

# ЭФФЕКТ ДВУХКВАДРАНТНОГО ПЕРЕМАГНИЧИВАНИЯ ТРАНСФОРМАТОРА КЛАССИЧЕСКОГО ПРЯМОХОДОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

**Александр Гончаров**, генеральный конструктор, президент группы компаний «Александр Электрик»

В данной работе рассказывается о небольшом открытии, сделанном автором при непосредственной поддержке и помощи Ю.И. Конева, памяти которого эта статья посвящена. Сразу оговорюсь, что понятие научного открытия в данном случае сформировано автором и не претендует на публичный успех. Возможно, что речь идет об известном для кого-то эффекте, однако подробные исследования были сделаны автором самостоятельно и практическая польза получена.

Однотактные прямоходовые преобразователи (ОПП) сегодня являются самыми популярными в технике построения высокочастотных и высокоэффективных стабилизированных конвертеров DC/DC с низковольтными выходными напряжениями.

Классическая схема ОПП приведена на рисунке 1. В его основе лежит транзисторный ключ VT1, переключаемый последовательно прямоугольных импульсов с постоянной частотой и коэффициентом заполнения, являющимся функцией выходного напряжения, а также прямой VD1 и обратный VD2 диоды совместно с накопительным дросселем L1.

В классических работах [1–3], как правило, подробно рассматривается обратногоходовой преобразователь. ОПП повезло значительно меньше. Обычно приводится устаревшая схема с размагничивающей рекуперационной обмоткой и кратко утверждается, что характерным режимом трансформатора ОПП является работа магнитопровода в одном квадранте, по частному гистерезисному циклу. При этом отмечается, что по эффективности использования трансформатор в ОПП значительно уступает двухтактным схемам, где перемагничивание происходит в двух квадрантах с удвоенным размахом индукции.

В 1980-е гг., когда рабочие частоты преобразователей возросли до сотен кГц, повсюду шли споры отечественных ученых о преимуществах и недостатках двухтактных и однотакт-

ных преобразователей. Ю.К. Захаров написал знаменитую статью, посвященную сравнению высокочастотных современных преобразователей двухтактного и однотактного типа [4]. В статье была отмечена важная роль конденсатора, подключаемого к первичной или вторичной обмотке, в перемагничивании сердечника трансформатора.

В настоящее время рабочие частоты достигают 500...700 кГц для ОПП с низковольтной входной сетью 12...24...48 В и 200...300 кГц с высоковольтной входной сетью 175...400 В. В таких случаях размагничивающая обмотка практически не применяется из-за конструктивных неудобств, ее низкой эффективности на высоких частотах и большим уровнем помех, порождаемых обмоткой и рекуперационным диодом. При этом рекуперационная обмотка значительно умень-

шает эффективность (увеличивает потери) трансформатора.

Рассмотрим работу современной классической схемы ОПП без рекуперационной обмотки, широко используемую практически всеми мировыми производителями. Для пояснения сути эффекта не будем загромождать рассмотрение лишними подробностями. Будем считать, что транзистор и диоды переключаются мгновенно, прямые падения напряжения на них равны нулю, дроссель и конденсатор фильтра идеальны и имеют значительную индуктивность и емкость соответственно, и пульсациями выходного напряжения можно пренебречь. Также и источник входного напряжения стабилен и имеет нулевой импеданс.

Ток намагничивания трансформатора T1 обозначим  $I_m$ , а к величине емкости C1 (см. рис. 1) прибавим и паразитные емкости обмоток. Начнем рассмотрение с момента времени  $t_0$  (см. рис. 2), когда происходит выключение силового транзистора VT1 и ток через него мгновенно падает до нуля, а рабочий ток первичной обмотки начинает перезаряжать емкость C1, имеющую начальное напряжение  $E_n$ . Поскольку этот ток достаточно большой, он быстро

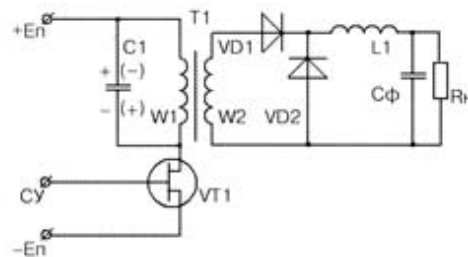


Рис. 1. Классическая схема ОПП

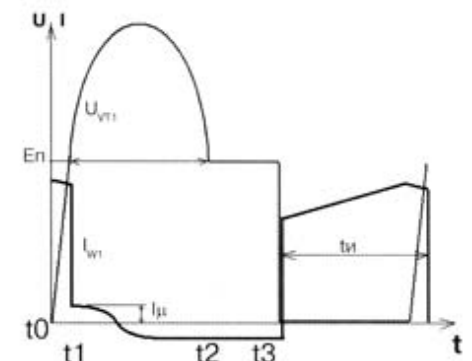


Рис. 2. Временная диаграмма работы ОПП

перезаряжает емкость  $C1$  до напряжения, равного нулю, т.е. на стоке VT1 напряжение становится равным напряжению питания (момент времени  $t1$ ) и далее перезаряжает емкость  $C1$ , формируя на ней напряжение обратной полярности.

Начальным условием для момента времени  $t1$  является ток намагничивания  $I_m$ , протекающий в первичной (в данном примере) обмотке  $W1$ , и продолжает перезаряжать конденсатор  $C1$  до полярности, указанной на рисунке 1 в скобках. Поскольку в современных преобразователях обмотки и конденсаторы являются элементами с малыми потерями, т.е. высокодобротными, параллельный резонансный контур  $L_m C1$  резонирует, формируя колоколообразный синусоидальный выброс на стоке силового транзистора VT1 (см. рис. 2).

Длительность основания данного выброса  $t_{осн} = \pi (L_m C)^{1/2}$ , благодаря высокой добротности резонансного контура фазовый сдвиг тока  $I_m$  через первичную обмотку  $W1$  составляет  $-90^\circ$ . Весь рабочий ток сосредотачивается в выходном дросселе  $L1$ , а в обмотках трансформатора  $T1$  исчезает. Конечно, читатель понимает, что такое возможно только в многообмоточных магнитосвязанных катушках индуктивности. Начиная с этого момента, в трансформаторе  $T1$  начинается свободный переходный процесс, в котором участвуют две, в данном случае, обмотки  $W1$  и  $W2$ , нагруженные только на емкость  $C1$ .

В момент  $t2$  напряжение на вторичной обмотке  $W2$  становится рав-

ным нулю и, пытаясь изменить свою полярность, при помощи выходного дросселя  $L1$ , через который протекает практически постоянный ток, закрывает прямой диод  $VD1$  и открывает обратный диод  $VD2$ . В результате происходит короткое замыкание обмоток трансформатора  $T1$  и от момента времени  $t2$  до момента времени  $t3$  напряжение стока транзистора остается равным напряжению  $E_n$ .

Этот процесс характеризуется почти неизменным током, протекающим в обмотке (обмотках) трансформатора, так как высокая добротность резонансной системы трансформатора предполагает значительную постоянную времени  $\tau = L/r$ .

Далее открывается силовой транзистор VT1 на время  $t4$  и затем процессы циклически повторяются.

Легко заметить, что в момент времени  $t1$  ток намагничивания трансформатора  $T1$  равен  $+I_m$ , а в моменты времени  $t2...t3$  равен  $-I_m$ . Это доказывает, что трансформатор  $T1$  в данных, идеальных условиях, перемагничивается строго симметрично в двух квадрантах аналогично трансформатору двухтактного преобразователя с удвоенным размахом индукции.

В результате этого небольшого открытия удастся на предприятиях группы компаний «Александр Электрик» использовать трансформаторы ОПП практически с полным двойным размахом индукции и ни в чем не проигрывать двухтактным преобразователям на той же частоте.

Насколько нам известно, об этом эффекте знают Лукин А.В. и Ненахов С.М., автор будет призна-

телен, если о данном эффекте ему напишут любые заинтересованные исследователи.

Подробно материалы данной статьи были доложены автором на кафедре 306 МАИ на семинаре под руководством Ю.И. Конева, посвященном результатам исследований резонансных свойств схемы ОПП с дополнительным конденсатором и ключом (так называемой схеме А.Г. Поликарпова), в 1997 г., опубликованы в [5, 6].

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Моис В.С., Лантев Н.Н. Стабилизированные транзисторные преобразователи. 1972;
2. Поликарпов А.Г., Серзиев Е.Ф. Однотактные преобразователи напряжения в устройствах электропитания РЭА. 1989;
3. Ромаш Э.М., Драбович Ю.И., Юрченко Н.Н., Шевченко П.Н. высокочастотные транзисторные преобразователи. 1988;
4. Захаров Ю.К. Сравнительный анализ двухтактного и однотактного стабилизированных преобразователей постоянного напряжения. Электронная техника в автоматике. Сб. Статей под ред. Ю.И. Конева. Вып. 11. 1980;
5. Гончаров А.Ю. Однотактные преобразователи напряжения с резонансным переключением. Сб. «Электропитание» под ред. Ю.И. Конева. вып. 2. 1993;
6. Гончаров А.Ю. Начальная школа построения импульсных DC-DC преобразователей. Первый – пятый классы. Журнал «Электронные компоненты», №№6, 7 – 2002, №№ 1, 5, 6 – 2003.

## Приглашение к сотрудничеству

>> Предлагаем вниманию потенциальных авторов следующие темы для статей

**ЭК 7** Тематический выпуск «МК и DSP». В этом выпуске мы планируем рассказать о новых микросхемах, а также разместить материалы об использовании МК и DSP в различных приложениях. Нас интересуют статьи со сравнительным анализом специализированных процессоров, предназначенных для сравнительно узких областей применения, например, МК для силовой электроники. Тематический выпуск «Источники питания» будет посвящен как функционально и конструктивно законченным модулям и блокам, так и применяемым в этих изделиях микросхемам. На этот раз мы планируем расширить выпуск за счет публикации статей о мощных преобразователях.

**ЭК 8** В тематическом выпуске «Дискретные силовые компоненты» мы хотим рассказать о полупроводниковых компонентах и сборках, применяемых для построения изделий силовой электроники. Ждем от наших читателей обзорно-аналитические статьи со сравнительным анализом силовых компонентов различных компаний.

В тематическом выпуске «Широкополосная беспроводная связь» помимо материалов, рассказывающих о решениях и законченных системах, нам хотелось бы видеть статью, посвященную различным стандартам в этой области, а также обзор новых решений, появившихся за последний год.

**ЭК 9** Тематический выпуск «Аналоговые компоненты», наверное, не нуждается в представлении. Мы лишь хотим подчеркнуть, что ожидаем не столько материалы, рассказывающие о конкретных компонентах той или иной компании, а, скорее, сравнительные статьи по различным группам продукции.

В выпуске «Пассивные компоненты» мы хотим рассказать о резисторах, конденсаторах, дросселях, трансформаторах, устройствах защиты электрических цепей и других необходимых элементах, без которых невозможно ни одно изделие электронной техники. В этой части журнала нам хотелось бы предоставить читателю как можно больше информации о новых компонентах и особенностях их применения.

Дополнительно сообщаем, что вы можете приобрести компакт-диск с электронной копией журналов «Электронные компоненты» за 2004–2005 гг. и за 2006 г., позвонив в отдел распространения нашего издательства по тел. (495) 741-7701.