

Основные схемы однофазных непосредственных ШИМ-преобразователей переменного напряжения

Как известно, все преобразователи переменного напряжения в переменное (в том числе их частный случай — преобразователи частоты) можно разделить на схемы с промежуточным звеном постоянного тока и непосредственные преобразователи [1, 2]. В статье рассмотрены основные схемы однофазных непосредственных ШИМ-преобразователей переменного напряжения с принудительной коммутацией (регуляторов действующего значения переменного напряжения) [3, 4]. По сравнению с регуляторами переменного тока с фазовым управлением на тиристорах (с естественной коммутацией) [5] ШИМ-преобразователи переменного напряжения имеют важные преимущества: квазисинусоидальную форму тока, больший коэффициент мощности, лучшие динамические характеристики и меньшие габариты входных и выходных фильтров и всего устройства в целом. Кроме того, они обеспечивают высокую надежность, безопасную коммутацию транзисторов и высокий КПД. Также на базе непосредственных ШИМ-преобразователей переменного напряжения можно строить сетевые кондиционеры, дополнив схему трансформатором для последовательной компенсации напряжения.

Александр Серебрянников,
к. т. н.

alex-silver@mail.ru

Сергей Чумаров, к. т. н.

chumarov@mail.ru

Введение

Увеличение количества нелинейных нагрузок вызвало серьезную обеспокоенность по поводу качества электроэнергии и, следовательно, помех, действующих на чувствительные электронные приборы. Некоторые сетевые кондиционеры все еще строятся на тиристорах. Поглощаемые в таких кондиционерах гармоники имеют высокие амплитуды и низкие частоты. Из-за размещения этих гармоник вблизи основной в системе электропитания не рекомендуется использовать пассивные фильтры, к тому же размер, вес и цена пассивных элементов могут быть большими. А потому непосредственные преобразователи переменного напряжения с тиристорами не соответствуют новым стандартам по электромагнитной совместимости (ЭМС), которые ограничивают допустимые помехи в системе электропитания. К тому же реактивная мощность, поглощаемая этими преобразователями, и, как следствие, коэффициент мощности изменяется вместе с углом управления. Данные сетевые кондиционеры имеют низкое быстродействие и нуждаются в больших входных и выходных фильтрах для подавления низких гармоник.

Подключаемые к сети регуляторы переменного напряжения могут быть заменены ШИМ-

преобразователями переменного напряжения, которые имеют в целом лучшие характеристики, и указанные выше проблемы удастся решить, если эти регуляторы спроектировать для работы в импульсном режиме (chopping mode). В рассматриваемых в статье схемах используется ШИМ-регулирование, когда входное напряжение «нарезается» на сегменты, а действующее значение выходного напряжения определяется относительной длительностью его импульсов.

До 90-х годов XX века ШИМ-преобразователи переменного напряжения строились на четырехквadrантных ключах, применение которых было приостановлено из-за коммутационных проблем. Для обеспечения безопасной коммутации без перенапряжений были разработаны принципы ШИМ-управления, однако надежность преобразователей зависела от точности управления, и сохранялся высокий риск возникновения перенапряжений и сверхтоков. После 1990 года были созданы различные топологии импульсных преобразователей переменного напряжения с сокращенным числом ключей или со стандартными двухквadrантными коммутационными ячейками. Для повышения надежности преобразователей использовались простые снабберы в виде конденсатора, подключенного параллельно ключам.

В статье описывается принцип работы двух основных схем непосредственных ШИМ-преобразователей переменного напряжения с простым снаббером — конденсатором без разрядных резисторов [3], подключенным непосредственно к силовым ключам для поглощения энергии, накопленной в паразитной индуктивности сети.

Принцип работы основных схем однофазных непосредственных ШИМ-преобразователей переменного напряжения

Принцип работы рассматриваемых ШИМ-преобразователей переменного напряжения аналогичен принципу действия импульсных преобразователей постоянного напряжения [6–9]. Они также могут и понижать, и повышать выходное напряжение относительно входного. Рассмотрим топологию (рис. 1) и схемотехнику (рис. 2) ШИМ-преобразователей переменного напряжения понижающего типа.

По режиму питания и способу подключения нагрузки ШИМ-преобразователи переменного напряжения делятся на дифференциальные (рис. 1а) и недифференциальные (рис. 1б). Оба варианта можно реализовать в виде схем, состоящих из двух ячеек коммутации на IGBT-транзисторах — двунаправленных по току и однонаправленных по напряжению. В работе [10] приведен пример использования в качестве ключей МДП-транзисторов.

В дифференциальной схеме (рис. 2а) ключи S_1 и S_2 , источник напряжения и нагрузка подключаются последовательно. Помещая ключ S_2 между источником напряжения и ключом S_1 , получают недифференциальную схему (рис. 2б). Вторая структура имеет преимущество, поскольку в ней входное и выходное напряжения имеют общий вывод.

Оба преобразователя имеют одинаковый принцип управления в зависимости от знака сетевого напряжения u_c . Например, когда $u_c > 0$, ключи S_1 и S_{1c} управляются инверсными по отношению друг к другу ШИМ-сигналами с относительной длительностью импульсов γ и $(1 - \gamma)$ соответственно, а ключи S_2 и S_{2c} все время открыты (рис. 3). Когда $u_c < 0$, схема переключения транзисторов изменяется на противоположную: ключи S_2 и S_{2c} становятся комплементарными и управляются ШИМ-сигналами, а ключи S_1 и S_{1c} постоянно открыты.

На выходе этих схем чаще всего стоит LC-фильтр для сглаживания тока и напряжения, поэтому выходной ток на схемах обозначен через i_L . Поскольку два ключа всегда включаются в течение полупериода источника напряжения, потери при переключении значительно уменьшаются.

В понижающих схемах (рис. 2) действующее значение выходного напряжения пропорционально относительной длительности импульсов:

$$U_{\text{ВЫХ}} = \gamma U_c$$

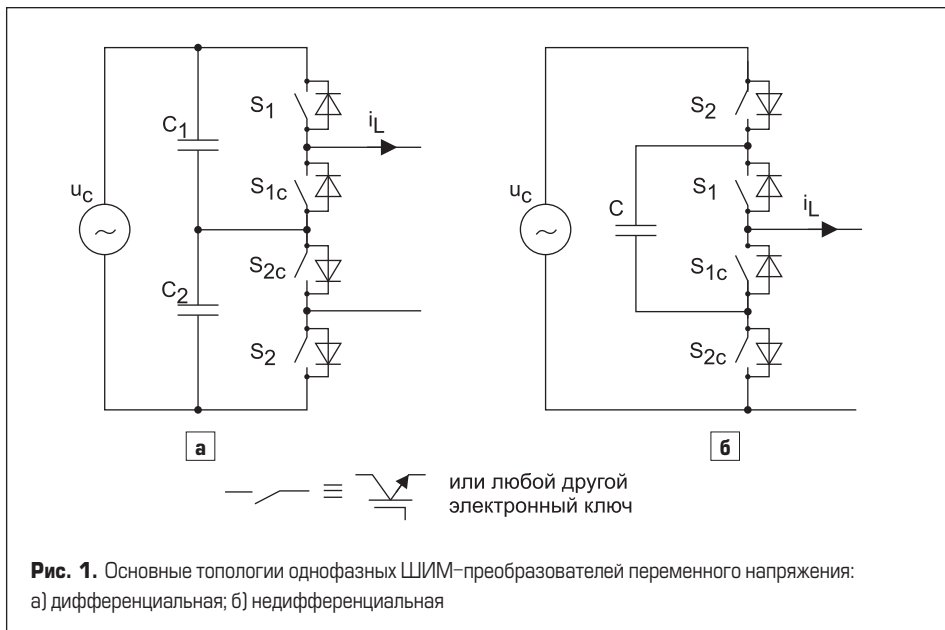


Рис. 1. Основные топологии однофазных ШИМ-преобразователей переменного напряжения: а) дифференциальная; б) недифференциальная

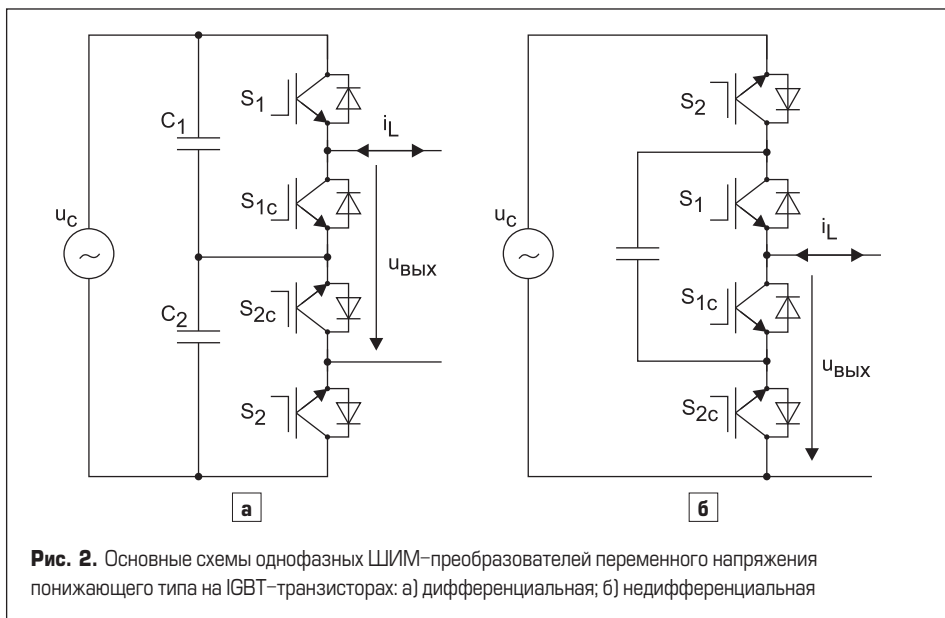


Рис. 2. Основные схемы однофазных ШИМ-преобразователей переменного напряжения понижающего типа на IGBT-транзисторах: а) дифференциальная; б) недифференциальная

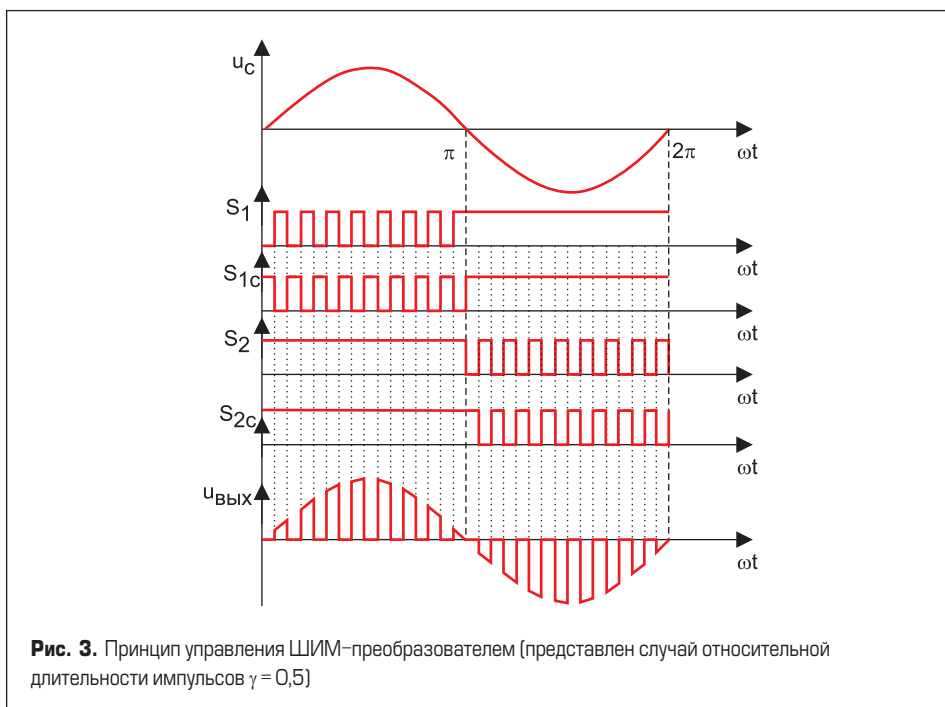


Рис. 3. Принцип управления ШИМ-преобразователем (представлен случай относительной длительности импульсов $\gamma = 0,5$)

Режимы работы непосредственных ШИМ-преобразователей переменного напряжения

В течение одного периода переключения ШИМ-преобразователи переменного напряжения могут работать в одном из трех режимов: активный, свободного хода и обходной (транзитный).

Активный режим

В этом режиме ток дросселя i_L проходит через входные и выходные цепи и обеспечивает выход энергией. Ключи S_1 и S_2 открываются, а ток дросселя i_L проходит через ключ S_1 и диод ключа S_2 при $i_L > 0$ или через ключ

S_2 и диод ключа S_1 при $i_L < 0$, как показано на рис. 4а.

Режим свободного хода (freewheeling mode)

Этот режим дополняет активный режим. Во время данного режима ключи S_{1c} и S_{2c} включаются и закорачивают выходную цепь, как показано на рис. 4б, и ток дросселя i_L течет в контуре, образованном этими двумя ключами и выходной цепью.

Обходной (транзитный) режим (Bypass mode)

Режим вызван нелинейностью работы силовых устройств. Чтобы избежать проблем

с коммутацией во время паузы («мертвого времени»), для такого типа преобразования был предложен специальный принцип управления. В этом режиме для безопасной коммутации включены два дополнительных ключа. Когда входное напряжение $u_c > 0$, для безопасной коммутации включаются ключи S_2 и S_{2c} . Во время паузы ток дросселя i_L проходит в положительном направлении через нагрузку, ключ S_{2c} и диод ключа S_{1c} . Отрицательный ток дросселя i_L проходит через источник напряжения, ключи S_2 и диод ключа S_1 . Таким образом, в обходном режиме всегда существует путь для протекания тока дросселя в любом направлении. Пути тока в этом режиме для $u_c > 0$ показаны на рис. 4в.

В таблице представлены значения выходного напряжения в зависимости от управления ключами. Основными ограничениями для этого способа управления являются точность и скорость обнаружения перехода через ноль сетевого напряжения.

Выводы

В статье представлены две основные схемы однофазных непосредственных ШИМ-преобразователей переменного напряжения на базе двухквadrантных коммутационных ячеек, а также самый простой принцип управления этими преобразователями, основанный на слежении за знаком сетевого напряжения. Более того, подобным преобразователям не нужны устройства для ограничения тока, которые уменьшают потери. Структуры, основанные на ячейках коммутации с двухквadrантами ключами, более надежны, чем построенные на базе четырехквadrантных ключей. На ключах преобразователя во время коммутаций не возникают импульсы напряжения за счет использования простых снабберов, подключенных непосредственно к каждой коммутационной ячейке. Недифференциальная схема преобразователя переменного тока имеет такую же прочность, что и дифференциальная, но обладает преимуществом связи входа и выхода через общий вывод.

В соответствии со стандартами по ЭМС, устройства с фазовым управлением должны быть заменены современными структурами, например такими, какие представлены в этой статье. ШИМ-преобразователи переменного напряжения обеспечивают квазисинусоидальное напряжение, поэтому они находят применение во многих приложениях. При равной полной мощности

Таблица. Значения выходного напряжения в зависимости от управления ключами

	S_1	S_{1c}	S_2	S_{2c}	$U_{\text{вых}}$	
					$i_L > 0$	$i_L < 0$
$u_c > 0$	1	0	1	1	u_c	u_c
	0	0	1	1	0	u_c
	0	1	1	1	0	0
$u_c < 0$	1	1	1	0	u_c	u_c
	1	1	0	0	u_c	0
	1	1	0	1	0	0

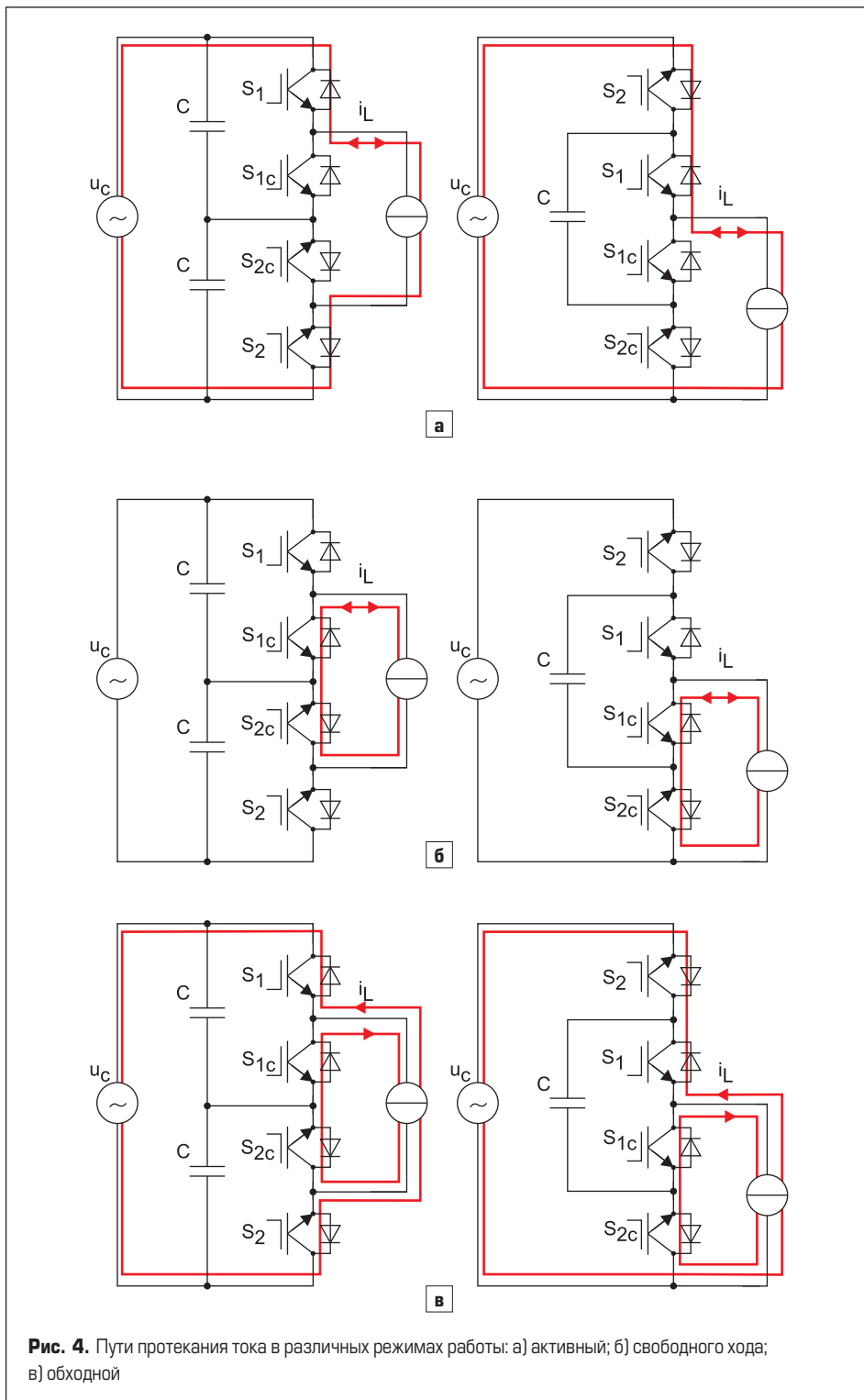


Рис. 4. Пути протекания тока в различных режимах работы: а) активный; б) свободного хода; в) обходной

ШИМ-преобразователи переменного напряжения дороже, чем трансформаторы, но на их базе можно построить регуляторы действующего значения переменного напряжения с большим КПД и малыми массогабаритными показателями.

Литература

1. Floricău D. PWM AC choppers: basic topologies and applications // U.P.B. Sci. Bull., Series C. 2006. Vol. 68. No. 4.
2. Hagemeyer M., Solanki J., Fröhleke N., Böcker J., Averberg A., Wallmeier P. Comparison of PWM AC Chopper Topologies. Proceedings of 40th Conference Industrial Electronics Society (IECON-2014), 2014.
3. Floricău D., Dumitrescu M., Popa I., Ivanov S. Basic topologies of direct PWM AC choppers // Annals of the University of Craiova. Electrical Engineering series. 2006. No. 30.
4. Prajapati S., Vora S., Patel N. N. Pulse width modulation controlled using ac chopper voltage controller // International Journal For Technological Research In Engineering. 2015. Vol. 2. Iss. 9.
5. Удовиченко А. В., Гришанов Е. В., Дыбко М. А., Кучак С. В., Брованов С. В. Математическая модель для анализа электромагнитных процессов в многозонном полупроводниковом преобразователе // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2018. Т. 18. № 1.
6. Geng X., Tang H.-J., Jin N., Lan J.-Y. Direct Buck-type AC-AC Converters using VSC Method // Przegląd Elektrotechniczny. 2013. R. 89. NR 1b.
7. Ladoux P., Chéron Y., Lowinsky A., Raimondo G., Marino P. New Topologies for Static Reactive Power Compensator Based on PWM AC Choppers // 22 EPE Journal. 2011. Vol. 21. No. 3.
8. Nan J., Tang H.-J., Lan J.-Y., Yao C., Chen W.-W., An X.-Y. Dynamic Voltage Regulator based on PWM AC Chopper Converter: Topology and control // WSEAS Transactions on Systems. 2010. Vol. 9. Iss. 5.
9. Fedyczak Z., Strzelecki R., Benysek G. Single-phase PWM AC/AC Semiconductor Transformer Topologies and Applications. Proceedings of Power Electronics Specialists Conference (PESC-2002). IEEE 33rd Annual. February 2002. Vol. 2.
10. Коршунов А. Импульсные преобразователи напряжения переменного тока // Силовая электроника. 2006. № 1.