

УДК 621.314

ВЛИЯНИЕ ИНДУКТИВНОСТИ РАССЕЯНИЯ ТРАНСФОРМАТОРА В ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ НА ИХ ВЫХОДНУЮ МОЩНОСТЬ

Ю.В. Руденко¹, канд. техн. наук, Т.В. Руденко², канд. техн. наук

1 - Институт электродинамики НАН Украины,

пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина

e-mail: rudenko@ied.org.ua

2 – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»,

пр. Победы, 37, Киев, 03056, Украина

Исследована степень влияния индуктивности рассеяния разделительного трансформатора на передачу энергии в полумостовом инверторе и обратноходовом преобразователе. Используются математические модели преобразователей, позволяющие анализировать параметры установившегося процесса при заданных характеристиках устройства с учетом индуктивности рассеяния, определяющей неидеальность магнитной связи трансформатора и обусловленной высокопотенциальной изоляцией обмоток. Получены аналитические и графические зависимости для определения допустимой величины индуктивности рассеяния, обеспечивающей заданную выходную мощность преобразователей. Библи. 7, рис. 3.

Ключевые слова: полупроводниковые преобразователи, высокопотенциальный трансформатор, индуктивность рассеяния, электронно-лучевые пушки.

Проблема учета индуктивности рассеяния в трансформаторах высокочастотных полупроводниковых преобразователей связана с расширяющимся использованием их в системах электропитания высоковольтного электровакуумного оборудования. В настоящее время высокочастотные полупроводниковые преобразователи применяются в источниках ускоряющего напряжения, системах питания накала, источниках смещения [1, 3, 6]. Особенностью функционирования таких систем питания является то, что их выходные цепи находятся под высоким потенциалом (порядка десятков киловольт) относительно корпуса технологического оборудования. Этот факт требует использования специальной конструкции разделительного трансформатора в преобразователе, которая обеспечит необходимую электрическую изоляцию между первичной и вторичной обмотками трансформатора и соответственно между входными и выходными цепями источника питания. Однако конструкция трансформатора с повышенной электрической изоляцией между обмотками неминуемо ведет к ухудшению магнитной связи между ними вследствие существенных уровней полей рассеяния, что выражается таким продольным паразитным параметром трансформатора, как индуктивность рассеяния. Этот параметр определяет индуктивное сопротивление и работает последовательно с нагрузкой в схеме замещения трансформатора. Чем выше частота преобразования и чем больше индуктивность рассеяния, тем больше влияние индуктивного сопротивления, включенного последовательно с нагрузкой, что, безусловно, влияет на процессы передачи энергии в преобразователе [6]. О проблемах и необходимости учета паразитных параметров трансформатора в связи с повышенными требованиями к изоляции между обмотками указывается также в работах [1, 7]. В связи с этим актуальным является выбор оптимальных параметров узлов преобразователя, позволяющих обеспечить его максимальную эффективность. Этому способствовало бы определение аналитических и графических зависимостей параметров преобразователей от величины индуктивности рассеяния трансформатора. Одним из таких параметров является мощность выходной энергии преобразователя.

Поэтому целью рассматриваемой работы является определение допустимых значений индуктивности рассеяния силового разделительного трансформатора в полупроводниковых преобразователях для обеспечения заданного значения выходной мощности.

Для примера рассмотрим наиболее распространенные типы преобразователей с разделительным трансформатором – полумостовой инвертор (рис. 1 а) и обратноходовой преобразователь (рис. 1 б). Анализ проведем для случая неуправляемых режимов с фиксированной длительностью импульсов управления. Для полумостового инвертора используем режим максимальной длительности, для обратноходового преобразователя – режим с длительностью управления T_H .

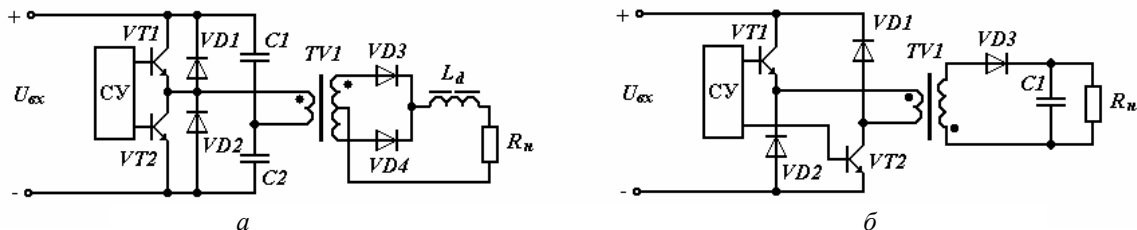


Рис. 1

Для анализа процессов воспользуемся математическими моделями указанных преобразователей, разработанными в работах [4, 5]. Используя данные модели, сделаем пренебрежение активными сопротивлениями обмоток, падением напряжения на транзисторах и диодах в проводящем состоянии. Источник входного напряжения $U_{вх}$ считаем идеальным. Пульсациями напряжения на конденсаторах пренебрегаем, считая их емкость достаточно большой. В эквивалентной схеме замещения трансформатора, приведенном к единичному [2], индуктивность рассеяния L_s отображаем на первичной стороне, используя «обратную» Г-образную эквивалентную схему.

Для полумостового инвертора математическая модель в виде системы нелинейных алгебраических уравнений представляется следующими выражениями [5]:

$$\begin{aligned} L_s \frac{\Delta I_{Ls}}{T_O} &= \frac{U_{вх}}{2}; & L_d \frac{\Delta I_d}{T_O} &= U_H; & K_{ТР} \left(L_d \frac{\Delta I_d}{T_H} + U_H \right) &= \frac{U_{вх}}{2}; \\ \Delta I_{Ls} &= 2 \frac{I_{dav}}{K_{ТР}}; & T_O + T_H &= T/2, \end{aligned} \quad (1)$$

В этой системе введены следующие обозначения: L_s – индуктивность рассеяния трансформатора, приведенная к первичной стороне; ΔI_{Ls} – величина изменения тока индуктивности рассеяния на первичной стороне на интервале T_O отдачи энергии в нагрузку R_n ; ΔI_d – величина изменения тока индуктивности дросселя L_d на интервале T_H накопления энергии из источника входного напряжения; $K_{ТР}$ – коэффициент трансформации; I_{dav} – среднее значение тока дросселя, равное току нагрузки $I_{dav} = I_H$; T – период рабочей частоты преобразователя. В этой модели принято допущение о пренебрежении током намагничивания в схеме замещения трансформатора, а также пренебрежении пульсациями напряжения на нагрузке по сравнению с его средним значением $U_H = R_n I_H$.

Исходя из системы уравнений (1) составим выражения для выходной мощности полумостового инвертора: $P_{вых} = U_H I_H$, где U_H – напряжение на нагрузке. Амплитуда напряжения на выходе выпрямителя VD3, VD4 в приведенном к первичной стороне виде равна $U'_{mr} = U_{вх}/2$, поэтому напряжение на нагрузке имеет следующий вид:

$$U_H = \frac{U_{вх}}{2} K_3 = \frac{U_{вх}}{2} \left(1 - \frac{2T_O}{T} \right).$$

Переходя от схемы замещения к реальному трансформатору, с учетом выражений в системе (1) запишем

$$U_H = \frac{U_{вх}}{2K_{ТР}} \left(1 - \frac{8L_s I_H}{U_{вх} T K_{ТР}} \right).$$

Поэтому выражение для выходной мощности примет вид

$$P_{\text{в\ух}} = \frac{U_{\text{в\ух}} I_{\text{н}}}{2K_{\text{т\p}} \left(1 - \frac{8L_s I_{\text{н}}}{U_{\text{в\ух}} T K_{\text{т\p}}} \right)} \quad (2)$$

На рис. 2 показано семейство графиков зависимости мощности на выходе $P_{\text{в\ух}}$ от тока нагрузки $I_{\text{н}}$ полумостового инвертора, рассчитанные для следующих параметров схемы: $U_{\text{в\ух}} = 300 \text{ В}$, $T = 40 \text{ мкс}$, двух значений коэффициента трансформации силового трансформатора $K_{\text{т\p}}$ и нескольких значений индуктивности рассеяния L_s . Расчет проведен в тех диапазонах параметров, которые характерны при использовании преобразователя в качестве источника накала прямонакальной электронно-лучевой пушки с токами накала до 100...150 А.

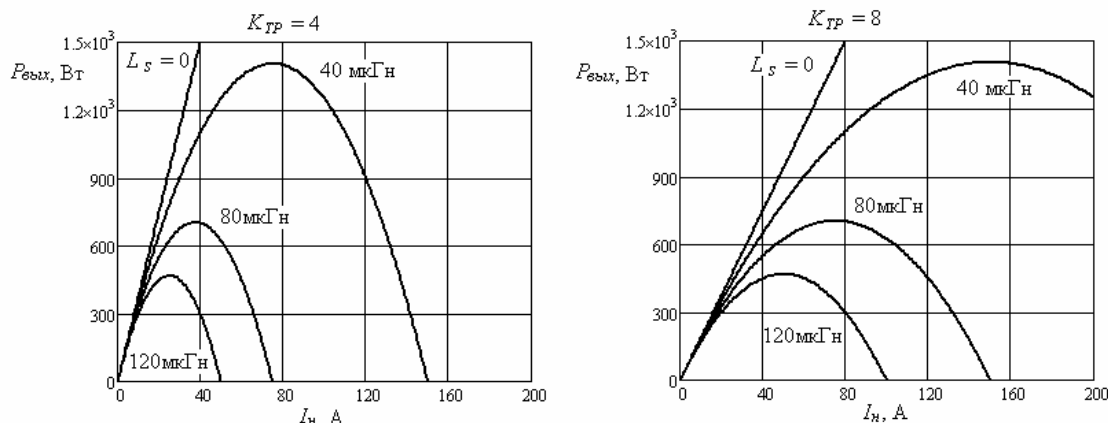


Рис. 2

Графические зависимости показывают, что наличие индуктивности рассеяния существенно снижает способность передачи энергии преобразователем. Особенно это проявляется при больших токах нагрузки, когда мощность на выходе преобразователя резко снижается. Поэтому целесообразно использование рабочего диапазона изменения выходного тока преобразователя на участке от нуля до точки максимума в кривой выходной мощности. Полученные зависимости позволяют выбрать максимально допустимые значения индуктивности рассеяния, при которых можно достичь заданного максимального значения выходной мощности при заданном максимальном токе нагрузки. Однако важную роль в процессе расчета играет коэффициент трансформации. Например, если задан максимальный ток нагрузки $I_{\text{нmax}} = 150 \text{ А}$, максимальная выходная мощность $P_{\text{в\уxmax}} = 1,4 \text{ кВт}$, то достичь заданных значений мощности при максимальном токе с индуктивностью рассеяния 40 мкГн можно только при коэффициенте трансформации, равном восьми (рис. 2). Оценить требуемый коэффициент трансформации и допустимую величину индуктивности рассеяния для обеспечения заданной максимальной мощности $P_{\text{в\уxmax}}$ при заданном максимальном токе нагрузки $I_{\text{нmax}}$

можно, исходя из выражений, полученных из анализа зависимости (2): $L_s \leq \frac{U_{\text{в\ух}}^2 T}{64 P_{\text{в\уxmax}}}$;

$$K_{\text{т\p}} = \frac{U_{\text{в\ух}} I_{\text{нmax}}}{4 P_{\text{в\уxmax}}}$$

Рассмотрим процессы в обратномходовом преобразователе (рис. 1 б) в режиме прерывистого магнитного потока трансформатора. Используем для этого математическую модель, полученную в [4] без учета падения напряжения на диоде VD3 в виде системы нелинейных алгебраических выражений с использованием схемы замещения трансформатора, в которой его индуктивность рассеяния L_s приведена к первичной стороне:

$$\begin{aligned} (L_m + L_s) \frac{I_{m1}}{T_{\text{н}}} &= U_{\text{в\ух}} ; & (L_m + L_s) \frac{I_{m1}}{T_{\text{п}}} - L_m \frac{I_{m2}}{K_{\text{т\p}} T_{\text{п}}} &= U_{\text{в\ух}} ; & \frac{L_m}{T_{\text{п}}} \left(I_{m1} - \frac{I_{m2}}{K_{\text{т\p}}} \right) &= U_{\text{н}} K_{\text{т\п}} ; \\ \frac{L_m I_{m2}}{K_{\text{т\p}} (T_{\text{о}} - T_{\text{п}})} &= U_{\text{н}} K_{\text{т\п}} ; & I_{m2} \frac{T_{\text{о}}}{2T} &= I_{\text{н}} . \end{aligned} \quad (3)$$

В этой системе уравнений обозначено: L_m – индуктивность намагничивания схемы замещения трансформатора; I_{m1} – максимальный ток на первичной стороне трансформатора; I_{m2} – максимальный ток на вторичной стороне трансформатора; T_H – интервал накопления энергии в поле магнитопровода и в поле рассеяния трансформатора; T_P – интервал рекуперации энергии, накопленной в поле рассеяния источника входного напряжения $U_{вх}$ через рекуперационные диоды $VD1$, $VD2$ и частичной передачи энергии из поля магнитопровода в выходной конденсатор $C1$ через диод $VD3$; T_O – суммарный интервал отдачи энергии из поля магнитопровода и поля рассеяния во входной источник и выходную цепь; U_H – напряжение на нагрузке R_H ; T – период рабочей частоты преобразователя; I_H – среднее значение тока нагрузки.

Используя введенные обозначения, можно записать выражения для определения мощности на выходе данного преобразователя:

$$P_{\text{вых}} = U_H I_{m2} \frac{T_O}{2T}. \quad (4)$$

Для более полного описания выражения для мощности (4) требуется определение параметров установившегося процесса: максимальных значений токов I_{m1} , I_{m2} , напряжения U_H , временных интервалов T_P , T_O для заданных величин входного напряжения $U_{вх}$, длительности интервала накопления T_H , периода рабочей частоты T . Указанные параметры установившегося процесса позволяют определить решение системы уравнений (3). Решение данной системы уравнений с помощью пакета *Mathcad* позволило получить численные зависимости входной и выходной мощностей обратноходового преобразователя при изменении тока нагрузки для различных значений индуктивности рассеяния и коэффициента трансформации трансформатора. Зависимости значений выходной мощности $P_{\text{вых}}$ обратноходового преобразователя от тока нагрузки I_H при различных значениях индуктивности рассеяния L_s и коэффициента трансформации K_{TP} представлены на рис. 3 для следующих параметров схемы: $U_{вх} = 300$ В, $T_H = 10$ мкс, $T = 40$ мкс, $L_m = 200$ мкГн. Расчет проведен в диапазоне параметров, которые были использованы при построении накаливого источника для электронно-лучевой пушки с косвенным накалом катода.

Полученные результаты также позволяют определить максимально допустимое значение индуктивности рассеяния, при котором можно достичь заданной максимальной мощности при максимальном заданном токе нагрузки. Однако, если, например, при индуктивности рассеяния 40 мкГн достичь заданной мощности 360 Вт при токе нагрузки 16 А возможно при коэффициенте трансформации 4, то при большем коэффициенте трансформации этого выполнить не удастся (рис. 3). Определить искомые параметры индуктивности рассеяния и коэффициента трансформации позволяет выражение (4) при решении системы (3).

Таким образом, в результате анализа получены аналитические и графические зависимости, позволяющие определить степень влияния индуктивности рассеяния трансформатора на выходную мощность преобразователей. Эти зависимости дают возможность рассчитать

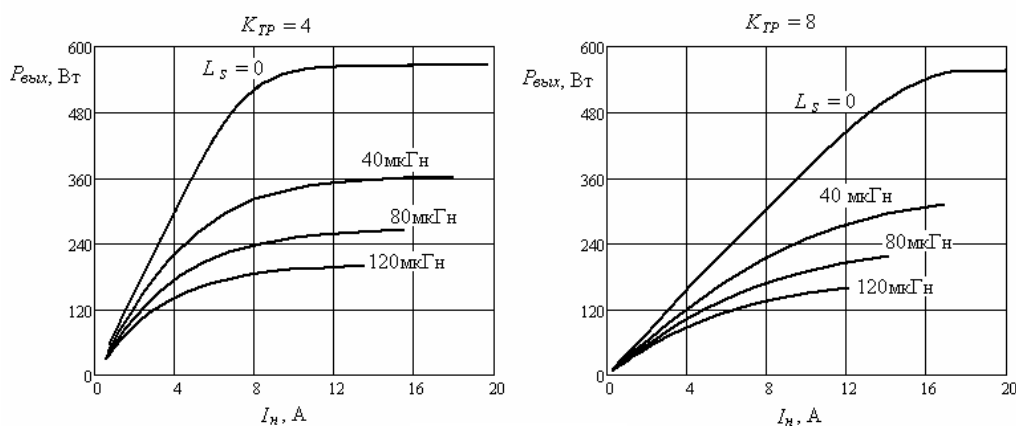


Рис. 3

максимально допустимое значение индуктивности рассеяния обмоток, которое обеспечивает требуемую мощность на выходе рассмотренных схем преобразователей.

1. Владимирова Е.Н., Ланцов В.В., Лебедева О.К. Высоковольтный импульсный источник питания большой мощности с управлением от микропроцессора // Современная электроника. – 2007. – №7. – С. 52–55.
2. Горский А.Н., Русин Ю.С., Иванов Н.Р., Сергеева Л.А. Расчет электромагнитных элементов источников вторичного электропитания. – М.: Радио и связь, 1988. – 176 с.
3. Назаренко О.К. Схемотехника управления током сварочного пучка электронов. – К.: Институт электро-сварки им. Е.О. Патона НАН Украины, 2013. – 56 с.
4. Руденко Ю.В. Анализ процессов в обратноходовом преобразователе с учетом неидеальности трансформатора // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2011. – Вип. 30. – С. 108–116.
5. Руденко Ю.В. Влияние неидеальности трансформатора на процессы в прямоходовом двухтактном преобразователе // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2014. – Вип. 39. – С. 79–82.
6. Чайка Н.К. Блок смещения и питания катода электронно-лучевой сварочной пушки с использованием инверторных преобразователей // Автоматическая сварка. – 2007. – № 7. – С. 50–52.
7. Щербаков А.В. Современные тенденции развития электрооборудования для прецизионной электронно-лучевой сварки и размерной обработки // Электротехника. – 2010. – № 3. – С. 42–48.

УДК 621.314

Ю.В. Руденко¹, канд. техн. наук, **Т.В. Руденко²**, канд. техн. наук

1 – Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна

2 – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,
пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна

Вплив індуктивності розсіяння трансформатора в перетворювачах на їх вихідну потужність

Досліджено ступінь впливу індуктивності розсіяння роздільного трансформатора на передачу енергії в напівмостовому інверторі та зворотноходовому перетворювачі. Використано математичні моделі перетворювачів, що дають змогу аналізувати параметри сталого процесу при заданих характеристиках пристрою з урахуванням індуктивності розсіяння, що визначає неідеальність магнітного зв'язку трансформатора та обумовлено високопотенційною ізоляцією обмоток. Отримано аналітичні та графічні залежності для визначення допустимої величини індуктивності розсіяння, що забезпечує задану вихідну потужність перетворювачів. Бібл. 7, рис. 3.

Ключові слова: напівпровідникові перетворювачі, високопотенційний трансформатор, індуктивність розсіяння, електронно-променеві гармати.

Yu.V. Rudenko¹, T.V. Rudenko²

1 – Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

2 – National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute”,
Peremohy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine

Effect of transformer's leakage inductance in converters on output power

The effect of dividing transformer's leakage inductance is investigated taking into account the effectiveness of power transfer at half-bridge inverter and flyback converter. Mathematical models of converters are applied which allows to analyze the parameters of steady-state process with given characteristics of source taking into account the leakage inductance, which determines the faultiness of transformer's magnetic coupling caused by high potential insulation of winding. The analytic and graphic dependences are obtained for determination of permissible value of leakage inductance which provide for given converter output power. References 7, figures 3.

Key words: semiconductor converters, high potential transformer, leakage inductance, electron-beam guns.

Надійшла 26.05.2015

Received 26.05.2015