

# Особенности работы индуктивных элементов в одноктных преобразователях

С. КОСЕНКО, г. Воронеж

**Магнитопровод индуктивного элемента (трансформатора или дросселя) одноктного преобразователя работает в специфическом режиме импульсного однополярного намагничивания, что необходимо учитывать при проектировании этого элемента и преобразователя в целом. В статье подробно рассмотрены физические процессы этого режима, влияние насыщения магнитопровода на характеристики индуктивного элемента, сформулированы практические рекомендации по его испытанию и измерению параметров.**

Трансформаторы и дроссели — необходимые элементы всех импульсных источников питания, в том числе одноктных, для которых характерно, что период генерации  $T = t_{ON} + t_{OFF}$  — сумма интервалов времени, соответствующих открытому и закрытому состоянию единственного коммутатора. Одноктные преобразователи можно разделить на три класса, упрощенные схемы которых показаны на рис. 1: прямоходовые преобразователи (ПХП, рис. 1,а), обратныхходовые преобразователи (ОХП, рис. 1,б), импульсные понижающие стабилизаторы напряжения (ИПС, рис. 1,в).

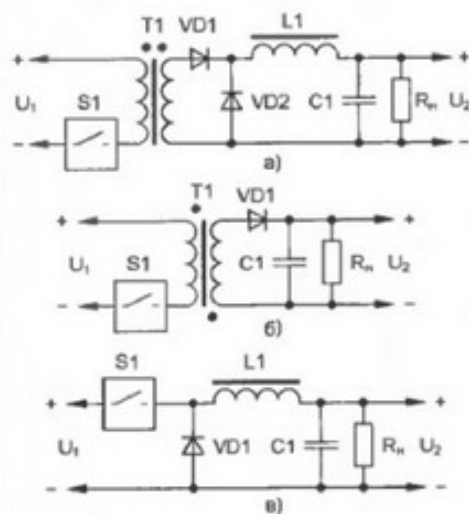


Рис. 1

В прямоходовом преобразователе (рис. 1,а) в интервале  $t_{ON}$  коммутатор S1 замкнут, поэтому энергия источника напряжения  $U_1$  передается через трансформатор T1 и элементы VD1, L1 в нагрузку  $R_n$ . Ток, потребляемый первичной обмоткой трансформатора T1, содержит прямоугольную составляющую, вызванную передачей энергии в нагрузку, и треугольную составляющую, связанную с намагничиванием материала магнитопровода, подробно описанную в [1]. В интервале  $t_{OFF}$  коммутатор S1 разомкнут, диод VD1 закрыт, а VD2 — открыт. Ток в нагрузке поддерживается энергией, накопленной в дросселе L1 и конденсаторе C1.

Основной недостаток ПХП — возможность повреждения коммутатора

большим током при замыкании в нагрузке. Другой недостаток ПХП — усложнение схемы, вызванное необходимостью утилизации энергии, накопленной магнитопроводом.

ОХП и ИПС не имеют этих недостатков, поскольку процессы накопления энергии в интервале  $t_{ON}$  и ее передачи в нагрузку в интервале  $t_{OFF}$  четко разделены. Поэтому процессы намагничивания материала магнитопровода, рассматриваемые в этой статье, и рекомендации по использованию индуктивных элементов идентичны для обоих классов этих устройств. Другие вопросы проектирования ОХП подробно опи-

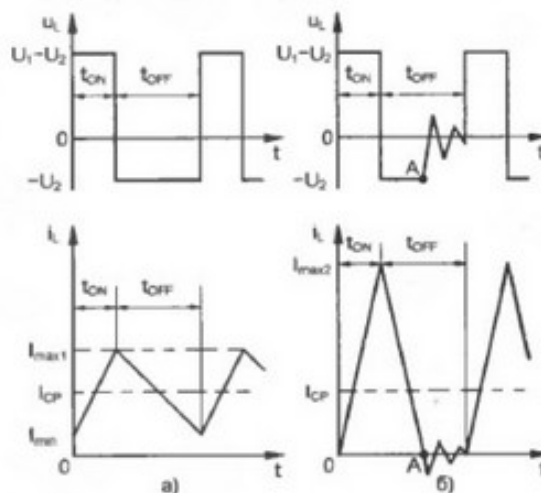


Рис. 2

саны в журнале, в частности в статье [2]. Подробный расчет ИПС опубликован в [3], а простая схема ИПС отрицательной полярности напряжения — в [4].

Вначале рассмотрим диаграммы напряжения и тока в дросселе ИПС, показанные на рис. 2. В зависимости от индуктивности дросселя L1 при одной и той же выходной мощности и частоте преобразования  $f = 1/T$  могут быть реализованы два режима работы: с непрерывным током (рис. 2,а) и прерывистым (рис. 2,б). Напряжение показано на левом по схеме (рис. 1,в) выводе дросселя L1 относительно его правого вывода. В режиме непрерывного тока в интервале  $t_{ON}$  коммутатор S1 замкнут, диод VD1 закрыт, напряжение на дросселе равно  $U_1 - U_2$ , а ток через него нарастает от ми-

нимального значения  $I_{min} > 0$  до некоторого максимального  $I_{max1}$ , при этом магнитопровод запасает энергию. В интервале  $t_{OFF}$  коммутатор S1 разомкнут, диод VD1 открыт, напряжение на дросселе равно напряжению на нагрузке, а ток через дроссель линейно уменьшается до прежнего значения  $I_{min}$ .

В режиме прерывистого тока (рис. 2,б) энергия, запасенная в магнитопроводе дросселя, заканчивается раньше окончания интервала  $t_{OFF}$ . В этот момент, который отмечен на рис. 2,б точкой А, ток в дросселе становится равным нулю, и возникают свободные затухающие колебания напряжения и тока. Это обстоятельство, а также показанное на рисунке значительное увеличение  $I_{max2} > I_{max1}$  при одном и том же среднем значении тока в обмотке  $I_{cp}$ , свидетельствуют о резком увеличении пульсаций тока и, соответственно, напряжения в выходных цепях преобразователей, что ухудшает технические показатели такого режима.

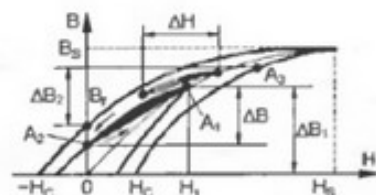


Рис. 3

ОХП и ИПС с фиксированной частотой преобразования, рассчитанные на режим непрерывного тока, переходят в режим прерывистого тока, когда нагрузка потребляет ток в несколько раз меньше номинального. Но в этом случае амплитуда тока недостаточна для насыщения магнитопровода, поэтому недостатки режима прерывистого тока не имеют существенного значения.

Интересно отметить, что форма напряжения на коммутаторе S1 для ОХП и ИПС одинакова, причем аналогичны даже затухающие колебания в режиме прерывистого тока в интервале  $t_{OFF}$ . Единственное отличие — в ОХП нарастание тока в первичной обмотке трансформатора в интервале  $t_{ON}$  происходит под воздействием напряжения  $U_1$ , а в ИПС — под воздействием разности напряжений  $(U_1 - U_2)$ . Максимальная амплитуда асимптотических колебаний в ИПС равна  $U_2$  (рис. 2,б), а в ОХП — наведенному в первичную обмотку напряжению  $U_2$  с учетом коэффициента трансформации. Полная аналогия ОХП и ИПС справедлива и по отношению к диаграммам тока и создаваемой током обмотки напряженности магнитного поля в магнитопроводе дросселя (трансформатора). Конечно, в трансформаторе ОХП напряженность поля создается как первичной, так и вторичными обмотками, если их несколько. Физически же процессы намагничивания магнитопровода протекают идентично, поскольку и в ОХП, и в ИПС на отрезке времени  $t_{ON}$  происходит накопление энергии в магнито-

провода, а  $t_{off}$  — ее передача в нагрузку.

В общем виде процессы намагничивания феррита, влияние насыщения на изменение индуктивности обмотки рассмотрены в [1]. Но для ОХП и ИПС характерно однополярное намагничивание, требующее отдельного рассмотрения (рис. 3). По оси абсцисс здесь отложена напряженность магнитного поля  $H$ , создаваемого первичной и вторичными обмотками, по оси ординат — магнитная индукция  $B$  в магнитопроводе. На рис. 3 показана верхняя половина предельной петли гистерезиса и ее характерные точки: насыщение ( $H_s$ ,  $B_s$ ), остаточная магнитная индукция  $B_r$ , коэрцитивная сила  $\pm H_c$ .

Намагничивание первым импульсом тока, создающим магнитное поле с напряженностью  $H_1$ , происходит по кривой  $OA_1$ , в результате чего магнитная индукция выйдет в точку  $A_1$ , увеличившись при этом на  $\Delta B_1$ . По завершении импульса размагничивание магнитопровода пойдет по частной петле  $A_1A_2$  (верхней границе области со сплошной заливкой) в направлении, указанном стрелкой, и индукция снизится на  $\Delta B$ , достигнув точки  $A_2$ . При следующем и всех остальных импульсах, создающих напряженность поля  $H_1$ , намагничивание будет происходить по нижней границе области со сплошной заливкой, снова достигая точки  $A_1$ , а размагничивание — по уже пройденному пути  $A_1A_2$ . Потери на намагничивание и размагничивание магнитопровода при этом будут характеризоваться площадью фигуры со сплошной заливкой. Подобное пояснение происходящих процессов в магнитопроводах с одноконтурным режимом работы можно найти в [5]. Но некоторые другие авторы ошибочно утверждают, что поскольку с каждым импульсом магнитная индукция будет увеличиваться на  $\Delta B_2$ , намагничивание и размагничивание магнитопровода всегда будут происходить по точкам на правой и левой (верхней и нижней) ветвях основной петли намагничивания, и в конечном итоге рабочая траектория намагничивания займет положение, обозначенное точками  $B, A_2$  на рис. 3, забывая при этом о том, что на основную петлю намагничивания можно выйти только после магнитного насыщения магнитопровода.

Все приведенные выше рассуждения относятся к работе дросселя с прерывистым током в обмотке. В случае непрерывного тока намагничивание и размагничивание дросселя будут проходить по заштрихованной области, показанной на рис. 3 интервалом изменения напряженности магнитного поля  $\Delta H$ .

Для однополярного намагничивания важно наличие немагнитного зазора в замкнутом магнитопроводе [5]. Он уменьшает остаточную магнитную индукцию  $B_r$ , в результате чего через обмотку дросселя можно пропускать гораздо больший ток без насыщения. Но все-таки с возрастанием тока через

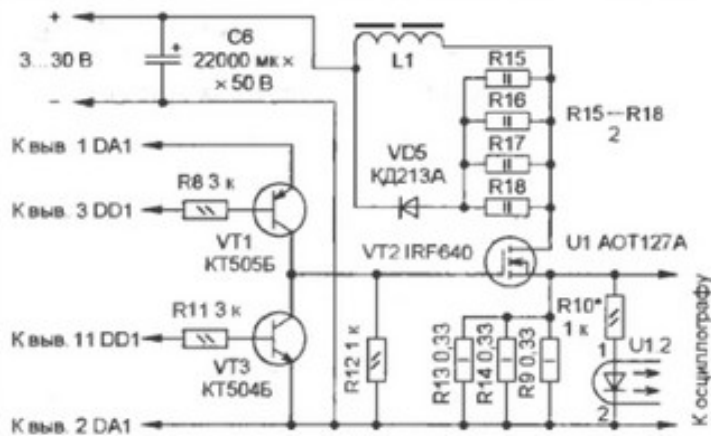


Рис. 4

обмотку растет и напряженность магнитного поля в магнитопроводе, а угол наклона касательной к петле намагничивания уменьшается. Индуктивность обмотки уменьшается и, наконец, достигает того значения, которое соответствует отсутствию феррита, который, таким образом, "теряет" свои магнитные свойства.

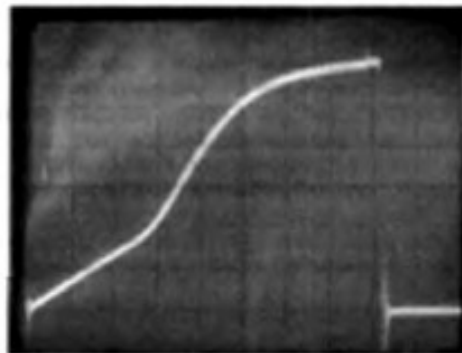


Рис. 5

Это можно наблюдать экспериментально, используя прибор, описанный в [6]. В качестве исследуемого магнитопровода выбран Ш5×5 из феррита 2000НМ1. Для обмотки в 29 витков провода ПЭВ-2 0,9 с немагнитным зазором 0,4 мм (по 0,2 мм на боковых стержнях) начальная индуктивность дросселя равна 90 мкГн.

Прибор хорошо зарекомендовал себя при испытании ОХП и дросселей с малой энергоемкостью. Для оценки параметров дросселей с большой энергоемкостью (с максимальным рабочим током более 1 А) в прибор пришлось внести изменения, показанные на рис. 4 и описанные ниже. Нумерация элементов на схеме продолжает нумерацию рис. 1 в [6]; L1 — дроссель, подвергаемый испытаниям.

Вначале было разорвано соединение выходов элементов DD1.3 и DD1.4 (выводы 3 и 11). Для удлинения измерительного интервала увеличена емкость конденсатора C4 до 0,015 мкФ, вследствие чего частота коммутирующих импульсов уменьшилась примерно до 1 кГц, а их длительность возросла до 170 мкс. Это, в свою очередь, вынудило отказаться от маломощного трансформатора T1, который входил в насыщение в середине удлиненного импульса. Для испытаний дросселя использовано

напряжение до 30 В, поэтому нет необходимости его гальванической развязки от источника питания прибора. Вместо трансформатора введен усилитель тока коммутации полевого транзистора на двух комплементарных биполярных транзисторах (к ранее имевшемуся транзистору VT1 добавлен транзистор VT3). Транзистор VT2 IRF640 заменен более мощным IRF640. Параллельно датчику тока — резистору R9 — подключены два аналогичных резистора R13 и R14. Емкость конденсатора C1 в цепи питания прибора увеличена до 470 мкФ.

Энергия, запасаемая за время коммутирующего импульса в мощном дросселе (максимальный ток до 17 А), так велика, что уже не успевает рассеиваться во время паузы, поэтому диод VD5 дополнен нагрузкой, составленной из четырех резисторов R15—R18. Диод VD5 установлен без теплоотвода. На рис. 3 в [6] его позиционное обозначение — VD1. Стабилитрон VD2, показанный на том же рисунке, не использован, так как в нем отпала необходимость.

Используемый для испытания мощных дросселей регулируемый источник питания должен обеспечивать постоянный ток нагрузки до 10 А. Дополнительно к его выходу необходимо подключить оксидный конденсатор C6 емкостью не менее 10000 мкФ, увеличивающий импульсный ток нагрузки. Автор применил конденсатор К50-18 емкостью 22000 мкФ на номинальное напряжение 50 В.

В ходе эксперимента при испытательном напряжении 4 В снята осциллограмма, показанная на рис. 5. Цена одного деления по горизонтали — 20 мкс, по вертикали — 1 А. На осциллограмме различимы три характерных участка. Начало (0...55 мкс) — линейное намагничивание, приращение тока примерно 2 А. Этот участок соответствует максимальной магнитной проницаемости магнитопровода и, соответственно, максимальной индуктивности дросселя. Середина (55...100 мкс) — приближение к магнитному насыщению, уменьшение индуктивности, приращение тока около 3 А. Индуктивность дросселя стала меньше. Конечный участок (100...170 мкс) — насыщение, приращение тока 1 А. На плоском участке ток достиг 6 А и больше уже не возрастал. Ток ограничен сопротивлением резисторов R9, R13—R18, обмотки дросселя и канала полевого транзистора.

Моменту окончания линейного намагничивания магнитопровода соответствовал ток 1,9 А. Но при необходимости ток обмотки может быть выбран гораздо больше — вплоть до 5 А (до магнитного насыщения), хотя температура дросселя при этом будет выше, чем при линейном намагничивании, из-за значительно возросших потерь в магнитопроводе.

Для других магнитопроводов с зазором характер изменения тока в обмотке будет аналогичным, что позволяет

сформулировать важную рекомендацию: испытание сконструированного преобразователя нужно проводить вначале на половинной мощности, контролируя форму тока в обмотке индуктивного элемента. Плавное увеличение нагрузки, с помощью осциллографа наблюдают изменение формы сигнала с датчика тока. При максимальной нагрузке рабочий режим преобразователя не должен выходить за пределы участка линейного намагничивания — на осциллограмме тока должен отсутствовать характерный излом. В противном случае лучше всего использовать магнитопровод большего типоразмера.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Косенко С.** Расчет импульсного трансформатора двухтактного преобразователя. — Радио, 2005, № 4, с. 35—37, 44.
2. **Косенко С.** Эволюция обратноходовых импульсных ИП. — Радио, 2002, № 6, с. 43, 44; № 7, с. 47, 48; № 8, с. 32—35; № 9, с. 24—26.
3. **Семенов Ю.** Импульсные понижающие стабилизаторы. — Радио, 2002, № 5, с. 41—46; № 6, с. 45, 46.
4. **Компаненко Л.** Синхронизируемый импульсный стабилизатор напряжения. — Радио, 2004, № 11, с. 32.
5. **Володин В.** Инверторный источник сварочного тока. Опыт ремонта и расчет электромагнитных элементов. — Радио, 2003, № 9, с. 32—34.
6. **Косенко С.** Универсальный прибор для проверки ИП. — Радио, 2003, № 8, с. 38—41.