные токи практически определяются только процессами изменения магнитного потока в сердечнике трансформатора, в то время как быстрые – с изменением потоков рассеяния обмоток. Таким образом, наличие рассеяния вначале замедляет переходный процесс и не допускает скачкообразного изменения токов в обмотках, а затем в продолжение переходного процесса ускоряет его.

Второй этап. На этом этапе решается система уравнений (3). Решение этой системы относительно тока I_{12} (ток первичной ветви для второго этапа вычисления) дает следующее уравнение:

$$I_{12} = \frac{L_1 i_1(0) + M i_2(0)}{L_1} \cdot \frac{p + \beta_2}{(1 - k^2) p^2 + (\beta_1 + \beta_2) p + \beta_1 \beta_2} = A_{12} \frac{F_4(p)}{F_2(p)}, \quad (16)$$

где $A_{12} = E_1(0)/L_1$; $F_4(p) = p + \beta_2$.

Видим, что нулевого корня знаменатель уравнения (16) не имеет, а два его действительных корня определяются уравнением (10). Введем обозначение $E_1(0) = L_1 i_1(0) + M i_2(0)$ - постоянная величина, определяемая начальными значениями токов $i_1(0)$ и $i_2(0)$.

Применив к уравнению (16) формулу разложения, получим оригинал тока первичной обмотки $i_{12}(t)$:

$$i_{12}(t) = A_{12} \left[\frac{(\beta_2 + p_1) \exp(p_1 t)}{2(1 - k^2) p_1 + \beta_1 + \beta_2} + \frac{(\beta_2 + p_2) \exp(p_2 t)}{2(1 - k^2) p_2 + \beta_1 + \beta_2} \right]$$

или

$$i_{12}(t) = i_{12m} + i_{12b} = I_{12m} \exp(p_1 t) + I_{12b} \exp(p_2 t),$$

(17)

с начальными значениями токов:

$$I_{12m} = \frac{A_{12}(\beta_2 + p_1)}{2(1-k^2)p_1 + \beta_1 + \beta_2}; \quad I_{12b} = \frac{A_{12}(\beta_2 + p_2)}{2(1-k^2)p_2 + \beta_1 + \beta_2}.$$

Видим, что уравнение (17) не содержит принужденных членов, следовательно, установившиеся значения этих токов равны нулю. Как и в случае свободных токов $i_{11}(t)$, в токе $i_{12}(t)$ имеют место медленно и быстро затухающие свободные токи, обусловленные соответствующими постоянными времени T_3 и T_4 , одинаковыми для первой и второй задач.

Уравнение вторичного тока в операторной форме I_{22} имеет вид

$$I_{22} = -\frac{ME_1(0)}{L_1 L_2} \cdot \frac{p}{(1-k^2)p^2 + (\beta_1 + \beta_2)p + \beta_1 \beta_2} = A_{22} \frac{F_5}{F_2},$$

где $A_{22} = -ME_1(0)/(L_1 L_2)$; $F_5 = p$.

Применение теоремы разложения дает следующее выражение для тока вторичной обмотки $i_{22}(t)$:

$$i_{22}(t) = A_{22} \left[\frac{p_1 \cdot \exp(p_1 t)}{2(1-k^2)p_1 + \beta_1 + \beta_2} + \frac{p_2 \cdot \exp(p_2 t)}{2(1-k^2)p_2 + \beta_1 + \beta_2} \right]$$

или

$$i_{22}(t) = i_{22m} + i_{22b} = I_{22m} \exp(p_1 \cdot t) + I_{22b} \exp(p_2 \cdot t).$$

(18)

Из уравнения (18) видно, что принужденный ток во вторичной обмотке отсутствует, а свободные токи I_{21m} и I_{21b} определяются выражениями:

$$I_{22m} = \frac{A_{22}p_1}{2(1-k^2)p_1 + \beta_1 + \beta_2};$$

$$I_{22b} = \frac{A_{22}p_2}{2(1-k^2)p_2 + \beta_1 + \beta_2}.$$

Третий этап. Из сопоставления схем на рисунках 3в и 3г, легко заметить подобие третьей задачи второй. Эти схемы «зеркальны», как и их уравнения (3) и (4). Таким образом, решение третьей задачи сводится к повторению решения второй с заменой постоянных $r_k, L_k, ЭДС E_k$ и токов I_k по следующему правилу: вместо $E_1(0)$ записывается $E_2(0)$, определяемое уравнением $E_2(0) = L_2 i_2(0) + M i_1(0)$ - ЭДС от начальных значений токов переходного процесса, т.е.; $E_1(0) \leftrightarrow E_2(0)$; далее $r_1 \leftrightarrow r_2, L_1 \leftrightarrow L_2, i_{12} \leftrightarrow i_{23}, i_{22} \leftrightarrow i_{13}$.

Проведя указанную замену коэффициентов и переменных в уравнениях (3), получим решение уравнений (4):

$$i_{23}(t) = i_{23m} + i_{23b} = I_{23m} \exp(p_1 t) + I_{23b} \exp(p_2 t),$$

с начальными значениями токов:

$$I_{23m} = \frac{A_{23}}{A_{12}} I_{12m} = \frac{E_2(0)L_1}{E_1(0)L_2} I_{12m}; \quad I_{23b} = \frac{A_{23}}{A_{12}} I_{12b} = \frac{E_2(0)L_1}{E_1(0)L_2} I_{12b}$$

где $A_{23} = E_2(0)/L_2$.

Уравнение тока первичного контура

$$i_{13}(t) = i_{13m} + i_{13b} = I_{13m} \exp(p_1 t) + I_{13b} \exp(p_2 t)$$

с начальными значениями токов

$$I_{13m} = \frac{A_{13}}{A_{22}} I_{22m} = \frac{E_2(0)}{E_1(0)} I_{22m}; \quad I_{13b} = \frac{A_{13}}{A_{22}} I_{22b} = \frac{E_2(0)}{E_1(0)} I_{22b},$$

где $A_{13} = -ME_2(0)/(L_1 L_2)$.

Результаты и обсуждение

Вернемся к первоначальной задаче определения токов в первичном и вторичном контуре трансформатора по схеме на рисунке 2.

Расчетный ток первичной обмотки является суммой токов этой обмотки по трем предыдущим этапам задачи, т.е.

$$i_1 = i_{11}(t) + i_{12}(t) + i_{13}(t) = I_0 + I_{1m}e^{p_1 t} + I_{1b}e^{p_2 t}, \quad (19)$$

$$I_0 = \frac{U}{r_1};$$

$$I_{1m} = I_{11m} + I_{12m} + I_{13m};$$

$$I_{1b} = I_{11b} + I_{12b} + I_{13b}.$$

Ток вторичной обмотки трансформатора:

$$i_2 = i_{21}(t) + i_{22}(t) + i_{23}(t) = I_{2m}e^{p_1 t} + I_{2b}e^{p_2 t}; \quad (20)$$

$$I_{2m} = I_{21m} + I_{22m} + I_{23m};$$

$$I_{2b} = I_{21b} + I_{22b} + I_{23b}.$$

Ток i_1 имеет принужденное значение численно равное U/r_1 и свободные токи – быстрого и медленного затухания; ток i_2 принужденного значения не имеет и в переходном процессе изменяется от ненулевых начальных значений, устремляясь к нулю. При этом в ходе переходного процесса ток i_2 может вначале возрасть до некоторого максимума, а затем спадать до нуля, имея медленную и быструю экспоненциальные составляющие. Как и в случае нулевых начальных условий, максимум тока i_2 и время его наступления определяются из условия равенства нулю первой производной функции $di_2/dt = 0$ по уравнению (20). Время наступления максимума тока

$$t_m = \frac{1}{p_1 - p_2} \ln \frac{I_{2m} p_2}{I_{2b} p_1}. \quad (21)$$

Подстановкой времени t_m из (21) в уравнение (20) получим максимальное значение тока i_2 в переходном процессе:

$$i_{2\max} = I_{2m}e^{p_1 t_m} + I_{2b}e^{p_2 t_m}.$$

Начальные значения токов обмоток определяются как параметрами трансформатора, так и значениями токов в обмотках в момент включения выключателя. При этом переходный процесс рассчитывается для каждого интервала подключения трансформатора к источнику напряжения заданной полярности.

Полагая в уравнениях (19) и (20) $t = 0$, получим количественную связь постоянных в уравнениях с начальными токами в обмотках:

$$I_0 + I_{1m} + I_{1b} = i_1(0); \quad I_{2m} + I_{2b} = i_2(0).$$

Исключение составляет теоретически возможный, но практически нереализуемый случай отсутствия потоков рассеяния обмоток ($k = 1$), когда быстро протекающий переходный процесс вырождается в изменение токов в обмотках трансформатора скачком. При этом сумма токов $i_1 + i_2$, определяющая магнитный поток трансформатора, как и сам магнитный поток, согласно законам коммутации, скачком измениться не могут.

Влияние начальных условий на переходные токи в обмотках реального (не идеализированного) трансформатора можно увидеть при сопоставлении кривых этих токов при нулевых и ненулевых начальных условиях на рисунке 4, где начальные значения токов определяются при $t = 0$. Видим, что начальные токи существенным образом влияют на переходные токи в обеих обмотках трансформатора. Особенно заметно это на токе вторичной обмотки, максимальное значение которого изменяется от действия ненулевых начальных условий.

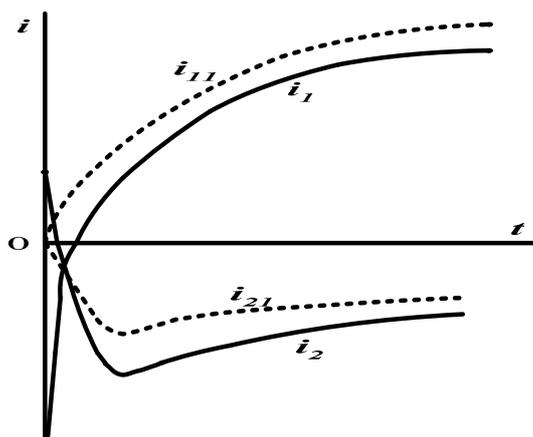


Рисунок 4 – Кривые изменения токов при нулевых (i_{11}, i_{21}) и ненулевых (i_1, i_2) начальных условиях

Выводы

Характер протекания переходных токов в обмотках трансформатора при перемагничивании сердечника в значительной мере определяется начальными значениями этих токов в момент переключения цепи (начальными условиями). Если характер изменения токов остается неизменным, с так называемыми медленным и быстрым переходным процессом, то количественные значения токов меняются заметным образом. Это необходимо учитывать при определении параметров источника питания при сушке трансформатора переходными токами при низкой частоте переключений (0,1 – 2 Гц).

Литература

1. Патент 2482564 Российская Федерация, МПК H01F 30/122, H01F 27/25, H01F 27/12. Трехфазный трансформатор/ П.Д. Ирха, И.Г. Стрижков и др.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Кубанский государственный аграрный университет» (RU). – № 2011122998/07; заявл. 07.06.2011; опубл. 20.05.2013, Бюл. № 14.
2. Авт. свид. 1365149 СССР, МКИ H01F 27/14. Способ прогрева силового трансформатора/ Н.Я. Кравцов, Е.Н. Чеснюк, и др.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Кубанский государственный аграрный университет» (RU). – № 3629056/24; заявл. 28.07.83; опубл. 07.01.88, Бюл. № 1.

3. Чеснюк Е.Н. Прогрев и сушка силовых трансформаторов сельских потребителей способом короткого замыкания на пониженной частоте. Дисс. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. Краснодар, 1993. – 173 с.

4. Чеснюк Е.Н. Сушка силовых трансформаторов / Физико-технические проблемы создания новых технологий в агропромышленном комплексе. 2-я Российская научно-методическая конференция. Сб. научных трудов. – Ставрополь, 2003. С.75-77.

5. Демирчан К.С., Нейман Л.Р. и др. Теоретические основы электротехники. 4-е изд. Том 2. М.: 2003. – 442 с.

6. Зевеке Г.В., Ионкин П.А. и др. Основы теории цепей. Учебник для вузов. М.: «Энергия», 1975. – 410 с.

7. Конторович М.И. Операционное исчисление и процессы в электрических цепях. Учебное пособие для вузов. Изд. 4-е. М., «Сов. Радио», 1975. – 320 с.

8. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. М.: «Энергия», 1970. – 290 с.

References

1. Pat. 2482564 Rossijskaja Federacija, МРК H01F 30/122, H01F 27/25, H01F 27/12. Tree-phase transformer / P.D. Erha, I.G. Strizhkov; zajavitel' i patentoobladatel' Kubanskij gosudarstvennyj agrarnyj universitet (RU). – № 2011122998/07; zajavl. 07.06.2011; opubl. 20.05.2013, Bjul. № 14. [in Russian]

2. Avt. svid. 1365149 USSR, МРК H01F 27/14. Sposob progrev a silovogo transformatora/ N.I. Kravtsov, E.N. Chesnuk, и др.; zajavitel' i patentoobladatel' Kubanskij gosudarstvennyj agrarnyj universitet (RU). – № 3629056/24; zajavl. 28.07.83; opubl. 07.01.88, Bjul. № 1.

3. Chesnuk E.N. Progre v i sushka silovyh transformatorov selskih potrebiteleye sposobom korotkogo замыканиа на понизhenной частоте. Diss. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. Краснодар, 1993. – 173 p.

4. Chesnuk E.N. Sushka silovyh transformatorov / Fiziko-technicheskie problemy. 2-nd Rossiyskaya nauchno-metodicheskaya konferentsiya. Sbornik troodov. Stavropol, 2003. P.75-77.

5. Demirchian K.S., Neiman L.R. Teoreticheskie osnovy elektrotehniki. Tom 2. Moscow: 2003. – 442 p.

6. Seveke G.V. Ionkin P.A. Osnovy teorii tsepey. Uchebnik dlia voozov. Moscow: Energiya, 1975. – 410 p.

7. Kontorovich M.I. Operatsionnoe ischisleniye I prochessy v elektricheskikh tsepyah. Uchebnoe posobiye dlia voozov. Moscow: Sov. Radio, 1975. – 320 p.

8. Ulianov C.A. Electromagnitnye perehodnye protsessy v ekektricheskikh systemah. Moscow: Energiya, 1970. – 290 p.