

Библиотека Инженера

Хныков А.В.

Теория и расчет трансформаторов источников вторичного электропитания



Математическая модель трансформатора

Расчет числа витков и выбора сердечника

Расчет потерь в сердечнике

Примеры расчета

Справочные материалы

Пусть эта книга принесет вам удачу!



УДК 621.31

ББК 31

X67

А. В. Хныков

X 67 Теория и расчет трансформаторов источников вторичного электропитания. — М.: СОЛОН-Пресс, 2010. — 128 с.: ил. — (Серия «Библиотека инженера»).

ISBN 5-98003-060-3

Изложены теоретические основы расчета многообмоточных трансформаторов. Получены расчетные формулы для трансформаторов одноконтурных прямо- и обратноточковых преобразователей, двухконтурных преобразователей, трансформаторов, работающих от синусоидальной сети (однофазный и трехфазный варианты), трансформатора тока. Приводится методика расчета потерь в сердечнике. Приведены примеры (методики) расчета трансформаторов указанных типов.

Книга снабжена большим количеством справочных материалов и предназначена для инженеров-разработчиков источников вторичного электропитания и студентов высших учебных заведений.

КНИГА — ПОЧТОЙ

Книги издательства «СОЛОН-Пресс» можно заказать наложенным платежом по фиксированной цене. Оформить заказ можно одним из двух способов:

1. послать открытку или письмо по адресу: 123001, Москва, а/я 82;
2. передать заказ по электронной почте на адрес: **magazin@solon-r.ru**.

Бесплатно высылается каталог издательства по почте.

При оформлении заказа следует правильно и полностью указать адрес, по которому должны быть высланы книги, а также фамилию, имя и отчество получателя. Желательно указать дополнительно свой телефон и адрес электронной почты.

Через Интернет Вы можете в любое время получить свежий каталог издательства «СОЛОН-Пресс». Для этого надо послать пустое письмо на робот-автоответчик по адресу: **katalog@solon-r.ru**.

Получать информацию о новых книгах нашего издательства Вы сможете, подписавшись на рассылку новостей по электронной почте. Для этого пошлите письмо по адресу: **news@solon-r.ru**. В теле письма должно быть написано слово SUBSCRIBE.

По вопросам приобретения обращаться:

ООО «Альянс-книга»

Тел: (095) 258-91-94, 258-91-95, **www.abook.ru**

Фирменный магазин издательства

«СОЛОН-Пресс»

г. Москва, ул. Бахрушина, д. 28

(м. «Павелецкая кольцевая»).

Тел.: 959-21-03, 959-20-94.

ISBN 5-98003-060-3

© Хныков А. В.

© Макет и обложка «СОЛОН-Пресс», 2010

Содержание

Введение	3
---------------------------	----------

Глава 1

Приведенная эквивалентная схема замещения N-обмоточного трансформатора для мгновенных значений напряжений,

э.д.с., токов	4
--------------------------------	----------

§1.1. Основные допущения	4
------------------------------------	---

§1.2. Однофазный N-обмоточный трансформатор. Приведенная эквивалентная схема замещения	6
---	---

§1.3. Идеальный трансформатор	14
---	----

§1.4. Одноименные зажимы обмоток	16
--	----

§1.5. Формулы для определения коэффициента трансформации	19
--	----

§1.6. «Витки на вольт»	21
----------------------------------	----

§1.7. Связь напряженности магнитного поля в сердечнике с намагничивающим током	21
---	----

§1.8. Трехфазный N-обмоточный трансформатор. Приведенная эквивалентная схема замещения	23
---	----

§1.9. Суммирующий (вычитающий) трансформатор	25
--	----

Глава 2

Формулы трансформаторных э.д.с. Расчет числа витков

обмоток	28
--------------------------	-----------

§2.1. Определение формы потока в сердечнике трансформатора	28
--	----

§2.2. Процессы перемагничивания сердечника	29
--	----

§2.3. Обоснование невозможности передачи через трансформатор постоянной составляющей напряжения	33
--	----

§2.4. Расчет индуктивности намагничивания трансформатора	33
--	----

§2.5. Потери в сердечнике	35
-------------------------------------	----

§2.6. Трансформатор однотактного прямоходового преобразователя. Формула трансформаторной э.д.с.	40
--	----

§2.7. Трансформатор двухтактного преобразователя. Формула трансформаторной э.д.с.	42
--	----

§2.8. Трансформатор с синусоидальным входным воздействием. Формула трансформаторной э.д.с.	44
---	----

§2.9. Полувитковая обмотка	45
--------------------------------------	----

Глава 3

Формулы габаритной мощности. Выбор сердечника	47
--	-----------

§3.1. Определения	47
§3.2. Трансформатор однотактного прямоходового преобразователя. Формула габаритной мощности	47
§3.3. Трансформатор двухтактного преобразователя. Формула габаритной мощности	48
§3.4. Трансформатор с синусоидальным входным воздействием. Формулы габаритной мощности для однофазного и трехфазного вариантов	49
§3.4.1. Однофазный трансформатор	49
§3.4.2. Трехфазный трансформатор	49
§3.5. Соотношение расчетных мощностей первичной и вторичной обмоток. Частные случаи	50
Глава 4	
Трансформатор однотактного обратногоходового преобразователя. Расчет числа витков и выбор сердечника.	52
§4.1. Общие замечания	52
§4.2. Энергия, запасенная в индуктивности	53
§4.3. Уравнение энергетического баланса в однотактном обратногоходовом преобразователе	54
§4.4. Регулировочная характеристика ООХП	56
§4.5. Теория трансформатора ООХП	57
Глава 5	
Примеры расчета	61
§5.1. Расчет трансформатора однотактного прямоходового преобразователя	61
§5.2. Расчет трансформатора двухтактного мостового преобразователя	70
§5.3. Расчет трехфазного трансформатора	78
§5.4. Расчет трансформатора однотактного обратногоходового преобразователя	84
§5.5. Расчет трансформатора тока	93
Заключение	98
Приложение П1	99
Приложение П2	102
Приложение П3	106
Приложение П4	108
Приложение П5.	109
Список литературы	122

Глава 1

Приведенная эквивалентная схема замещения N-обмоточного трансформатора для мгновенных значений напряжений, э.д.с., токов

§ 1.1. Основные допущения

Однофазный N-обмоточный трансформатор (рис. 1.1) имеет одну первичную и (N-1) вторичных обмоток, намотанных на одном общем магнитопроводе. Будем приписывать величинам, относящимся к первичной обмотке (напряжения, э.д.с., токи, сопротивления и т. д.), индекс «1», а величинам, относящимся к какой-либо вторичной обмотке, один из индексов $k = 2, 3, \dots, N$.

Магнитный поток, создаваемый в сердечнике током i_k (рис. 1.2), содержит две составляющих: поток Φ_k , пронизывающий все N обмоток, и поток рассеяния Φ_{sk} , связанный только с током i_k (с k-й обмоткой). Результирующий поток Φ в сердечнике, пронизывающий все N обмоток, есть алгебраическая сумма потоков Φ_k . Так, для выбранных на рис. 1.2 положительных направлений потоков Φ_k и Φ последний равен:

$$\Phi_1 - \Phi_2 - \dots - \Phi_N.$$

В дальнейшем нас будет интересовать только поток Φ , а не его составляющие Φ_k , поскольку именно с его изменением связано существование э.д.с. электромагнитной индукции (трансформаторных э.д.с.).

Последующий анализ базируется на следующих общепринятых допущениях:

- активные сопротивления обмоток $r_1, r_2, \dots, r_N$ условно вынесены за пределы обмоток;
- не учитываются обмоточные и межобмоточные емкости;
- магнитное поле в сердечнике однородно в том смысле, что векторы индукции **B** и напряженности **H** магнитного поля имеют одинаковое направление и длину в любой точке поперечного сечения сердечника. Кроме того, длина векторов остается неизменной при движении вдоль силовых линий магнитного поля.

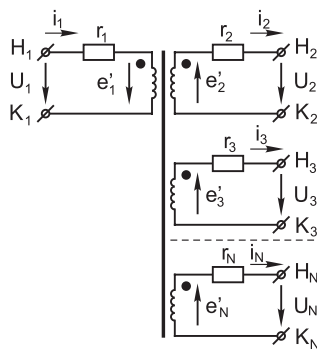


Рис. 1.1

Известно, что для поля в зазоре характерен эффект «выпучивания» линий магнитной индукции (рис. 1.3, а), причем он проявляется тем сильнее, чем хуже выполняется условие $l_3 \ll l$.

Реальную картину поля, показанную на рис. 1.3, а, можно заменить идеализированной, изображенной на рис. 1.3, б, где поле в зазоре считается однородным, а эффект выпучивания учитывается некоторым увеличением площади сечения немагнитного зазора S_3 .

В совокупности с принципом непрерывности магнитного потока данная идеализация так же, как и в предыдущем случае, позволяет придать общим формулам потока и циркуляции наиболее простой вид:

$$\Phi = BS = B_3 S_3, \quad (1.3)$$

$$\oint_{l-p} \mathbf{H} d\mathbf{l} = Hl + H_3 l_3, \quad (1.4)$$

где величины с индексом «з» относятся к зазору, а величины без индекса — к сердечнику.

Заметим, что, если принять $S = S_3$ (т. е. не учитывать эффект выпучивания), получим $B = B_3$. Данное обстоятельство может быть использовано на практике: помещая в узкий зазор датчик Холла [2], можно по результатам измерения магнитной индукции в зазоре приближенно судить о ее величине в теле сердечника.

§ 1.2. Однофазный N-обмоточный трансформатор. Приведенная эквивалентная схема замещения

Изложение ведется на основе законов Ома, Кирхгофа и закона электромагнитной индукции Фарадея—Максвелла. Несколько слов о последнем из них.

Пусть w витков катушки с током i пронизываются магнитным потоком Φ . Тогда, если положительные направления тока i и потока Φ связаны между собой правилом правоходового винта, а э.д.с. e на зажимах катушки совпадает по направлению с током i , формула закона имеет вид:

$$e = -w \frac{d\Phi}{dt}. \quad (1.5)$$

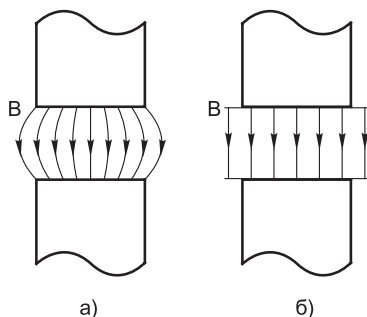


Рис. 1.3

Невыполнение хотя бы одного из этих двух условий ведет к перемене знака в правой части формулы (1.5). Действительно, пусть положительные направления i и Φ не связаны правилом правоходового винта, а направления i и e совпадают. Тогда этим правилом связаны направления величин i и $-\Phi$, и вступает в силу формула (1.5):

$$e = -w \frac{d(-\Phi)}{dt} = w \frac{d\Phi}{dt}, \text{ что и требовалось доказать.}$$

Аналогично рассматривается случай несовпадения по направлению i и e , когда направления i и Φ связаны правилом правоходового винта.

Условимся в дальнейшем принимать направления i и e всегда совпадающими.

На основании законов Ома и Кирхгофа можем записать следующую систему уравнений (см. рис. 1.1):

$$\begin{cases} e'_1 = -u_1 + r_1 i_1, \\ e'_2 = u_2 + r_2 i_2, \\ e'_3 = u_3 + r_3 i_3, \\ \text{-----} \\ e'_N = u_N + r_N i_N. \end{cases} \quad (1.6)$$

Смысл величин, входящих в (1.6), ясен из рис. 1.1 и 1.2. В частности, $e'_1, e'_2, e'_3, \dots, e'_N$ — это э.д.с. на зажимах идеализированных (без активных сопротивлений) обмоток, возникающие в результате пронизывания их соответствующим магнитным потоком и которые могут быть определены на основании закона электромагнитной индукции (1.5). С учетом принятых на рис. 1.2 положительных направлений величин и замечания о знаке в правой части формулы (1.5) можем записать:

$$\begin{cases} e'_1 = -w_1 \frac{d}{dt} (\Phi + \Phi_{S1}), \\ e'_2 = -w_2 \frac{d}{dt} (-\Phi + \Phi_{S2}), \\ e'_3 = -w_3 \frac{d}{dt} (-\Phi + \Phi_{S3}), \\ \text{-----} \\ e'_N = -w_N \frac{d}{dt} (-\Phi + \Phi_{SN}), \end{cases} \quad (1.7)$$

где w_k — число витков k -й обмотки ($k = 1, 2, \dots, N$).

Потоки рассеяния обмоток $\Phi_{S1}, \Phi_{S2}, \Phi_{S3}, \dots, \Phi_{SN}$ малы по сравнению с основным потоком Φ , и поэтому в первом приближении ими можно пренебречь. Однако в некоторых случаях их все-таки приходится учитывать, и делается это введением линейных индуктивностей рассеяния обмоток, определяемых равенствами:

$$L_{S1} = \frac{w_1 \Phi_{S1}}{i_1}, L_{S2} = \frac{w_2 \Phi_{S2}}{i_2}, \dots, L_{SN} = \frac{w_N \Phi_{SN}}{i_N}. \quad (1.8)$$

Назовем э.д.с., определяемые равенствами

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi}{dt}, e_2 = -w_2 \frac{d\Phi}{dt}, \dots, e_N = -w_N \frac{d\Phi}{dt}, \quad (1.9)$$

трансформаторными э.д.с.

С учетом равенств (1.8) и (1.9) систему (1.7) можно представить в следующем виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} e'_1 = e_1 - L_{S1} \frac{di_1}{dt}, \\ e'_2 = -e_2 - L_{S2} \frac{di_2}{dt}, \\ e'_3 = -e_1 - L_{S3} \frac{di_3}{dt}, \\ \text{-----} \\ e'_N = -e_N - L_{SN} \frac{di_N}{dt}. \end{array} \right. \quad (1.10)$$

После подстановки э.д.с. $e'_1, e'_2, \dots, e'_N$, определенных уравнениями системы (1.10), в систему (1.6) получим:

$$\left\{ \begin{array}{l} e_1 = r_1 i_1 + L_{S1} \frac{di_1}{dt} - u_1, \\ -e_2 = r_2 i_2 + L_{S2} \frac{di_2}{dt} + u_2, \\ -e_3 = r_3 i_3 + L_{S3} \frac{di_3}{dt} - u_3, \\ \text{-----} \\ -e_N = r_N i_N + L_{SN} \frac{di_N}{dt} - u_N. \end{array} \right. \quad (1.11)$$

Дальнейшие преобразования связаны с понятием *коэффициента трансформации* от i -й к k -й обмотке, под которым понимается отношение чисел витков i -й и k -й обмоток:

$$\eta_{ik} = \frac{w_i}{w_k}. \quad (1.12)$$

Заметим, что при $i = k$ $\eta_{ii} = 1$.

Особый интерес представляет коэффициент трансформации

$$\eta_{1k} = \frac{w_1}{w_k}, \quad (1.13)$$

устанавливающий связь трансформаторной э.д.с. e_1 с любой из трансформаторных э.д.с. e_k , определенных равенствами (1.9). Связь эта носит фундаментальный характер и имеет вид:

$$e_1 = \eta_{1k} e_k. \quad (1.14)$$

Доказательство равенства (1.14) не представляет труда. Действительно,

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi}{dt} = \frac{w_1}{w_k} \left(-w_k \frac{d\Phi}{dt} \right) = \eta_{1k} e_k, \text{ что и требовалось доказать.}$$

После этого система (1.11) может быть приведена к виду:

$$\left\{ \begin{array}{l} e_1 = r_1 i_1 + L_{S1} \frac{di_1}{dt} - u_1, \\ -\eta_{12} e_2 = \eta_{12}^2 r_2 \left(\frac{i_2}{\eta_{12}} \right) + \eta_{12}^2 L_{S2} \frac{d}{dt} \left(\frac{i_2}{\eta_{12}} \right) + \eta_{12} u_2, \\ -\eta_{13} e_3 = \eta_{13}^2 r_3 \left(\frac{i_3}{\eta_{13}} \right) + \eta_{13}^2 L_{S3} \frac{d}{dt} \left(\frac{i_3}{\eta_{13}} \right) + \eta_{13} u_3, \\ \dots \dots \dots \\ -\eta_{1N} e_N = \eta_{1N}^2 r_N \left(\frac{i_N}{\eta_{1N}} \right) + \eta_{1N}^2 L_{SN} \frac{d}{dt} \left(\frac{i_N}{\eta_{1N}} \right) + \eta_{1N} u_N. \end{array} \right. \quad (1.15)$$

Системе уравнений (1.15) соответствует приведенная к первичной обмотке эквивалентная схема N-обмоточного трансформатора (рис. 1.4, а), в которой напряжения $u_2, u_3, \dots, u_N$, токи $i_2, i_3, \dots, i_N$ заменены соответственно на $u'_2 = \eta_{12} u_2, u'_3 = \eta_{13} u_3, \dots, u'_N = \eta_{1N} u_N, i'_2 = i_2 / \eta_{12}, i'_3 = i_3 / \eta_{13}, \dots, i'_N = i_N / \eta_{1N}$ ¹.

¹ Здесь и ниже значком «штрих» отмечены приведенные (к первичной обмотке) величины.

Смысл приведения, как видно, заключается в исключении связей посредством электромагнитной индукции и замене их связями «по проводам». Приведение может быть осуществлено к любой из N обмоток, если в этом есть необходимость.

Величины, определенные равенствами

$$\begin{cases} r'_k = \eta_{1k}^2 r_k, \\ L'_{Sk} = \eta_{1k}^2 L_{Sk}, \end{cases} \quad (1.16)$$

где $k = 2, 3, \dots, N$, носят название *приведенных* к первичной обмотке активных сопротивлений и индуктивностей рассеяния вторичных обмоток.

Ветвь, содержащая э.д.с. $e_1 = \eta_{1k} e_k$, называется *намагничивающей*. Ток i_μ , протекающий в ней, называется *намагничивающим*. Имеет место следующее равенство (см. рис. 1.4, а):

$$i_1 = i_\mu + \frac{i_2}{\eta_{12}} + \frac{i_3}{\eta_{13}} + \dots + \frac{i_N}{\eta_{1N}}. \quad (1.17)$$

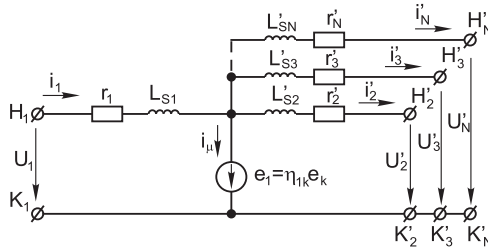


Рис. 1.4, а

Э.д.с. e_1 можно рассматривать как э.д.с. на зажимах некоторой дифференциальной индуктивности

$$L_\mu = w_1 \frac{d\Phi}{di_\mu}, \quad (1.18)$$

называемой *индуктивностью намагничивания* трансформатора:

$$e_1 = -L_\mu \frac{di_\mu}{dt}. \quad (1.19)$$

В справедливости равенства (1.19) нетрудно убедиться, применяя к первому равенству системы (1.9) правило дифференцирования сложной функции.

Свойства индуктивности намагничивания будут выяснены ниже (см. § 2.4), а пока отметим, что ее введение позволяет заменить математические операции с магнитным потоком более привычными с точки зрения теории цепей операциями с намагничивающим током.

Приведенная эквивалентная схема трансформатора преобразуется в этом случае в вид, показанный на рис. 1.4, б.

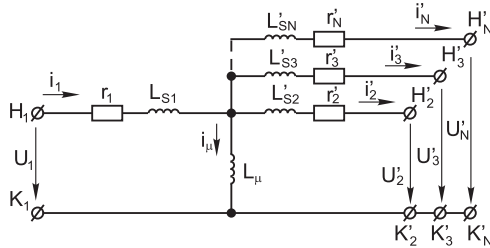


Рис. 1.4, б

Следует отметить, что нагрузки, подключенные ко вторичным обмоткам трансформатора, нельзя непосредственно подключать к выходным зажимам приведенной эквивалентной схемы. Однако, если известен характер нагрузок, можно все-таки привязать приведенную эквивалентную схему к этим нагрузкам. Делается это следующим образом. Рассмотрим несколько частных примеров.

1. Пусть k -я вторичная обмотка нагружена на нелинейное в общем случае активное сопротивление R_{hk} , для которого связь напряжения u_k с током i_k определяется законом Ома:

$$u_k = R_{hk} i_k \quad (1.20)$$

или, что то же самое,

$$\eta_{1k} u_k = \eta_{1k}^2 R_{hk} \frac{i_k}{\eta_{1k}}. \quad (1.21)$$

Равенство (1.21), а следовательно, и (1.20) выполняется, если к соответствующим зажимам приведенной эквивалентной схемы подсоединить сопротивление $R'_{hk} = \eta_{1k}^2 R_{hk}$, называемое *приведенным к первичной обмотке активным сопротивлением нагрузки*.

В этом состоит особенность приведенной эквивалентной схемы, о которой нельзя забывать.

2. Пусть вторичная обмотка с номером k нагружена на нелинейную в общем случае индуктивность L_{hk} , для которой связь напряжения u_k с током i_k определяется равенством:

$$u_k = \frac{d}{dt}(L_{\text{нк}} i_k) \quad (1.22)$$

или, что то же самое,

$$\eta_{1k} u_k = \frac{d}{dt} \left((\eta_{1k}^2 L_{\text{нк}}) \frac{i_k}{\eta_{1k}} \right). \quad (1.23)$$

Равенство (1.23), а следовательно, и (1.22) выполняется, если к соответствующим зажимам приведенной эквивалентной схемы подсоединить индуктивность $L'_{\text{нк}} = \eta_{1k}^2 L_{\text{нк}}$, называемую *приведенной к первичной обмотке индуктивностью нагрузки*. И здесь, как видим, величину нагрузки (в данном случае индуктивность) требуется «приводить» к первичной обмотке.

3. Пусть нагрузкой k -й обмотки является нелинейная в общем случае емкость $C_{\text{нк}}$, для которой связь тока i_k с напряжением u_k определяется равенством:

$$i_k = \frac{d}{dt}(C_{\text{нк}} u_k) \quad (1.24)$$

или, что то же самое,

$$\frac{i_k}{\eta_{1k}} = \frac{d}{dt} \left(\left(\frac{C_{\text{нк}}}{\eta_{1k}^2} \right) \eta_{1k} u_k \right). \quad (1.25)$$

Равенство (1.25) эквивалентно подсоединению к соответствующим зажимам приведенной эквивалентной схемы емкости $C'_{\text{нк}} = C_{\text{нк}} / \eta_{1k}^2$, называемой *емкостью нагрузки, приведенной к первичной обмотке*.

4. Пусть нагрузкой k -й обмотки является сложный двухполюсник (рис. 1.5), состоящий из соединенных различным образом активных сопротивлений, индуктивностей, емкостей, которые считаются в общем случае нелинейными.

В соответствии с 1-м и 2-м законами Кирхгофа можем записать следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} i_k = i_{k1} + i_{k2} + i_{k3}, \\ u_k = u_{k1} + u_{k2}, \end{cases}$$

или

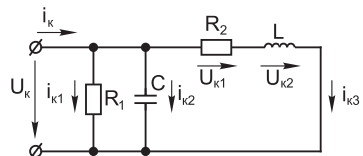


Рис. 1.5