

# ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИНХРОННОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ ПУТЕМ МОДЕЛИРОВАНИЯ В NI MULTISIM

**В** статье рассмотрены вопросы эффективности использования синхронного выпрямителя в AC/DC- и в DC/DC-преобразователях. Проведено моделирование выпрямителей на диодах Шоттки, идеальных ключах и ключах с использованием МДП-транзисторов. Результаты экспериментов не подтверждают безоговорочное преимущество синхронных выпрямителей. Предложено использование комбинированных схем выпрямителей для повышения их КПД.

В. Макаренко

В работах [1-3] отмечается, что применение синхронных выпрямителей на МДП-транзисторах позволяет повысить КПД выпрямителей как в AC/DC-, так и в DC/DC-преобразователях. В [2] даже приведена эффективность применения синхронного выпрямителя совместно с синхронным повышающим контроллером TPS43061 в паре с силовым блоком CSD86330Q3D по сравнению с использованием несинхронного контроллера и диодов Шоттки. К сожалению, как в этих работах, так и в других отсутствует описание общих закономерностей при использовании синхронных выпрямителей. Как правило рекомендации ограничиваются советами использовать транзисторы с минимальным сопротивлением открытого канала исток-сток.

Если верить этим источникам, то все преобразователи давно нужно перевести на использование синхронных выпрямителей. Однако на практике это далеко не так. Продолжается выпуск преобразователей с использованием диодов Шоттки как в старых, так и в новых разработках.

Целью этой статьи является попытка проследить некоторые закономерности при использовании синхронных выпрямителей и сформировать обоснованные рекомендации по их применению. При этом задачи анализа схем преобразователей не ставятся, а производится только оценка эффективности применения

## EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF THE USE OF SYNCHRONOUS RECTIFIER BY SIMULATION IN NI MULTISIM

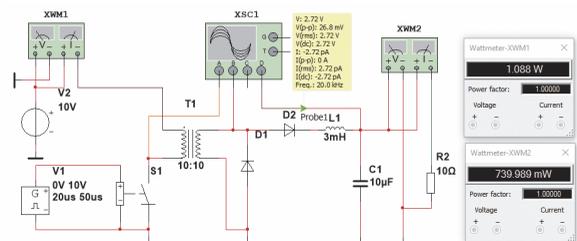
**Abstract** – The article considers issues of efficiency of the use of synchronous rectifier in AC/DC and DC/DC converters. The simulation of the rectifiers diode Schottky, perfect keys and keys using MOS transistors was executed. The results of the experiments do not confirm unconditional advantage of the synchronous rectifiers. It was proposed the use of combined circuits of the rectifiers to increase their efficiency.

V. Makarenko

синхронного выпрямителя по сравнению с выпрямителем на диодах Шоттки.

Программа NI Multisim для выполнения таких задач подходит наилучшим образом. Для исследования можно использовать как виртуальные устройства с идеальными характеристиками, так и модели реальных полупроводниковых приборов.

Для оценки эффективности использования различных элементов в выпрямителях необходимо сформировать схему преобразователя, в котором осуществляется контроль мощности отдаваемой источником энергии и мощности, отдаваемой в нагрузку. На рис. 1 приведена схема однотактного обратного преобразователя с выпрямителем, построенным на виртуальных идеальных диодах.



**Рис. 1. Схема для исследования выпрямителя с LC-фильтром, выполненного на идеальных диодах**

В качестве ключа S1 использован ключ

VOLTAGE\_CONTROLLED\_SPST, сопротивление которого в открытом состоянии  $R_{on}$  установлено равным 0.01 мОм (рис. 2).

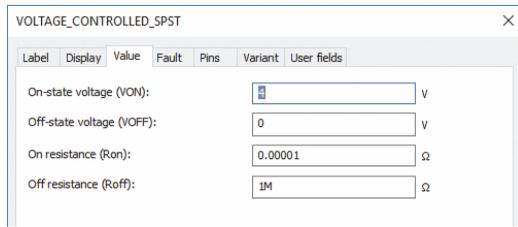


Рис. 2. Окно настройки параметров ключа VOLTAGE\_CONTROLLED\_SPST

Контроль мощности, отдаваемой источником питания, и в нагрузку осуществляется с помощью ваттметров XMM1 и XMM2, соответственно, а постоянное напряжение и размах пульсаций на выходе контролируется пробником Probe1.

Осциллограммы сигналов, снятые в различных точках схемы, приведены на рис. 3. С учетом того, что сравнивать параметры различных выпрямителей необходимо при одинаковых начальных условиях и для работы синхронного выпрямителя необходимы защитные промежутки между сигналами управления, длительность импульсов управления ключом преобразователя во всех экспериментах установлена равной 20 мкс при периоде их следования равном 50 мкс.



Рис. 3. Осциллограммы сигналов на входе/выходе трансформатора и на выходе выпрямителя (нижня)

Эксперимент показал, что при использовании таких компонентов мощность, отдаваемая источником питания, составила 1.088 Вт, мощность, отданная в нагрузку 0.74 Вт, а КПД – 68%. Размах напряжения пульсаций 26.8

мВ (рис. 1). Для увеличения мощности в нагрузке индуктивность L1 была уменьшена до 20 мкГн, а емкость C1 увеличена до 500 мкФ (для сохранения такого же уровня пульсаций, как и в первом эксперименте), что привело к увеличению выходной мощности до 4.453 Вт и КПД до 88.3%.

Поэтому катушка фильтра была исключена и в дальнейшем использовался емкостной фильтр (рис. 4), емкость конденсатора которого была увеличена до 1000 мкФ.

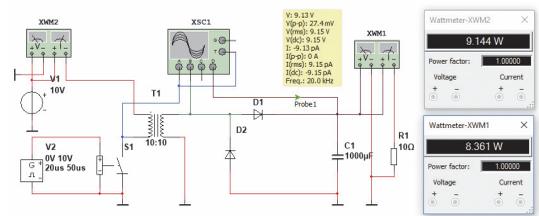


Рис. 4. Схема для исследования выпрямителя с емкостным фильтром, выполненного на идеальных диодах

При использовании емкостного фильтра КПД преобразователя составил 91.4%.

На базе схемы, приведенной на рис. 4, создана модель преобразователя с выпрямителем на диодах Шоттки (рис. 5). Временные диаграммы сигналов для этой схемы приведены на рис. 6. КПД с выпрямителем на диодах Шоттки типа 1N5828 составил 96.7%, а с 1N5834 – 97.18%. Увеличение КПД при использовании диодов Шоттки объясняется меньшим прямым падением напряжения на открытом диоде.

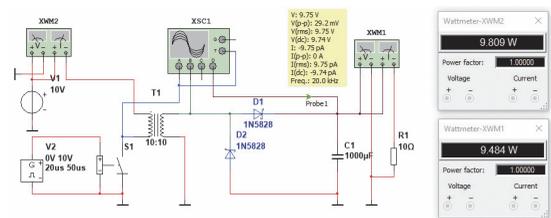
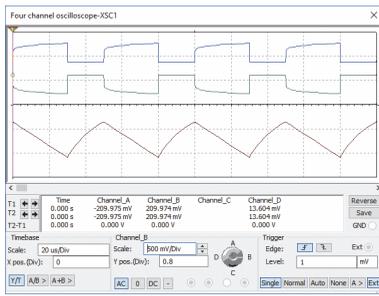


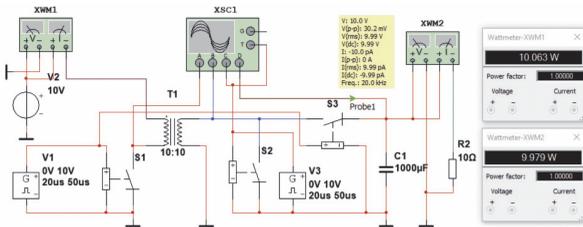
Рис. 5. Схема для исследования выпрямителя с емкостным фильтром, выполненного на диодах Шоттки

Модель преобразователя с синхронным выпрямителем, построенным на идеальных ключах S2 и S3, приведена на рис. 7.

Для синхронного выпрямителя основным параметром является сопротивление открыто-



**Рис. 6. Осциллограммы сигналов на входе/выходе трансформатора и на выходе выпрямителя (нижняя) для схемы, приведенной на рис. 5**



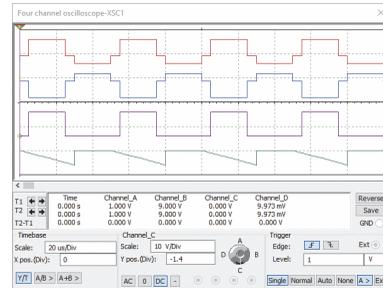
**Рис. 7. Схема для исследования однополупериодного синхронного выпрямителя с емкостным фильтром, выполненного на идеальных ключах**

го ключа, которое и определяет потери мощности в таком выпрямителе. В качестве источника управляющего сигнала использован генератор прямоугольных импульсов V1, управляющий работой ключа преобразователя S1. Питание преобразователя осуществляется от источника постоянного напряжения 10 В (V2). Гальваническая развязка первичной и вторичной цепи преобразователя осуществляется с помощью идеального трансформатора T1 с коэффициентом трансформации, равным единице, и активным сопротивлением обмоток 1 мОм.

Управление ключом S2 синхронного выпрямителя осуществляет генератор V3. Так как в Multisim все генераторы, используемые в модели, имеют нулевую начальную фазу колебаний, это дает возможность исследовать свойства выпрямителя при изменении времени задержки сигнала управления относительно сигнала, который выпрямляется, с использованием для этого различных генераторов.

Для первого эксперимента сопротивление открытого ключа S1 ( $R_{on}$ ) установлено равным 0.01 мОм, а ключей синхронного выпрямителя S2 и S3 равным 1 мОм (рис. 2). Длительность

импульсов на выходе генераторов V1 и V2 равна 20 мкс, защитный промежуток 2.5 мкс, период следования импульсов 50 мкс. Осциллограммы сигналов, снятые в различных точках схемы, приведены на рис. 8.



**Рис. 8. Осциллограммы сигналов на входе/выходе трансформатора, входе управления ключа S2 и на выходе выпрямителя (нижняя) для схемы, приведенной на рис. 7**

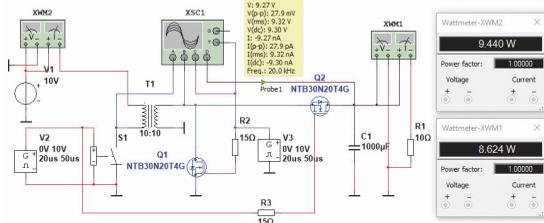
Нижняя осциллограмма на рис. 8 иллюстрирует пульсации напряжения на нагрузке. В результате проведенного эксперимента удалось выяснить, что мощность в нагрузке (при указанных выше параметрах моделирования) составила 9.979 Вт, а мощность, отдаваемая источником питания, 10.063 Вт, что соответствует КПД 99.2%.

Таким образом, синхронный выпрямитель на идеальных ключах показал наиболее высокий результат по КПД из всех рассмотренных схем. Для проверки зависимости КПД от сопротивления открытого ключа (S2 и S3) было проведено еще два эксперимента, в которых  $R_{on}$  устанавливалось равным 0.01 и 0.1 Ом. При сопротивлении ключа 0.01 Ом КПД составил 99.7%, а при 0.1 Ом – 97.7%. Если уменьшение КПД при увеличении  $R_{on}$  до 0.1 Ом вполне объяснимо из-за роста потерь мощности, то увеличение КПД при сопротивлении 0.01 Ом по сравнению со случаем 0.001 Ом на первый взгляд объяснить затруднительно.

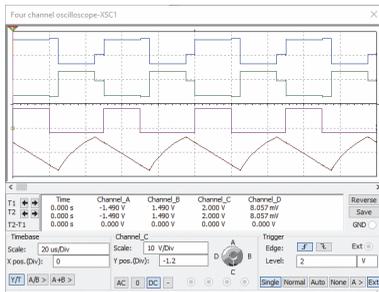
Модель для исследования синхронного выпрямителя на полевых транзисторах приведена на рис. 9, а временные диаграммы сигналов – на рис. 10.

В качестве ключей использованы полевые транзисторы NTB30N20T4G (Power MOSFET 200 В, 30 А, 81 мОм, N-канал). Для выбранного типа транзисторов КПД составил 91.4%.

Для оценки влияния параметров транзисто-



**Рис. 9. Схема для исследования однополупериодного синхронного выпрямителя с емкостным фильтром, выполненного на полевых транзисторах**



**Рис. 8. Осциллограммы сигналов на входе/выходе трансформатора, входе управления ключа Q1 и на выходе выпрямителя (нижняя) для схемы, приведенной на рис. 9**

ров синхронного выпрямителя на его КПД было проведено несколько экспериментов, результаты которых представлены в таблице. Параметры управляющих сигналов при этих экспериментах сохранялись неизменными кроме длительности фронтов управляющих сигналов, формируемых генераторами V2 и V3.

Результаты в табл. 1 расположены по

уменьшению сопротивления открытого ключа. И если первые 3 строки подтверждают положение о том, что сопротивление открытого ключа определяет КПД [2], то последующие 3 строки это опровергают. С аналогичным случаем мы столкнулись при изменении сопротивления идеального ключа. Следовательно, этот вопрос требует дополнительного исследования.

При увеличении длительности фронтов управляющих сигналов изменение КПД происходит еще более странным образом. Для некоторых типов транзисторов он увеличивается (например, для BSB017N03LX3 G), а для других уменьшается.

Кроме того, сравнивая КПД синхронного выпрямителя на идеальных ключах и на полевых транзисторах, видим, что при сопротивлении идеального ключа 100 мОм он имеет КПД выше, чем у самого лучшего выпрямителя на полевых транзисторах с сопротивлением открытого ключа 4.9 мОм – 97.7% против 95.8%, что также требует поиска других факторов, влияющих на КПД.

Известно, что потери мощности происходят в моменты переключения ключей, когда его сопротивление изменяется от минимального до максимального. Чем больше время переключения, тем большие потери мощности будут происходить на нем при прочих равных условиях. Однако, сравнивая параметры транзисторов, приведенные в data sheet, видим, что результаты эксперимента это положение не подтверждают. Например, время переключения транзистора BSO040N03MS G составляет 18 нс, а транзистора BSZ018NE2LS – 4.8 нс, а

**Зависимость КПД синхронного выпрямителя от параметров транзисторов ключей**

Тип транзистора	$R_{он}, мОм$	$I_{пр}, А$	$U_{обр. макс}, В$	$P_{вых}, Вт$	КПД, %	
					$t_{\phi} = 1 нс$	$t_{\phi} = 25 нс$
NTB30N20T4G	81	30	200	8.624	91.4	93.8
ATP405-TL-H	33	40	100	8.57	92.4	91.8
BSO040N03MS G	4.9	20	30	8.930	95.8	94.5
BSZ018NE2LS	1.8	40	25	8.603	93.8	92.4
BSB017N03LX3 G	1.7	147	30	8.978	93.1	94.4
BSC010N04L	1.0	100	40	8.661	91.8	92.8

КПД выше при использовании BSO040N03MS G.

Сравнение с лучшим результатом с диодами Шоттки (97.18%) противоречит общепринятому мнению, что синхронный выпрямитель лучше, чем реализованный на диодах Шоттки. Даже лучший по КПД для синхронного выпрямителя на полевых транзисторах результат говорит не в его пользу.

Естественно предположить, что комбинация синхронного выпрямителя и диодов Шоттки может привести к увеличению КПД. Для проверки этого положения собрана модель, приведенная на рис. 11, в которой использованы элементы, обеспечивающие наихудшие параметры для каждого типа выпрямителей, рассмотренных в данной статье.

Полученный результат подтвердил высказанное предположение. КПД для схемы на рис. 11 составил 97.9%, что превышает наилучшие значения как для выпрямителей на диодах Шоттки, так и для синхронных выпрямителей на полевых транзисторах.

Дополнительные исследования зависимости КПД синхронного выпрямителя на идеальных ключах от сопротивления открытого ключа показали, что максимальное значение КПД получается при значении  $R_{on} = 7.5$  мОм (рис. 12).

### ВЫВОДЫ

1. Проведенные эксперименты позволяют сделать вывод о том, что не всегда синхронный выпрямитель лучше, чем выпрямитель, выполненный на диодах Шоттки.

2. Для получения максимального КПД требуется тщательный подбор параметров сигналов управления ключами синхронного вы-



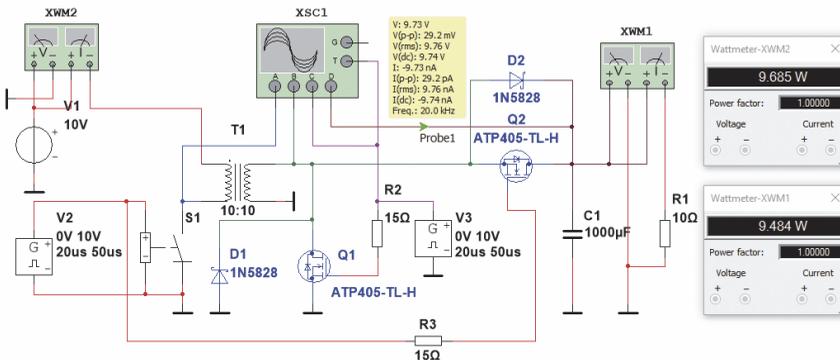
**Рис. 12. Зависимость КПД выпрямителя от сопротивления открытого идеального ключа**

прямителя. При использовании диодов Шоттки формировать управляющие сигналы нет необходимости.

3. Использование синхронных выпрямителей на полевых транзисторах с подключенными параллельно им диодами Шоттки позволяет повысить КПД выпрямителя.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Power Management Guide/ <http://www.ti.com/lit/sg/slv145p/slv145p.pdf>.
2. Э. Фаньяни Увеличение КПД преобразователя за счет синхронного выпрямления/ Электронные компоненты, 2014, №4. с. 35-37.
3. М. Соломатин Применение компонентов International Rectifier для синхронного выпрямления / Электронные компоненты, 2010, №6. с. 12-20.



**Рис. 11. Схема для исследования комбинированного синхронного выпрямителя**

# О ВЫБОРЕ ПАРАМЕТРОВ DC/DC-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ С НАКАЧКОЙ ЗАРЯДА

**В** статье рассматриваются вопросы оптимизации параметров DC/DC-преобразователей с накачкой заряда для получения максимально возможного КПД. Проведено моделирование инвертирующего преобразователя в NI Multisim при вариации параметров элементов преобразователей. Сформулированы рекомендации по выбору параметров элементов преобразователей и формированию сигналов управления.

В. Макаренко

## ON THE CHOICE OF PARAMETERS OF DC/DC CONVERTERS WITH CHARGE PUMPS

**Abstract –** The article considers the questions of optimization of parameters of DC/DC converters with charge pumps to obtain the maximum possible efficiency. The simulation of the inverting Converter in NI Multisim at a variation of parameters of elements in converters. Recommendations on the choice of parameters of elements in converters and to the formation of the control signals are given.

V. Makarenko

Преобразователи с накачкой заряда (charge pump) для переноса и накопления энергии используют переключаемые конденсаторы, в отличие от DC/DC-преобразователей, использующих для накопления энергии в магнитном поле индуктивности. Интерес к преобразователям с накачкой заряда непрерывно растет в связи с их невысокой стоимостью и высоким КПД.

Конечно они уступают DC/DC-преобразователям по максимальной величине тока, отдаваемого в нагрузку, но в тех приложениях, где величина тока не превышает нескольких сот миллиампер, они могут использоваться весьма успешно [1, 2]. Многие ведущие производители ИМС выпускают такие преобразователи в интегральном исполнении, что позволяет минимизировать размеры преобразователей, построенных с их использованием.

Для уменьшения размеров конденсаторов и оптимизации выходного тока в преобразователях с накачкой заряда повышают частоту переключения и стараются уменьшить сопротивление ключей, но эти меры приводят к появлению шумов и пульсаций на входе подключения источника питания, что в свою очередь приводит к появлению кондуктивных помех, распространяемых по шинам питания. Это может привести к нарушению режимов работы устройств, чувствительных к помехам по цепям питания: генераторов, управляемых напряжением, аналого-цифровых преобразова-

телей и др.

Как правило, преобразователи с накачкой заряда делаются инвертирующими, хотя сделать его неинвертирующим не представляется сложной задачей. Напомним коротко основные принципы работы такого преобразователя, чтобы перейти к рассмотрению его параметров и оценки их влияния на характеристики преобразователя.

На рис.1 приведена функциональная схема преобразователя с накачкой заряда, работающего в режиме инвертирования входного напряжения.

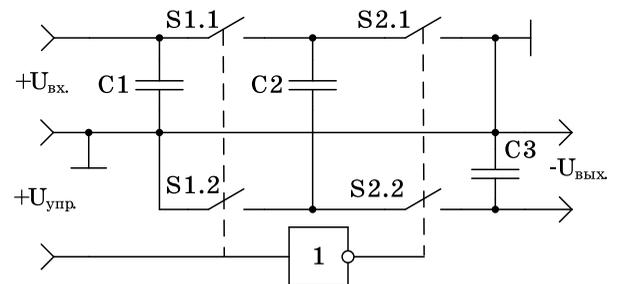


Рис. 1. Функциональная схема инвертирующего преобразователя с накачкой заряда

Управление ключами преобразователя осуществляется двухфазным сигналом со скважностью 2. В первом такте конденсатор накачки C2 заряжается от источника входным напряжением  $U_{вх}$  через замкнутые ключи S1.1 и S1.2. В это время ключи S2.1 и S2.2 закрыты.