

Способ контроля

одностороннего подмагничивания трансформатора преобразователя

Трансформатор — это необходимый атрибут различных импульсных преобразователей, он служит для гальванической развязки и согласования нагрузки. В свою очередь преобразователи разделяются на одно- и двухтактные.

Валентин Володин

Выходной ток однотактного преобразователя, кроме переменной составляющей, содержит значительную постоянную составляющую, которая вызывает магнитный поток подмагничивания в сердечнике трансформатора.

В двухтактных преобразователях магнитный материал сердечника трансформатора поочередно перемагничивается в противоположных направлениях разнополярными импульсами выходного тока преобразователя. При этом постоянная составляющая в выходном токе преобразователя нежелательна, так как может вызвать одностороннее подмагничивание и даже насыщение магнитного материала сердечника трансформатора. Однако практически невозможно создать преобразователь, способный обеспечить абсолютную симметричность процесса перемагничивания сердечника. Это объясняется заведомой неидентичностью элементов силовой схемы преобразователя. Даже если обеспечить абсолютно равные по длительности противофазные импульсы управления транзисторами преобразователя, то транзисторы одного типа имеют разное сопротивление в открытом и закрытом состояниях, различные времена запаздывания, а также длительность фронтов нарастания и спада тока. Это приводит к тому, что к первичной обмотке трансформатора в различные периоды перемагничивания прикладываются импульсы напряжения, имеющие различную амплитуду и длительность. Кроме этого, транзисторы преобразователя зачастую находятся в заведомо разных температурных условиях, обусловленных неоднородным креплением и охлаждением. Все эти перечисленные и неперечисленные причины при комплексном воздействии могут вызвать одностороннее насыщение сердечника трансформатора, что в свою очередь может привести к снижению эффективности преобразователя, сбоям в его работе и повреждению ключевых транзисторов.

Актуальность проблемы одностороннего подмагничивания увеличивается с повышением рабочей частоты преобразования, так как составляющая подмагничивающего тока, обусловленная различиями параметров переключения транзисторов, растет пропорционально частоте. Подмагничивание сердечника трансформатора наиболее характерно для мостовых преобразователей и для преобразователей, выполненных на трансформаторе со средней точкой. Для полумостовых преобразователей, в установленном режиме, постоянная составляющая в первичной обмотке трансформатора отсутствует, так как последовательно с ней включен конденсатор. Однако трансформатор полумостового преобразователя может на-

сыщаться в момент запуска, а также при резком изменении тока нагрузки. Таким образом, абсолютно все топологии двухтактных преобразователей можно считать незащищенными от одностороннего подмагничивания трансформатора.

Чтобы избежать одностороннего насыщения, нужно уменьшить максимальную индукцию в сердечнике на величину индукции подмагничивания или скомпенсировать напряженность подмагничивания путем введения немагнитного зазора в сердечник. Индукцию подмагничивания можно определить расчетным путем или моделируя работу преобразователя в Spice-симуляторе.

Ранее в периодической литературе [1] уже был проанализирован процесс подмагничивания сердечника трансформатора двухтактного преобразователя, имеющего на выходе выпрямитель с удвоением тока. Рассмотрим более распространенный вариант — двухтактный преобразователь с LC выходным фильтром. В этом случае, благодаря непрерывности тока дросселя, практически исключается несимметрия тока вторичной обмотки трансформатора. Следовательно, основным источником несимметрии остается разброс параметров ключевых транзисторов преобразователя. Такими параметрами являются:

$V_{ce(on)}$ — падение напряжения на открытом биполярном (BJT) или IGBT-транзисторе;

$R_{ds(on)}$ — сопротивление канала открытого MOSFET-транзистора;

$t_{d(on)}$ — задержка включения;

$t_{d(off)}$ — задержка выключения;

t_r — время нарастания напряжения;

t_f — время спада напряжения.

На рис. 1 изображена эквивалентная схема, используемая для расчета тока подмагничивания.

Здесь изображен контур подмагничивания, содержащий постоянное напряжение смещения V_{CM} , сопротивление подмагничивания R_{Π} и первичную обмотку трансформатора W_{TP} . Напряжение смещения V_{CM} вызывается неидентичностью параметров ключевых транзисторов преобразователя. Сопротивление подмагничивания R_{Π} является суммарным сопротивлением, ограничивающим ток в контуре подмагничивания, и включает в себя сопротивление первичной обмотки трансформатора W_T , внутреннее сопротивление источника питания и сопротивление соединительных проводов. Данная эквивалентная схема создана на основе предположения, что все компоненты силовой схемы, кроме ключевых транзисторов, абсолютно симметричны.

Составляющая тока подмагничивания, вызываемая различием падения напряжения на открытых

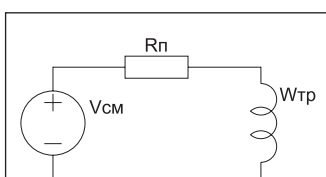


Рис. 1. Эквивалентная схема, используемая для расчета тока подмагничивания

транзисторах преобразователя, прямо пропорциональна заполнению периода и при максимальном заполнении равна:

$$I_{п.в} = \frac{V_{CM.V}}{R_{п}} = \frac{0,5 \times (V_{ce(он)max} - V_{ce(он)min})}{R_{п}}$$

Составляющая тока подмагничивания, вызываемая разбросом времени задержки включения и выключения транзисторов преобразователя, прямо пропорциональна напряжению питания $V_{ИП}$ преобразователя и частоте преобразования F :

$$I_{п.д} = \frac{V_{CM.D}}{R_{п}} = \frac{V_{ИП} \times (td_{(он)max} - td_{(он)min} + td_{(off)max} - td_{(off)min}) \times F}{R_{п}}$$

Составляющая тока подмагничивания, вызываемая разбросом времени нарастания и спада напряжения транзисторов преобразователя, также прямо пропорциональна напряжению питания $V_{ИП}$ преобразователя и частоте преобразования F :

$$I_{п.рф} = \frac{V_{CM.RF}}{R_{п}} = \frac{0,5 \times V_{ИП} (tr_{max} - tr_{min} + tf_{max} - tf_{min}) \times F}{R_{п}}$$

При расчетах следует учитывать наихудший вариант, когда все составляющие тока подмагничивания суммируются.

Например, популярные IGBT типа IRG4PC50U имеют следующие параметры:

$$\begin{aligned} V_{ce(он)max} &= 2 \text{ В}; V_{ce(он)min} = 1,65 \text{ В}; \\ td_{(off)max} &= 260 \text{ нс}; td_{(off)min} = 170 \text{ нс}; \\ tf_{max} &= 130 \text{ нс}; tf_{min} = 88 \text{ нс}. \end{aligned}$$

Эти транзисторы, установленные без предварительного подбора в преобразователь, работающий на частоте 30 кГц и имеющий сопротивление в контуре подмагничивания $R_{п} = 0,1 \text{ Ом}$, могут спровоцировать подмагничивающий ток величиной более 10 А.

Как уже говорилось, для устранения подмагничивания трансформатора можно уменьшить максимальную индукцию в его сердечнике на величину индукции подмагничивания или ввести немагнитный зазор, позволяющий компенсировать напряженность подмагничивания. Однако такие меры борьбы с подмагничиванием далеки от идеальных. Во-первых, они не позволяют учитывать все факторы, вызывающие подмагничивание, а во-вторых, приводят к росту габаритов и стоимости трансформатора или к увеличению потерь на ключевых транзисторах преобразователя, обусловленных необходимостью коммутировать больший по величине намагничивающий ток. Поэтому на практике все чаще применяются способы автоматической компенсации подмагничивания. Несмотря на то, что эти способы имеют различную схемотехническую реализацию, все они предусматривают использование датчика намагничивания (ДН) сердечника трансформатора, сигнал которого необходим для организации симметричного режима перемагничивания трансформатора,

путем изменения длительности импульсов управления ключевыми транзисторами преобразователя. В свою очередь, ДН имеют разнообразное исполнение.

В качестве простейших ДН можно использовать трансформаторы тока и резистивные шунты, включенные последовательно с ключевыми транзисторами, обмоткой трансформатора или в общие цепи питания преобразователя. В этом случае насыщение сердечника обнаруживается по величине или скорости нарастания тока. Так как подобные датчики контролируют полный ток нагрузки преобразователя, состоящий из тока нагрузки и тока намагничивания трансформатора, то они зачастую не способны обеспечить корректную работу во всех возможных режимах.

Для обнаружения насыщения трансформатора используют способ, давно применяемый в электротехнике для контроля исправности трансформатора. Этот способ называется дифференциальной защитой трансформатора и состоит в том, что с помощью специального многообмоточного трансформатора тока из тока его первичной обмотки вычитаются токи нагрузки вторичных обмоток. В результате удается получить сигнал, пропорциональный току намагничивания трансформатора, и использовать его для устранения подмагничивания [2].

Также заслуживают внимания методы прямого контроля намагниченности сердечника трансформатора при помощи магнитодиодов, магниторезисторов или датчиков Холла. Существуют способы контроля насыщения при помощи пьезодатчиков, установленных на магнитопроводе трансформатора. В этом случае воспринимаются акустические сигналы, связанные с магнитострикцией сердечника, возникающей при его насыщении.

Особое место занимают ДН, контролирующие магнитное поле, вытесняемое из сердечника при его насыщении. Происходит это потому, что при насыщении сердечника его магнитная проводимость падает. Как следствие, возрастает напряженность магнитного поля вдоль сердечника, что приводит к увеличению магнитного потока в его окрестностях. Именно этот поток можно контролировать при помощи внешней катушки, в качестве которой используется магнитный пояс Роговского. Конструктивно магнитный пояс выглядит как плоская катушка, плотно прижатая к сердечнику (рис. 2). Классический магнитный пояс Роговского не имеет магнитного сердечника,

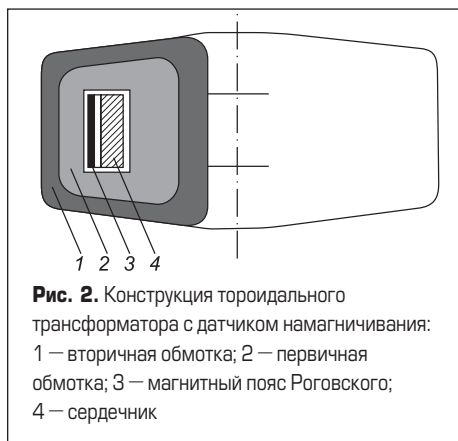


Рис. 2. Конструкция тороидального трансформатора с датчиком намагничивания: 1 — вторичная обмотка; 2 — первичная обмотка; 3 — магнитный пояс Роговского; 4 — сердечник

но в данном случае, для повышения чувствительности, магнитный сердечник зачастую используется. При этом индукция насыщения магнитного сердечника магнитного пояса должна превышать индукцию насыщения контролируемого магнитопровода. Например, для магнитного пояса, контролирующего ферритовый сердечник, применяется сердечник из пермаллоя или трансформаторной стали.

Зависимость напряжения на магнитном поясе от магнитного состояния сердечника определяется по формуле [3]:

$$E_{п} = U_{ИПТ} \frac{W_{п} \times S_{п} \times \mu_{п.д}}{W_1 \times S_T \times \mu_{Т.д}},$$

где $E_{п}$ — напряжение на выводах магнитного пояса; $U_{ИПТ}$ — напряжение источника питания; $W_{п}$ — число витков магнитного пояса; $S_{п}$ — сечение витка (сердечника) магнитного пояса; $\mu_{п.д}$ — дифференциальная магнитная проницаемость сердечника магнитного пояса; W_1 — число витков первичной обмотки трансформатора; S_T — сечение сердечника трансформатора; $\mu_{Т.д}$ — дифференциальная магнитная проницаемость сердечника трансформатора.

Графики зависимости $\mu_{п.д} / \mu_{Т.д}$ для сердечника трансформатора из феррита М2000 НМ и сердечника магнитного пояса из материалов Э350 и 50 НМ приведены на рис. 3 [3].

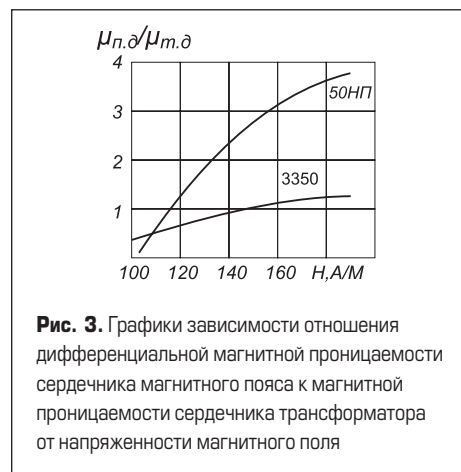


Рис. 3. Графики зависимости отношения дифференциальной магнитной проницаемости сердечника магнитного пояса к магнитной проницаемости сердечника трансформатора от напряженности магнитного поля

В момент насыщения сердечника трансформатора напряжение на обмотке магнитного пояса резко возрастает, что является сигналом для устройства управления к тому, чтобы запереть открытые транзисторы преобразователя.

Необходимость применения магнитных материалов с высокой индукцией насыщения ограничивает использование магнитного пояса или затрудняет его, если контролируется сердечник, выполненный из материала, имеющего высокую индукцию насыщения. В этом случае приходится использовать магнитный пояс без сердечника, который имеет меньшую чувствительность к полезному сигналу и большую чувствительность к помехам.

Однако существует метод контроля насыщения [4], свободный от указанного недостатка. Данный способ предусматривает отщепление части основного магнитопровода и замыкание данной части короткозамкнутым витком, ток в котором контролируется дополнительным трансформатором тока и пропорционален степени насыщения сердечника.

Рассмотрим подробнее принцип действия данного способа контроля насыщения сердечника. Для наглядности разобьем сердечник на две области, где большая область 1 является рабочей, а меньшая область 2 — тестовой и охвачена короткозамкнутым (КЗ) витком.

На рис. 4 изображено состояние, когда под действием приложенного к обмотке трансформатора напряжения индукция в сердечнике трансформатора нарастает, но имеет значение меньше максимального B_m .

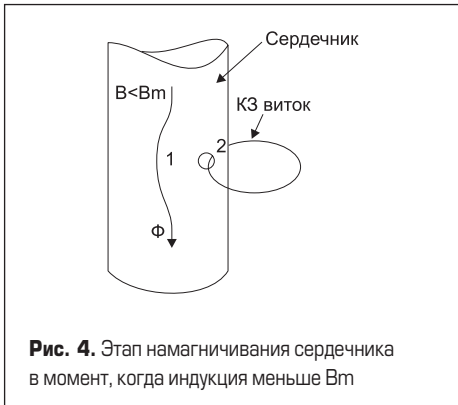


Рис. 4. Этап намагничивания сердечника в момент, когда индукция меньше B_m

В области 1 сердечника, согласно закону Фарадея, индукция изменяется со скоростью:

$$dB_1/dt = E/S_1.$$

В области 2, охваченной КЗ витком, индукция практически не меняется, так как напряжение КЗ витка равно 0. При этом в КЗ витке, благодаря тому, что отщеплена небольшая часть магнитопровода, циркулирует относительно небольшой ток.

На рис. 5 изображено состояние, когда под действием приложенного к обмотке трансформатора напряжения индукция в сердечнике трансформатора достигла максимального значения B_m и превысила его. Это состояние соответствует моменту насыщения сердечника, когда магнитное сопротивление (величина, обратная магнитной проницаемости) области 1 повышается, что приводит к перераспределению магнитного потока, который теперь пытается протекать через отщепленную ненасыщенную часть сердечника. При этом величина тока в КЗ витке резко возрастает, что является признаком насыщения сердечника. Полярность тока указывает, в каком направлении сердечник насыщается.

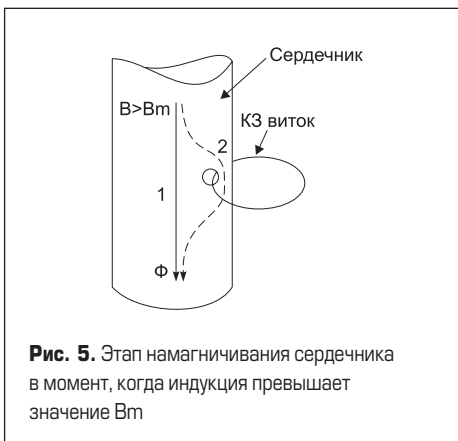


Рис. 5. Этап намагничивания сердечника в момент, когда индукция превышает значение B_m

На рис. 6 изображен вариант использования [4] указанного способа для предотвращения насыщения сердечника нерегулируемого двухтактного преобразователя.

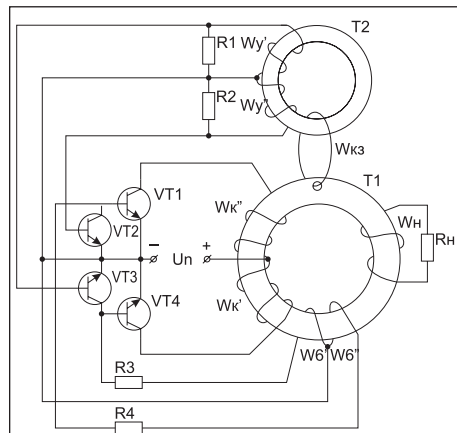


Рис. 6. Схема нерегулируемого двухтактного преобразователя напряжения, не допускающая одностороннего насыщения трансформатора

В основе преобразователя лежит двухтактный автогенераторный преобразователь Ройера, собранный на элементах VT1, VT4, R3, R4 и T1, от которого питается сопротивление нагрузки R_H . Для устранения насыщения около края сердечника трансформатора T1 делают отверстие, в которое продет КЗ виток, одновременно охватывающий магнитопровод трансформатора тока T2. К вторичным обмоткам W_y' и W_y'' трансформатора T2 подключены нагрузочные резисторы R1 и R2, параллельно которым подключены база-эмиттерные переходы транзисторов VT3 и VT2, которые шунтируют база-эмиттерные переходы ключевых транзисторов преобразователя.

Если в какой-то момент сердечник трансформатора T1 начинает насыщаться, то это приводит к увеличению тока в обмотке W_{k3} , который трансформируется во вторичные обмотки трансформатора тока и, в соответствии с полярностью насыщения, открывает транзистор VT2 или VT3, который, в свою очередь, шунтирует база-эмиттерный переход соответствующего ключевого транзистора преобразователя и запирает его. При этом предотвращается дальнейшее насыщение сердечника трансформатора T1.

Однако, несмотря на очевидные достоинства, описанный метод контроля насыщения имеет и некоторые недостатки. Например, достаточно сложно сделать отверстие в магнитопроводе. Если используется хрупкий ферритовый сердечник, то даже удачно проделанное отверстие ослабляет сердечник и может впоследствии привести к его расколу. Кроме этого, при отщеплении части магнитопровода уменьшается его полезное сечение, следовательно, увеличиваются размеры и стоимость трансформатора, при прочих равных условиях.

Автором статьи на форуме Power Electronics (ник valvol) [5] был предложен альтернативный способ контроля одностороннего насыщения сердечника трансформатора при помощи электромагнитной «нашлепки». Это фрагмент магнитопровода с обмоткой, который закрепляет-

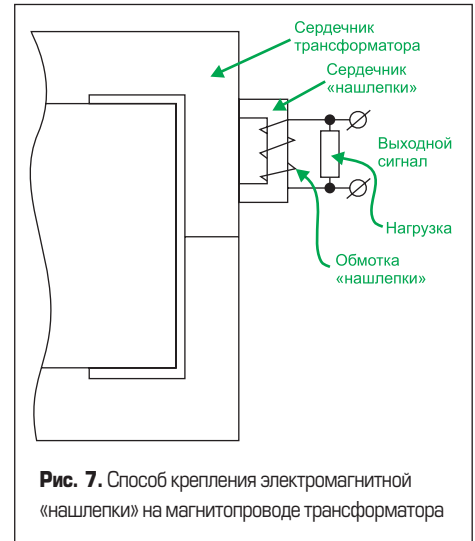


Рис. 7. Способ крепления электромагнитной «нашлепки» на магнитопроводе трансформатора

ся на любом участке магнитопровода, свободном от обмотки и немагнитного зазора (рис. 7).

Принцип контроля насыщения сердечника трансформатора при помощи «нашлепки» также основан на вытеснении магнитного потока из сердечника, при его насыщении.

В тот момент, когда сердечник трансформатора не насыщен, он имеет малое магнитное сопротивление и шунтирует магнитную «нашлепку». При этом в обмотке «нашлепки» наводится незначительное напряжение. Когда сердечник насыщается и его магнитное сопротивление увеличивается, часть основного потока ответвляется в сердечник магнитной «нашлепки», что приводит резкому нарастанию напряжения на выводах ее обмотки. Это напряжение можно использовать для воздействия на схему управления преобразователем, с целью устранения причин насыщения трансформатора.

Использование электромагнитной «нашлепки» устраняет необходимость технологической доработки сердечника трансформатора, позволяет полностью использовать сечение магнитопровода, а также избавляет от необходимости применения дополнительного трансформатора тока.

На форуме Power Electronics [6] участник с ником Трибун (Александр Квитко) провел экспериментальную проверку электромагнитной «нашлепки» при установке последней на сердечнике силового трансформатора однотактного прямоходового преобразователя.

В качестве сердечника «нашлепки» была использована половинка Ш-образного магнитопровода Ш7×7 из феррита M2000 НМ. Обмотка была намотана в одно из окон магнитопровода (рис. 8).



Рис. 8. Пример практической реализации электромагнитной «нашлепки»

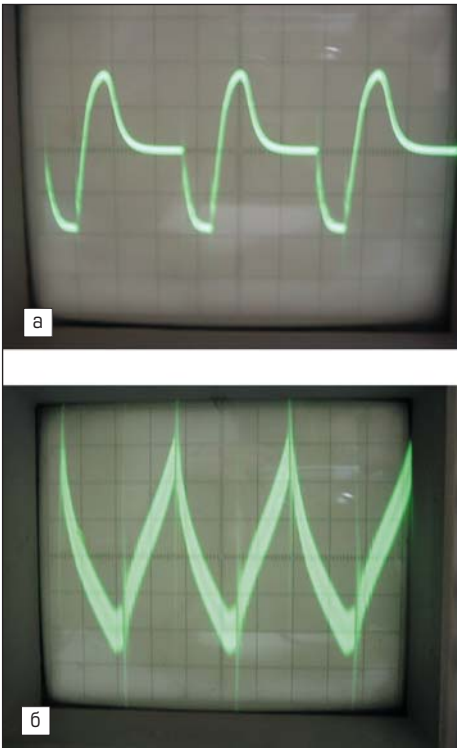


Рис. 9. Сигнал на выводах обмотки электромагнитной «нашлепки»: а) ненагруженная обмотка; б) обмотка нагружена на сопротивление 6,5 Ом

В результате было получено несколько осциллограмм для различных режимов нагрузки обмотки электромагнитной «нашлепки» (рис. 9).

Электромагнитную «нашлепку» можно моделировать в специализированных симуляторах или в обычном Spice-симуляторе, при помощи методики, разработанной для моделирования разветвленных магнитопроводов [7].

В качестве примера произведем моделирование в симуляторе LTspice несимметричного режима двухтактного преобразователя с фазовым управлением, использующим выпрямитель с удвоением тока (рис. 10). Подобные выпрямители, при несимметричности компонентов, способны вызывать значительный подмагничивающий ток во вторичной обмотке трансформатора преобразователя.

Сосредоточимся на несимметричности выпрямителя с удвоением тока и для простоты будем считать, что сам преобразователь полностью симметричен. В этом случае преобразователь можно моделировать двумя встречно включенными источниками импульсного напряжения V1 и V2. Директива .PARAM служит для настройки преобразователя и позволяет устанавливать амплитудное напряжение U , частоту F , заполнение D и скорость нарастания-спада tf -импульсов, формируемых преобразователем.

Реальный трансформатор преобразователя выполнен на двух комплектах сердечников

ПК40×18 из феррита М3000НМС1, из которых сформирован Ш-образный сердечник. Первичная обмотка трансформатора имеет 40, а вторичная — 8 витков. В модели трансформатора преобразователя представлен индуктивностями L1–L5, где L1 моделирует индуктивность рассеяния первичной обмотки, L3 индуктивность рассеяния вторичной обмотки, L5 индуктивность намагничивания, приведенную к вторичной обмотке, а L2 и L4 осуществляют гальваническую развязку и моделируют коэффициент трансформации.

Электромагнитная «нашлепка» выполнена на Ш-образной половинке сердечника Ш7×7 из феррита М2000НМ. Обмотка содержит 64 витка и нагружена на резистор 36 Ом. На рис. 11а изображена конфигурация магнитопровода в районе электромагнитной «нашлепки» и указаны индуктивности, моделирующие отдельные его участки. В модели электромагнитная «нашлепка» представлена индуктивностями L6–L9, где L6 моделирует фрагмент магнитопровода трансформатора, шунтируемый «нашлепкой», L7 — магнитопровод «нашлепки», а L8 и L9 осуществляют гальваническую развязку и моделируют коэффициент трансформации.

Организуем несимметричность выпрямителя, установив различные сопротивления обмоток дросселей L10 и L11 ($R_{L10} = 1$ мОм, $R_{L11} = 3$ мОм) и прямые падения напряжения на диодах выпрямителя D1 и D2 ($V_{fwd,d1} = 0,4$ В, $V_{fwd,d2} = 0,6$ В).

В результате моделирования получены графические зависимости тока через индуктивность намагничивания трансформатора I (L5) и напряжение V (n009) на нагрузочном резисторе R2 электромагнитной «нашлепки» (рис. 11б). Судя по графикам, амплитуда тока подмагничивания во вторичной обмотке трансформатора достигает 70 А, что соответствует амплитудному значению 90 В напряжения на резисторе R2. При этом динамика выходного напряжения «нашлепки» практически совпадает с динамикой изменения тока в индуктивности намагничивания трансформатора.

Литература

1. Гусев Б., Овчинников Д. Мостовой преобразователь с удвоителем тока при подмагничивании сердечника трансформатора // Электроника: наука, технология, бизнес. 2005. № 5.
2. Бас А. А., Миловзоров В. П., Мусолин А. К. Источники вторичного электропитания с бестрансформаторным входом. М.: Радио и связь, 1987.
3. Источники вторичного электропитания / Справочное пособие. Под ред. Ю. И. Конева. М.: Радио и связь, 1983.
4. Патент РФ № 2035833. Способ ограничения одностороннего насыщения трансформатора импульсного преобразователя / И. В. Фомин.
5. <http://valvol.flyboard.ru/topic157.html>
6. <http://valvol.flyboard.ru/viewtopic.php?p=8401#8401>
7. Володин В. Я. Моделирование сложных электромагнитных компонентов при помощи Spice-симулятора LTspice/SwCAD III // Компоненты и технологии. 2008. № 4.

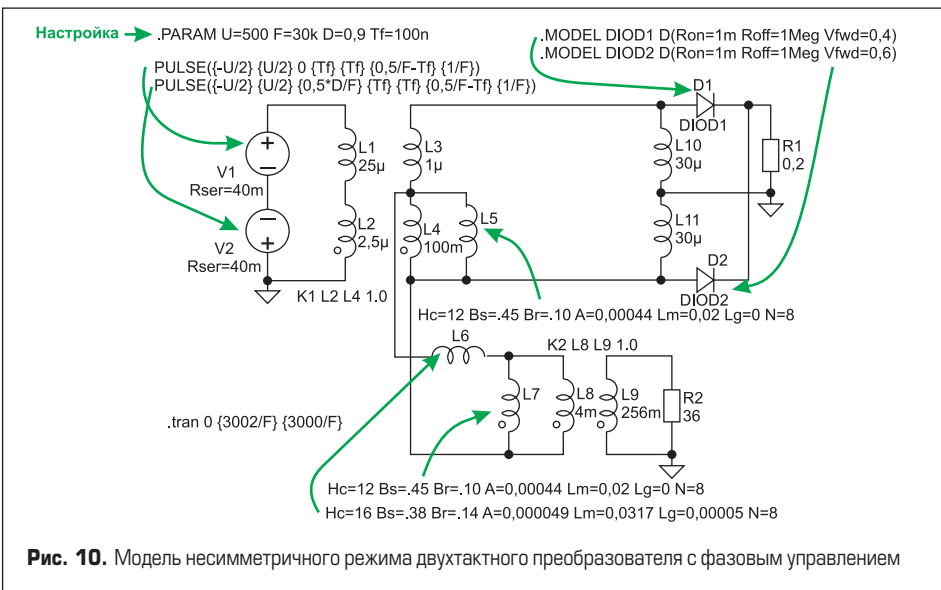


Рис. 10. Модель несимметричного режима двухтактного преобразователя с фазовым управлением

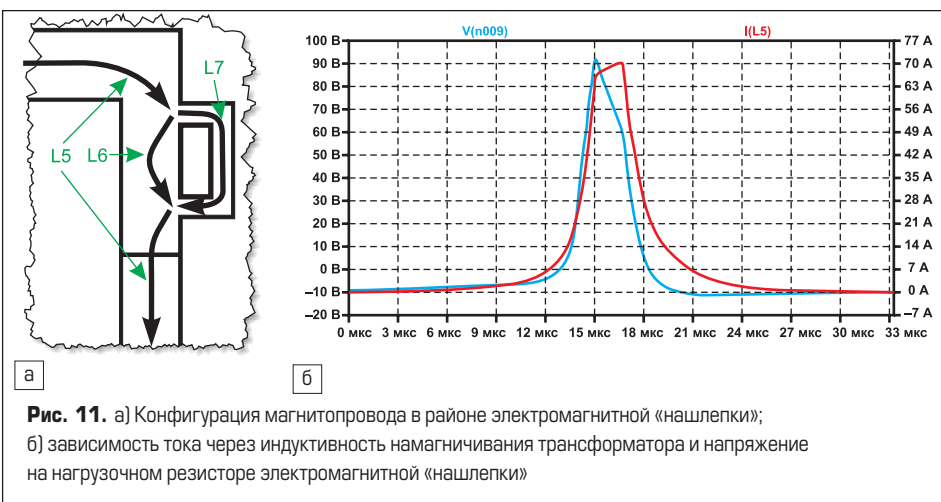


Рис. 11. а) Конфигурация магнитопровода в районе электромагнитной «нашлепки»; б) зависимость тока через индуктивность намагничивания трансформатора и напряжение на нагрузочном резисторе электромагнитной «нашлепки»