

Способы уменьшения синфазных электромагнитных помех

Георгий БОКОВ,
Georg.Bokovvv@yandex.ru

В статье рассматриваются способы уменьшения синфазных помех в DC/DC-преобразователях. Основное внимание уделяется конструктивным особенностям трансформатора обратного преобразователя.

В [1] рассматривались причины возникновения синфазных электромагнитных помех. В этой статье мы обсудим способы их уменьшения. Но вначале напомним, каким образом формируются синфазные помехи. Источники их возникновения представлены на рис. 1, где показан изолированный обратного преобразователя с двумя вторичными обмотками. Вместо первичной электрической сети использовался ее эквивалент LISN. Прерывистыми линиями показаны пути протекания синфазного тока.

В схему введены следующие эквивалентные паразитные конденсаторы:

- C_Z — емкость между землями первичной и вторичной цепи;
- C_{PS} — емкость между первичной и основной вторичной обмоткой;
- C_{SA} — емкость между первичной и вспомогательной вторичной обмоткой;
- C_{PM} — емкость между первичной обмоткой и сердечником;
- C_{SM} — емкость между вторичной обмоткой и сердечником;
- C_{AM} — емкость между вспомогательной обмоткой и сердечником;
- C_{PE} — емкость между землей первичной стороны и заземлением;
- C_{DE} — емкость между стоком MOSFET и заземлением;
- C_{ME} — емкость между сердечником и заземлением;
- C_{SE} — емкость между землей вторичной стороны и заземлением.

Из рисунка видно, что синфазный ток протекает через паразитные емкости, поэтому чем выше скорость изменения напряжения, тем больше величина синфазного тока. Наибольшая скорость изменения напряжения наблюдается в узле SW — стоке силового MOSFET. Синфазный ток протекает через межобмоточные паразитные емкости

трансформатора, возвратный путь тока проходит через паразитные емкости между элементами схемы, землей и паразитные емкости между землями первичной и вторичной сторон.

Симметричная топология

Таким образом, для уменьшения синфазных помех необходимо уменьшить паразитные емкости и скорость изменения напряжения в узлах переключения. Последнее можно реализовать двумя способами: схемотехническими ухищрениями или увеличением времени открытия силовых ключей. Первый способ явно предпочтительнее и реализуется за счет использования симметричной топологии силовых каскадов.

На рис. 2 приведен пример таких топологий для прямоходового (рис. 2а) и обратного (рис. 2б) преобразователя. В точках коммутации SW1 и SW2 напряжение изменяется в противофазе, производные dV/dt имеют противоположные знаки, поэтому, хотя в каждой из этих точек скорость изменения напряжения по-прежнему велика, порождаемые синфазные токи компенсируют друг друга. Основным недостатком этих схем заключается в плавающем потенциале затвора силового ключа в обратном преобразователе и ключа Q1 в прямоходовом преобразователе.

Схожим образом образуется симметричная топология резонансного LLC-преобразователя; его схема приведена на рис. 3. И в этом случае появляется дополнительный силовой ключ с плавающим потенциалом затвора. Это обстоятельство усложняет топологию каскада, хотя и приводит к снижению синфазных токов,

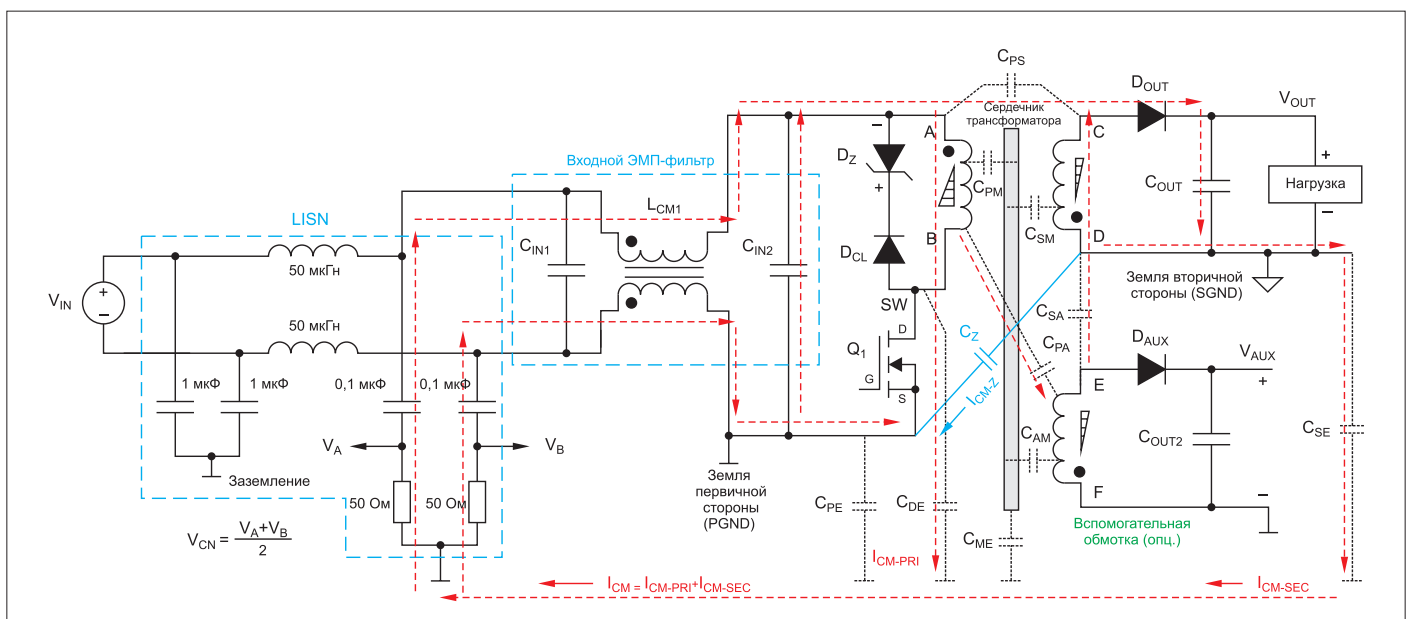


Рис. 1. Источники синфазных помех в изолированном обратном преобразователе

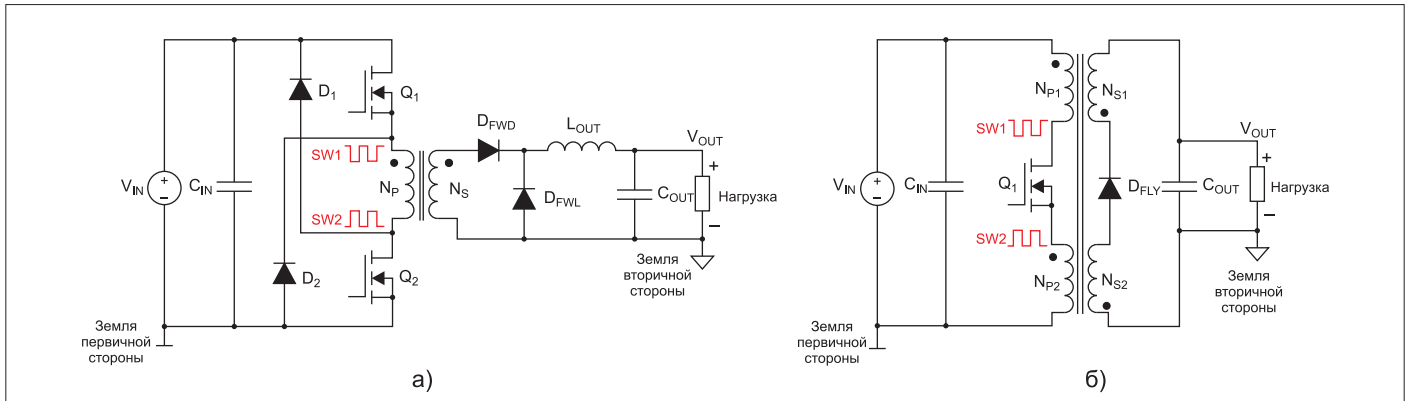


Рис. 2. Симметричные топологии: а) прямоходового; б) обратногоходового преобразователей

если между обмотками трансформаторов имеется паразитная емкость, с которой нельзя не считаться.

Симметричные топологии — не единственная мера по снижению синфазных помех. В [1] выводится формула для расчета синфазных помех. Из нее видно, что уменьшить синфазные помехи поможет конденсатор C_Z , включенный между первичной и вторичной землями. Использовать эту емкость рекомендуется в случае, если по каким-либо причинам не применяется конденсатор C_Y между фазой и нейтралью.

Внутренняя балансировка трансформатора

Еще одним способом, позволяющим уменьшить синфазные помехи, является т. н. балансировка трансформатора (Balance techniques). Внутренняя балансировка заключается в использовании экранирующих слоев в обмотке и в добавлении вспомогательной гасящей обмотки. Последний способ показан на рис. 4. Вспомогательная обмотка N_{AUX} включена встречно первичной обмотке. Путем подбора числа витков обмотки N_{AUX} можно добиться, чтобы выполнялось равенство $i_{CM1} = i_{CM2}$; при этом синфазный ток протекает только между первичной и вспомогательной обмоткой, минуя вторичную обмотку. Внешняя балансировка заключается во включении дополнительного конденсатора между первичной и вторичной или одной из вторичных обмоток, если речь идет о многоканальном преобразователе.

Экранирующая обмотка, выполненная проводом или слоем фольги, значительно уменьшает синфазный ток через паразитные межобмоточные емкости. На рис. 5 показана схема обратногоходового преобразователя с экранирующей обмоткой, соединенной с землей первичной стороны (рис. 5а); в трансформаторе показаны паразитные межобмоточные емкости и паразитные емкости между экранирующей обмоткой и обмотками трансформатора. Первичная обмотка состоит из двух слоев по 12 витков в каждом, а вторичная обмотка – однослойная из восьми витков.

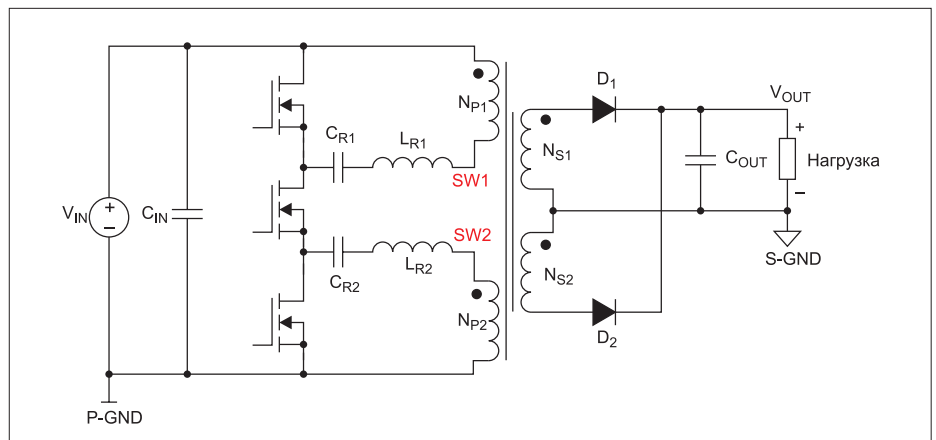


Рис. 3. Симметричная топология резонансного LLC-преобразователя

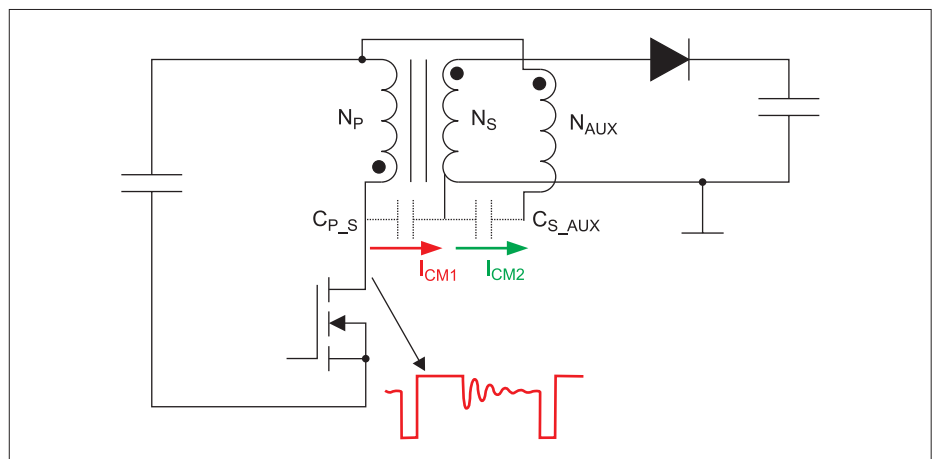


Рис. 4. Использование вспомогательной гасящей обмотки

Первичная и вторичная обмотки намотаны отдельно и не перемежаются.

Экранирующая обмотка трансформатора в большинстве случаев позволяет удовлетворить требованиям медицинских стандартов электробезопасности в части ограничения токов утечки на пациента. Тем не менее, поскольку число витков обмотки экрана и вторичной обмотки, как правило, не совпадают, особенно если экранирующая обмотка выполнена из фольги, синфазный ток не уменьшается до нуля. При всех достоинствах экранирующей обмотки следует отметить и недостатки этого способа. Из-за увеличения расстояния между первичной

и вторичной обмотками возрастает индуктивность рассеяния, а при высокой рабочей частоте в экранирующей обмотке увеличиваются потери из-за вихревых токов. Таким образом, в экранирующей обмотке следует использовать тонкую фольгу, желательно толщиной не более 100 мкм.

Балансировка с помощью добавочного конденсатора

Рассмотрим топологию обратногоходового преобразователя со вспомогательной обмоткой для обратной связи. Его схема приведена на рис. 6а. Паразитные связи между первич-

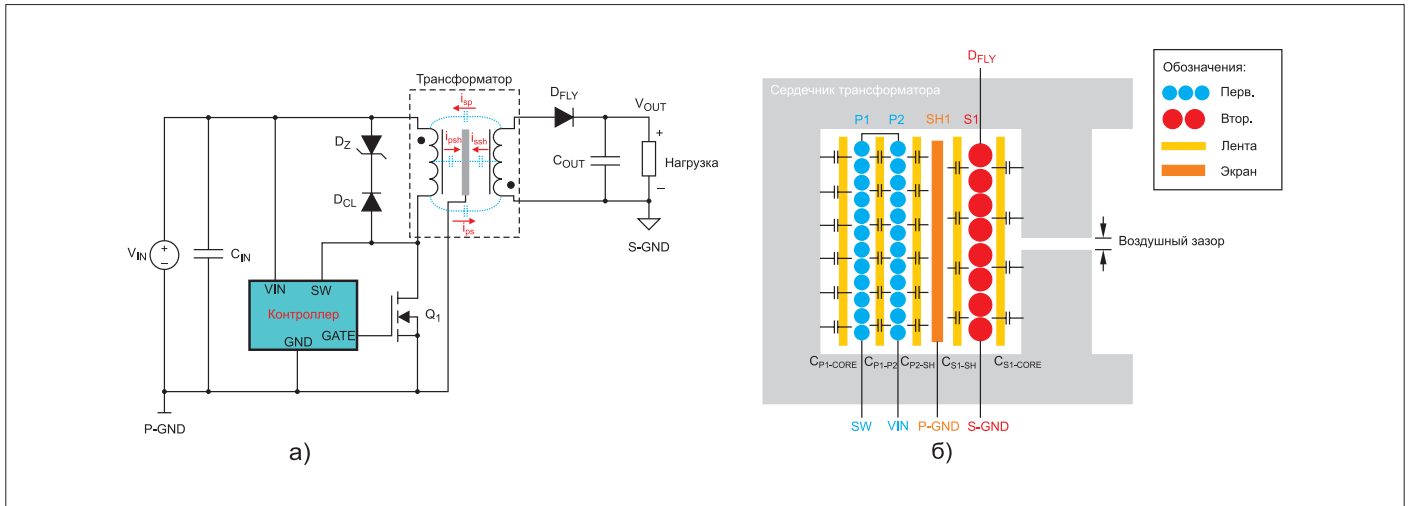


Рис. 5. Использование экранирующей обмотки трансформатора: а) обратноходовой преобразователь; б) окно трансформатора

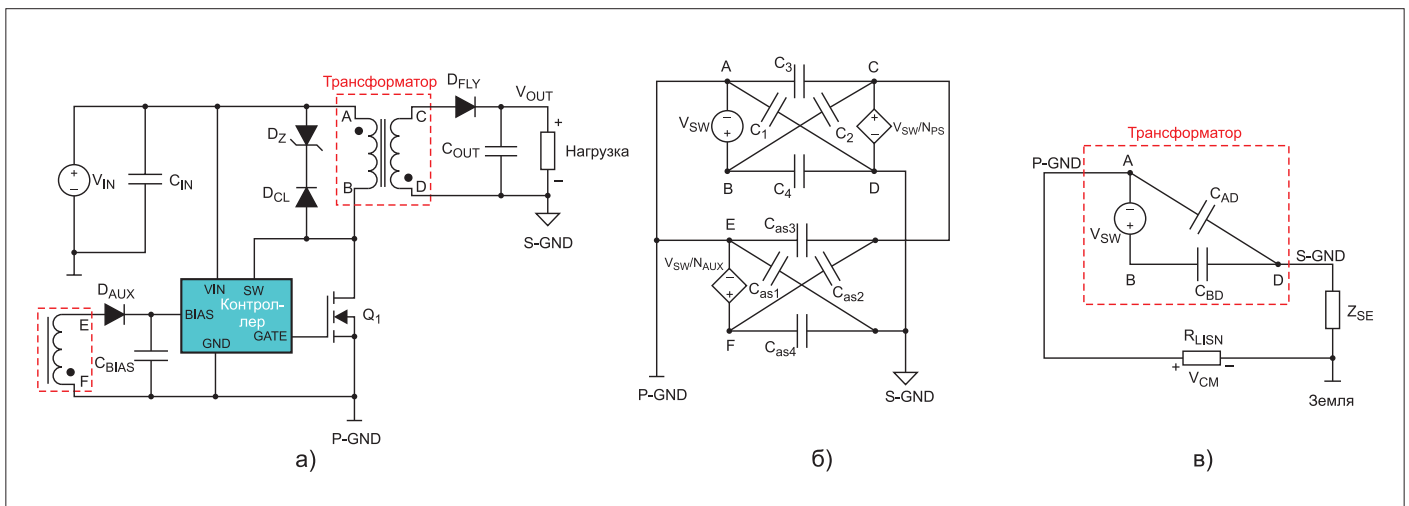


Рис. 6. а) схема обратноходового преобразователя со вспомогательной обмоткой; б) схема замещения из четырех конденсаторов; в) упрощенная эквивалентная схема из двух конденсаторов

ной обмоткой \$N_{PS}\$ и вспомогательной \$N_{AUX}\$ исключим из рассмотрения, поскольку ток между этими обмотками протекает через паразитные емкости только с первичной стороны и не влияет на синфазный ток.

Для описания связей между вторичной и первичной обмотками, а также между вторичной и вспомогательной обмотками, можно воспользоваться эквивалентной схемой из четырех конденсаторов (рис. 6б). Будем считать, что импеданс входного конденсатора для синфазного тока невелик и им можно пренебречь, поэтому выводы «А» и «Е» трансформатора закорочены на землю P-GND. Далее с помощью описанных в [1] приемов перейдем к упрощенной эквивалентной схеме из двух конденсаторов (рис. 6в). Емкость конденсатора \$C_{BD}\$ определяется из соотношения (1):

$$C_{BD} = C_2 \times [1 - (1/N_{PS})] - (C_3/N_{PS}) + C_4 + C_{AS2} \times [(1/N_{AUX}) - (1/N_{PS})] - (C_{AS3}/N_{PS}) + (C_{AS4}/N_{AUX}). \quad (1)$$

Как показано в [1], это уравнение можно свести к выражению (2):

$$C_{BD} = (V_{AD}/V_{AB}) \times C_{TOTAL}, \quad (2)$$

где \$C_{TOTAL} = C_1 + C_2 + C_3 + C_4\$.

Как следует из уравнения (1), емкость можно значительно уменьшить, если увеличить отрицательные члены этого соотношения. Самый простой путь для этого состоит в установке дополнительного внешнего конденсатора \$C_{EXT}\$ параллельно \$C_3\$. Величина емкости этого конденсатора определится из простой формулы:

$$C_{EXT} = N_{PS} \times C_{BD}. \quad (3)$$

Если же величина емкости \$C_{BD}\$, полученной из (1), имеет отрицательное значение, внешний конденсатор следует подключить параллельно емкости \$C_4\$ между выводами «В» и «D».

Способ намотки обмоток трансформатора для уменьшения синфазных помех

Альтернативой применению добавочных конденсаторов может служить способ

намотки обмоток трансформатора с чередованием. При этом слои обмоток чередуются друг с другом таким образом, чтобы слои, в которых скорость изменения напряжения вдоль обмотки идентична или мало отличается, чередуются и располагаются рядом друг с другом. В этом случае уменьшается и синфазный ток через паразитные емкости. Подобная схема намотки и распределения напряжения по слоям обмотки приведена на рис. 7.

Как видно из рис. 7, скорости изменения напряжения по высоте в слоях вторичной обмотки \$S1\$ и \$S2\$ противоположны по знаку изменению напряжения в слое первичной обмотки \$P1\$, расположенном между слоями \$S1\$ и \$S2\$. Поэтому, даже несмотря на то, что при таком способе намотки паразитная межобмоточная емкость увеличивается, синфазные токи уменьшаются. Кроме того, такой способ намотки приводит к уменьшению индуктивности рассеяния. К сожалению, в этом случае невозможно использовать экранирующую обмотку.

Для того чтобы компенсировать синфазный ток между слоем вторичной обмотки \$S2\$

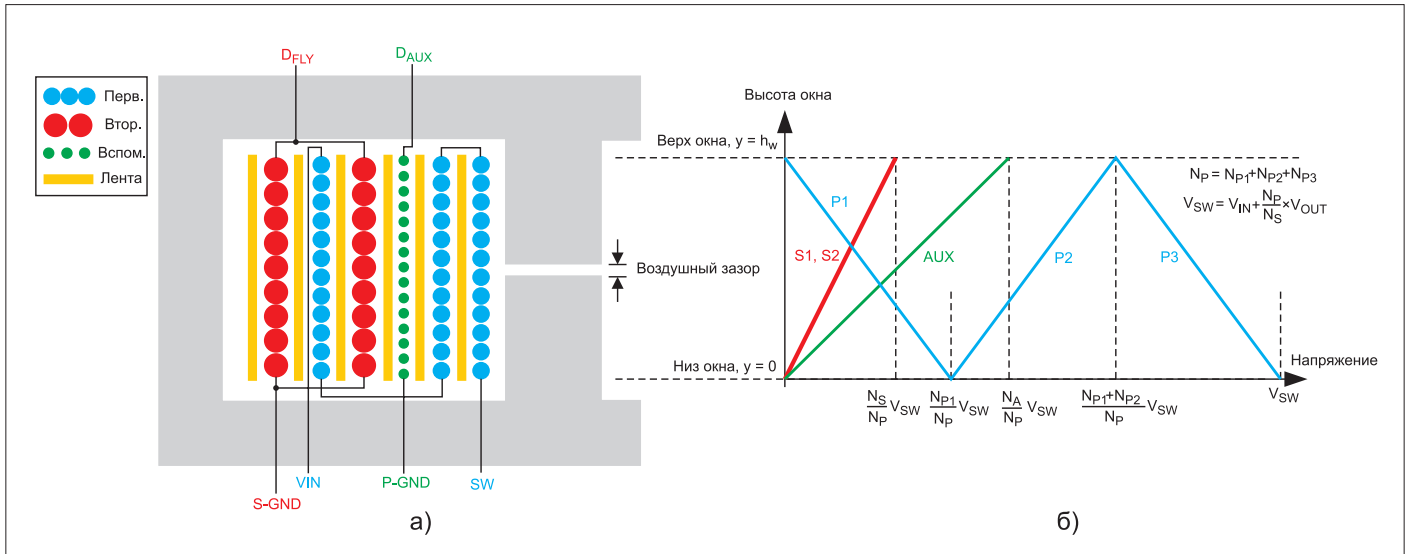


Рис. 7. а) схема чередующейся намотки; б) распределение напряжения в слоях обмотки

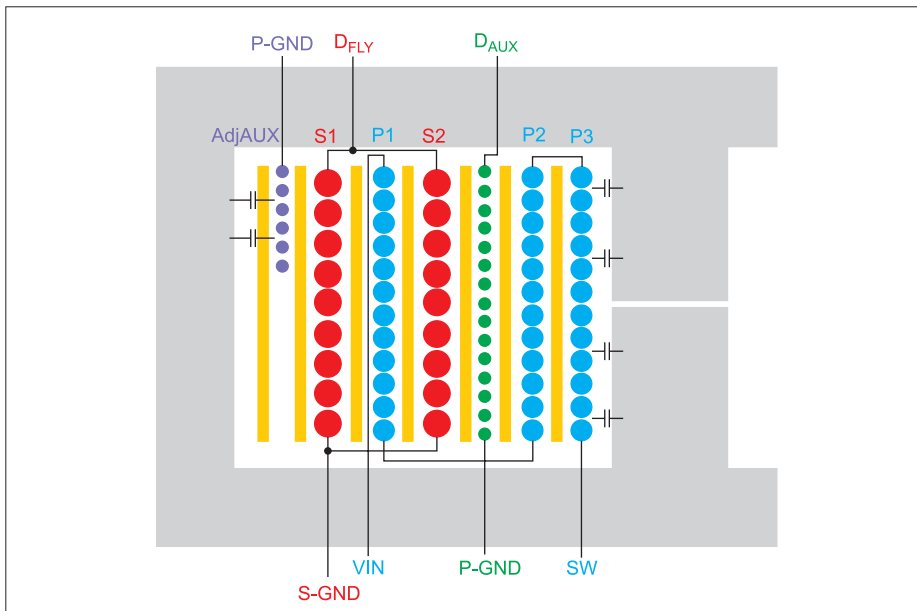


Рис. 8. Намотка трансформатора с дополнительной секцией

и дополнительной обмоткой можно домотать обмотку AUX. Этот способ показан на рис. 8. Дополнительная часть обмотки AUX имеет обозначение AdjAUX и расположена слева от секции вторичной обмотки S1. Поскольку секция AdjAUX находится с наружной части обмотки, не составляет большого труда подобрать требуемое число витков секции AdjAUX для минимизации синфазного тока.

Причем эта секция может не использоваться в электрической схеме, и ее неподключенный к земле вывод можно оставить «висеть в воздухе». Разумеется, все манипуляции с обмоткой проводятся на опытном образце трансформатора, после чего уточняется документация и трансформатор поступает в серийное производство. ■

ЛИТЕРАТУРА

1. Георгий Боков. Синфазные электромагнитные помехи в обратноходовом преобразователе//Электронные компоненты № 2. 2019.

Статья опубликована в журнале «Электронные компоненты» № 12'2019