

Однотактный комбинированный преобразователь

Статья продолжает тему публикаций в «СЭ» №№ 1 и 2 за 2004 год, посвященных использованию и проектированию зарядных устройств на базе однотактных преобразователей.

Константин Матвеев

mkf@ie.tusur.ru

Виталий Скворцов

sva@ie.tusur.ru

Известно, что для каждого ряда мощностей зарядных устройств (ЗУ) существует свое наиболее оптимальное схемотехническое решение. При мощностях нагрузки в диапазоне 50–500 Вт по соотношению «цена — качество» предпочтительно использование однотактных преобразователей. Ранее авторами было предложено в устройствах заряда данного диапазона мощностей использовать однотактный комбинированный преобразователь [1] по патенту № 2242073 РФ [2].

Для однотактного обратного преобразователя характерно наличие на выходе импульсного тока с крутым фронтом, что приводит к импульсу перенапряжения при выключении ключа. Это приводит к потерям мощности на ключевом элементе. Кроме того, при обеспечении высокого напряжения изоляции между входом и выходом (это обязательное требование к ЗУ) потери увеличиваются из-за возрастающей индуктивности рассеяния трансформатора. Пульсирующий выходной ток заставляет применять при сравнительно низких выходных напряжениях (типично для аккумуляторов 6 и 12 В) выходную фильтрующую емкость значительных габаритов, что, соответственно, отражается на стоимости преобразователя. За счет разделенной передачи энергии от первичного источника к нагрузке (аккумулятору или конденсатору) трансформатор и ключевой элемент имеют завышенную габаритную мощность.

Предложенные авторами структура преобразователя и алгоритм работы [1] позволяют поддерживать постоянный по величине зарядный ток без цепи

обратной связи. Причем за счет непрерывной формы тока уменьшена суммарная габаритная мощность элементов схемы.

На рис. 1 представлена схема однотактного комбинированного преобразователя, который представляет собой обратный преобразователь с двумя ключами, дополненный прямоходовым трансформатором (TV1) и выпрямительным диодом (VD4). За счет введения в схему дополнительного прямоходового трансформатора (TV1) устранена пауза и крутой фронт тока на выходе преобразователя. Для ограничения импульса перенапряжения на ключевых элементах использована схема двухключевого однотактного инвертора (VT1, VT2, VD1, VD2). При этом энергия, накапливаемая в индуктивностях рассеяния трансформаторов TV1, TV2, не рассеивается на элементах схемы, а возвращается во входной конденсатор. Кроме того, за счет прямоходового трансформатора TV1 энергия в аккумуляторную батарею передается не только при выключении ключевых элементов VT1, VT2, но и при их включенном состоянии, поэтому амплитуда тока в них меньше, чем в обратном преобразователе (а значит, и их суммарная габаритная мощность тоже меньше). Выходная мощность двух трансформаторов соответствует выходной мощности одного трансформатора обратного преобразователя, однако за счет уменьшения амплитуды тока и, соответственно, действующего его значения, уменьшена их габаритная мощность. Габаритная мощность выходного конденсатора снижается за счет уменьшения переменной составляющей выходного тока — отсутствуют паузы в выходном токе и уменьшена его амплитуда.

Идеализированная схема силовой части преобразователя, в которой исключены элементы, не оказывающие влияния на основные процессы, изображена на рис. 2. Период работы однотактного комбинированного преобразователя состоит из следующих этапов (рис. 3):

- включение ключей K_1 и K_2 происходит при нулевых начальных условиях (токи в обмотках равны нулю) — момент времени t_0 ;
- первичный ток I_1 нарастает за счет напряжения E , приложенного к первичным обмоткам (промежуток времени t_0-t_1);

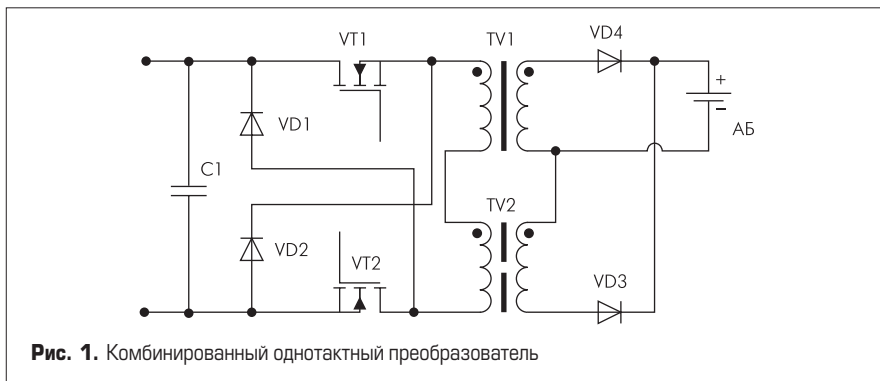


Рис. 1. Комбинированный однотактный преобразователь

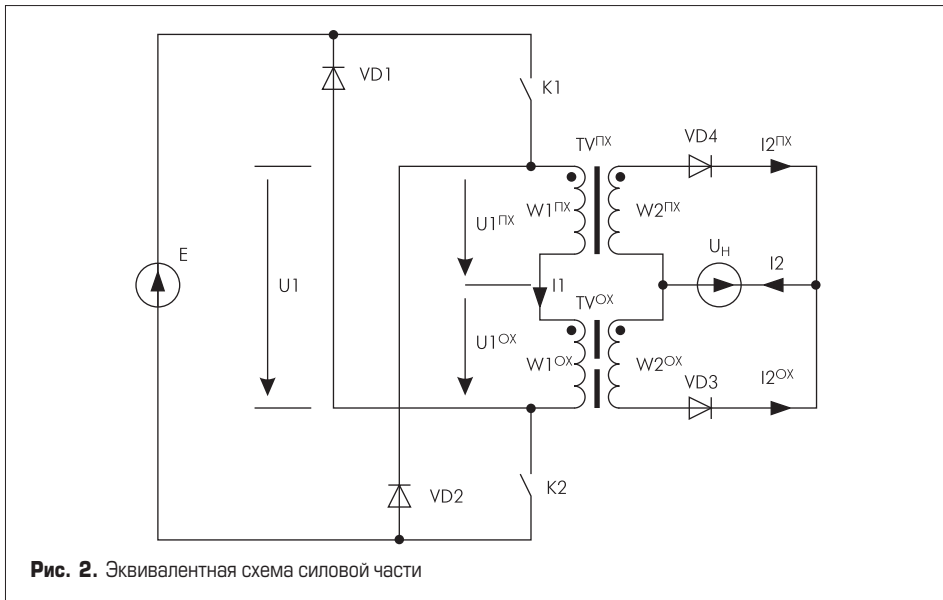


Рис. 2. Эквивалентная схема силовой части

- выключение ключей происходит по достижении током I_1 заданной величины — момент времени t_i ;
- накопленная в индуктивности намагничивания прямоходового трансформатора TV^{PX} энергия возвращается в источник питания — промежуток времени t_1-t_{2PX} ;
- накопленная в обратногоходовом трансформаторе TV^{OX} энергия передается в нагрузку — промежуток времени t_1-t_{2OX} ;
- по окончании обоих промежутков времени t_1-t_{2PX} , t_1-t_{2OX} сразу же начинается новый период работы преобразователя.

Функционирование преобразователя в граничном режиме позволяет обеспечивать стабилизацию среднего значения выходного тока I_{2CP} только за счет задания максимальной величины первичного тока I_{1MAX} . Нет необходимости в реализации ОС по выходному току, поэтому схема управления комбинированным преобразователем в граничном режиме отличается простотой реализации и лишь обеспечивает:

- отключение ключей $K1$ и $K2$ по достижении первичным током заданного значения,
- включение ключей через промежуток времени, обеспечивающий размагничивание магнитопроводов обоих трансформаторов.

Ввиду отмеченных положительных свойств, граничный режим работы выбран как основной режим работы однофазного комбинированного преобразователя. В этом режиме преобразователь функционирует как автогенераторная система.

Длительность импульса тока в первичной обмотке, определяемая требуемой амплитудой тока, равна

$$t_H = t_1 - t_0 = \frac{I_{1M} \times L_1^{OX}}{E - U_H \times K_{TP}}$$

Длительность сброса накопленной энергии будет, соответственно, зависеть от времени ее накопления

$$t_{CBP} = t_{2OX} - t_1 = \frac{(E - K_{TP} \times U_H)}{K_{TP} \times U_H} \times t_H$$

Длительность размагничивания прямоходового трансформатора TV^{PX} равна

$$t_{PA3M} = \frac{U_H \times K_{TP}}{E - U_H \times K_{TP}} \times t_H$$

В зависимости от соотношения входного напряжения E и выходного напряжения U_H возможны три режима работы комбинированного преобразователя.

Режим работы 1 — номинальный режим работы. В этом режиме работы преобразователя при $E > 2 \times U_H \times K_{TP}$ длительность сброса энергии из трансформатора TV^{OX} больше длительности размагничивания трансформатора TV^{PX} $t_{CBP} > t_H$, $t_{PA3M} < t_H$.

Данный режим работы для комбинированного преобразователя является основным. Среднее значение выходного тока за период преобразования всегда остается постоянной величиной.

Режим работы 2 — режим неполной мощности. В случае уменьшения напряжения пи-

тания E или увеличения напряжения нагрузки U_H когда выполняется условие $E \leq 2 \times U_H \times K_{TP}$ сброс энергии из TV^{OX} происходит быстрее, чем размагничивается TV^{PX} — $t_{CBP} < t_{PA3M}$. Длительность этапа размагничивания TV^{PX} при этом равна $t_{PA3M} = t_H$. В выходном токе I_2 присутствует пауза $t_{2PX} - t_{2OX}$, приводящая к неполному использованию элементов схемы во времени.

Режим работы 3 — холостой ход. Режим холостого хода для рассматриваемого преобразователя является допустимым, поэтому нет необходимости в специальной защите элементов схемы в этом режиме. Ограничение выходного напряжения достигается за счет последовательного включения первичных обмоток прямоходового (TV^{PX}) и обратногоходового (TV^{OX}) трансформаторов. При увеличении напряжения U_H выше величины E/K_{TP} диоды выпрямителя $VD3$, $VD4$ (рис. 2, 3) остаются всегда запертыми и, поскольку $L_1^{PX} = L_1^{OX} \gg L_1^{OX}$, ток I_1 в первичной и ток I_2 во вторичной цепи нарастает медленно, трансформатор TV^{OX} перестает накапливать энергию, а преобразователь переходит в режим холостого хода. Максимальная величина выходного напряжения холостого хода $U_{H,XX}$ определяется величиной входного напряжения E и коэффициентом трансформации K_{TP} .

Принципиально возможно использование собственной индуктивности рассеяния трансформатора в функции обратногоходового трансформатора $TV2$ (рис. 1) и применение стандартного магнитопровода. Построение трансформатора на П-образном сердечнике условно показано на рис. 4. Принцип действия основан на неравной магнитной связи обмоток, расположенных на различных стержнях магнитопровода. Поясняет принцип действия преобразователя рис. 5,

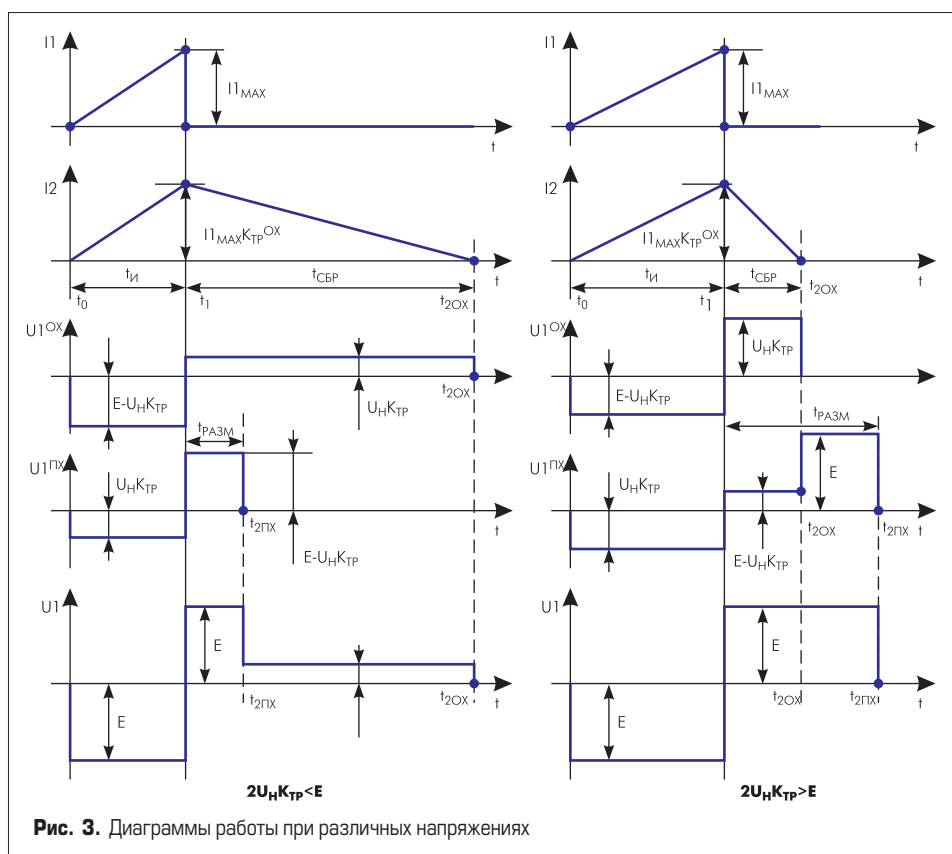
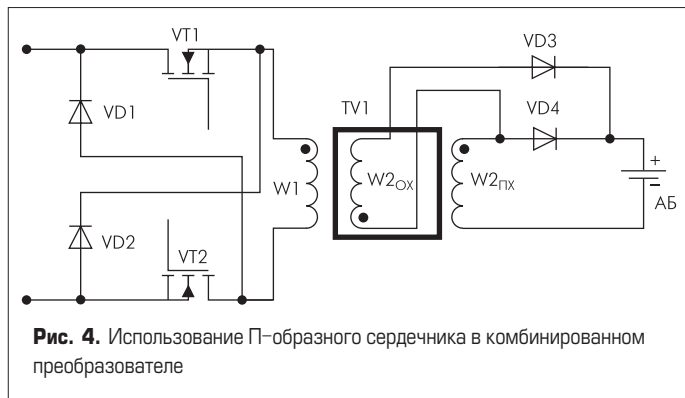


Рис. 3. Диаграммы работы при различных напряжениях



на котором трансформатор на ферромагнитном П-образном сердечнике представлен как воздушный трансформатор.

Различная магнитная связь между различными парами обмоток отражена коэффициентами связи $K_{св}$. Для двух обмоток, расположенных на одном стержне, коэффициент связи максимален и приближается к единице. Для пары обмоток, расположенных на разных стержнях, коэффициент связи имеет конечное значение, обусловленное конструктивным исполнением этих обмоток. Таким образом, эквивалентный воздушный трансформатор, состоящий из индуктивностей $L_1, L_{2_{OX}}, L_{2_{ПХ}}$ имеет взаимные индуктивности, определяемые как

$$M_{12_{OX}} = K_{св} I_{2_{OX}} \times \sqrt{L_1 \times L_{2_{OX}}}$$

$$M_{12_{ПХ}} = K_{св} I_{2_{ПХ}} \times \sqrt{L_1 \times L_{2_{ПХ}}}$$

$$M_{2_{OX} 2_{ПХ}} = K_{св} I_{2_{ПХ}} \times \sqrt{L_{2_{OX}} \times L_{2_{ПХ}}}$$

где $K_{св}$ — коэффициенты связи соответствующих обмоток, причем $K_{св} I_{2_{ПХ}} < 1$ и $K_{св} I_{2_{OX}} \approx 1$.

Неравенство коэффициентов связи достигнуто за счет расположения соответствующих обмоток на разных стержнях магнитопровода. При включенных VT_1, VT_2 энергия от первичной обмотки $W_1(L_1)$ за счет $M_{12_{ПХ}}$ передается во вторичную прямоходовую обмотку $W_{2_{ПХ}}(L_{2_{ПХ}})$ и одновременно накапливается в магнитном потоке этих обмоток. За счет $K_{св} I_{2_{ПХ}} < 1$ ток нарастает не мгновенно. Магнитный поток обмотки $W_1(L_1)$ практически полностью связан с обмоткой $W_{2_{OX}}(L_{2_{OX}})$ за счет $K_{св} I_{2_{OX}} \approx 1$. При выключении VT_1, VT_2 энергия магнитного потока обмоток $W_{2_{OX}}(L_{2_{OX}})$ и $W_{2_{ПХ}}(L_{2_{ПХ}})$ через последовательно соединенные вторичные обмотки передается в нагрузку (на схеме АБ). При равных числе витков $W_{2_{OX}}$ и $W_{2_{ПХ}}$ выходной ток имеет непрерывную форму. Сердечник в это время получает возможность свободно размагничиваться.

Различные варианты совмещения функций двух электромагнитных элементов в одном описаны в литературе [3]. Их недостатком является использование магнитопровода специальной конструкции. Для комбинированного преобразователя с одним трансформатором на стандартном магнитопроводе (рис. 4) предлагается модель силовой части преобразователя для исследования процессов, протекающих в комбинированном преобразователе.

Трансформатор, выполненный на П-образном сердечнике (рис. 4), одновременно

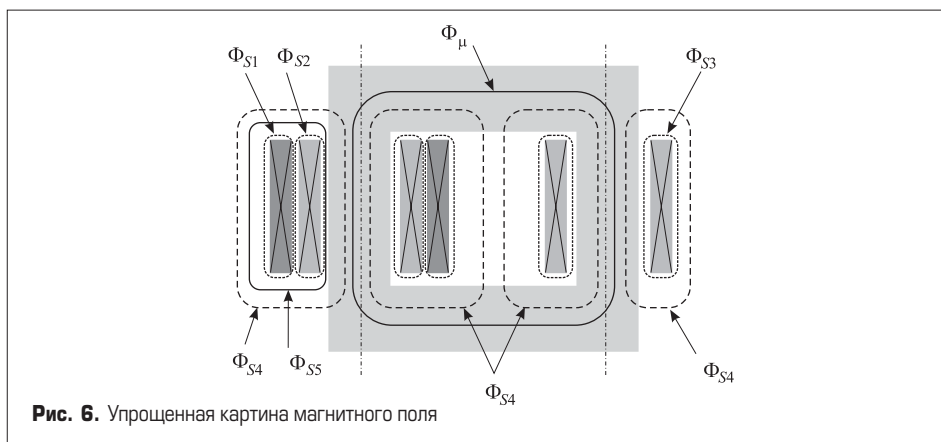
выполняет функции прямоходового (TV_1) и обратногоходового (TV_2) трансформаторов (рис. 1). Трансформаторный узел, совмещающий две различные функции и выполненный как одна конструктивная единица, назван *совмещенным трансформатором*. Первичная обмотка и одна из вторичных обмоток расположены на разных стержнях магнитопровода, что существенно увеличивает индуктивность рассеяния между ними. Конструкция трансформатора с разнесенными обмотками предполагает неравномерное намагничивание магнитопровода. Таким образом, модель трансформатора, представляемая в виде электрической схемы замещения, должна отражать индуктивности рассеяния между обмотками и индуктивности намагничивания отдельных участков магнитопровода.

В простейшем случае модель трансформатора может представлять собой четырехполюсник с заданным коэффициентом передачи напряжения и тока. Более сложные модели учитывают наличие индуктивностей рассеяния и индуктивностей намагничивания. Для построения схем замещения трансформатора в принципе возможны два подхода. Первый заключается в том, что сам трансформатор представляется в виде «черного ящика», у которого доступны только внешние выводы. Теоретически можно с любой точностью определить внешние характеристики (собственные и взаимные проводимости, зависящие или не зависящие от токов и напряжений). В связи с тем, что реально не все параметры трансформатора могут быть измерены с достаточной точностью, этот метод может приводить к существенным ошибкам из-за разностей близких величин. Второй метод основывается на том, что конструктивное

исполнение трансформатора известно, магнитное поле в нем описано достаточно просто, участки магнитной цепи могут быть представлены цепями с сосредоточенными параметрами [4].

Исследуемый трансформатор (рис. 4) имеет первичную обмотку W_1 , одну вторичную обратногоходовую обмотку $W_{2_{OX}}$ на том же стержне и прямоходовую вторичную обмотку $W_{2_{ПХ}}$ на другом стержне магнитопровода. Как известно, это приводит к существенному увеличению индуктивности рассеяния между этими обмотками, и, соответственно, к неравному магнитному потоку в стержнях. Насколько эти потоки отличаются между собой — заранее не известно, это необходимо определить во всех режимах работы преобразователя. Для составления электрической схемы замещения трансформатора рассмотрена картина магнитного поля (рис. 6), на которой представлены основные потоки. Поток Φ_{μ} , проходящий через весь магнитопровод, является потоком намагничивания, потоки $\Phi_{S1}, \Phi_{S2}, \Phi_{S3}$ являются потоками рассеяния соответствующих обмоток, эти потоки сцепляются только с витками каждой из них. Поток Φ_{S4} , проходящий только через один стержень и замыкающийся по воздуху преимущественно между верхним и нижним ярмом магнитопровода, отражает рассеяние между правой и левой половинками сердечника. Поток Φ_{S5} , сцепляющийся с витками первой и второй обмоток, отражает взаимосвязь этих обмоток только за счет магнитного поля вне магнитопровода. На основании составленной картины поля получена схема магнитной цепи (рис. 7).

Магнитные сопротивления R_{M1} и R_{M2} отражают сопротивление магнитному потоку Φ_{μ} , проходящему через магнитопровод:



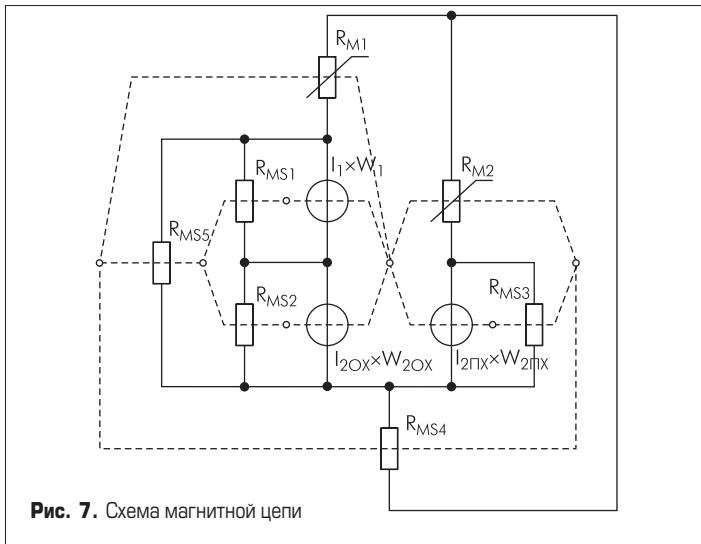


Рис. 7. Схема магнитной цепи

$$R_{M1} + R_{M2} = H_c \times l_c$$

где H_c и l_c — напряженность поля и средняя длина силовой линии в магнитопроводе.

В общем случае эти сопротивления нелинейные.

Магнитные сопротивления $R_{MS1} - R_{MS5}$ отражают сопротивление соответствующим магнитным потокам, проходящим по воздуху. МДС $I_1 W_1$, $I_{2OX} W_{2OX}$, $I_{2ПХ} W_{2ПХ}$ отражают соответствующие обмотки и токи через них.

На основании схемы магнитной цепи (рис. 7) по формальным правилам [5] составлена электрическая схема замещения трансформатора (рис. 8). Каждой ветви на схеме магнитной цепи соответствует узел на электрической схеме замещения. И, напротив, узлу на схеме магнитной цепи соответствует ветвь на электрической схеме замещения. Пунктирными линиями на схемах показаны ветви дуальных цепей.

Данная схема уже пригодна для моделирования в таких программных пакетах как PSpice, OrCAD и др. в режиме малых токов (без насыщения магнитопровода), а также в режиме больших токов, при неравномерном насыщении магнитопровода [4]. Каждый из стержней магнитопровода представлен индуктивностями намагничивания $L_{\mu 1}$ и $L_{\mu 2}$. Для определения индукции в участке магнитопровода необходимо определить ток в соответствующей индуктивности намагничивания. Соответствие между током и напряженностью магнитного поля легко можно установить из формулы

$$H_c \times l_c = I \times W$$

где H_c — напряженность магнитного поля в участке магнитопровода, l_c — длина средней магнитной линии в участке магнитопровода, W — число витков, к которому приведена схема.

Индуктивностями на схеме замещения отражены соответствующие магнитные потоки трансформатора

$$L = \frac{\Psi}{I} = \frac{\Phi \times W}{I}$$

Индуктивности $L_{\mu 1}$ и $L_{\mu 2}$ могут быть определены расчетным способом, либо на основании одних физических свойств магнитопровода — длины средней магнитной линии, эффективного сечения и кривой намагничивания, которые никак не связаны с конструктивным исполнением обмоток. Поскольку длина магнитного пути для каждой индуктивности намагничивания в два раза меньше суммарной, то каждая из индуктивностей должна быть вдвое больше суммарной:

$$L_{\mu 1} = L_{\mu 2} = 2 \times \frac{\mu_0 \times \mu \times S_c \times W^2}{l_c}$$

Физическим аналогом индуктивностей намагничивания $L_{\mu 1}$, $L_{\mu 2}$ являются воображаемые катушки с током, которые расположены на поверхности магнитопровода.

От исполнения обмоток трансформатора в схеме замещения зависят индуктивности рассеяния $L_{S1} - L_{S5}$. Измерение их величин невозможно провести с помощью прямых измерений на реальном трансформаторе. Их достаточно просто определить на конечно-элементной модели трансформатора [4]. Для этого достаточно проинтегрировать индукцию магнитного поля для катушки с током в соответствующем сечении.

Следует отметить, что величина L_{S4} на порядок превышает величины $L_{S1} - L_{S3}$, L_{S5} и является наиболее значимой в представленной схеме замещения, так как отражает поток рассеяния между обмотками, расположенными на разных стержнях магнитопровода. Именно этот поток в основном влияет на функционирование комбинированного преобразователя. В простейших случаях величинами $L_{S1} - L_{S3}$, L_{S5} можно пренебречь.

На основании данной модели разработана методика проектирования совмещенного трансформатора, основные расчетные соотношения которой представлены ниже.

Коэффициент трансформации:

$$K_{TP} = \frac{1}{2} \times \frac{U_{BX_MIN}}{U_{H_MAX}}$$

Максимальное напряжение на выходе преобразователя при работе без нагрузки:

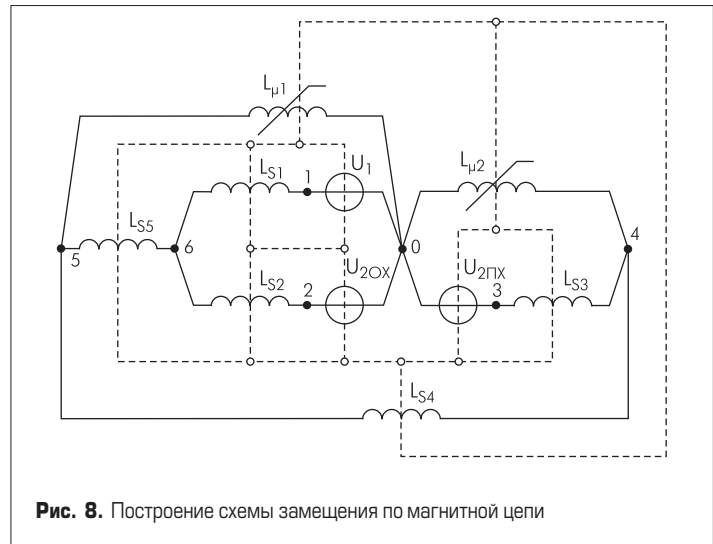


Рис. 8. Построение схемы замещения по магнитной цепи

$$U_{ВЫХ_XX_MAX} = U_{ВХ_MAX} / K_{TP}$$

Величина мощности, снимаемая с выбранного магнитопровода, ориентировочно оценивается как

$$\begin{cases} P_{MAX} \leq 0,72 \times \Delta B \times S_c \times S_o \times K_o \times j \times f \\ P_{MAX} \leq 2,5 \times L_{S0} \times S_o^2 \times K_o^2 \times j^2 \times f \end{cases}$$

где ΔB — размах индукции, S_c — сечение магнитопровода, S_o — сечение окна магнитопровода, K_o — коэффициент его заполнения, j — плотность тока, f — требуемая рабочая частота, L_{S0} — приведенная к одному витку индуктивность рассеяния L_{S4} (является параметром магнитопровода и геометрии катушек).

Число витков первичной обмотки определяется исходя из возможности работы преобразователя на холостом ходу:

$$W_1 \geq \frac{U_{ВХ}}{2 \times \Delta B \times S_c \times j}$$

Результаты проведенных исследований однотактного комбинированного преобразователя позволяют осуществлять его проектирование для конкретных применений в ЗУ.

Литература

- Скворцов В. А., Русанов В. В., Матвеев К. Ф. Устройства заряда на базе однотактных комбинированных преобразователей // Компоненты и Технологии: Силовая электроника. 2004. № 1.
- Пат. 2242073 РФ. Зарядное устройство для аккумуляторной батареи / Скворцов В. А., Матвеев К. Ф. // Открытия. Изобретения. 10.12.2004. Бюл. № 34.
- Задерей Г. П., Заика П. Н. Многофункциональные трансформаторы в средствах вторичного электропитания. М.: Радио и связь. 1989.
- Лейтес Л. В. Электромагнитные расчеты трансформаторов и реакторов. М.: Энергия. 1981.
- Матвеев К. Ф. Использование пакета ANSYS для моделирования электромагнитных элементов импульсных преобразователей // Компоненты и Технологии: Силовая электроника. 2004. № 2.