

УДК 621.311.6 + 621.3.072

Д. В. Сеньков^{1,2}, Д. Н. Пурескин¹, А. С. Медведко¹

¹ *Институт ядерной физики им. Будкера СОРАН
пр. Акад. Лаврентьева, 11, Новосибирск, 630090, Россия*

² *Новосибирский государственный университет
ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, Россия*

D.V.Senkov@inp.nsk.su

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ НАПРЯЖЕНИЯ С ОБРАТИМЫМ СИНХРОННЫМ ВЫПРЯМИТЕЛЕМ НА ВЫХОДЕ НА БАЗЕ ЦИФРОВОГО СИГНАЛЬНОГО ПРОЦЕССОРА

Рассматриваются структура и алгоритмы управления 10 кВт источником с 25 кГц преобразователем частоты и с синхронным выпрямителем на выходе, позволяющим получать изолированное от входной сети выходное напряжение или ток произвольной формы с выходной частотой от постоянного тока до 1 кГц. Применяемые схемотехнические решения позволяют обеспечить рекуперацию энергии в накопительную емкость источника и обеспечивают мягкую коммутацию ключей синхронного выпрямителя. Описано его применение в качестве источника регулируемого синусоидального напряжения, работающего на частоте 400 Гц.

Ключевые слова: быстроперестраиваемый источник тока, генератор сигналов произвольной формы, синхронный выпрямитель, мягкая коммутация, стабилизация тока, цифровая петля стабилизации, цифровой сигнальный процессор.

Введение

В последнее десятилетие наблюдается существенный прогресс в развитии цифровой обработки сигналов. В том числе появилась возможность применять цифровую обработку сигналов в схемах управления источниками питания. Разработчиками микроэлектронных компонент стали выпускаться производительные сигнальные процессоры, предназначенные для применения в преобразователях энергии. Эти микросхемы, построенные по принципу «система на кристалле», имеют в своем составе процессорное ядро, быстрый многоканальный АЦП с частотой дискретизации в десятки мегагерц, многоканальный генератор сигналов с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ), часто с дроблением минимального шага, что позволяет получать дискретность ШИМ

сигнала более 16 бит при частоте ШИМ до 100 кГц. Процессор оснащен богатым набором последовательных и параллельных периферийных интерфейсов и интерфейсов управления. Характерная вычислительная мощность процессорного ядра составляет до сотни миллионов операций в секунду, что позволяет реализовывать достаточно сложные алгоритмы управления источником с полностью цифровой стабилизацией и достигать качества регулирования до десятков ppm. Применяемые процессорные ядра поддерживают аппаратные операции умножения и деления и, часто, операции с плавающей точкой, что позволяет использовать в разрабатываемых алгоритмах управления и стабилизации цифровую фильтрацию в реальном времени. Таким образом, применяя описанные специализированные сигнальные процессоры для управления преобразовате-

Сеньков Д. В., Пурескин Д. Н., Медведко А. С. Источник постоянного тока с обратимым синхронным выпрямителем на выходе на базе цифрового сигнального процессора // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Физика. 2015. Т. 10, вып. 2. С. 10–17.

лем и современные силовые быстродействующие ключи на основе биполярных транзисторов с изолированным затвором (IGBT) в силовой части преобразователя, появляется возможность построения источников питания с выходной мощностью в десятки киловатт с высоким коэффициентом полезного действия, гибко настраиваемым алгоритмом управления и интегрированными управляющими интерфейсами.

На основе описанных принципов в ИЯФ в составе энергоблока для установки электронно-лучевой сварки был разработан силовой преобразователь для высоковольтного источника с рабочим напряжением 60 кВ и мощностью 15 кВт [1]. Применение цифрового сигнального процессора и программируемой логики в контроллере, а также модульная архитектура построения силовой части преобразователя обеспечивают ему большую гибкость и адаптируемость к разнообразным задачам.

Для электромагнитов электрофизических установок часто требуется сравнительно сложный набор режимов – как статических, так и динамических. Это приводит к тому, что от источников тока для магнитов требуется широкий диапазон рабочих токов, отношение которых достигает трех порядков. Зачастую также требуется плавный и управляемый переход между уровнями тока с сохранением уровня точности отработки тока. При одной полярности тока это требует от источника возможности работать в двух квадрантах. Если для работы нужны токи как положительной, так и отрицательной полярности, то требуется уже возможность работать во всех четырех квадрантах. При этом зачастую нужен режим плавного поведения тока вблизи нуля и при переходе через ноль, что тоже требует особого внимания. Для решения этих задач, аналогично слаботочной и измерительной технике, возможно применение синхронного детектирования. Принцип работы такого источника заключается в получении модулированного требуемым сигналом высокочастотного колебания. Затем несущий сигнал выделяется синхронным детектором и фильтром низких частот. Также такой источник может использоваться для получения напряжения требуемой формы низкой частоты. Максимальная выходная частота его определяется способностью фильтра низких частот подавить удвоенную вторую гармонику несущей.

Для рабочей (несущей) частоты около 25 кГц выходная частота может достигать 1 кГц. Ограничение полосы определяется характеристиками применяемых силовых ключей.

Для работ ИЯФ по созданию инжектора ионов в институте был создан источник с выходным напряжением до 1,5 МВ. Источник состоит из генератора синусоидального напряжения 120 В, 100 А [2] и секционированного высоковольтного выпрямителя, серийно выпускаемого ИЯФ для ускорителей типа ЭЛВ [3]. Резонансная частота контура, образованного индуктивностями намагничивания и рассеяния первичной обмотки высоковольтного трансформатора, конструктивной емкостью секционированного выпрямителя и корректирующими реактивностями, составляет около 400 Гц. Источник синусоидального напряжения обеспечивает накачку этого контура на частоте, близкой к частоте резонанса. Для этой работы нами был разработан 10 кВт источник регулируемого синусоидального напряжения, изолированного от сети, с частотой, регулируемой в диапазоне 200–800 Гц. Было решено создавать источник на основе части готовых блоков (блок сетевого выпрямителя, блок инвертора с управляющим контроллером), изготавливаемых нами для высоковольтного источника энергоблока электронно-лучевой сварки [1], и вновь разработанного блока синхронного выпрямителя.

Структурная схема источника

Выбранная для источника структурная схема показана на рис. 1. Вся схема источника разделена на три отдельных модуля, выполненных в виде блоков, содержащих логически законченные части. Такое построение сформировано нами еще при разработке энергоблока. Оно оказалось удобным и с точки зрения производства и наладки, и с точки зрения модернизации источников. Сетевое напряжение выпрямляется в блоке ввода и заряжает накопительную емкость С1-8 блока инвертора. Кроме собственно трехфазного выпрямителя в блоке ввода расположены также защитный автомат, схема плавного пуска и фильтры F1, L1, обеспечивающие соответствие источника стандартам на электромагнитную совместимость для промышленного оборудования. Напряжение с емкостей С1–С8

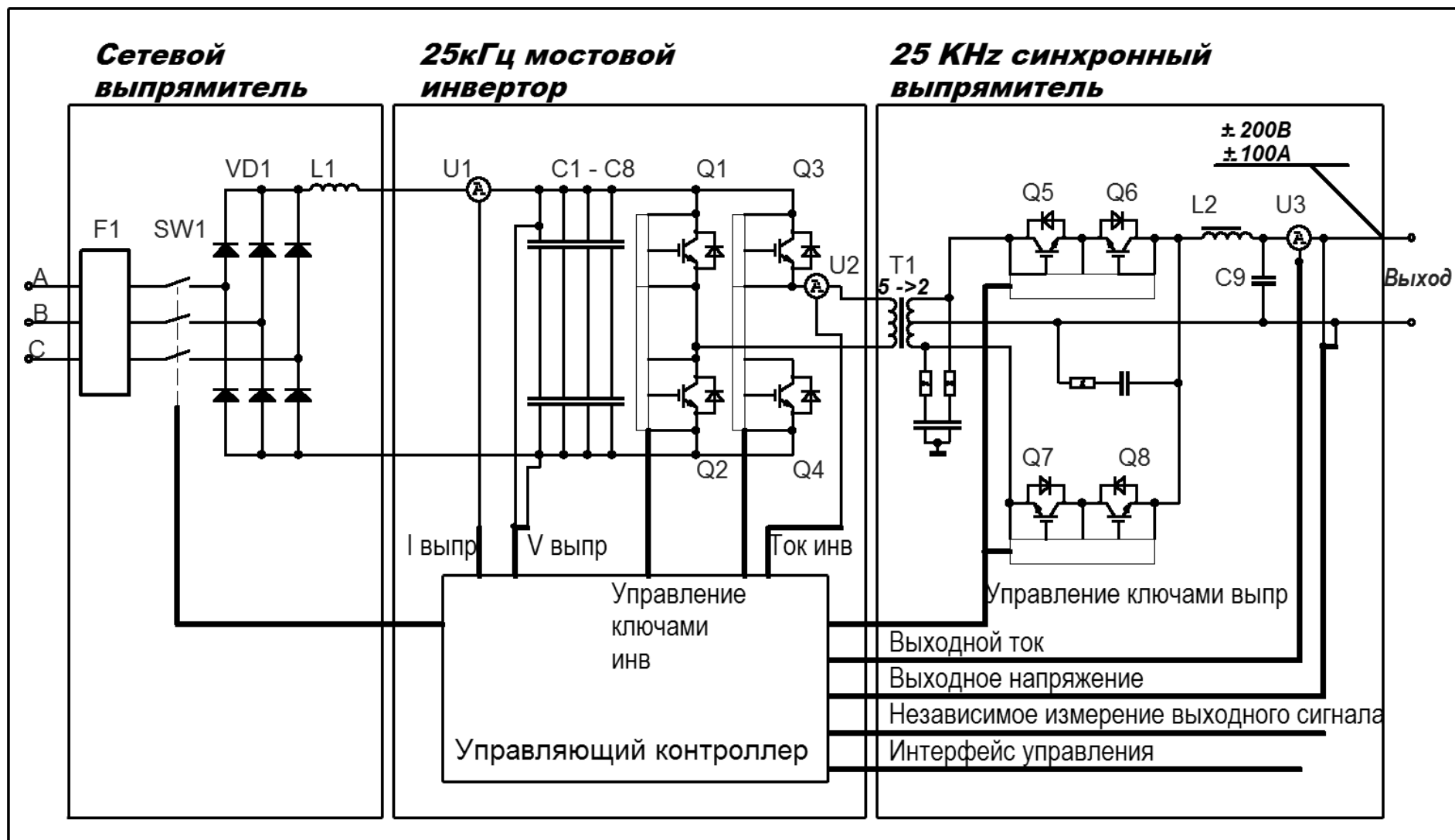


Рис 1. Блок-схема преобразователя

преобразуется мостовым инвертором на IGBT транзисторах в переменное прямоугольной формы с несущей частотой 25 кГц, модулированное по скважности сигналом с нужной низкой частотой. Это напряжение поступает в развязывающий трансформатор Т1 блока синхронного выпрямителя и с него на сам синхронный выпрямитель, образованный двумя двунаправленными ключами на IGBT транзисторах (Q5–Q8).

За счет управления фазой работы выпрямителя, как показано на рис. 2, на выходе фильтра L2–С9 получается изолированное от входной сети напряжение требуемой частоты и амплитуды. При этом за счет двунаправленной конструкции ключей, каждый из которых состоит из двух встречено последовательно включенных транзисторов, ток в любом направлении протекает через транзистор и параллельный диод встречно включенного транзистора. Выбором фазы работы выпрямителя, возможно как замыкание энергии, циркулирующей в нагрузке, через выходные ключи синхронного выпрямителя, так и рекуперация этой энергии из нагрузки в емкость С1–С8 инвертора. Выходное напряжение источника может меняться от постоянного до переменного с частотой до 1 кГц за счет ШИМ модуляции высокочастотного сигнала, как это изображено на рис. 2. Максимальная частота определяется достаточным уровнем фильтрации рабочей частотой преобразователя выходным фильтром 2 порядка. При граничной частоте фильтра 1 кГц уровень фильтрации второй гармоники рабочей частоты на выходе составляет примерно $5 \cdot 10^2$.

Управление преобразователем осуществляет контроллер, построенный на базе циф-

рового сигнального процессора и программируемой логической матрицы. Рабочая частота процессора составляет 100 МГц, частота дискретизации встроенного АЦП с 16-канальным коммутатором составляет 10 МГц. Сигнальный процессор имеет два встроенных 6-канальных формирователя широтно-импульсного сигнала с шагом 10 нс. Эти возможности позволили реализовать управляющий алгоритм с полностью цифровой петлей стабилизации, включая цепи прямого регулирования и цепи обратной связи.

АЦП контроллера измеряет 10 каналов с частотой дискретизации каждого 100 кГц (четвертая гармоника рабочей частоты):

- выходное напряжение;
- выходной ток;
- выпрямленное напряжение на емкости С1–С8;
- выходной ток трехфазного выпрямителя;
- амплитуда тока 25 кГц инвертора;
- 2 сигнала термодатчиков на радиаторе;
- 2 сигнала контроля внутреннего источника питания контроллера.

В результате измерение каждого сигнала производится 4 раза за период рабочей частоты источника 25 кГц. Эти 4 измерения усредняются, таким образом, реализуется полная фильтрация измеряемого сигнала от помех, наведенных работой силового преобразователя. После этого каждый сигнал поступает на фильтр первого порядка. Для медленно меняющихся и, соответственно, контролируемых с периодом 1 мс сигналов от термодатчиков и сигналов внутреннего контроля постоянная времени фильтра составляет 20 мс. Для сигналов токов и на-

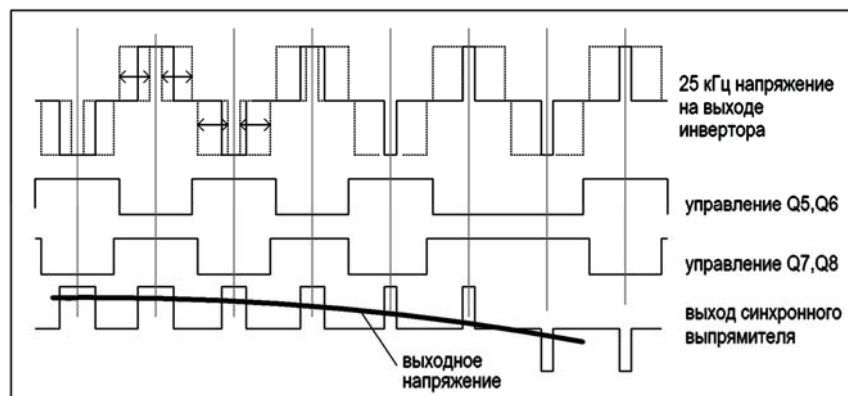


Рис. 2. Диаграмма работы преобразователя

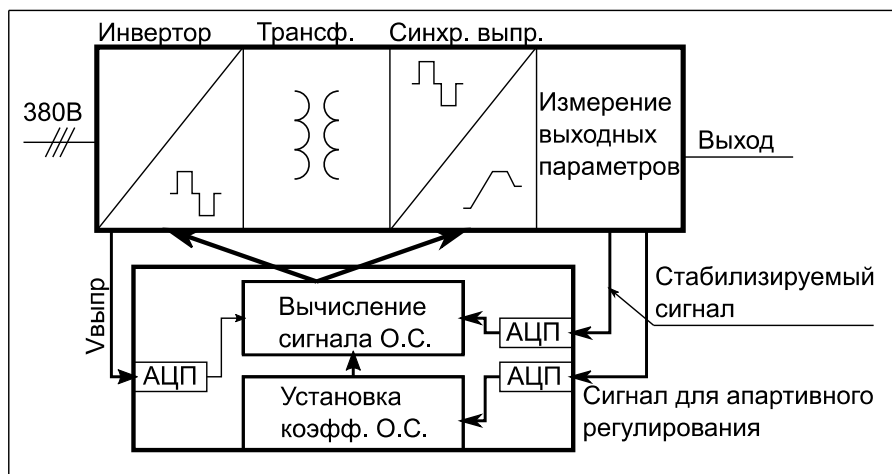


Рис. 3. Блок-схема регулятора

пряжения, используемых в быстрых защитах и обратной связи и контролируемых с периодом 40 мкс, постоянная времени цифрового фильтра составляет 200 мкс. Фильтрация используется для дополнительного снижения уровня помех и для коррекции искажений фазовой характеристики, вносимых усредняющим фильтром. Вычисление сигнала обратной связи осуществляется один раз за период рабочей частоты на основании измеренных значений токов и напряжений. Используется два контура обратной связи, как это показано на рис. 3:

- регулятор по выходному параметру источника. Сигнал берется с датчика, измеряющего стабилизируемый сигнал (выходной ток или выходное напряжение).
- параметрический регулятор, подавляющий пульсации 300 Гц выпрямленного сетевого напряжения в выходном сигнале.

Эквивалентная граничная частота основного контура стабилизации составляет около 1 кГц. Применение цифровой обратной связи позволяет простым путем достигать характеристик регулирования, сложно достижимых в аналоговых системах. В частности, очень легко менять частотные характеристики и коэффициент усиления в зависимости от нагрузки источника, что позволяет существенно повышать качество регулирования при сохранении достаточной простоты собственно регулирующего ядра. В аналоговых системах для этого требуется применение коммутаторов и ключей сброса интеграторов системы обратной связи. При цифровом регулировании изменение коэф-

фициентов не составляет проблемы и может быть плавным в зависимости от выходного тока, например. Применение второго контура обратной связи требуется в данной системе для дополнительного подавления 300 Гц пульсаций на выходе до уровня менее чем 0,1 % во всем диапазоне работы. Частотные ограничения на основной контур стабилизации, определяемые конструкцией преобразователя, не позволяют получить достаточного усиления в контуре обратной связи на частотах около 300 Гц. Поэтому используется дополнительный контур параметрической стабилизации, основанный на выделении сигнала пульсаций выпрямленного напряжения на емкости С1–С8.

Формирователь широтно-импульсного сигнала синхронно управляет ключами инвертора и ключами синхронного выпрямителя. При этом управляющий сигнал на ключи инвертора модулируется по частоте и амплитуде в соответствии с необходимой формой и амплитудой сигнала на выходе преобразователя, а сигнал на синхронный выпрямитель изменяется только по фазе (см. рис. 2 сигналы Q5, 6 Q7, 8). Число возможных шагов модуляции сигнала, идущего на ключи, составляет

$$N = \frac{f_{DSP}}{2 \cdot F_{ps}} = \frac{100\text{MHz}}{2 \cdot 25\text{kHz}} = 2000,$$

где f_{DSP} – тактовая частота формирователя, F_{ps} – рабочая частота источника. Этого количества шагов вполне достаточно для получения качества регулирования выходного

напряжения либо тока с нестабильностью менее 0,1 %.

Мягкая коммутация ключей

В источнике реализована мягкая коммутация ключей синхронного выпрямителя. Это кардинально снижает коммутационные выбросы на ключах при резонансной или индуктивной нагрузке и динамические потери в ключах при коммутации. Принцип организации мягкой коммутации заключается в том, чтобы минимизировать напряжение на ключе в момент его открывания и минимизировать ток через ключ в момент закрывания. Есть несколько способов организации такого процесса. В прямо- и обратноточковых преобразователях часто используют дополнительные индуктивные или емкостные элементы, составляющие вместе с уже присутствующей в схеме конструктивной емкостью или индуктивностью резонансный контур, колебания которого и обеспечивают условия мягкой коммутации. Другой путь, который используется в мостовых и полумостовых преобразователях, заключается в том, чтобы организовать плавное перетекание тока от закрывающегося ключа к открывающемуся. Для этого используются перехватывающие (снабберные) емкости параллельно ключам. В случае описываемого преобразователя тоже используется принцип перетекания тока от одного ключа к другому. Для описываемого источника, однако, не требуется применение дополнительных элементов, так как мягкая коммутация ключей может осуществляться за счет специального алгоритма управления. В инверторе установкой дополнительной паузы между запирающим одним ключом полумоста и открыванием другого, за счет перезарядки в это время емкостей коллектор-эмиттер транзисторов, при рабочих токах обеспечивается включение ключа при близком к нулевому напряжении. В синхронном выпрямителе для перехвата тока устроено перекрытие открытого состояния в управляющих сигналах на ключи синхронного выпрямителя, как это показано на рис. 4. Управление ключами инвертора при этом таково, что напряжение на выходе инвертора в момент перекрытия всегда равно нулю, так что весь алгоритм можно описать следующим образом.

- Выходное напряжение равно нулю, ток инвертора при этом зависит от характера нагрузки. При резонансной или индуктивной нагрузке ток не прекращается, и соответственно остается ток в открытом ключе синхронного выпрямителя.

- Открывается противоположный ключ синхронного выпрямителя. Через 500 нс, в течение которых открывается транзистор, ток за время перекрытия перераспределяется примерно поровну между двумя противоположными ключами.

- После команды на закрывание ключа ток в нем падает до нуля, перетекая в открытый ключ. В коммутационном выбросе участвует только энергия, запасенная в индуктивности рассеяния вторичной обмотки трансформатора Т1, скоммутированной на ключ. Энергия же, запасенная в индуктивных элементах со стороны первичной обмотки и в индуктивности нагрузки, не участвует в этом выбросе, так как у тока есть возможность уйти в открытый ключ.

В результате применения мягкой коммутации динамические потери в ключах становятся в несколько раз меньше, и практически до нуля уменьшается коммутационный выброс, который в случае жесткой коммутации может составлять сотни вольт, увеличивая требования к классу транзисторов синхронного выпрямителя по напряжению.

Результаты испытаний

Преобразователь был испытан в ИЯФ в качестве источника 120 В, 100 А, 400 Гц для питания напряжением частоты 400 Гц секционированного высоковольтного выпрямителя 1,5 МВ прототипа инжектора ионов для проекта НИС [4]. Для задания и чтения параметров в контроллере были реализованы локальное управление и индикация, а также связь с системой управления установкой по протоколу CANbus. Сигнал для обратной связи брался с прецизионного делителя, расположенного на выходе высоковольтного выпрямителя. Была успешно проверена работоспособность описанных идей и алгоритмов управления, заложенных при разработке преобразователя. Нестабильность ускоряющего напряжения инжектора была на уровне 0,1 %, коммутационные выбросы на ключах синхронного выпрямителя при работе источника отсутствовали, показывая

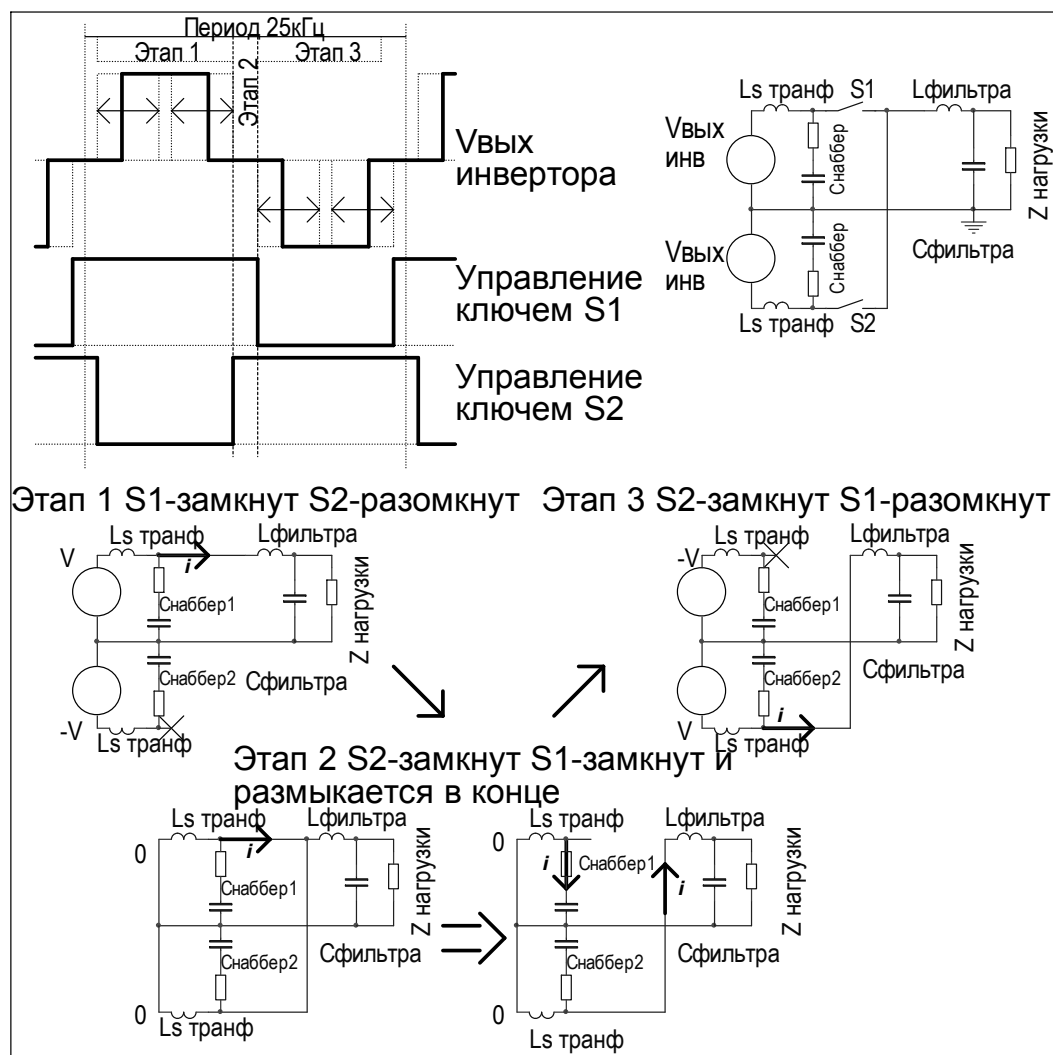


Рис. 4. Принцип мягкой коммутации ключей синхронного выпрямителя

успешность применяемого принципа мягкой коммутации. КПД преобразователя был оценен по нагреву охлаждающей воды и составил более 90 % на мощности 5 кВт. Было опробовано получение синусоидального напряжения с частотой до 800 Гц.

Схема силового преобразователя, как было описано выше, позволяет использование его в качестве быстро перестраиваемого четырехквadrантного источника тока с выходным током до 100 А и выходным напряжением до 200 В. Эти выходные параметры приведены для существующих соотношений первичной и вторичных обмоток развязывающего трансформатора Т1. Такой вариант применения источника был успешно испытан. Для испытаний использовались последовательно соединенные магниты с номинальным током 100 А. Максимальное напряжение

при быстром изменении тока составляло около 200 В. Были испытаны управляемый подъем тока от 0 до 100 А за 0,5 с, управляемый спад с рекуперацией энергии в емкость преобразователя. По результатам испытаний была изготовлена серия из 5 источников, которые планируется использовать при модернизации систем питания ускорительных комплексов ИЯФ.

Список литературы

1. Senkov D. V., Gusev I. A. et al. High-voltage source with output voltage up to 60 kV with power up to 15 kW // Proc of RUPAC. Novosibirsk, 2006. P. 301–303.
2. Nemytov P. I., Golubenko Yu. I., Senkov D. V. et al. Power Source for High Voltage Column of Injector to Proton Synchrotron with

Output Power up to 5kW // Proc of RUPAC. Protvino, 2010. P. 360–362.

3. Салимов Р. А. Мощные ускорители электронов для промышленного применения // УФН. 2000. № 170. P. 197–201.

4. Cherepkov V. G., Nemytov P. I., Senkov D. V. et al. Status of HITS injector // Proc of RUPAC. Protvino, 2010. P. 376–378.

Материал поступил в редколлегию 06.02.2015

D. V. Senkov, D. N. Pureskin, A. S. Medvedko

¹ *Institute of Nuclear Physics of SB RAS
11 Academician Lavrentiev Ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation*

² *Novosibirsk State University
2 Pirogov Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation*

D.V.Senkov@inp.nsk.su

THE BASED ON DIGITAL SIGNAL PROCESSOR POWER SOURCE WITH REVERSIBLE OUTPUT SYNCHRONOUS RECTIFIER

There are the structure and control algorithms 10kW power source with 25 kHz converter and output synchronous rectifier shown in the article. The output voltage or current of power source has controlled waveform with 1 kHz maximal frequency. The output voltage is galvanically isolated from mains. The source design allows using the load's energy recuperation in the power converter storage capacitor and soft switching in the synchronous rectifier. The article shows the application of power source as 400 Hz waveform regulated sinusoidal voltage generator.

Keywords: ramping current source, waveform generator, synchronous rectifier, soft switching, current stabilization, digital feedback loop, digital signal processor.