

Расчет и конструирование планарного трансформатора для обратноходового преобразователя

М. Савин¹, С. Абрамов, к. т. н.²

УДК 621.316 | ВАК 05.27.01

С увеличением частоты переключений импульсных преобразователей постоянного напряжения все чаще в схемах применяются планарные трансформаторы и индуктивности, методики проектирования которых получили развитие в последнее время. В статье приводится методика расчета планарного трансформатора обратноходового преобразователя, а также пример построения топологии и конструкции планарного трансформатора.

Новые разработки и исследования в силовой электронике направлены на повышение частоты переключений преобразователей, снижение потерь мощности и уменьшение габаритов. Зачастую перед разработчиками стоит задача спроектировать преобразователь большой мощности (порядка 1–2 кВт) с минимальными размерами.

Благодаря повышению частоты преобразователя при одновременном снижении потерь мощности увеличивается удельная мощность преобразователя. При этом в некоторых случаях использование обычных проволочных трансформаторов имеет ряд ограничений. При уменьшении размеров обычных проволочных трансформаторов возможно увеличение потерь мощности из-за поверхностного эффекта (скин-эффекта) и эффекта близости [1]. По этой причине в последние годы все более популярными при проектировании высокочастотных преобразователей становятся планарные трансформаторы.

Планарный трансформатор представляет собой многослойную печатную плату с нанесенными на нее медными дорожками. Слои печатной платы разделены между собой слоями изоляции.

По сравнению с обычными трансформаторами планарный трансформатор имеет следующие преимущества: значительно уменьшенную высоту (низкий профиль); большую площадь поверхности, в результате чего улучшается теплоотдача, уменьшается индуктивность рассеяния; хорошую воспроизводимость, которая обеспечивается структурой обмотки [2]. Современные

технологии изготовления печатных плат позволяют конструировать планарные трансформаторы на мощности вплоть до 2 кВт [3].

Рассмотрим пример конструирования планарного трансформатора для обратноходового преобразователя. Разные варианты компоновки обмоток позволяют частично обеспечить оптимальное соотношение параметров при компромиссных ситуациях без потерь, что играет важную роль в оптимизации планарного трансформатора [3]. Далее рассматриваются преимущества и недостатки четырех типичных вариантов чередования обмоток планарного трансформатора, их трехмерные модели показаны на рис. 1.

Компоновка без чередования (рис. 1а) дает очень высокое сопротивление переменному току и высокую индуктивность рассеяния по сравнению с другими вариантами компоновки [3]. Однако при такой компоновке создается наименьшая паразитная емкость, поскольку имеет только одно пересечение между первичной и вторичной обмотками.

В случае полного чередования П-В-П-В-П-В-П-В (рис. 1б) сопротивление переменному току и индуктивность рассеяния резко снижаются, так как чем меньше отношение электродвижущей силы к количеству слоев, тем более слабый эффект близости в соседних слоях, и тем более низкое сопротивление переменному току. Семь пересечений между первичной и вторичной обмотками приводит к более высокой паразитной емкости, которая почти в 10 раз больше, чем при нечередующейся компоновке [3].

Чередование П-В-В-П-П-В-В-П (рис. 1в) представляет собой другой тип компоновки полного чередования. Отношение электродвижущей силы к количеству слоев, как и в предыдущем случае, равно единице. Если сравнивать с обычным полным чередованием П-В-П-В-П-В-П-В,

¹ ФГУП «МНИИРИП», начальник отдела пассивной электроники и электротехнических изделий.

² ФГБОУ ВО «ЧГУ им. И. Н. Ульянова» (г. Чебоксары), доцент кафедры промышленной электроники.

чередование П-В-П-П-В-П-В-П имеет аналогичное сопротивление переменному току и индуктивность рассеяния, потому что распределения ЭДС при данных чередованиях одинаковые. Примечательно то, что паразитная емкость уменьшается без ухудшения других характеристик (индуктивность рассеяния или сопротивление переменному току), это связано с меньшим числом пересечений (четыре) между первичной и вторичной обмотками [3].

Компоновка 0,5П-В-П-В-П-В-П-В-П-В-0,5П (рис. 1г) представляет собой улучшение полного чередования, в котором верхний слой соединен параллельно с нижним слоем, которые затем соединены последовательно с другими витками первичной обмотки. Таким образом, отношение ЭДС к количеству слоев может быть дополнительно уменьшено. Для такой компоновки характерны не только малые величины сопротивления переменному току и индуктивности рассеяния, но также меньшая паразитная емкость по сравнению с другими вариантами чередования [3].

Исходные данные для проектирования: минимальное входное напряжение $U_{ACmin} = 195$ В; максимальное входное напряжение $U_{ACmax} = 265$ В; частота питающей сети $f_c = 50$ Гц; частота переключений силового транзистора $f_T = 132$ кГц; выходное напряжение $U_{вых} = 5$ В; выходная мощность $P_{вых} = 10$ Вт; КПД источника питания $\eta = 0,85$.

Для расчета параметров трансформатора обратного преобразователя воспользуемся методиками, описанными в [4–6].

Определим максимальную входную мощность:

$$P_{вх.макс} = \frac{P_{вых}}{\eta} = \frac{10}{0,85} = 11,7647 \text{ Вт}.$$

Минимальное входное выпрямленное напряжение определяется по формуле [4]

$$U_{вх.мин} = \sqrt{\left(2U_{ACmin}^2\right) - \frac{2P_{вых}\left(\frac{1}{2f_c} - t_{пр}\right)}{\eta C_{вх}}} = \sqrt{\left(2 \cdot (195)^2\right) - \frac{2 \cdot 10 \left(\frac{1}{2 \cdot 50} - 0,003\right)}{0,85 \cdot 10}} = 275,77 \text{ В},$$

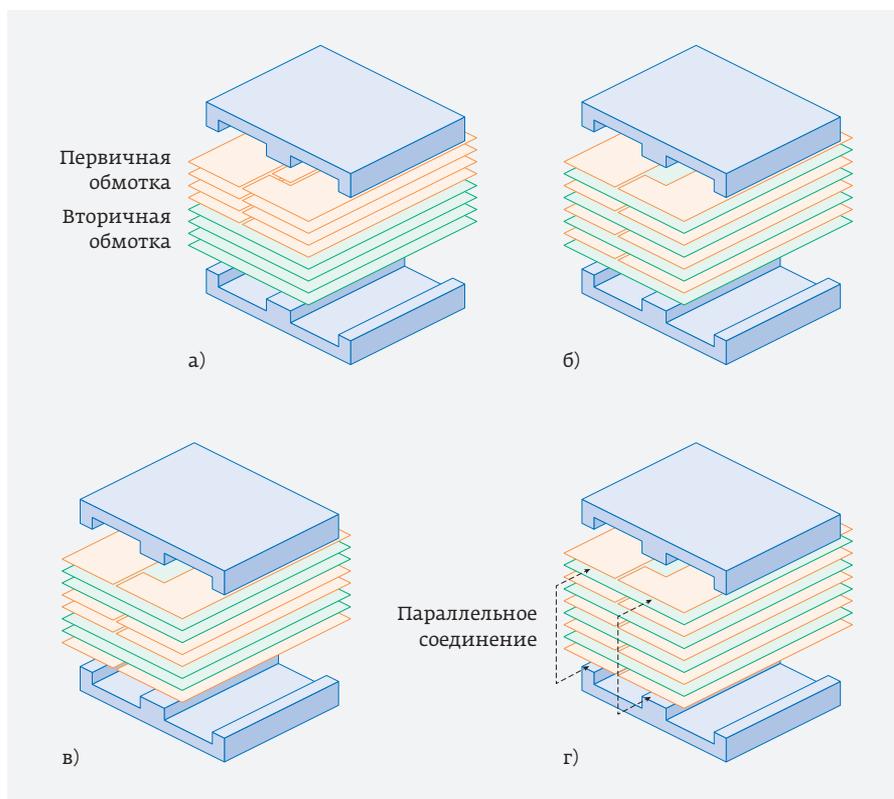


Рис. 1. Трехмерные модели планарного трансформатора: а – без чередования; б – чередование П-В-П-В-П-В-П-В-П-В; в – чередование П-В-В-П-П-В-В-П-П; г – улучшенное чередование 0,5П-В-П-В-П-В-П-В-П-В-0,5П

где $C_{вх} = 10$ мкФ – входная накопительная емкость, определяемая из условия 1 мкФ на единицу мощности $P_{вых}$; $t_{пр} = 3$ мс – время проводимости мостового выпрямителя.

Определим максимальную относительную длительность включенного состояния силового транзистора:

$$\gamma_{max} = \frac{U_{доп}}{U_{доп} + U_{вх.мин} - U_{си}} = \frac{100}{100 + 275,77 - 10} = 0,27,$$

где $U_{доп} = 100$ В – величина, на которую увеличивается напряжение на транзисторе в закрытом состоянии относительно напряжения питания при передаче энергии в нагрузку. При входном напряжении питающей сети 85–264 В дополнительное напряжение находится в диапазоне 60–100 В [5]; $U_{си} = 10$ В – напряжение сток-исток силового транзистора.

Если при расчете получилось, что $\gamma_{max} \geq 0,5$, то $U_{доп}$ необходимо выбрать таким образом, чтобы выполнялось условие $\gamma_{max} \geq 0,5$ [6].

Средний ток диодного моста:

$$I_{cp} = \frac{P_{вых}}{\eta U_{вх.мин}} = \frac{10}{0,85 \cdot 275,77} = 0,043 \text{ А}.$$

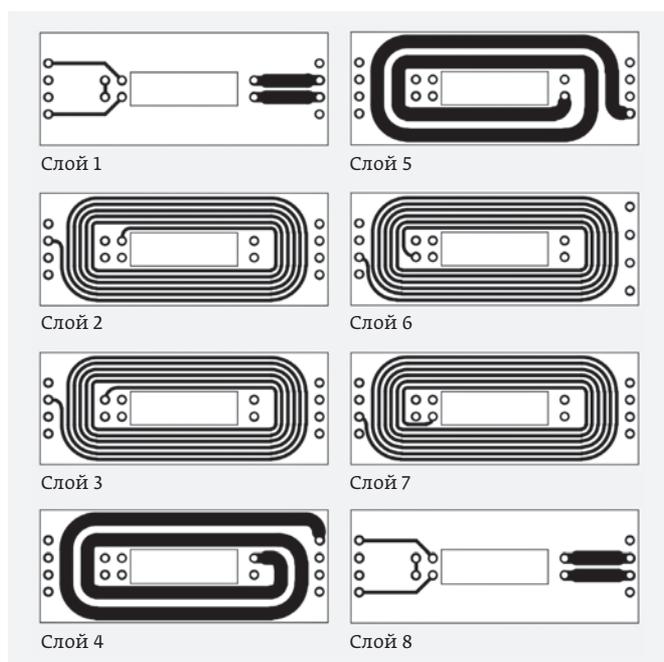


Рис. 2. Послойная топология проектируемого планарного трансформатора

Максимальный ток на первичной стороне трансформатора:

$$I_1 = \frac{I_{\text{ср}}}{(1 - \frac{K_{\text{и}}}{2}) \gamma_{\text{max}}} = \frac{0,043}{(1 - \frac{0,6}{2}) \cdot 0,23} = 0,23 \text{ A},$$

где $K_{\text{и}} = I_{\text{р}} / I_1 = 0,6$ – коэффициент использования, показывающий отношение приращения тока дросселя ΔI_L к максимальному значению.

Номинальная индуктивность первичной обмотки трансформатора:

$$L_1 = \frac{10^6 P_{\text{вых}} K_{\text{п}} (1 - \eta) + \eta}{0,5 I_1^2 f_{\text{т}} \eta} = \frac{10^7}{(0,23)^2 \cdot 0,5 \cdot 132000} \times \frac{0,5(1 - 0,85) + 0,85}{0,85} = 3185,79 \text{ мкГн},$$

где $K_{\text{п}} = 0,5$ – коэффициент распределения потерь. Если $K_{\text{п}} = 1$, то потери преобладают на вторичной стороне. Если $K_{\text{п}} = 0$, то потери на первичной стороне. $K_{\text{п}} = 0,5$ следует выбирать, если справочные данные отсутствуют.

Количество витков первичной обмотки:

$$N_1 = \frac{I_1 L_1}{10^2 B_{\text{М}} A_{\text{е}}} = \frac{0,23 \cdot 3185,79}{100 \cdot 0,25 \cdot 0,783} = 24,$$

где $A_{\text{е}} = 0,783 \text{ см}^2$ – эффективное сечение сердечника; $B_{\text{М}} = 0,25 \text{ Тл}$ – максимальная плотность магнитного потока.

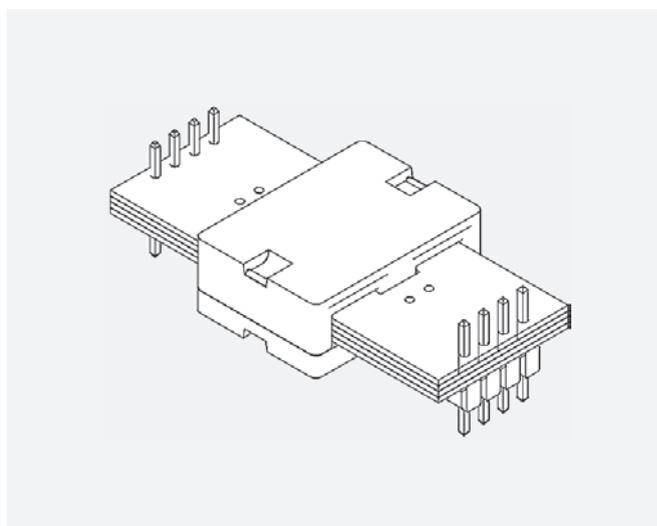


Рис. 3. 3D-модель планарного трансформатора для обратного преобразователя

Количество витков вторичной обмотки:

$$N_2 = N_1 \frac{U_{\text{вых}} + U_{\text{D}}}{U_{\text{доп}}} = 24 \frac{5 + 0,45}{100} = 2.$$

Глубина поверхностного слоя:

$$\delta = 2230 / (f_{\text{т}})^{1/2} = 2230 / (132)^{1/2} = 194,1 \text{ мкм},$$

где $f_{\text{т}}$ – частота переключений, кГц.

Если берется проводник с толщиной w_t меньше, чем $2\delta = 388,2 \text{ мкм}$, вклад скин-эффекта будет ограничен [7]. Примем ширину дорожки первичной обмотки (w_{t1}) равной 0,5 мм, а вторичной обмотки (w_{t2}) равной 2 мм.

Определим расстояние между витками первичной и вторичной обмоток:

$$s_1 = \frac{b_w - 0,8 - w_{t1} N_{l1}}{N_1 - 1} = \frac{5,9 - 0,8 - 0,5 \cdot 6}{6 - 1} = 0,42;$$

$$s_2 = \frac{b_w - 0,8 - w_{t2} N_{l2}}{N_2 - 1} = \frac{5,9 - 0,8 - 2 \cdot 2}{2 - 1} = 1,1,$$

где $N_{l1} = 6$ и $N_{l2} = 2$ – количество витков в одном слое первичной и вторичной обмоток соответственно; $b_w = 5,9 \text{ мм}$ – доступная ширина намотки.

Послойное расположение обмотки планарного трансформатора показано на рис. 2. Конструкция строится таким образом, что первичная обмотка трансформатора, содержащая 24 витка, распределяется на 4 слоя по 6 витков (слои 2, 3, 5, 6). Вторичная обмотка помещается на 1 слой и содержит 2 витка (слой 4).

Конструкция планарного трансформатора (рис. 3) преобразователя представляет собой наглядное изображение проектируемых слоев и включает: электрические



ЕДИНОЕ ОКНО

ФГУП «МНИИРИП»

МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ — ЕДИНОЕ ОТРАСЛЕВОЕ ИНФОРМАЦИОННОЕ ОКНО

- ✓ ДОСТУПНОСТЬ, ПРОЗРАЧНОСТЬ И УДОБСТВО ПОЛУЧЕНИЯ УСЛУГ
- ✓ ОТСЛЕЖИВАНИЕ СТАТУСА ЗАЯВКИ В ОНЛАЙН-РЕЖИМЕ
 - ✓ РЕГЛАМЕНТИРОВАННЫЕ СРОКИ
 - ✓ ЕДИНЫЙ СТАНДАРТ КАЧЕСТВА

ФГУП «МНИИРИП»

Головная научно-исследовательская испытательная
организация Минпромторга России в области ЭКБ

www.mniirip.ru
info@mniirip.ru

Московская область, г. Мытищи, ул. Колпакова, д. 2а

соединения, печатные проводники, переходные и крепежные отверстия, маркировку и прочую информацию, необходимую для удобства проектирования, изготовления и эксплуатации изделия.

С увеличением частоты переключений импульсных преобразователей постоянного напряжения все чаще в схемах применяются планарные трансформаторы и индуктивности, методики проектирования которых получили развитие в последнее время, о чем свидетельствует большое количество публикаций в отечественной и зарубежной литературе.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Терейковский А.** Потери в обмотках вследствие эффекта близости / Пер. статьи Dr. Ray Ridley. – https://mp36c.ru/pdf/library/articles/T_L/Потери_в_обмотках_вследствие_эффекта_близости.pdf
2. **Шихов С.** Планарные трансформаторы на основе многослойных печатных плат // Компоненты и технологии. 2003. № 6. С. 28–34. – https://www.kit-e.ru/assets/files/pdf/2003_06_28.pdf
3. **Ouyang Ziwei, Thomsen Ole Cornelius, Andersen Michael A. E.** Optimal Design and Tradeoffs Analysis for Planar Transformer in High Power DC-DC Converters. – International Power Electronics Conference – ECCE ASIA – IPEC-Sapporo 2010 IEEE.
4. TOPSwitch-GX Flyback Design Methodology Application Note AN-32. – <https://www.power.com/sites/default/files/PDFFiles/an32.pdf>
5. Design Guide for Off-line Fixed Frequency DCM Flyback Converter. – <https://www.mouser.com/pdfdocs/2-8.pdf>
6. BM2P0XX series PWM Buck-Boost converter Technical Design. – https://www.rohm.com/documents/11405/3315897/Applicationnote_BM2P0XX_flyback_iso_revA_EN.pdf
7. **Шихов С.** Проектирование планарных силовых трансформаторов // Компоненты и технологии. 2003. № 7. С. 22–27. – https://www.kit-e.ru/assets/files/pdf/2003_07_22.pdf

ГОТОВИТСЯ К ИЗДАНИЮ



ОСНОВЫ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

А. И. Белоус, С. А. Ефименко, В. А. Солодуха

М.: ТЕХНОСФЕРА,
2019. — ок. 300 с.

Это третье издание всемирно известного «Справочника по радиолокации». В нем нашли отражение новые усовершенствованные технологии радиолокации. Некоторые темы предыдущих изданий справочника, утратившие свою актуальность, были исключены из настоящего издания.

Справочник является результатом усилий как специалистов по общим вопросам, так и экспертов по специальным разделам радиолокации.

Книга будет полезна для инженеров, участвующих в разработке, производстве и эксплуатации радиолокационных систем.

КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

✉ 125319, Москва, а/я 91; ☎ +7 495 234-0110; 📠 +7 495 956-3346; knigi@technosphera.ru, sales@technosphera.ru

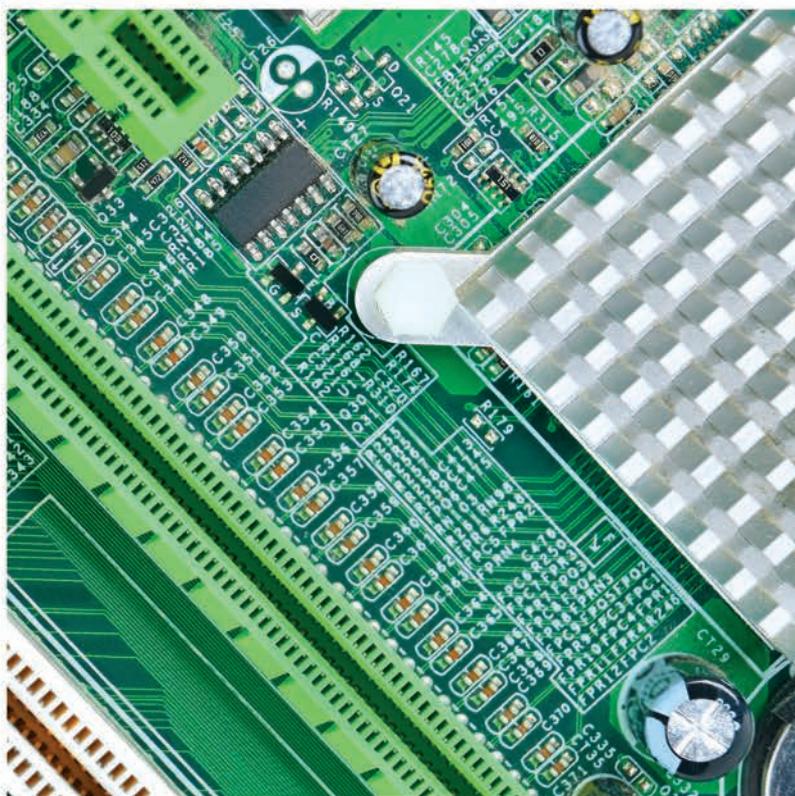


Самая крупная в России
выставка электронных
компонентов, модулей
и комплектующих

Ваш компонент успеха!

14–16 апреля 2020

Москва
МВЦ «Крокус Экспо»



11 674

посетителя
из **36** стран

457

участников
из **17** стран

**Забронируйте
стенд**

expoelectronica.ru

*Совместно с выставкой



Организатор
Группа компаний ITE
+7 (499) 750-08-28
electron@ite-expo.ru