

# Особенности работы высокочастотного трансформатора

## в схеме последовательного резонансного инвертора

**Рассмотрены особенности работы трансформатора в схеме последовательного резонансного инвертора в несимметричном режиме. Дана количественная оценка смещения частного цикла петли гистерезиса в зависимости от величины несимметрии. Рассмотрен вариант симметрирования частного цикла петли гистерезиса с помощью включения разделительной емкости в цепь первичной обмотки трансформатора, определены условия благоприятного переходного процесса, исключающего завышение рабочей индукции его магнитопровода. Показано влияние индуктивности рассеяния трансформатора на процессы перемагничивания.**

**Святослав Земан,**  
к. т. н.  
**Александр Осипов,**  
к. т. н.

ossan@mail.ru

**Олег Сандырев**

sandirev@mail.ru

### Введение

В настоящее время в системах индукционного нагрева преобразователь частоты (ПЧ), как правило, строится на основе последовательного резонансного инвертора, согласованного с нагрузкой через трансформатор, позволяющий, кроме этого, обеспечить гальваническую развязку и безопасность обслуживающего персонала.

В процессе работы на трансформатор с мостового инвертора поступает прямоугольное напряжение, которое, как правило, характеризуется определенной степенью несимметрии. Такой режим работы приводит к одностороннему намагничиванию трансформатора и может быть аварийным. Несмотря на наличие большого количества публикаций, посвященных этой теме [1–5], вопросы работы трансформатора в схеме резонансного инвертора, процессы симметрирования рабочего цикла петли гистерезиса, учет влияния индуктивности рассеяния рассмотрены в общем случае, не учитывающем специфики резонансного режима.

Решение этих вопросов важно и актуально для силовой электронной аппаратуры, используемой в технологиях индукционного нагрева, и является целью настоящей статьи.

### Процесс подмагничивания трансформатора

Типовая структура ПЧ для установки индукционного нагрева, построенная на основе последовательного резонансного инвертора напряжения, нагруженного через согласующий трансформатор TV1 на последовательный резонансный контур, образованный индуктором с нагреваемой деталью, имеющей активно-индуктивное сопротивление ( $R_H, L_H$ ), и компенсирующим конденсатором С, изображена на рис. 1. В процессе нагрева параметры нагрузки существенно изменяются, что приводит к изменению

резонансной частоты колебательного контура, в связи с этим в систему управления ПЧ вводится узел фазовой автоподстройки частоты, непрерывно настраивающий инвертор на резонансную частоту. При этом возможно однократное появление несимметрии при изменении длительности одного из полупериодов питающего напряжения, которая определяется отношением длительности шага подстройки к резонансному периоду.

Если к согласующему трансформатору TV1 прикладывается симметричное прямоугольное напряжение, его магнитопровод перемагничивается по симметричной частной петле гистерезиса (рис. 2) и магнитная индукция в нем изменяется от значения  $+B_p$  до значения  $-B_p$ . Однако разброс динамических параметров IGBT-транзисторов, согласующих драйверов и системы фазовой автоподстройки частоты приводит к неодинаковой длительности полупериодов выходного напряжения и, как следствие, к появлению постоянной составляющей напряжения, прикладываемого к трансформатору  $U_{cp}$  и подмагничиванию силового трансформатора постоянным током [1], величину которого можно определить соотношением

$$I_0 = U_{cp}/R_{o61}, \quad (1)$$

где  $U_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt$  — среднее значение напряжения

на первичной обмотке в течение резонансного периода  $T$ ,  $R_{o61}$  — сопротивление первичной обмотки.

Это приводит к смещению центра частной петли гистерезиса по основной кривой намагничивания из точки О в точку О1 (рис. 2), соответствующую напряженности поля  $H_0$  от намагничивающей силы постоянно-го тока.  $H_0$  определяется согласно закону полного тока

$$H_0 = I_0 W/l_c, \quad (2)$$

где  $W$  — количество витков первичной обмотки;  $l_c$  — длина силовой магнитной линии трансформатора.

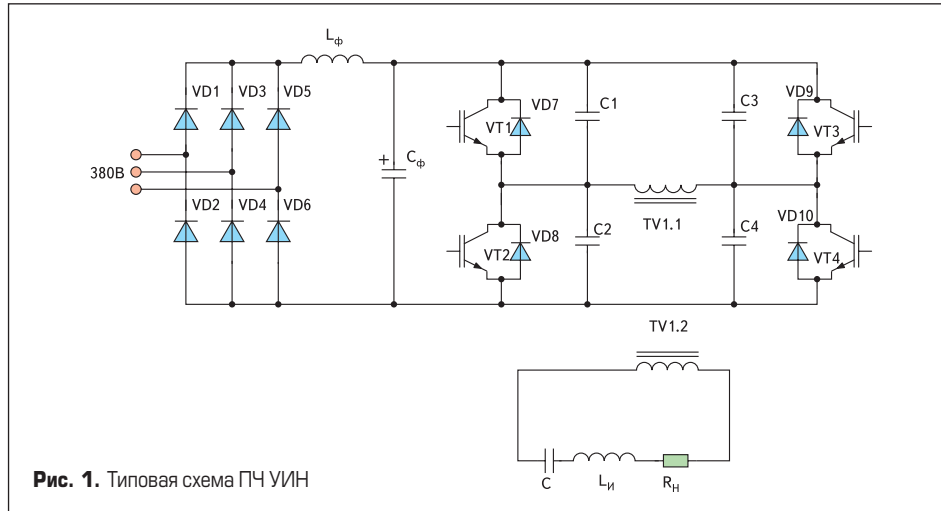


Рис. 1. Типовая схема ПЧ УИН

Таким образом, ток  $I_{L\mu}$  индуктивности намагничивания трансформатора  $L_{\mu}$  можно условно разделить на переменную составляющую, обеспечивающую перемагничивание магнитопровода, и постоянную составляющую, называемую током подмагничивания  $I_0$  и определяемую величиной постоянной составляющей напряжения несимметрии  $U_{cp}$ .

Подмагничивание силового трансформатора приводит к перемагничиванию его сердечника по несимметричному циклу (кривая 2), что при достаточном значении тока подмагничивания приводит к насыщению силового трансформатора и неограниченному росту тока первичной обмотки, несмотря на малое значение  $B_p$  (рис. 3). В результате этого происходит перегрузка и выход из строя силовых транзисторов инвертора.

Известные в настоящее время методы решения проблем подмагничивания трансформатора условно можно свести к четырем группам:

1. Введение обратной связи по потоку рассеяния или току намагничивания трансформатора. В этом случае, при увеличении тока подмагничивания, коррекция длительности управляющих импульсов должна производиться в каждом такте управления [4].
2. Выбор магнитопровода трансформатора с непрямоугольной формой петли намагничивания [3]. При этом следует отметить, что чем больше длина магнитной силовой линии и меньше магнитная проницаемость ферромагнитного материала магнитопровода, тем более силовой трансформатор становится устойчивым к подмагничиванию постоянным током (рис. 2), так как постоянная составляющая индукции ( $B_0$ ), вызванная током подмагничивания ( $I_0$ ), оказывается значительно меньше диапазона изменения рабочей индукции ( $B_p$ ).
3. Введение немагнитного зазора в магнитопровод трансформатора, имеющего мощный размагничивающий эффект, приводящий к сдвигу петли гистерезиса и заметному снижению магнитной проницаемости высокопроницаемых материалов при уменьшении остаточной индукции  $B_r$ . В связи с этим значительно увеличивается полезный размах индукции [3]. Малые величины зазора фактически не влияют на потери в магнитопроводе, однако оказывают необходимый размагничивающий эффект, исключая

ющий быстрое насыщение магнитопровода при воздействии поля постоянного тока.

4. Включение разделительного конденсатора в первичную обмотку трансформатора (рис. 5), что приводит к симметрированию положения рабочей петли гистерезиса. В этом случае ток подмагничивания трансформатора полностью отсутствует за счет того, что среднее значение тока разделительного конденсатора в установившемся режиме равно нулю.

При сопоставлении данных методов следует отметить следующие особенности их реализации. Первый метод является универсаль-

ным, однако на практике он связан со значительными сложностями измерения контролируемых параметров (потока рассеивания и тока подмагничивания). К тому же при значительной несимметрии рост тока через первичную обмотку трансформатора в каждом периоде происходит с большой скоростью, что может привести к ситуации, когда ограничение длительности импульсов не успеет скорректировать несимметрию [4].

Второй метод наиболее простой, но его применение не исключает ток подмагничивания, вследствие чего приходится увеличивать запас рабочей индукции по отношению к индукции насыщения, которая должна включать постоянный уровень  $B_0$ , обусловленный током подмагничивания.

Введение немагнитного зазора является эффективным методом борьбы с подмагничиванием магнитопровода и позволяет уменьшить смещение частного цикла петли намагничивания при воздействии значительных несимметрий. Однако в этом случае, как и в предыдущем, полностью устранить ток подмагничивания не удается.

В резонансных схемах наиболее эффективен четвертый метод, который полностью исключает ток подмагничивания трансформатора, благодаря чему удается симметризовать частный цикл петли гистерезиса при воздействии значительных несимметрий и сравнительно малом запасе рабочей индукции.



Рис. 2. Смещение частной петли гистерезиса магнитопровода силового трансформатора при наличии подмагничивания постоянным током

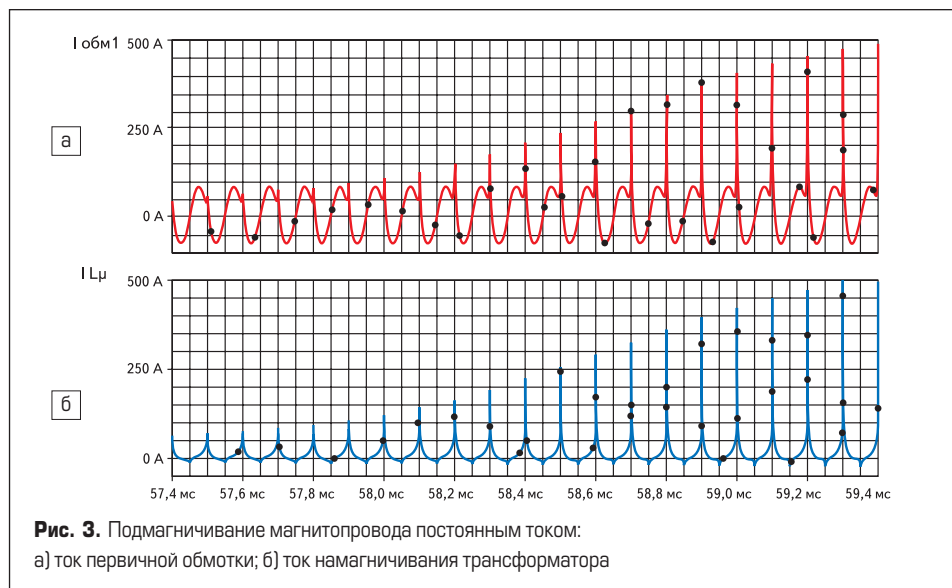


Рис. 3. Подмагничивание магнитопровода постоянным током: а) ток первичной обмотки; б) ток намагничивания трансформатора

### Моделирование переходного процесса в схеме с немагнитным зазором магнитопровода трансформатора

Как уже отмечалось ранее, введение немагнитного зазора в магнитопровод трансформатора уменьшает его эффективную проницаемость [2] и позволяет допускать значительные постоянные составляющие напряжения, воздействующие на первичную обмотку трансформатора, почти всегда работающего в асимметричном режиме.

$$\mu_e = \frac{1}{\frac{1}{\mu_i} + \frac{l_g}{l_c}}, \quad (3)$$

где  $\mu_i$  — начальная проницаемость неразрезанного магнитопровода,  $l_g$  — общая длина зазора,  $l_c$  — длина средней линии магнитопровода. Таким образом, изменяя длину зазора, можно получить требуемую эффективную проницаемость магнитопровода определенного размера, в связи с чем, при том же токе подмагничивания вызванная этим током индукция будет гораздо меньше. Это значительно увеличивает полезный размах индукции и повышает устойчивость трансформатора к подмагничиванию.

Аналитический расчет переходного процесса при воздействии несимметрии различных значений на трансформатор с разными значениями  $\mu_e$  произвести довольно трудно из-за существенно нелинейного характера выражений, описывающих аппроксимацию петли намагничивания. Поэтому для моделирования переходного процесса работы трансформатора в асимметричном режиме был использован программный комплекс Orcad 9.2. Для определения параметров математической PSpice-модели магнитопровода марки 5БДСР с немагнитным зазором 0,9 мм была применена программа PSpiceModelEditor, входящая в состав комплекса. Программа производит экстраполяцию параметров модели по заранее известной форме петли намагничивания. В результате экстраполяции были получены параметры магнитопровода марки 5БДСР, достаточно близкие к реальным.

Параметры математической PSpice-модели магнитопровода 5БДСР:

- LEVEL = 2 — индекс модели;
- A = 45037 А/м — параметр формы безгистерезисной кривой намагничивания;
- AREA = 1,57 см<sup>2</sup> — площадь поперечного сечения магнитопровода;
- C = 1,4905 — постоянная упругого смещения доменных границ;
- GAP = 0,09 см — ширина воздушного зазора;
- K = 17371 А/м — постоянная подвижности доменов;
- MS = 686630 А/м — намагниченность насыщения;
- PASC = 0,99 — коэффициент заполнения сердечника;
- PATH = 0,014 м — средняя длина магнитной силовой линии.

Моделирование производилось в условиях непрерывного воздействия несимметричной

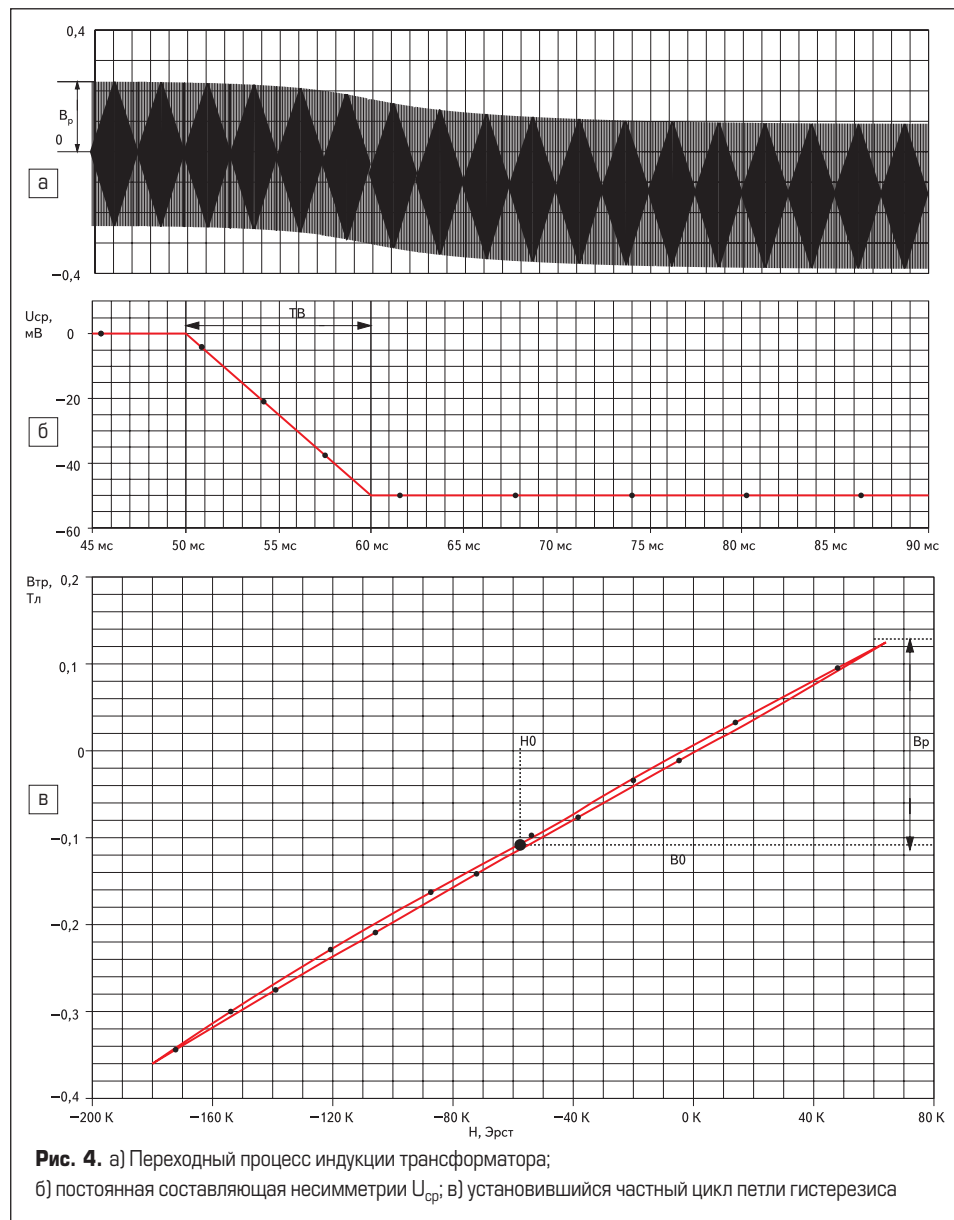


Рис. 4. а) Переходный процесс индукции трансформатора; б) постоянная составляющая несимметрии  $U_{cp}$ ; в) установившийся частный цикл петли гистерезиса

составляющей напряжения на один из полупериодов переменного напряжения, подаваемого на вход первичной обмотки со следующими параметрами:

- $U_{пит} = 500$  В — амплитуда переменного прямоугольного напряжения;
- $U_{cp} = 50$  мВ — величина несимметрии;
- $L_{\mu} = 10$  мГн — индуктивность намагничивания трансформатора;
- $R_{об1} = 0,02$  Ом — сопротивление первичной обмотки постоянному току;
- $f_2 = 10$  кГц — резонансная частота колебательного контура, расположенного по вторичной обмотке.

Моделирование воздействия несимметричной составляющей напряжения на трансформатор показало наличие переходного процесса, приводящего к установившейся несимметричной петле намагничивания его магнитопровода (рис. 4в) с постоянной времени, равной

$$\tau = L_{\mu}/R_{об1}. \quad (4)$$

Результаты моделирования приведены на рис. 4 и подтверждают справедливость выражения (1), описывающего величину смещения установившегося частного цикла, и выра-

жения (4), характеризующего динамику переходного процесса.

Следует отметить, что при введении несимметрии частный цикл петли гистерезиса устанавливается на уровне, определяемом величиной тока подмагничивания. Дальнейший рост тока подмагничивания приводит к смещению частной петли намагничивания и насыщению магнитопровода. Для повышения устойчивости магнитопровода к воздействию тока подмагничивания необходимо увеличение немагнитного зазора магнитопровода, что не всегда возможно из-за возрастания потерь на перемагничивание и значительного роста тока намагничивания трансформатора.

### Моделирование переходного процесса в схеме с разделительным конденсатором

Применение разделительного конденсатора в первичной обмотке трансформатора (рис. 5) является более эффективным методом борьбы с подмагничиванием, так как позволяет симметризовать положение частного цикла петли намагничивания магнитопровода при воздействии значительно больших несимметрий.

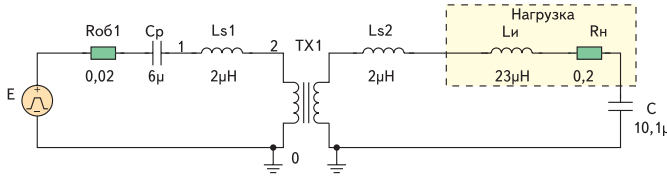


Рис. 5. Электрическая схема замещения трансформатора

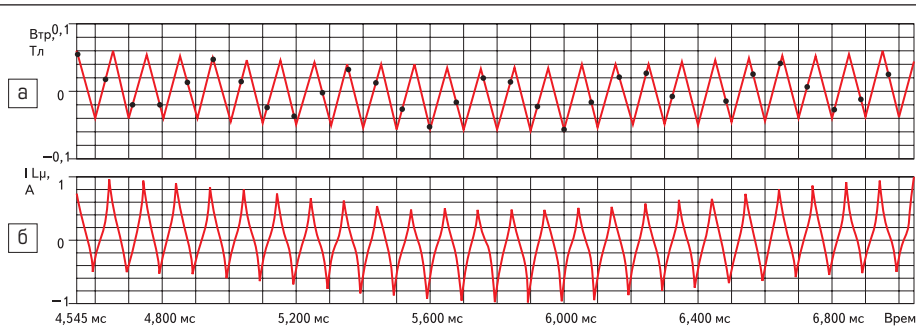


Рис. 6. Форма тока намагничивания и индукции на периоде колебаний резонансного контура между  $C_p$  и  $L_\mu$

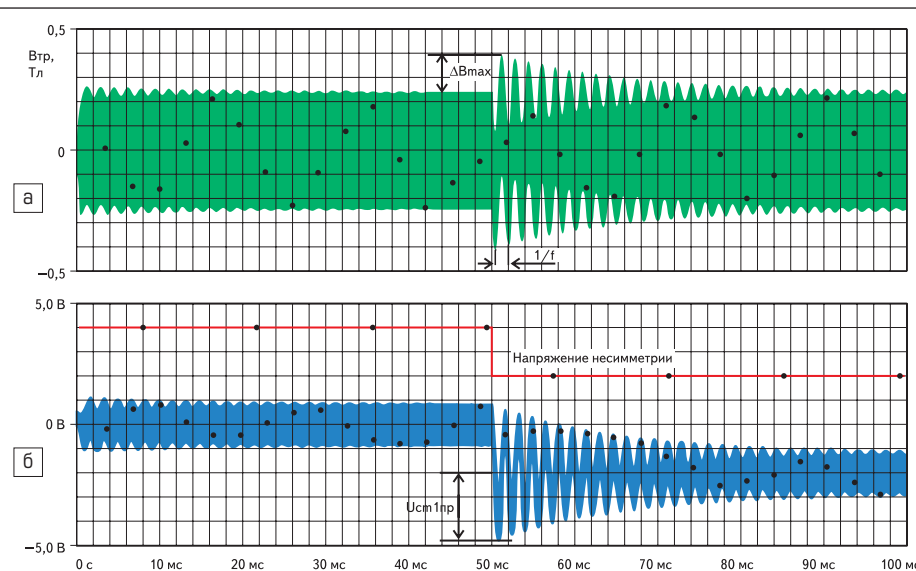


Рис. 7. Переходной процесс индукции силового трансформатора при скачке несимметрии с  $T_{пп} = 0$

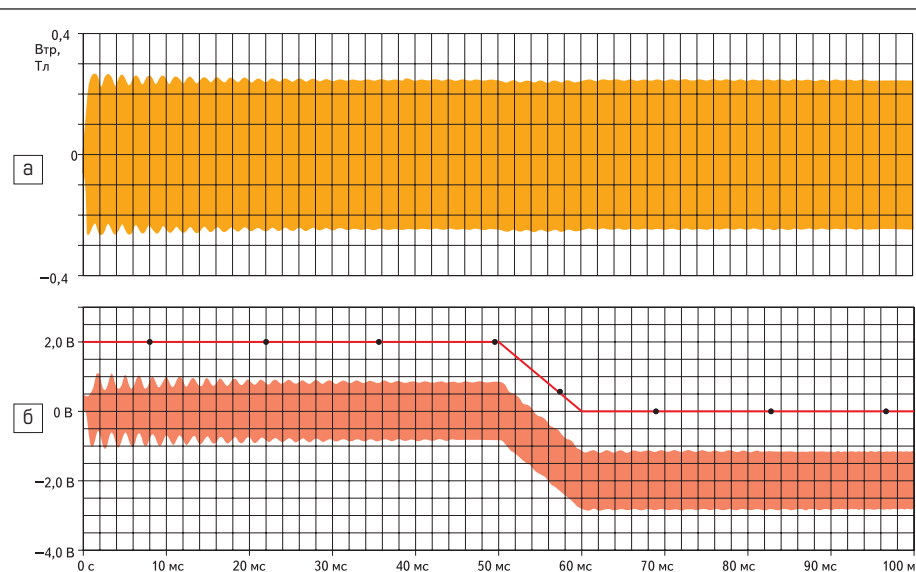


Рис. 8. Переходной процесс индукции силового трансформатора при скачке несимметрии с  $T_{пп} = 10$  мс  
а) индукция силового трансформатора; б) величина несимметрии и напряжение на проходной емкости

Ввиду последовательного включения разделительного конденсатора с первичной обмоткой трансформатора постоянная составляющая ее тока отсутствует, то есть ток подмагничивания всегда равен нулю. Однако в этом случае образуется резонансный контур между разделительным конденсатором  $C_p$  и индуктивностью намагничивания трансформатора  $L_\mu$  (рис. 5). При скачке несимметрии и возникает переходный колебательный процесс (рис. 6) на частоте

$$f_1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_\mu C_p}} \quad (5)$$

При возникновении колебаний напряжение на первичной обмотке трансформатора превышает напряжение питания, в результате чего увеличивается рабочая индукция трансформатора (рис. 7а). Напряжение на разделительном конденсаторе складывается из двух составляющих (рис. 7б), первая (высокочастотная) обусловлена протеканием приведенного тока колебательного контура, расположенного на вторичной обмотке, а вторая (низкочастотная) обусловлена переходным процессом, образующимся при воздействии  $U_{cp}$  на колебательный контур, расположенный на первичной обмотке. Вторая составляющая определяется произведением тока подмагничивания на величину реактивного сопротивления разделительного конденсатора. Таким образом, с учетом (1)

$$U_{Cp} = I_n^* R_n^* + I_0 x_{cp} \sin(2\pi f_1 t) e^{-\delta t} = I_n^* R_n^* + \frac{U_{cp} \sin(2\pi f_1 t)}{2\pi R_{об1} f_1 C_p} e^{-\delta t} \quad (6)$$

где  $I_n^*$  — приведенное значение тока вторичной обмотки,  $R_n^*$  — приведенное значение сопротивления вторичной обмотки,  $\delta = R_{об1}/2L_\mu$  декремент затухания, определяющий длительность переходного процесса  $T_{пп}$ .

Для аналитического описания рабочей индукции магнитопровода необходимо определить напряжение на первичной обмотке трансформатора, которое складывается из напряжения питания и напряжения разделительного конденсатора. Поэтому в выражении для расчета индукции трансформатора также присутствуют две составляющие, обусловленные резонансными контурами, расположенными в первичной и вторичной обмотках трансформатора.

$$B = B_p + \Delta B = \frac{E + U_{Cp}}{4 S_c W_l f_2} \quad (7)$$

где  $S_c$  — площадь поперечного сечения магнитопровода,  $\Delta B$  — величина завышения индукции трансформатора.

Для исключения низкочастотных колебаний, то есть для приведения переходного процесса к апериодическому виду, необходимо, чтобы крутизна фронта возмущения (несимметрии) была больше периода колебаний ( $T_b = 1/f_1$ ). Результаты моделирования, соответствующие данному условию, показаны на рис. 8, отмечено отсутствие перерегулирования рабочей индукции, ее амплитуда не превышает амплитуды в установившемся режиме.

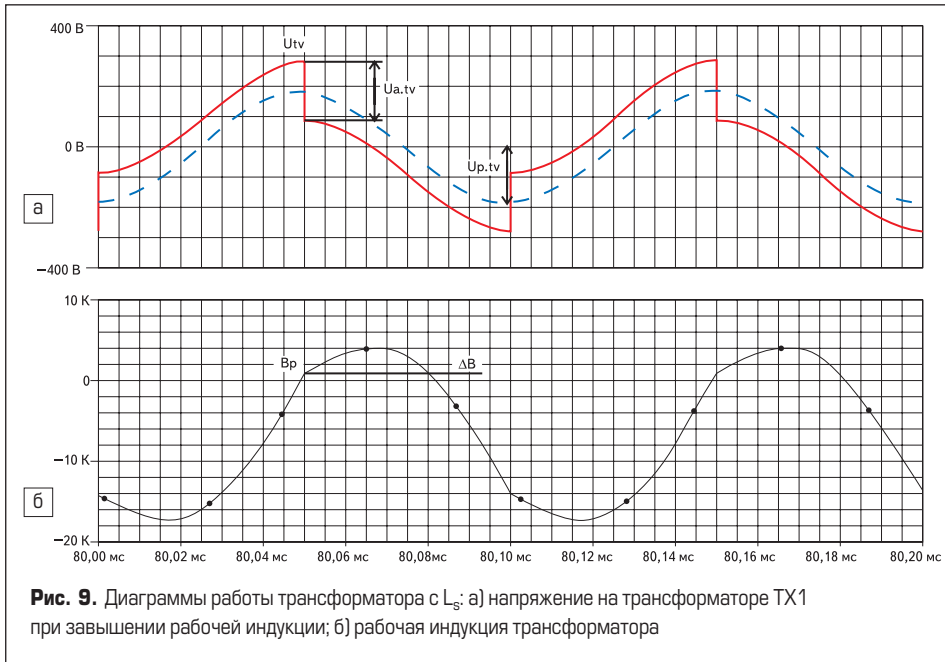


Рис. 9. Диаграммы работы трансформатора с \$L\_s\$: а) напряжение на трансформаторе ТХ1 при завышении рабочей индукции; б) рабочая индукция трансформатора

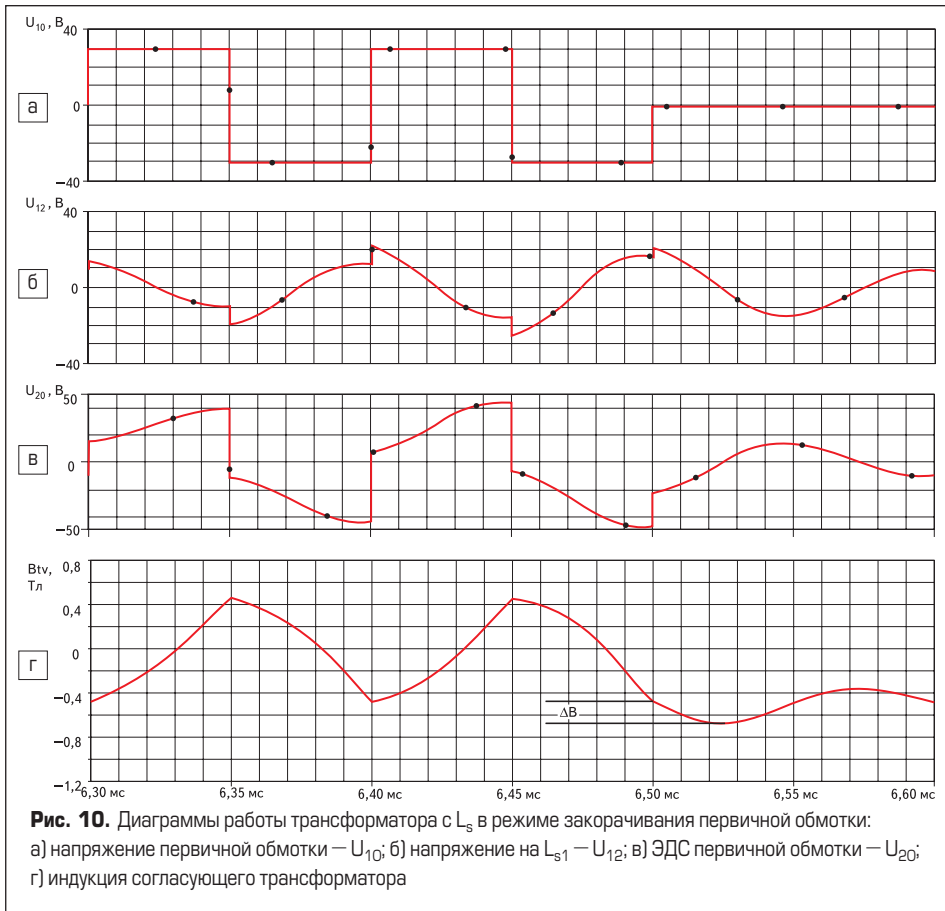


Рис. 10. Диаграммы работы трансформатора с \$L\_s\$ в режиме закорачивания первичной обмотки: а) напряжение первичной обмотки — \$U\_{10}\$; б) напряжение на \$L\_{s1}\$ — \$U\_{12}\$; в) ЭДС первичной обмотки — \$U\_{20}\$; г) индукция согласующего трансформатора

### Индуктивность рассеяния трансформатора

Одним из важных параметров, определяющих качество работы трансформатора, является индуктивность рассеяния его обмоток (\$L\_s\$). Как известно, магнитный поток трансформатора можно условно разделить на рабочий (основной) поток и поток рассеяния. Первый из этих потоков сцеплен с обеими обмотками, и его путь проходит в основном по магнитопроводу, а второй сцеплен только с одной из обмоток и проходит по воздуху.

Индуктивность рассеяния, как правило, определяется геометрическими размерами

и расположением обмоток трансформатора. Одним из вариантов расчета \$L\_s\$ является предложенный в [1], согласно которому, \$L\_s\$, приведенную к виткам, вычисляют по общей формуле

$$L_s = \frac{\mu_0}{2\pi} \omega_1^2 p \ln \frac{g_{12}^2}{g_1 g_2}, \quad (8)$$

где \$p\$ — средний периметр витка, \$g\_{12}\$, \$g\_1\$, \$g\_2\$ — среднегеометрические расстояния сечений обмоток относительно друг друга.

На электрической схеме замещения трансформатора индуктивность рассеяния располагается последовательно в первичной и вторич-

ной цепях (рис. 5). При этом если нагрузка представлена высокодобротным колебательным контуром, а индуктивность рассеяния имеет достаточно большую величину, реактивная составляющая напряжения, подаваемого на первичную обмотку трансформатора, может оказаться более активной (рис. 9). В результате происходит завышение рабочей индукции трансформатора на величину \$\Delta B\$.

Для получения аналитической интерпретации условия, при котором завышения рабочей индукции не происходит (\$U\_{pTV} < U\_{aTV}\$), необходимо определить составляющие напряжения, передаваемого через трансформатор. Реактивную составляющую напряжения первичной обмотки можно представить так:

$$U_{pTV} = U_{Cp} \left( \frac{L_{s1}}{L_{s1} + L_{s2} + L_u} \right), \quad (9)$$

Активная составляющая напряжения первичной обмотки будет представлена следующим образом

$$U_{aTV} = E \left( \frac{L_{s2} + L_u}{L_{s1} + L_{s2} + L_u} \right), \quad (10)$$

где \$E\$ — напряжение питания.

Учитывая, что при единичном коэффициенте трансформации \$U\_{Cp} = EQ/4\pi\$, можно записать условие минимизации рабочей индукции

$$\frac{L_{s2} + L_u}{L_{s1}} \geq \frac{4}{\pi} Q, \quad (11)$$

где \$Q\$ — добротность колебательного контура, расположенного по вторичной обмотке.

Таким образом, для минимизации рабочей индукции трансформатора необходимо и достаточно, чтобы величина индуктивности индуктора \$L\_u\$ была в \$Q\$ раз больше индуктивности рассеяния первичной обмотки.

Некоторые технологические процессы индукционного нагрева требуют регулирования мощности, передаваемой в нагрузку (нагреваемый объект), что может быть достигнуто путем периодического закорачивания первичной обмотки трансформатора смежными транзисторами инвертора в течение нескольких резонансных периодов. В результате в резонансном контуре возникает свободные затухающие колебания. При этом \$L\_s\$ включается последовательно в резонансный контур. Таким образом, при протекании тока по первичной обмотке, на \$L\_s\$ возникает падение напряжения (рис. 10б), которое приводит к завышению рабочей индукции трансформатора \$\Delta B\$ (рис. 10г). Индуктивность рассеяния вторичной обмотки в этом случае можно не учитывать, так как она включена последовательно с индуктивностью индуктора и нагрузки и компенсируется резонансной емкостью, поэтому на завышение габаритной мощности трансформатора не оказывает никакого влияния.

Включение разделительного конденсатора позволяет не только исключить ток подмагничивания трансформатора, но и компенсировать влияние рассеяния первичной обмотки.

При этом величина  $C_p$  определяется согласно условию компенсации реактивной составляющей напряжения ( $UL_{s1} = UC_p$ ):

$$L_{s1} \times C_p = (L_{s2} + L_u) \times C. \quad (12)$$

При такой компенсации  $L_{s1}$  превышения рабочей индукции не происходит ни в одном из режимов работы трансформатора. Это повышает технико-эксплуатационные характеристики трансформатора и расширяет спектр нагрузок, с которыми может работать ПЧ.

### Пусковой режим работы трансформатора на резонансную нагрузку

Пусковой режим должен обеспечивать нормальный переходный процесс и выход рабочей точки петли гистерезиса на симметричный частный цикл в рабочем режиме. Если изначально магнитопровод трансформатора был полностью размагничен, при подаче на трансформатор напряжения с частотой резонансного контура центр частного цикла петли намагничивания смещается по основной кривой намагничивания из точки О в точку О1, поэтому рабочая индукция оказывается увеличенной по отношению к своему установившемуся значению в два раза (рис. 11а).

Моделирование переходного процесса при пуске показало, что происходит размагничивание трансформатора (рис. 11б) с постоянной времени  $\tau$ , определяемой выражением (4). При этом видно, что величина перерегулирования индукции трансформатора достигает удвоенного значения. Для устранения перерегулирования пуск инвертора рекомендуется производить с повышенной частоты, соответственно в два раза превышающей резонансную. По мере размагничивания трансформатора частота может быть итерационно приближена к резонансной, при этом величина шага подстройки не должна приводить к превышению рабочей индукции (рис. 11в).

### Заключение

Работа трансформатора в схеме последовательного резонансного инвертора обусловлена рядом особенностей. Прежде всего, это наличие постоянно действующего тока подмагничивания, образующегося из-за несимметрии напряжения, прикладываемого к первичной обмотке трансформатора. Введение немагнитного зазора в магнитопровод трансформатора позволяет существенно повысить устойчивость частного цикла при определенном подмагничивании. При больших несимметриях напряжения инвертора рекомендуется включать разделительного конденсатора в первичную обмотку, что является наиболее универсальным методом, обеспечивающим симметрирование петли намагничивания магнитопровода. Следует отметить, что включение разделительного конденсатора позволяет не только устранить подмагничивание трансформатора, но и компенсировать паразитное влияние индуктивности рассеяния трансформатора. Важной

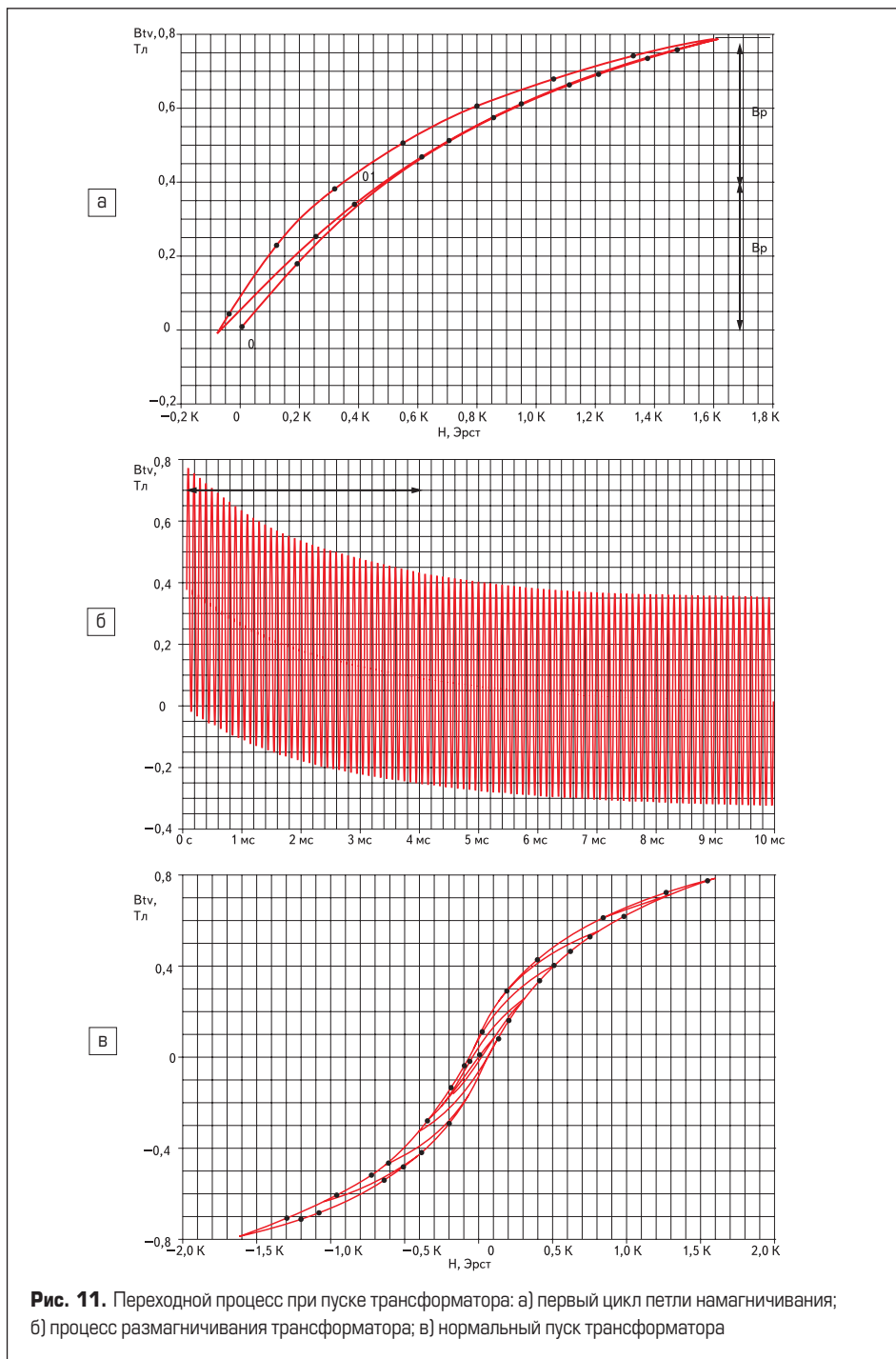


Рис. 11. Переходной процесс при пуске трансформатора: а) первый цикл петли намагничивания; б) процесс размагничивания трансформатора; в) нормальный пуск трансформатора

особенностью этого метода является образование разделительным конденсатором резонансного контура с индуктивностью намагничивания трансформатора. Поэтому при ступенчатом воздействии на трансформатор напряжения с определенной величиной несимметрии возникают низкочастотные колебания, приводящие к завышению рабочей индукции трансформатора. В статье определено, что для устранения этих колебаний и минимизации рабочей индукции необходимо, чтобы фронт роста несимметрии не превышал постоянную времени колебательного процесса, что является основой для расчета разделительной емкости.

Выявлена зависимость рабочей индукции трансформатора от индуктивности рассеивания его первичной обмотки, показано, что условием завышения индукции трансформатора является превышение реактивной составляющей его напряжения активной.

### Литература

1. Русин Ю. С., Гликман И. Я., Горский А. Н. Электромагнитные элементы радиоэлектронной аппаратуры. Справочник. М.: Радио и связь. 1991.
2. [http://www.noviteh.com/pro3\\_2\\_1.html#5](http://www.noviteh.com/pro3_2_1.html#5)
3. Ромаш Э. М. Источники вторичного электропитания радиоэлектронной аппаратуры. М.: Радио и связь. 1981.
4. Гусев Б., Овчинников Д. Мостовой преобразователь с удвоителем тока при подмагничивании сердечника трансформатора // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2005. Вып. 5.
5. Андреев В. В. Несимметричный режим работы силового трансформатора в транзисторном преобразователе. / Сб. статей под ред. Ю. И. Конева. Электронная техника в автоматике. Вып.2. М.: Советское радио. 1971.