

DOI: 10.24143/2072-9502-2017-2-136-144
УДК 621.313

Н. Г. Баженов, О. А. Филина, П. Н. Валеева, Е. Ю. Ермакова

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ КЛАССИЧЕСКОГО ТРАНСФОРМАТОРА КАК СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Обосновывается необходимость применения основных законов и правил теории автоматического управления по отношению к процессам, происходящим в классическом трансформаторе. Отмечается, что трансформаторы можно отнести к классу самонастраивающихся систем автоматического управления. Рассматривается трансформатор, работающий на активную нагрузку. Приводятся уравнения, описывающие происходящие процессы. При решении уравнений в качестве магнитной характеристики использовалась основная кривая намагничивания материала магнитопровода. Решение уравнений основывалось на линейной части кривой намагничивания с учетом того, что намагниченность зависит от материала сердечника. Решение уравнений проводилось в форме преобразований по Лапласу, построение структурно-динамических схем – на основе теории автоматического управления. Показано, что совершенствование магнитопровода является одним из способов обеспечения линейности нелинейных характеристик трансформатора, позволяющим улучшить его технические характеристики.

Ключевые слова: трансформатор, магнитопровод, магнитный поток, кривая намагничивания.

Введение

Процессы, происходящие в классическом трансформаторе, работающем на активную нагрузку, вызывают много вопросов, убедительные ответы на которые до сих пор не найдены. Об этом свидетельствуют следующие примеры.

1. В основу работы трансформаторов положен принцип вычитания магнитных потоков, но, как это следует из формул, которые будут приведены ниже, фаза тока во вторичной обмотке зависит от значения нагрузки. Поскольку фаза тока, порождающая магнитный поток, определяет фазу последнего, можно сделать вывод, что токи в первичной и вторичной обмотках, разные по фазе, не могут создавать противофазные магнитные потоки, т. е. можно говорить о нарушении принципа вычитания магнитных потоков.

2. При включении трансформатора с нагрузкой (или даже без нагрузки) отмечаются скачки тока в первичной обмотке. Возникает вопрос: где не работает первый закон коммутации – в трансформаторе или просто в обмотке с магнитопроводом и почему?

В этой связи возникла необходимость использовать применительно к процессам, происходящим в классическом трансформаторе, основные законы и правила теории автоматического управления, благодаря достижениям которой удастся спроектировать точные или даже сверхточные системы управления (в технической литературе эти системы в последнее принято называть прецизионными).

Целью нашего исследования явилось обоснование принципа работы трансформатора с точки зрения с теории автоматического управления и методики решения вопросов, связанных с намагниченностью трансформатора.

Возможный способ рассмотрения работы трансформатора при определённых значениях индуктивности и тока

На рис. 1 приведена схема трансформатора, которая положена в основу последующего анализа.

Согласно [1], уравнения классического трансформатора, изображенного на рис. 1, имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} u_1 &= L_1 \frac{di_1}{dt} + L_1 \omega i_1 + i_1 R_1 + M \frac{di_2}{dt}; \\ u_2 &= -M \frac{di_2}{dt} = L_2 \frac{di_2}{dt} + L_2 \omega i_2 + i_2 R_2, \end{aligned} \quad (1)$$

где u_1, u_2 – напряжение в функции времени на первичной и вторичной обмотках соответственно; i_1, i_2 – ток в первичной и вторичной обмотках; L_1, L_2 – индуктивность первичной и вторичной обмоток; $M = \sqrt{L_1 L_2}$ – коэффициент взаимной индуктивности трансформатора; ω – угловая частота; R_1, R_2 – активное сопротивление первичной и вторичной обмоток трансформатора.

В системе уравнений (1) все параметры, кроме R_1 и R_2 , являются функциями времени, в том числе и значения индуктивности в обмотках. Например, если

$$i_1(t) = i_1 = I_m \sin \omega t, \quad (2)$$

то

$$L_1 = L_0(1 + \cos \omega t), \quad (3)$$

где L_0 – индуктивность магнитопровода, которая определяется материалом магнитопровода; L_1 – индуктивность обмотки, зависящая ещё и от значения тока, протекающего по ней.

На рис. 1 электрические параметры (напряжений, токов) указаны в действующих значениях.

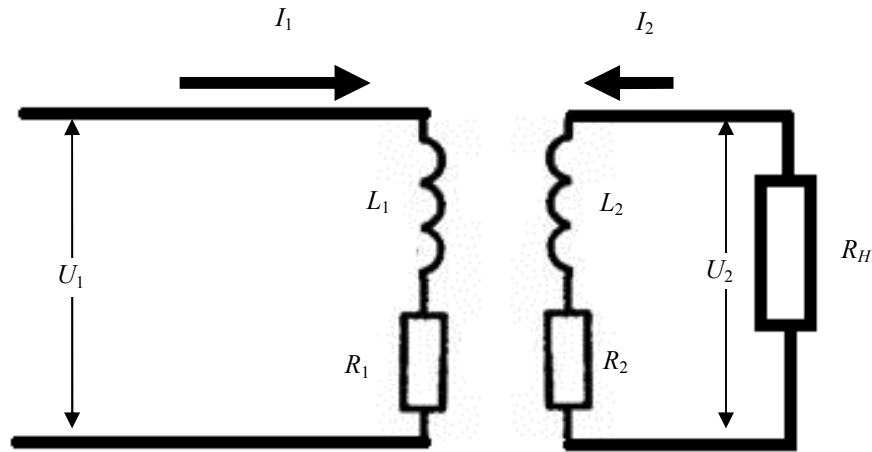


Рис. 1. Схема трансформатора

Индуктивности L_1, L_2 определяют ориентацию магнитных спин-атомов материала магнитопровода в направлении магнитных полей, порождаемых токами, протекающими по обмоткам. Члены в системе уравнений (1) вида $L_1 \omega i_1, L_2 \omega i_2$ определяют постоянную составляющую намагниченности магнитопровода, относительно которой происходит изменение индуктивности по гармоническому закону. Полярность постоянной составляющей намагниченности зависит от начальной фазы тока в первичной обмотке [2].

Поскольку индуктивность всегда препятствует изменению тока, то ее установившееся значение может быть достигнуто только через n периодов, т. е., проинтегрировав выражение (2) от нуля до nT , где T – время одного периода, с, можно получить среднее установившееся значение индуктивности при заданном токе:

$$L_1 = \frac{1}{nT} \int_0^{nT} L_{01} (1 + \cos \omega t) dt = L_{01}, \quad (4)$$

где индекс 01 указывает на конкретную амплитуду тока, протекающего по обмотке. Аналогичное решение можно получить и для L_2 .

Для последующего решения системы уравнений (1) преобразуем по Лапласу, т. е.

$$\begin{aligned} U_1 &= I_1(L_1 S + L_1 \omega + R_1) + M S I_2; \\ U_2 &= -M S I_1 = I_2(L_2 S + L_2 \omega + R_2), \end{aligned} \quad (5)$$

где S – оператор Лапласа; U_1, U_2, I_1, I_2 – напряжения и токи в изображении по Лапласу соответствующих обмоток.

Согласно выражению (3), определитель системы имеет вид

$$\Delta = \begin{vmatrix} (L_1 S + L_1 \omega + R_1) & MS \\ MS & (L_2 S + L_2 \omega + R_2) \end{vmatrix} = S(2L_1 L_2 \omega + R_2 L_1 + R_1 L_2) + \\ + (L_1 L_2 \omega^2 + R_2 L_1 \omega + R_1 L_2 \omega + R_1 R_2) = aS + b. \quad (6)$$

Частные определители:

$$\Delta_1 = U_1(L_2 S + L_2 \omega + R_2); \quad \Delta_2 = -MSV,$$

где $M = \sqrt{L_1 L_2}$, $SL_1 = L_1 S$; $L_2 = L_2 S$,
откуда

$$I_1 = \frac{\Delta_1 I_1}{\Delta}, \quad I_2 = \frac{\Delta_2 I_2}{\Delta}, \quad \frac{I_2}{I_1} = -\frac{(L_2 S + L_2 \omega + R_2)}{MS}. \quad (7)$$

Приведенные выражения соответствуют случаю, когда $0 < R_n < \infty$, т. е. нагрузка во вторичную цепь подключена и определяется зависимостью [3]:

$$R_4 = L_2 S + L_2 \omega + R_2. \quad (8)$$

При коротком замыкании вторичной обмотки наблюдается полное размагничивание магнитопровода, т. е. $L_1 \omega = L_2 \omega = 0$. Воспользовавшись известной формулой энергии магнитного поля для постоянного тока

$$W_m = \frac{1}{2} I^2 L \quad (9)$$

и руководствуясь действующими значениями переменных токов и напряжений, находим:

$$I_1 L_{10} - I_2 L_{20} = 0, \quad (10)$$

откуда

$$\frac{I_2}{I_1} = -\sqrt{\frac{L_{10}}{L_{20}}},$$

где L_{10}, L_{20} – статические значения индуктивности первичной и вторичной обмоток, измеренной классическим LC-метром при трансформаторе, отключенном от первичной цепи и нагрузки.

Согласно выражениям (4)–(6), активные сопротивления обмоток R_1, R_2 проявят себя как в виде активных потерь, так и в виде потерь в стали магнитопровода – по причине создания дополнительных смещений по фазам между токами и напряжениями. Тем не менее, с целью сокращения записи и выявления общих динамических свойств трансформатора, рассмотрим идеальный случай, т. е. будем предполагать, что $R_1 = R_2 = 0$.

В этом варианте выражения для токов I_1, I_2 в изображении по Лапласу, согласно (5), примут следующий вид:

$$I_1 = \frac{(T_1 S + 1)U_1}{L_1 \omega (T_2 S + 1)}; \quad I_2 = -\frac{S U_1}{\sqrt{L_1 L_2} \omega^2 (T_2 S + 1)}, \quad (11)$$

где $T_1 = \frac{1}{\omega}$, $T_2 = \frac{2}{\omega}$.

Примем, что $U_1(t) = U_m \sin \omega t \leftarrow U_m \frac{\omega}{S^2 + \omega^2}$.

Тогда, переходя от изображения по Лапласу к оригиналу, получим:

$$I_1(t) = \frac{U_m}{L_1 \omega \sqrt{1 + \omega^2 T_2^2}} \left[\sqrt{1 + \omega^2 T_2^2} \sin(\omega t + \varphi_1) - \frac{e^{-\frac{t}{T_2}}}{\sqrt{1 + \omega^2 T_2^2}} \left(1 - \frac{T_1}{T_2} \right) \right], \quad (12)$$

$$I_1(t) = \frac{U_m}{\sqrt{L_1 L_2} \omega \sqrt{1 + \omega^2 T_2^2}} \left[\cos \omega t + \frac{e^{-\frac{t}{T_2}}}{\sqrt{1 + \omega^2 T_2^2}} \right], \quad (13)$$

где

$$\varphi_1 = \operatorname{arctg} \frac{\omega(T_2 - T_1)}{T_1 T_2 \omega^2 - 1}; \quad U_m = U_1 \sqrt{2}, \quad (14)$$

U_1 – действующее значение в первичной обмотке.

Ток холостого хода трансформатора (при $R_n = \infty$) рассчитывается по выражению

$$I_{1x}(t) = \frac{U_m}{L_1 \omega \sqrt{1 + \omega^2 T_2^2}} \left[\sin(\omega t - \varphi_3) + e^{-\frac{t}{T_1}} \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 T_1^2}} \right], \quad (15)$$

где $\varphi_3 = \operatorname{arctg} \frac{1}{\omega T_1}$.

Если в формулы (8)–(10) подставить данные параметров, которые были получены нами на основе экспериментальных исследований трансформатора ТАН-56, то результаты расчета при $\omega L_{10} \gg R_1$ и $\omega L_{20} \gg R_2$ будут совпадать с данными эксперимента и окажутся достаточно близкими, когда $\omega L_{10} = R_1$, $\omega L_{20} = R_2$.

Индуктивность L_{10} , L_{20} получила название статической. Она измеряется обычным LC-метром при полностью отключенном трансформаторе: L_{10} – статическая индуктивность первичной обмотки, L_{20} – вторичной обмотки. Они могут быть определены экспериментально.

При изменении напряжения на первичной обмотке (при отключенной нагрузке, $R_n = \infty$) будет изменяться ток холостого хода I_{1x} . При каком-то значении этого тока (I_{10}) индуктивность обмотки окажется равной L_{10} , измеренной с помощью LC-метра. Дальнейшее увеличение напряжения на первичной обмотке будет связано с резким увеличением тока в первичной обмотке при сохранении коэффициента трансформации, что свидетельствует о полной магнитной насыщенности магнитопровода.

Значение тока I_{10} в первичной обмотке должно быть отправным моментом при исследовании трансформатора в режиме короткого замыкания и при расчете нагрузки R_n . Реальный ток в первичной обмотке I_1 должен удовлетворять условию $I_1 \leq I_{10}$, лучшее $I_1 = I_{10}$.

Согласно выражениям (8)–(10) и результатам экспериментальных исследований [1, 4–6], трансформатор имеет лучшие технические характеристики, когда индуктивность L_1 , обусловленная первичной обмоткой, имеет большее значение, чем индуктивность L_2 .

В общем случае индуктивность определяется выражением

$$L = N^2 \mu S / l,$$

где N – число витков обмотки, размещенной на магнитопроводе; μ – абсолютная магнитная проницаемость материала магнитопровода; S – площадь сечения; l – средняя длина магнитопровода.

Из выражения (11) следует, что заданную индуктивность можно обеспечить различным способами. В принятой в настоящее время теории проектирования трансформатора используются в основном два понятия – габаритная мощность и число витков в обмотках. Вместе с тем экспериментально установлено, что если избегать прямых углов при пересечении ярм магнитопроводов и увеличить площадь их поперечных сечений, то за счет округления и увеличения площади сечения обмоток удаётся повысить индуктивность до 15 %. Это снимает многие проблемы, и закономерно возникает вопрос, нельзя ли такой подход использовать в стационарных трансформаторах.

На основании анализа решений уравнений (8)–(10) можно сделать следующие выводы:

Во-первых, при включении трансформатора с нагрузкой ($0 < R_n < \infty$) должны отмечаться скачки тока в первичной обмотке.

Согласно (7), при $t = 0 \leftarrow \Delta t$, где $\Delta t \rightarrow 0$, ток $i_1(t) \neq 0$. Не равен нулю и ток во вторичной обмотке $i_2(t)$. Отметим, что отношение токов в переходном режиме (I_2/I_1) может в разы превышать их номинальное значение. При $R_1 = 0$ для тока холостого хода (10) такие скачки нехарактерны.

При этом следует иметь в виду начальную фазу напряжения, подключаемого к первичной обмотке: в момент коммутации трансформатора оно может определиться как $u_1(t) = U_m \sin \omega t$, а вполне возможно и $u_1(t) = U_m \sin (\omega t - 0)$, где $0 < \Theta < 160^\circ$. Другими словами, величина скачков токов может меняться при подключении трансформатора к одному и тому же напряжению U_1 (рис. 1), но в разные моменты времени.

Во-вторых, никакими изменениями индуктивности магнитопровода (11) невозможно изменить соотношение T_1/T_2 , а следовательно, каким-то образом повлиять на динамические свойства трансформатора.

В-третьих, по физике процессов, происходящих в трансформаторах, трансформаторы можно отнести к системам автоматического управления (САУ): есть потребитель (нагрузка R_n), нуждающийся в электрической энергии; есть источник энергии (первичная обмотка с протекающим током). В соответствии с нагрузкой меняется ток в первичной обмотке. Иначе говоря, процесс в трансформаторе можно рассматривать с позиции САУ, используя при этом правила и положения, сложившиеся в теории САУ. В частности, воспользуемся структурно-динамическим анализом, который позволяет выявить особенности систем и выработать соответствующие решения для достижения определенной технической цели.

На рис. 2, в соответствии с зависимостями (12)–(15), приведена структурно-динамическая схема (СДС) трансформатора, где ток I_{12} – это ток I_1 , выраженный через ток I_2 , физический смысл которого заключается в том, что если $I_2 = 0$, то и $I_{12} = 0$:

$$I_{12} = \frac{1}{L_1 \omega (T_1 S + 1)} I_2. \quad (16)$$

На СДС (рис. 2), как и в вышеприведенных формулах, не учтены активные сопротивления обмоток R_1, R_2 . Их влияние на динамические свойства трансформатора по сравнению с влиянием индуктивных сопротивлений обмоток $L_1 \omega, L_2 \omega$ незначительно. Тем не менее, согласно выражениям (11), они влияют на значения параметров T_1 и T_2 , но практически не оказывают влияния на их отношение (T_1/T_2 , или T_2/T_1).

Из анализа СДС (без учета пунктирной связи по $W_{o.c}$ (передача точной функции по обратной связи)) следует, что трансформатор, который рассматривается как САУ, имеет особенность, которая заключается в том, что в классических САУ обычно приходится иметь дело с отрицательными обратными связями (ООС) и крайне редко – с положительными обратными связями (ПОС). Последние используются, как правило, для поддержания энергетических возможностей систем (например, в электронных генераторах). Отметим, что ПОС в таких системах строго рассчитываются, в противном случае системы могут оказаться неустойчивыми, т. е. в итоге – саморазрушающимися.

В трансформаторе токи в первичной и вторичной обмотках, согласно результатам, полученным в [2, 7–9], и формуле (16), связаны между собой ПОС – увеличение тока в одной обмотке ведет к увеличению тока в другой обмотке. Иначе говоря, трансформаторы можно отнести к классу самонастраивающихся САУ. Однако эта связь является нелинейной – при нагрузке

$R_n = \infty$ ток холостого хода должен быть равным нулю или иметь какую-то минимальную величину; при увеличении тока в первичной обмотке этого не происходит. Следует отметить, что все это непосредственно связано с КПД (η) трансформаторов.

Потери в трансформаторе определяются разностью электромагнитных энергий ΔW , порожденных токами в первичной W_{31} и вторичной W_{32} обмотках, т. е.

$$\Delta\omega = W_{31} - W_{32} = 1/2(L_1 I_1^2 - L_2 I_2^2); \eta = \Delta\omega / W_{31},$$

где для удобства примем обозначения $\Delta\omega = \Delta W$.

Действующие значения токов I_1, I_2 в (12) рассчитываются по выражениям (7) и (8) в предположении, что переходный процесс закончился, т. е. $e^{-t/T_2} = 0$ (например, $t = 6T_2$).

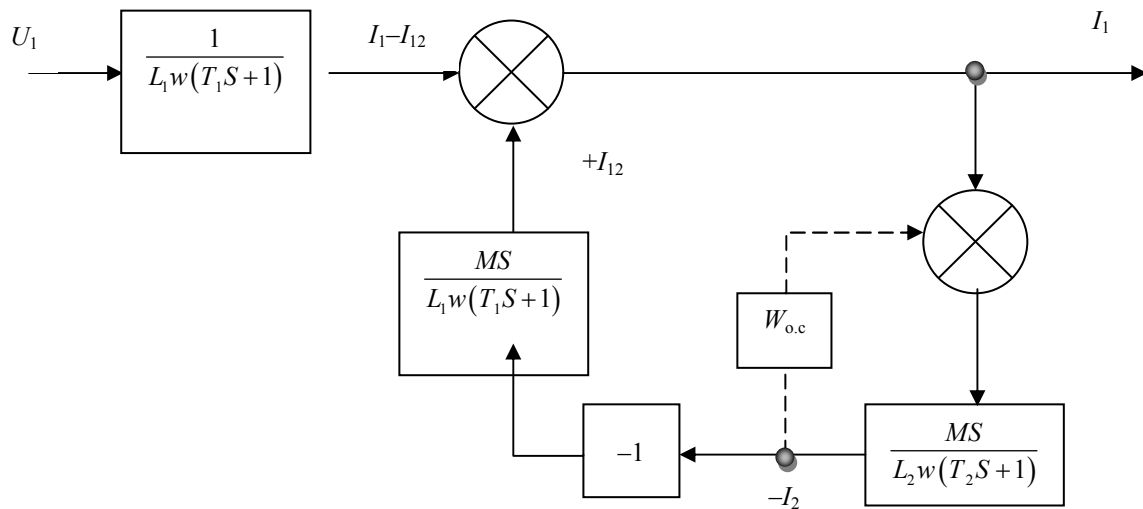


Рис. 2. Структурно-динамическая схема трансформатора

Оптимизируя решение задачи, нетрудно показать, что наибольшим КПД трансформатора будет тогда, когда коэффициенты передачи по токам κ_i равны коэффициентам передачи (трансформации) по напряжениям κ , т. е.

$$\kappa_i = I_2 / I_1 = \kappa_v = U_1 / U_2.$$

Это же подтверждается и экспериментальными данными (табл.).

Экспериментальные данные

$U_1, В$	$I_1, А$	$U_2, В$	$R_2, Ом$	$I_2, А$	$wL_1, Ом$	$L_1, Гн$	$wL_2, Ом$	$L_2, Ом$	$\sqrt{L_1/L_2}$	I_2/I_1	U_1/U_2	$P_1, Вт$	$P_2, Вт$	P_a	$\eta^1, КПД$	P_Σ	η
140	0,022	17,8	∞														
	0,085	17,2	33	0,58	1647,06	5,2454	29,66	0,0944	7,45	6,823	8,14	11,9	9,976	0,147	0,84	12,041	0,828
	0,154	16,9	16,5	1,1	909,1	2,8952	15,364	0,0489	7,692	7,143	8,284	21,56	18,59	0,483	0,86	22,043	0,843
	0,225	16,4	11	1,7	622,22	1,9816	9,647	0,0307	8,034	7,556	8,537	31,5	27,88	1,033	0,88	32,533	0,857
	0,28	15,8	8,25	2,16	500	1,5924	7,315	0,0233	8,267	7,714	8,861	39,2	34,128	1,6	0,87	40,8	0,836
	0,34	15,6	6,6	2,6	411,765	1,3114	6	0,0191	8,286	7,645	8,974	47,6	40,56	2,36	0,85	48,45	0,83
220	0,05	28,8	∞														
	0,124	27,2	33	0,84	1774,19	5,6503	32,381	0,1031	7,402	6,774	8,088	27,28	22,848	0,314	0,84	27,594	0,828
	0,21	26,5	16,5	1,57	1047,62	3,336	16,879	0,0538	7,875	7,476	8,302	46,2	41,605	0,9	0,9	47,1	0,883
	0,31	25,3	11	2,35	709,68	2,26	10,766	0,0343	8,117	7,581	8,6957	68,2	59,46	1,96	0,87	70,6	0,842
	0,39	24,7	8,25	3	564,1	1,7965	8,233	0,0862	8,281	7,692	8,907	85,8	74,1	3,103	0,86	88,9	0,834
	0,465	23,9	6,6	3,65	473,12	1,5067	6,548	0,0209	8,5	7,85	9,205	102,3	87,235	4,41	0,85	106,71	0,818

Нелинейность трансформатора обусловлена нелинейностью основной кривой намагничивания, т. е. ограниченностью магнитной насыщенности магнитопровода трансформатора. Этот фактор способствует устойчивой работе трансформатора при наличии ПОС. Вместе с тем наибольшее значение КПД соответствует только одному значению тока. Если подсчитать среднее значение η за рабочий день, окажется, что оно не превысит 0,8.

Для современного состояния науки и техники такие потери недопустимы.

Исходя из вышеизложенного, прежде всего следует стремиться к совершенствованию материала магнитопровода трансформатора, добиваться, чтобы в окрестности рабочей точки L_0 [10] на кривой намагничивания, соответствующей номинальному току, выполнялось условие

$$dH / di = \text{const}, \text{ или } d\mu / d\varepsilon = \text{const при } \mu = B/H,$$

где H – напряженность магнитного поля; B – магнитная индукция. Отметим, что B и H в окрестности рабочей точки являются функциями тока [10, 11] и, соответственно, времени.

Заключение

Таким образом, нами предложен способ обеспечения линейности нелинейных характеристик классического трансформатора, который реализуется при выполнении равенства

$$\kappa_i = I_2 / I_1 = \kappa_v = U_1 / U_2.$$

Отметим, что предложенный вариант не является единственным способом обеспечения линейности нелинейных характеристик трансформатора.

В практике построения прецизионных САУ для решения таких задач используются ООС. В трансформаторостроении аналог такого подхода имеется [12]. Линейный трансформатор, запатентованный в 2006 г., выполнен по схеме СДС (рис. 2) с учётом обратной связи по вторичной обмотке, показанной на СДС пунктирной линией, где $W_{o.c}$ – передаточная функция отрицательной обратной связи.

Не вдаваясь в детали оценки $W_{o.c}$ (насколько она оптимальна, как удачно выбраны (расчитаны) ее параметры), отметим, что экспериментальные образцы трансформаторов, выполненные по такой схеме, имеют ток холостого хода в 2 раза меньше, чем при отсутствии $W_{o.c}$, и их КПД на 5–7 % выше.

Надо полагать, что при отработке методики подхода к выбору передаточной функции $W_{o.c}$ и расчету ее оптимальных параметров технические характеристики таких трансформаторов будут ещё более улучшены.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вольдек А. И., Попов В. В. Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы. СПб.: Питер, 2008. 320 с.
2. Грищенко А. В., Козаченко Е. В. Новые электрические машины локомотивов. М.: Учеб.-метод. центр по образ. на железнодорож. транспорте, 2008. 271 с.
3. Иванов-Смоленский А. В. Электрические машины: учеб. для вузов. М.: Изд-во МЭИ, 2006. Т. 1. 652 с; Т. 2. 532 с.
4. Акимов Е. Г. Выбор асинхронных двигателей общего назначения. Методические рекомендации. М.: Изд-во МЭИ, 2009. 29 с.
5. Кацман М. М. Справочник по электрическим машинам. М.: Академия, 2005. 458 с.
6. Сечин В. И., Моисеева О. В. Обмотки электрических машин и трансформаторов. Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2008. 166 с.
7. Игнатович В. М., Ройз Ш. С. Электрические машины и трансформаторы. М.: Юрайт, 2016. 182 с.
8. Беспалов В. Я., Котеленец Н. Ф. Электрические машины. М.: Академия, 2006. 316 с.
9. Коноплев К. Г. Импульсное регулирование синхронных генераторов. Севастополь, СевНТУ, 2008. 258 с.
10. Кацман М. М. Электрические машины. М.: Высш. шк.; Академия, 2001. 463 с.
11. Грищенко А. В., Стрекопытов В. В. Электрические машины и преобразователи подвижного состава. М.: Академия, 2005. 319 с.
12. Пат. РФ № 56064. Линейный трансформатор / Ермаков И. И., Киселев В. В., Мулюкин К. Н., Попов Ю. И.; заявл. 15.05.2006; опубл. 27.08.2006.

Статья поступила в редакцию 20.03.2017

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Баженов Николай Георгиевич – Россия, 420059, Казань; Казанский государственный энергетический университет; канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры электротехнических комплексов и систем; olga_yuminova83@mail.ru.

Филина Ольга Алексеевна – Россия, 420059, Казань; Казанский государственный энергетический университет; аспирант кафедры электротехнических комплексов и систем; olga_yuminova83@mail.ru.

Валеева Полина Николаевна – Россия, 420059, Казань; Казанский государственный энергетический университет; аспирант кафедры электротехнических комплексов и систем; olga_yuminova83@mail.ru.

Ермакова Екатерина Юрьевна – Россия, 420059, Казань; Казанский государственный энергетический университет; аспирант кафедры электротехнических комплексов и систем; olga_yuminova83@mail.ru.



N. G. Bazhenov, O. A. Filina, P. N. Valeeva, E. Y. Ermakova

INTERPRETATION OF A CLASSICAL TRANSFORMER AS AN AUTOMATIC CONTROL SYSTEM

Abstract. The article sets out reasons for necessity to use basic principles and rules of the theory of automatic control with respect to processes that take place in a typical transformer. The authors state that transformers can be referred to self-adjusting automated control systems. The article describes a transformer operating into resistive load. There are given equations describing current processes. In the course of the equation solving normal magnetization curve of the core material was taken as a magnetic characteristic. Equation solving is based on a linear part of a magnetization curve in view of the fact that degree of magnetization depends of the core material. Equation solving was carried out in the form of Laplace transform, structural-dynamic diagrams were built using principles of the automatic control theory. The authors infer that transformer magnetic core upgrading is one of the ways to add linearity to nonlinear characteristics of the transformer, which helps enhance its performance.

Key words: transformer, magnetic core, magnetic flux, magnetization curve.

REFERENCES

1. Vol'dek A. I., Popov V. V. *Elektricheskie mashiny. Vvedenie v elektromekhaniku. Mashiny postoiannogo toka i transformatory* [Electrical machinery. Introduction into electromechanics. Direct-current machines and transformers]. Saint-Petersburg, Piter Publ., 2008. 320 p.
2. Grishchenko A. V., Kozachenko E. V. *Novye elektricheskie mashiny lokomotivov* [New electric machines in locomotives]. Moscow, Uchebno-metodicheskii tsentr po obrazovaniuu na zheleznodorozhnm transporte, 2008. 271 p.
3. Ivanov-Smolenskii A. V. *Elektricheskie mashiny* [Electrical machines]. Moscow, Izd-vo MEI, 2006. Vol. 1. 652 p; Vol. 2. 532 p.
4. Akimov E. G. *Vybor asinkhronnykh dvigatelei obshchego naznacheniiia* [Choosing a standard induction motor]. Moscow, Izd-vo MEI, 2009. 29 p.
5. Katsman M. M. *Spravochnik po elektricheskim mashinam* [Reference book on electrical machines]. Moscow, Akademiia Publ., 2005. 458 p.
6. Sechin V. I., Moiseeva O. V. *Obmotki elektricheskikh mashin i transformatorov* [Windings of electrical machines and transformers]. Khabarovsk, Izd-vo DVGUPS, 2008. 166 p.
7. Ignatovich V. M., Roiz Sh. S. *Elektricheskie mashiny i transformatory* [Electrical machines and transformers]. Moscow, Iurait Publ., 2016. 182 p.
8. Bepalov V. Ia., Kotelenets N. F. *Elektricheskie mashiny* [Electrical machines]. Moscow, Akademiia Publ., 2006. 316 p.
9. Konoplev K. G. *Impul'snoe regulirovanie sinkhronnykh generatorov* [Pulse control of alternators]. Sevastopol, SevNTU, 2008. 258 p.

10. Katsman M. M. *Elektricheskie mashiny* [Electrical machines]. Moscow, Vysshaya shkola; Akademiya Publ., 2001. 463 p.

11. Grishchenko A. V., Strekopytov V. V. *Elektricheskie mashiny i preobrazovateli podvizhnogo sostava* [Electrical machines and rolling stock converters]. Moscow, Akademiya Publ., 2005. 319 p.

12. Ermakov I. I., Kiselev V. V., Muliukin K. N., Popov Iu. I. *Lineinyi transformator* [Linear transformer]. Patent RF no. 56064, 2006.

The article submitted to the editors 20.03.2017

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Bazhenov Nikolay Georgievich – Russia, 420059, Kazan; Kazan State Power Engineering University; Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor; Assistant Professor of the Department of Electrical Engineering Complexes and Systems; olga_yuminova83@mail.ru.

Filina Olga Alekseevna – Russia, 420059, Kazan; Kazan State Power Engineering University; Postgraduate Student of the Department of Electrotechnical Complexes and Systems; olga_yuminova83@mail.ru.

Valeeva Polina Nikolaevna – Russia, 420059, Kazan; Kazan State Power Engineering University; Postgraduate Student of the Department of Electrotechnical Complexes and Systems; olga_yuminova83@mail.ru.

Ermakova Ekaterina Yur'evna – Russia, 420059, Kazan; Kazan State Power Engineering University; Postgraduate Student of the Department of Electrotechnical Complexes and Systems; olga_yuminova83@mail.ru.

