

Д. Р. Манбеков, Д. А. Шевцов

СИММЕТРИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЕРЕМАГНИЧИВАНИЯ СЕРДЕЧНИКА ДВУХТАКТНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ В РЕЖИМЕ *CURRENT MODE*

D. R. Manbekov,
D. A. Shevtsov

Balancing magnetic core magnetizing reversal process of a push-pull converter operating in current mode

Авторами показана возможность обеспечения симметричного перемагничивания сердечника силового трансформатора в двухтактном преобразователе в режиме *Current mode*. При этом обеспечивается работоспособность преобразователя, как в номинальном, так и в аварийном режимах.

Ключевые слова: симметрирование, магнитный сердечник, трансформатор, двухтактный преобразователь, токовое управление

The authors show the possibility of providing symmetrical magnetizing reversal for a push-pull converter operating in current mode. Working capacity herewith is guaranteed both under nominal and emergency conditions.

Key words: balancing, magnetic core, transformer, push-pull converter, current mode

Одной из важнейших проблем при проектировании двухтактных преобразователей постоянного напряжения с ШИМ-регулированием является обеспечение симметричного перемагничивания сердечника силового трансформатора. В противном случае возможно возникновение режима несимметричного перемагничивания, что может привести к магнитному насыщению сердечника, и, как результат, к следующим нежелательным последствиям:

- ненормированным броскам тока и, как следствие, к уменьшению надежности;
- увеличению потерь и, следовательно, к снижению КПД;
- возрастанию помех и ухудшению электромагнитной совместимости.

Причины появления режима несимметричного перемагничивания могут быть самые разные, однако все их можно свести к эквивалентной неодинаковости длительностей смежных управляющих импульсов [1]. Особенно остро проблема несимметрии проявляется при повышенном напряжении питания и повышенных частотах преобразования. Как отмечалось в [2], несимметрия может возникнуть при различных способах управления, если не применять специальных симметрирующих контуров.

В [3] предложен новый метод симметрирования двухтактных преобразователей. Однако результаты компьютерного моделирования показали, что ему свойственны следующие недостатки:

- наличие незначительной постоянной составляющей тока первичной цепи, что приводит к подмагниченности сердечника силового трансформатора [3];
- возможно нарушение работы симметрирующего контура в аварийных и переходных режимах при

срабатывании токовой защиты, что приводит к одностороннему магнитному насыщению [3];

- наиболее точная работа формирователя ВСИ обеспечивается только при измерении напряжения на первичной обмотке [3].

Первый из рассмотренных недостатков является принципиально неустранимым, однако постоянную составляющую тока можно уменьшить максимально точно рассчитав и подобрав элементы интегрирующей цепочки формирователя ВСИ [3].

Нарушение работы симметрирующего контура в аварийных режимах является устранимым недостатком. Для этого требуется согласовать работу токовой защиты с работой формирователя ВСИ с помощью специальных схемотехнических решений.

Последний из отмеченных недостатков обусловлен тем, что трансформатор не передает постоянную составляющую напряжения во вторичную цепь, и, следовательно, она не может быть учтена при измерении напряжения на вторичных обмотках.

Таким образом, этот метод симметрирования [3] хоть и является достаточно эффективным при использовании управления по напряжению (*Voltage mode*), но требует соблюдения определенных требований, а также введение узла, согласующего работу формирователя ВСИ и токовой защиты, что усложняет схему устройства.

Авторами предложен новый метод симметрирования, основанный на управлении в режиме *Current mode*. Его особенностью является организация обратной связи по току таким образом, что происходит автоматическое симметрирование (автосимметрирование) процесса перемагничивания сердечника силового трансформатора. Таким образом, отпадает необходимость в дополнительных контурах симметрирования, что упрощает

конструкцию преобразователя. На рис. 1 и 2 соответственно представлена функциональная схема ШИМ-контроллера UC 1825 [4] и способ его подключения в составе мостового преобразователя, с управлением в режиме *Current mode*. Несомненным достоинством этого ШИМ-контроллера является возможность реализовывать управление, как по току (режим *Current mode*), так и по напряжению (режим *Voltage mode*).

Для эффективного применения предложенного метода симметрирования необходимо учесть следующие особенности режима *Current mode*:

- устойчивая работа преобразователя в режиме безразрывных токов обеспечивается только при коэффициенте заполнения от 0 до 0,5;
- для обеспечения работы преобразователя во всем диапазоне регулирования необходимо использовать специальные схемы выпрямителей, например, с удвоением тока [5];
- при использовании режима *Current mode* и выпрямителей с удвоением тока коэффициент передачи силового трансформатора должен быть в два раза больше, чем в режиме *Voltage mode* с традиционными схемами выпрямления.

Поэтому для получения требуемого выходного напряжения и обеспечения работы преобразователя во

всем диапазоне изменения коэффициента заполнения (k_f) в схему были внесены следующие изменения:

- количество витков вторичной обмотки увеличено в два раза;
- в качестве выпрямителя применена схема с удвоением тока.

Моделирование преобразователя проводилось в системе OrCAD 9.2 в двух режимах работы:

- 1) при отсутствии асимметрии, т. е. при отсутствии факторов, вызывающих несимметричное перематгничивание;
- 2) при наличии асимметрии, т. е. при наличии факторов, вызывающих несимметричное перематгничивание.

Для введения асимметрии в моделируемую структуру используются два источника, работающие в разные полупериоды: в один полупериод первичным источником служит V1, а в другой — V3 (рис. 2). При моделировании преобразователя в асимметричном режиме напряжения на источниках соответственно равны:

- V1=293 В;
- V2=307 В.

Результаты моделирования преобразователя с подчиненным регулированием при отсутствии асимметрии и при наличии асимметрии приведены на рис. 3 и 4.

Из приведенных графиков видно, что в обоих случаях имеет место симметричный режим перематгничивания сердечника силового трансформатора. Таким образом, можно сделать вывод, что в номинальном режиме рассматриваемый метод достаточно эффективен.

Теперь необходимо оценить работоспособность схемы при коротком замыкании в нагрузке, так как срабатывание токовой защиты может привести к нарушению алгоритма симметрирования. Результаты моделирования представлены на рис. 5, из которых видно, что срабатывание токовой защиты не привело

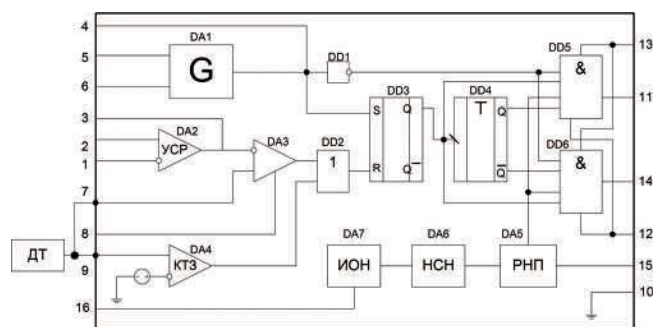


Рис. 1. Функциональная схема ШИМ-контроллера UC 1825

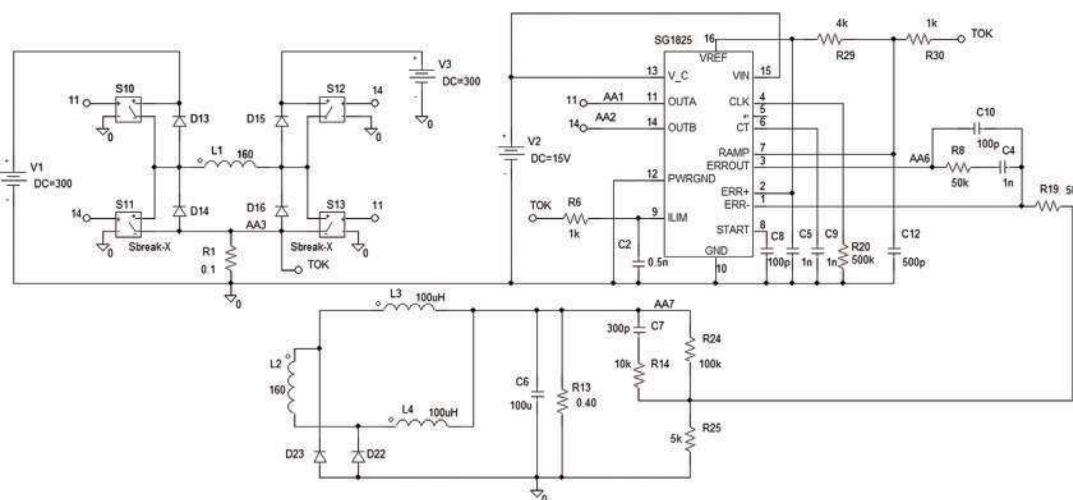


Рис. 2. Схема мостового преобразователя, управляемого ШИМ-контроллером UC 1825 в режиме *Current mode*

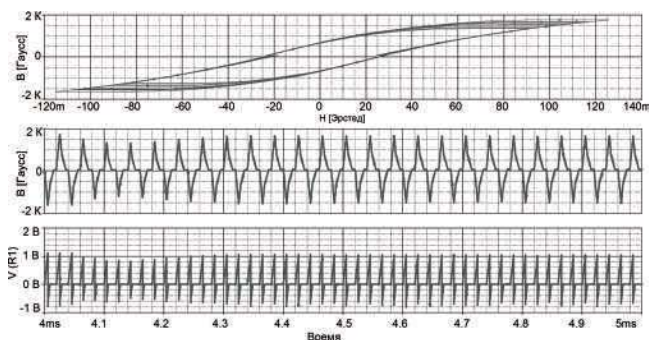


Рис. 3. Результаты моделирования при отсутствии асимметрии

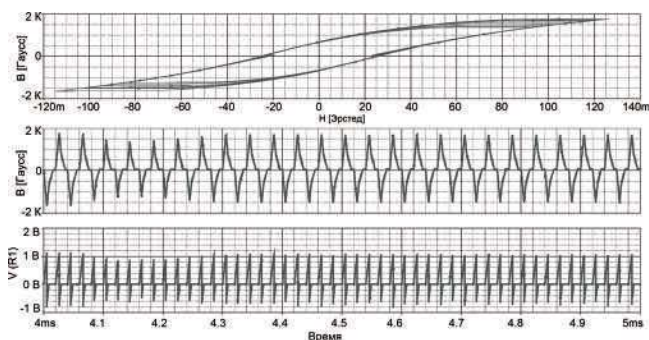


Рис. 4. Результаты моделирования при наличии асимметрии

к одностороннему магнитному насыщению, что выгодно отличает этот метод управления от ранее рассмотренного [3].

Таким образом, моделирование показало, что предложенный метод симметрирования, использующий подчиненное регулирование, обеспечивает симметричный режим перемагничивания сердечника силового трансформатора не только в номинальном режиме, но и в аварийном. Причем без использования дополнительных симметрирующих и согласующих контуров.

Предложенный метод симметрирования обладает существенными преимуществами по сравнению с [3], а именно:

- для реализации данного метода симметрирования не требуется введения дополнительных контуров не только в номинальном, но и в аварийном режимах;
- симметрирование процесса перемагничивания сердечника силового трансформатора двухтактного преобразователя обеспечивается как в номинальном, так и в аварийном режимах;
- представленный метод имеет наименьшее запаздывание из всех рассмотренных.

Однако нельзя не отметить и недостатки этого метода:

- необходимость двукратного увеличения витков вторичной обмотки при использовании выпря-

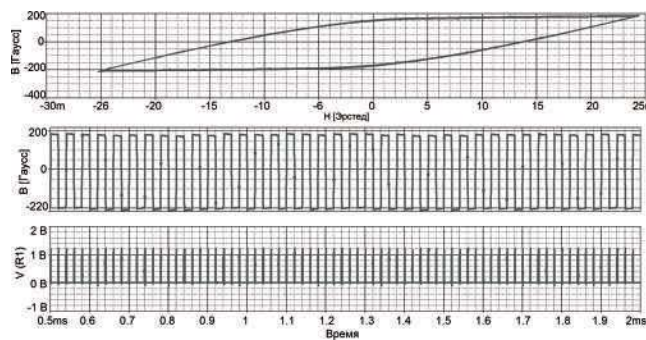


Рис.5. Результаты моделирования при наличии короткого замыкания в нагрузке

мителей с удвоением тока для обеспечения устойчивой работы преобразователя во всем диапазоне регулирования;

- ограниченный диапазон регулирования ($0 < k_3 < 0,5$) в режиме безразрывных токов при использовании обычных схем выпрямления, при котором обеспечивается устойчивая работа;
- для многоканальных преобразователей выходные дроссели должны быть многообмоточными, что усложняет технологию.

Литература

1. Шевцов Д. А., Манбеков Д. Р. Моделирование процессов несимметричного перемагничивания двухтактных ИВЭП // Практическая силовая электроника, № (30), 2008, С. 41–45.
2. Шевцов Д. А., Манбеков Д. Р. Сравнительный анализ различных типов транзисторных преобразователей постоянного напряжения при несимметричном режиме перемагничивания. // Практическая силовая электроника, № (33), 2009, С. 45–47.
3. Манбеков Д. Р., Шевцов Д. А. Обеспечение симметричного перемагничивания сердечника трансформатора в двухтактных преобразователях напряжения с управлением по вольт-секундному интегралу. // Практическая силовая электроника, № (35), 2009, С.41–44.
4. Интегральные микросхемы: Микросхемы для импульсных источников питания и их применение. М. ДОДЭКА, 1996.
5. Овчинников Д. А., Кастров М. Ю., Карзов Б. Н., Исаков М. С. Выпрямители со средней точкой и выпрямители с удвоением тока // Практическая силовая электроника, “Типография АРЕС”, Москва, 2002.

Шевцов Даниил Андреевич, д. т. н., профессор кафедры “Микроэлектронных электросистем” МАИ, тел. (499)158-45-59;

Манбеков Дмитрий Рауфович, аспирант кафедры “Микроэлектронных электросистем” МАИ, тел. (499)158-45-59.

Д. А. Шевцов, Д. Р. Манбеков

СИММЕТРИРОВАНИЕ РЕЖИМА ПЕРЕМАГНИЧИВАНИЯ СЕРДЕЧНИКА ТРАНСФОРМАТОРА МОСТОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ПУТЕМ ИЗМЕНЕНИЯ НАКЛОНА ОПОРНОГО ПИЛООБРАЗНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ШИМ

D. A. Shevtsov,
D. R. ManbekovBalancing of full bridge converter transformer core
magnetization reversal mode by adjustment of reference
ramp slope of PWM voltage

В статье представлено описание и результаты моделирования нового, разработанного авторами, метода симметрирования для двухтактных преобразователей напряжения, работающих в режиме Voltage mode. При этом обеспечивается работоспособность преобразователя, как в номинальном, так и в аварийном режимах.

Ключевые слова: симметрирование, магнитный сердечник, трансформатор, режим перемагничивания, двухтактный преобразователь, управление по напряжению

The paper presents the description and simulation results of a new, proposed by the authors method of balancing for push-pull voltage converters operating in voltage mode. Working capacity herewith is guaranteed both under nominal and emergency conditions.

Key words: balancing, magnetic core, transformer, magnetic saturation, magnetization reversal, push-pull converter, voltage mode

В [1] рассмотрен один из новых методов симметрирования процесса перемагничивания сердечника трансформатора двухтактных транзисторных преобразователей постоянного напряжения. Этот метод основан на использовании принципа подчиненного регулирования в режиме *Current mode* (токового управления). Результаты компьютерного и натурного моделирования показали высокую эффективность этого метода, как в номинальном, так и в аварийном режимах [1].

Однако многие отечественные ШИМ-контроллеры двухтактных преобразователей напряжения, неспособны работать в режиме токового управления, а могут работать только в режиме *Voltage mode* (управления по напряжению).

Недостатки рассмотренных ранее методов симметрирования [2] для режима *Voltage mode* приводят к необходимости поиска и разработке других методов симметрирования, обеспечивающих более эффективную работу преобразователя, как в номинальном, так в переходном и аварийном режимах.

Наиболее эффективным способом симметрирования является коррекция длительности управляющих импульсов, что обеспечивает выравнивание вольт-секундного интеграла в смежные полупериоды [3]. Для этого в новом методе, разработанном авторами, предлагается на части полупериода изменять крутизну опорного пилообразного напряжения (ОПН) широтно-импульсного модулятора, корректируя тем самым длительность соответствующего управляющего импульса.

Временные диаграммы, поясняющие суть нового метода симметрирования для ШИМ с модуляцией по переднему и заднему фронту приведены на рис. 1.

Совокупность причин, вызывающих несимметрию, может быть сведена к эквивалентной неодинаковости длительностей управляющих импульсов [4] и, как следствие, к неодинаковым задержкам на отключение. На рис. 1 разница в задержках на отключения обозначена $t_{\text{зад}}$. При этом без применения коррекции длительности управляющих импульсов одной диагонали имеют время t_1 , а другой диагонали: $t_1 + t_{\text{зад}}$. Однако, корректируя специальным образом наклон пилы, можно добиться выполнения условия: $t_2 + t_{\text{зад}} = t_1$, обеспечив тем самым равенство вольт-секундных интегралов и, как следствие, симметричный режим перемагничивания.

Для коррекции ОПН (с целью изменения крутизны соответствующего участка) предлагается времязадающий конденсатор ШИМ-контроллера C_i заряжать дополнительным током от блока симметрирования, как показано на структурной схеме, представленной на рис. 2.

Схема содержит следующие функциональные блоки:

- датчики тока ДТ1, ДТ2;
- фильтры низкой частоты ФНЧ1, ФНЧ2;
- узел рассогласования УР1, УР2;
- усилители сигналов рассогласования УСР1, УСР2;
- ключи Кл1 и Кл2, управляемые выходным напряжением ШИМ-контроллера;

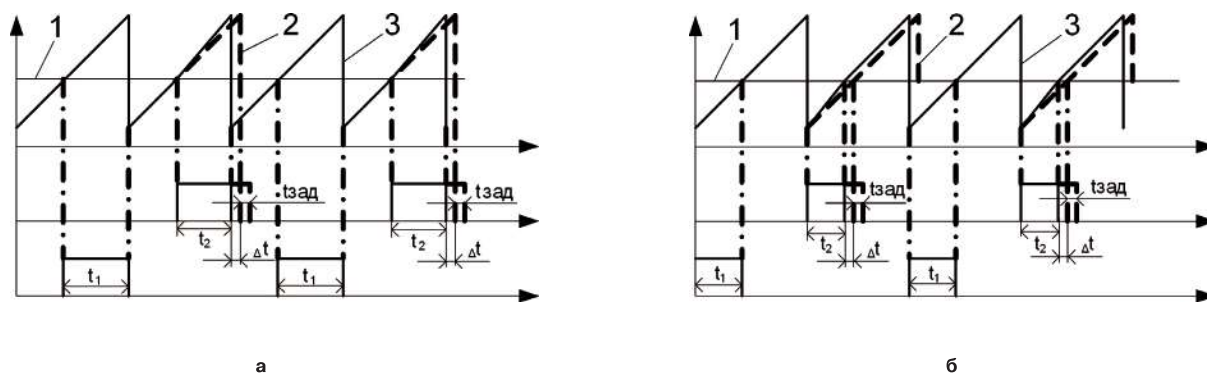


Рис. 1. Коррекция ОПН для ШИМ с модуляцией по переднему фронту (а) и по заднему фронту (б)

(1 – сигнал с выхода усилителя сигнала рассогласования; 2 – нескорректированное ОПН; 3 – скорректированное ОПН; t_1 – длительность управляющего импульса 1 диагонали; t_2 – длительность управляющего импульса 2 диагонали с учетом скорректированного ОПН; $t_{\text{зад}}$ – эквивалентное время задержки на отключение; Δt – разница длительностей нескорректированного и скорректированного управляющих импульсов, вызванное изменением наклона ОПН)

- токозадающий резистор $R_{\text{зад}}$.

Схема работает следующим образом. Информация о мгновенном значении тока каждой диагонали преобразователя снимается с датчиков тока ДТ1, ДТ2. Далее она поступает на соответствующие ФНЧ, с которых снимается информация о среднем значении токов в диагоналях и передается на узел рассогласования. Сигнал рассогласования поступает на вход соответствующего УСР. В случае если выходное напряжение УСР положительно, то в соответствующий полупериод времязадающий конденсатор C_t помимо основного зарядного тока, задаваемого резистором R_t , будет заряжаться дополнительным током от блока симметрирования через соответствующий ключ и времязадающий резистор $R_{\text{зад}}$.

Благодаря тому, что ключи Кл1, Кл2 управляются выходным напряжением ШИМ-контроллера, изменение наклона ОПН происходит именно в тот полупериод, который стремится вызвать магнитное насыщение сердечника. Благодаря дополнительному зарядному току время заряда конденсатора C_t уменьшается, а, следовательно, уменьшается и длительность соответствующего управляющего импульса. Как следствие происходит выравнивание вольт-секундных интегралов смежных полупериодов.

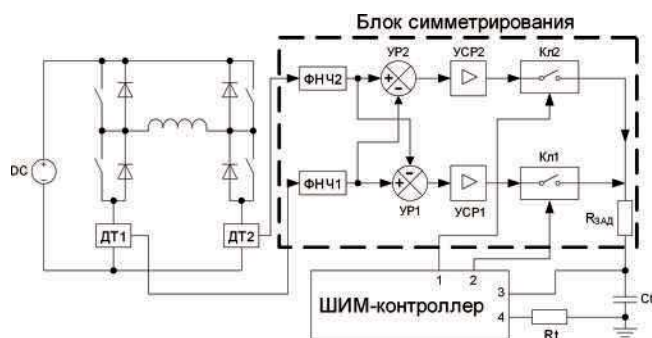


Рис.2 Структурная схема блока симметрирования в составе мостового преобразователя

(1, 2 – выходы управляющих импульсов ШИМ-контроллера; 3 – выход для времязадающего конденсатора; 4 – выход для времязадающего резистора)

Следует отметить, что такое управление ключами Кл1, Кл2 позволяет обеспечить синхронизацию режимов работы блока симметрирования с блоком токовой защиты.

Для проверки предложенного метода было проведено натурное и компьютерное моделирование в системе OrCAD 9.2 с использованием ШИМ-контроллеров UC 1825 (с модуляцией по заднему фронту) и TL 494 (с модуляцией по переднему фронту). Моделирование преобразователя проводилось при наличии факторов, вызывающих несимметричное перемagnичивание (в режиме асимметрии). Результаты моделирования подтвердили высокую эффективность предложенного метода. Отметим, что в моделях ШИМ-контроллеров, имеющихся в стандартных библиотеках OrCAD 9.2, частота жестко задается в параметрах контроллера, а не с помощью RC-элементов. Поэтому для получения достоверных результатов компьютерного моделирования структурные схемы этих ШИМ-контроллеров были созданы на стандартных элементах OrCAD 9.2. Частота в созданных ШИМ-контроллерах задается уже с помощью внешних RC-элементов, что позволило получить достоверные результаты при компьютерном моделировании.

Электрическая схема мостового преобразователя напряжения с дросселем постоянного тока во вторичной цепи и блоком симметрирования с коррекцией ОПН в соответствии со структурной схемой, показанной на рис. 2, представлена на рис. 3. Блок симметрирования включает в себя следующие элементы:

- ДТ1, ДТ2 на резисторах R22, R23;
- ФНЧ1 и ФНЧ2 на элементах R41, C14 и R42, C15;
- узлы рассогласования и УСР соответственно на операционных усилителях U3 и U4;
- управляемые ключи Кл1, Кл2 соответственно на транзисторах и диодах Q1, Q2, D9 и Q3, Q4, D10 соответственно;
- токозадающие элементы на резисторах R27, R40.

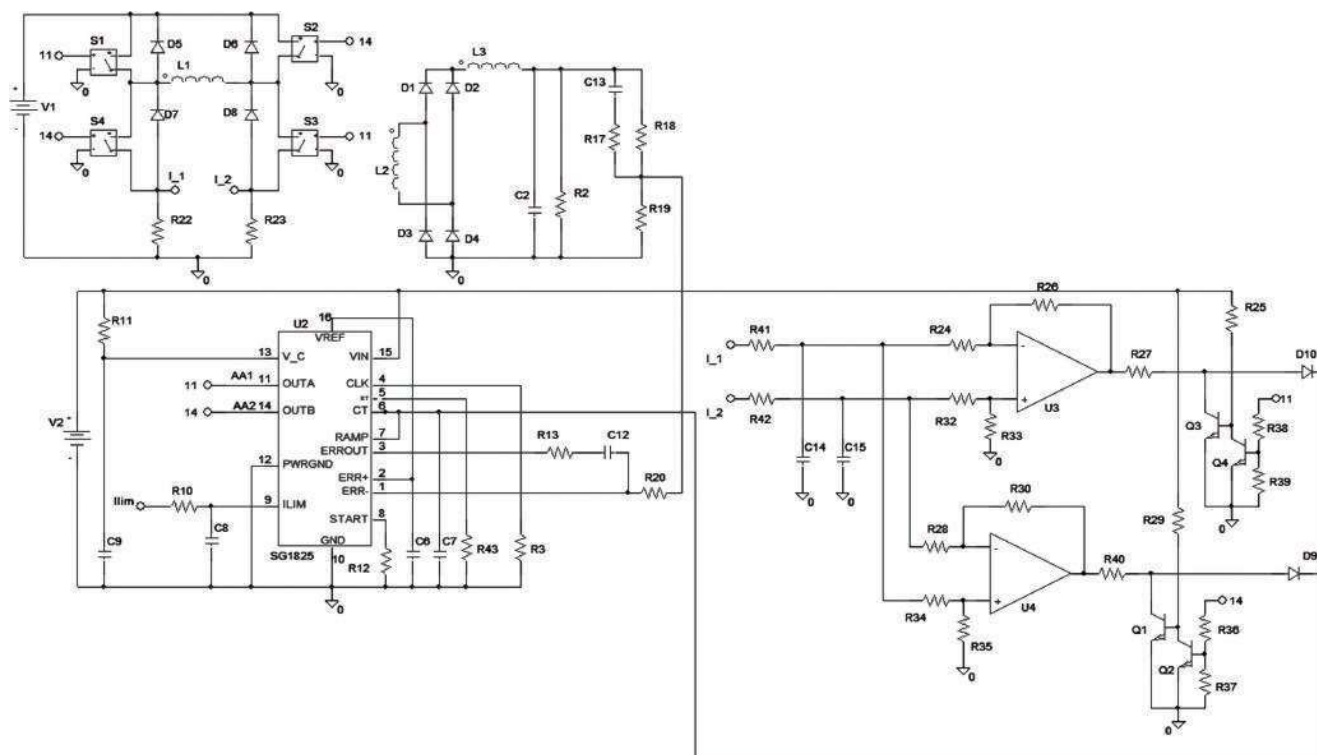


Рис. 3. Электрическая схема мостового преобразователя с симметрирующим контуром

Результаты моделирования представлены на рис. 4 и 5. Токи, протекающие через силовые ключи S1 и S2 (рис. 2), а также петля гистерезиса при наличии асимметрии и отсутствии симметрирующего контура показаны на рис. 4. Из рис. 4а видно, что режим перемагничивания несимметричен. При этом рабочая точка сердечника трансформатора достаточно глубоко заходит в область магнитного насыщения. Вследствие этого в конце полупериодов силовые транзисторы одной из диагоналей испытывают большие перегрузки по току (рис. 4б). Как показывает компьютерное моделирование и натурные эксперименты амплитуда бросков тока в конце полупериодов может в 5–7 раз превосходить амплитуду тока при симметричном перемагничивании сердечника. Броски тока сопровождаются также ухудшением электромагнитной совместимости преобразователя, понижением КПД и надежности.

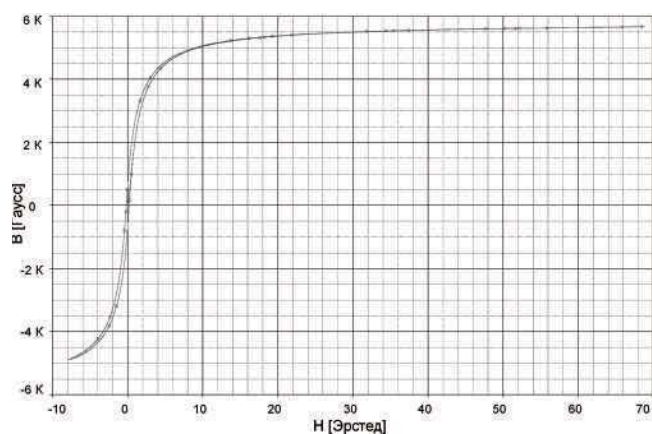
Рис. 5 демонстрирует работу мостового преобразователя при наличии асимметрии, но с использованием симметрирующего контура. Из рис. 5а видно, что перемагничивание происходит по симметричному циклу, благодаря наличию симметрирующего контура.

Токи, протекающие в диагоналях моста, представлены на рис. 5б. Благодаря наличию контура симметрирования они практически одинаковы, несмотря на присутствующую в схеме асимметрию. Отсутствие бросков тока в конце полупериодов также свидетельствует об эффективной работе контура симметрирования.

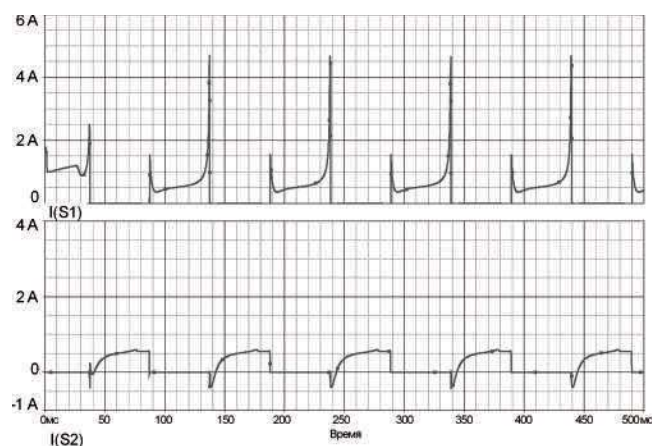
Результаты моделирования мостового преобразователя с ШИМ-контроллером TL 494 также полностью подтверждают высокую эффективность предложенного метода симметрирования.

Перечислим некоторые особенности рассмотренного метода симметрирования:

- благодаря наличию ФНЧ симметрирующий контур имеет высокую помехозащищенность;
- из-за наличия ФНЧ блок симметрирования обладает инерционностью;
- рассмотренный метод симметрирования может быть применен, как в одноканальных преобразователях, так и в многоканальных без каких-либо дополнений;
- предложенный метод симметрирования требует применения двух датчиков тока;
- предложенный метод симметрирования применим для любых двухтактных структур преобразователей (мостовых, полумостовых, со средней точкой, с дросселем постоянного в первичной цепи, с дросселем постоянного тока во вторичной цепи, с дросселем переменного тока);
- рассмотренный метод симметрирования остается работоспособным при модуляции, как переднего, так и заднего фронтов управляющих импульсов, а также при модуляции обоих фронтов;
- метод симметрирования сохраняет работоспособность как в номинальных, так в аварийных и переходных режимах;
- работа узла токовой защиты не оказывает влияния на работу блока симметрирования.



а



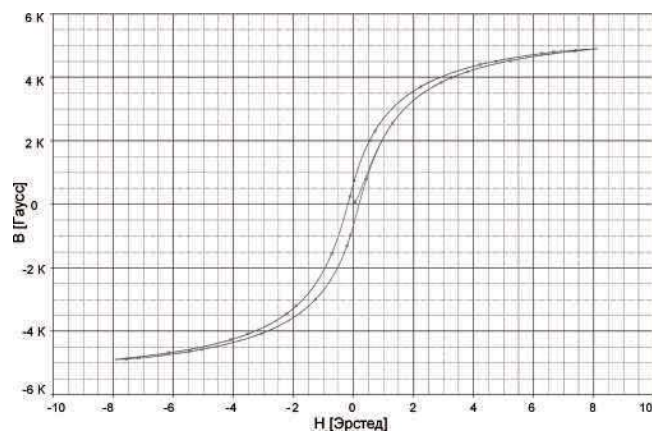
б

Рис. 4. Петля гистерезиса при работе преобразователя без симметрирующего контура (а); графики токов в ключах S1, S2 при работе преобразователя без симметрирующего контура (б)

Необходимо отметить, что в рамках проведенных исследований вопрос обеспечения устойчивой работы преобразователя с описанным выше методом симметрирования не рассматривался.

Литература

1. Манбеков Д. Р., Шевцов Д. А. Симметрирование процесса перемагничивания сердечника двухтактного преобразователя в режиме *Current mode* // Практическая силовая электроника, № 1 (37), 2010. С. 33–36.
2. Манбеков Д. Р., Шевцов Д. А. Моделирование двухтактного преобразователя с ШИМ-регулированием и контуром симметрирования по вольт-секундному интегралу // Практическая силовая электроника, № 4 (36), 2009. С. 45–48.
3. Шевцов Д. А., Манбеков Д. Р. Моделирование



а



б

Рис. 5. Петля гистерезиса при работе преобразователя с симметрирующим контуром (а); графики токов в ключах S1, S2 при работе преобразователя с симметрирующим контуром (б)

процессов несимметричного перемагничивания двухтактных ИВЭП // Практическая силовая электроника, № (30). 2008. С. 41–45.

4. Шевцов Д. А., Манбеков Д. Р. Сравнительный анализ и классификация методов симметрирования двухтактных преобразователей напряжения с ШИМ-регулированием // Силовые транзисторные устройства. Выпуск 2. / Тематический сборник научных трудов. Под редакцией Е. В. Машукова М.: “Экон-Информ”, 2006. С.58–75.

Шевцов Даниил Андреевич, д. т. н., профессор кафедры “Микроэлектронных электросистем” МАИ, тел. (499)158-45-59;

Манбеков Дмитрий Рауфович, аспирант кафедры “Микроэлектронных электросистем” МАИ, тел. (499)158-45-59.