

УДК 621.314.58

ПРИМЕНЕНИЕ SiC-ТРАНЗИСТОРОВ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ СИЛОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ БЛОКОВ

Ульянов А.В., Шибeko P.B.

ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет»,
Комсомольск-на-Амуре, e-mail: v394-7@mail.ru

В статье рассматриваются вопросы применения перспективных силовых приборов на основе карбида кремния для построения преобразовательных блоков, в частности для энергопитания и управления уличными осветительными линиями. В начале статьи приводятся сведения об основных свойствах SiC-транзисторов, сравниваются силовые транзисторы из различных полупроводниковых материалов, поясняются перспективы использования SiC-транзисторов для увеличения энергетических и частотных характеристик энергосистем. Далее рассматривается микросхема специализированного драйвера управления TLP5214A для управления IGBT-транзистором/Power MOSFET-транзистором. Приводится внутренняя структура драйвера, поясняются элементы внутренней структуры и показывается принципиальная схема включения драйвера для управления нижним транзистором полумоста с пояснениями некоторых компонентов схемы. В качестве примера использования драйвера TLP5214A приводится структура построения трехфазного инвертора на SiC-транзисторах TW070J120B с микроконтроллерным управлением, дается расчет входной цепи инвертора и выходных индуктивностей. Далее в статье в качестве современного компонента приводятся сведения о силовом SiC-модуле SK80MB120CR03TE1 (транзисторный полумост) компании SEMIKRON и показываются результаты моделирования топологии на основе этого модуля. Практическое применение данных SiC-компонентов может найти в «интеллектуальных» и энергоэффективных системах уличного освещения с использованием солнечной энергии. Приводится структурная схема такой системы и поясняются ее элементы.

Ключевые слова: SiC-транзистор, драйвер, карбид кремния, осветительная линия, инвертор, полумост

APPLICATION OF SiC-TRANSISTORS FOR CONSTRUCTION POWER CONVERTER BLOCKS

Ulyanov A.V., Shibeko R.V.

Komsomolsk-on-Amur State University, Komsomolsk-on-Amur, e-mail: v394-7@mail.ru

The article discusses the application of promising power devices based on silicon carbide for the construction of conversion units, in particular, for power supply and control of street lighting lines. At the beginning of the article, information about the main properties of SiC transistors is given, power transistors made of various semiconductor materials are compared, and the prospects for using SiC transistors to increase the energy and frequency characteristics of power systems are explained. Next, a dedicated TLP5214A driver chip is discussed for driving an IGBT / Power MOSFET. The internal structure of the driver is given, the elements of the internal structure are explained, and a schematic diagram of switching on the driver for controlling the lower half-bridge transistor is shown, with explanations of some components of the circuit. As an example of using the TLP5214A driver, the structure of building a three-phase inverter on SiC transistors TW070J120B with microcontroller control is given, the input circuit of the inverter and the output inductances are calculated. Further in the article, as a modern component, information about the power SiC-module SK80MB120CR03TE1 (transistor half-bridge) from SEMIKRON is given and the results of topology modeling based on this module are shown. Practical application of these SiC-components can be found in «smart» and energy efficient street lighting systems using solar energy. A structural diagram of such a system is given, and its elements are explained.

Keywords: SiC-transistor, driver, silicon carbide, lighting line, inverter, half-bridge

Карбид кремния, имея более широкую запрещенную зону, позволяет реализовать в MOSFET-транзисторах на его основе (SiC-транзисторах) более высокие напряжение пробоя и рабочую частоту, снижение сопротивления, увеличение нагрузочной способности, гибкие тепловые свойства и устойчивость к жестким коммутациям [1, 2].

Отсутствие неосновных носителей в режиме проводимости исключает «токовые хвосты», поэтому потери на запирающие достаточно малы. Потери при открытии также уменьшены по сравнению с другими типами транзисторов, в основном за счет меньших пиковых токов открытия. Оба типа потерь не приводят к повышению температуры [3].

По сравнению с кремниевыми аналогами SiC-транзисторы демонстрируют меньшую

крутизну передаточной характеристики, более высокое внутреннее сопротивление затвора, а их пороговое напряжение может быть менее 2 В. В результате для надежного запирающего такого транзистора на его затвор необходимо подавать отрицательное напряжение (обычно 5 В). К тому же для более полной реализации высокочастотных свойств SiC-транзисторов некоторые компании (например, Wolfspeed, Infineon Technologies) предлагают усовершенствованные корпуса с малой паразитной индуктивностью. Таким образом, SiC-транзисторы позволяют создавать устройства силовой электроники с повышенным КПД и удельной мощностью [4]. На рис. 1 показана сравнительная диаграмма некоторых свойств силовых транзисторов.

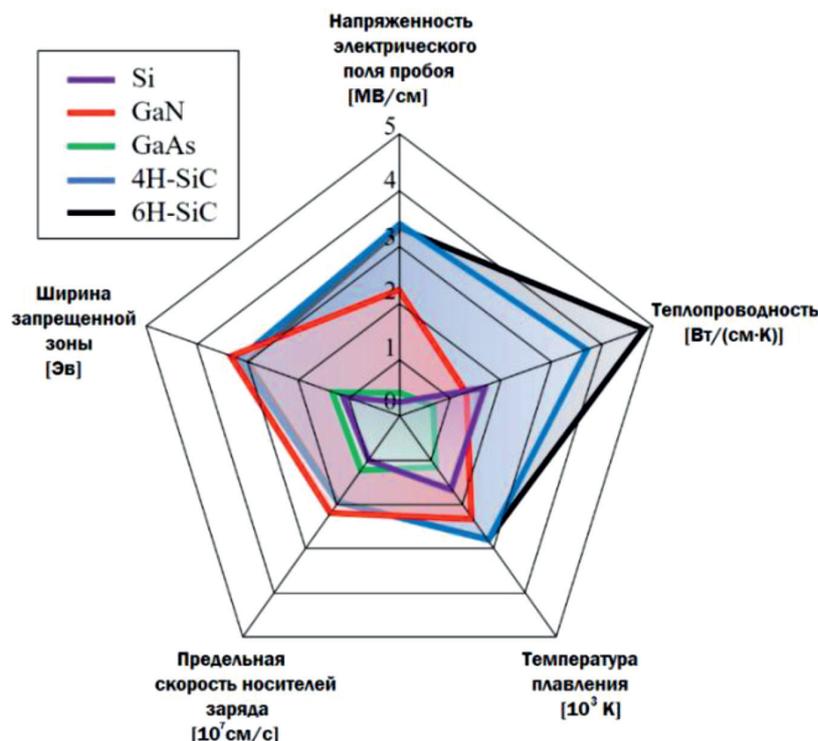


Рис. 1. Сравнительная диаграмма некоторых свойств силовых транзисторов

Целью статьи является показать перспективы использования SiC-транзисторов в силовых преобразовательных блоках.

Управление SiC-транзисторами

Для управления SiC-транзисторами наиболее целесообразно использовать специализированные драйверы. Рассмотрим драйвер TLP5214A, предлагаемый компанией Toshiba Electronic Devices & Storage Corporation. TLP5214A – это высокоинтегрированный драйвер IGBT-транзистора/Power MOSFET-транзистора с выходным током 4,0 А, размещенный в корпусе SO16L с длинными путями утечки и зазором (Creepage Distance – 8 мм (min)).

Драйвер TLP5214A состоит из двух инфракрасных светодиодов и двух высокоскоростных микросхем с высоким коэффициентом усиления. Они реализуют точное, высокоскоростное управление выходом. Имеется обратный ответ о состоянии неисправности выхода. Драйвер имеет встроенную гальваническую развязку. Хотя наличие гальванической развязки не является обязательным требованием при работе с SiC-транзисторами, тем не менее, ее присутствие значительно упрощает работу с этими сверхбыстрыми силовыми транзисторами.

Параметры драйвера:

- пиковый выходной ток: $\pm 4,0$ А (макс.);
- гарантированная работа при повышенной температуре: от -40 °С до 110 °С;
- ток питания: 3,8 мА (макс.);
- напряжение питания: от 15 В до 30 В;
- пороговый входной ток: 6 мА (макс.);
- время задержки распространения: 150 нс (макс.);
- время гашения переднего фронта DESAT: 1,1 мкс (тип.);
- устойчивость к синфазным переходным процессам: ± 35 кВ/мкс (мин);
- напряжение изоляции: 5000 В среднекв. (мин.).

Драйвер имеет схему UVLO-блокировка при пониженном напряжении питания и управления. Во время работы драйвера, если напряжение источника питания падает и становится ниже порогового напряжения, то UVLO переводит внутреннюю схему в полуждущее состояние, чтобы предотвратить повреждение силовых цепей. Когда напряжение источника питания возрастает и становится выше, чем напряжение срабатывания UVLO, то UVLO сбрасывается, и работа драйвера возобновляется.

Драйвер имеет встроенную схему ограничения эффекта Миллера, а также защиту от перегрузки по току (DESAT).

Повышенные частотные свойства SiC-транзисторов расширяют возможности использования различных способов модуляции выходного напряжения преобразователя, что позволяет формировать более сложные и гибкие законы управления. Однако разработчик обязан помнить о необходимости обеспечения электромагнитной совместимости для любой цепи с быстрыми сигналами. SiC-транзисторы являются источниками быстрых сигналов с высокой скоростью изменения тока di/dt , а это именно то, что вызывает значительные помехи, выбросы и другие проблемы.

На рис. 3 показана схема управления затвором нижнего плеча U-фазы. Неправильно выбранная концепция построения схемы управления нижним ключом влияет на электромагнитную совместимость проектируемого преобразователя электриче-

ской энергии. Для уменьшения «шума» при коммутации транзистора следует увеличить резистор R8 в затворе транзистора VT1, данный резистор способен уменьшить электромагнитные излучения за счет «заваливания» фронта сигнала отпираания. Стоит обратить внимание, что увеличение номинала R8 приведет к снижению скорости включения и выключения транзистора, что способствует ухудшению эффективности использования источника питания шины DC. Для уменьшения описанного эффекта предусмотрена цепь управления выключением транзистора VT1, резистор R7 позволяет реализовать данную функцию, если уменьшить его сопротивление. При любом варьировании R8 и R7 всегда следует проверять тепловыделение и уровень электромагнитных помех, что очень важно при прохождении ЭМС.

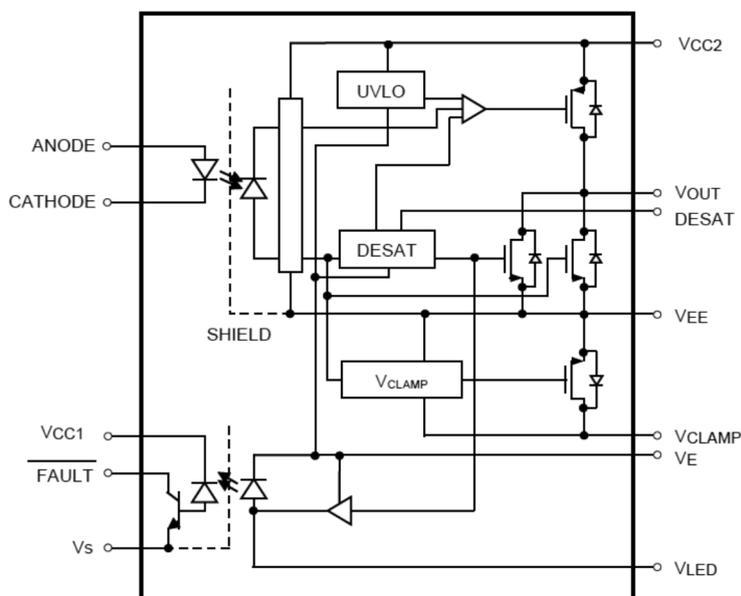


Рис. 2. Внутренняя структура драйвера

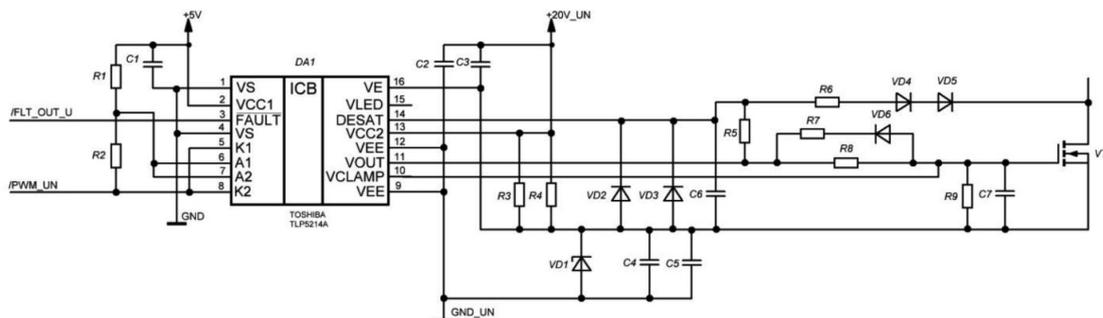


Рис. 3. Схема включения драйвера TLP5214A для управления нижним транзистором полумоста

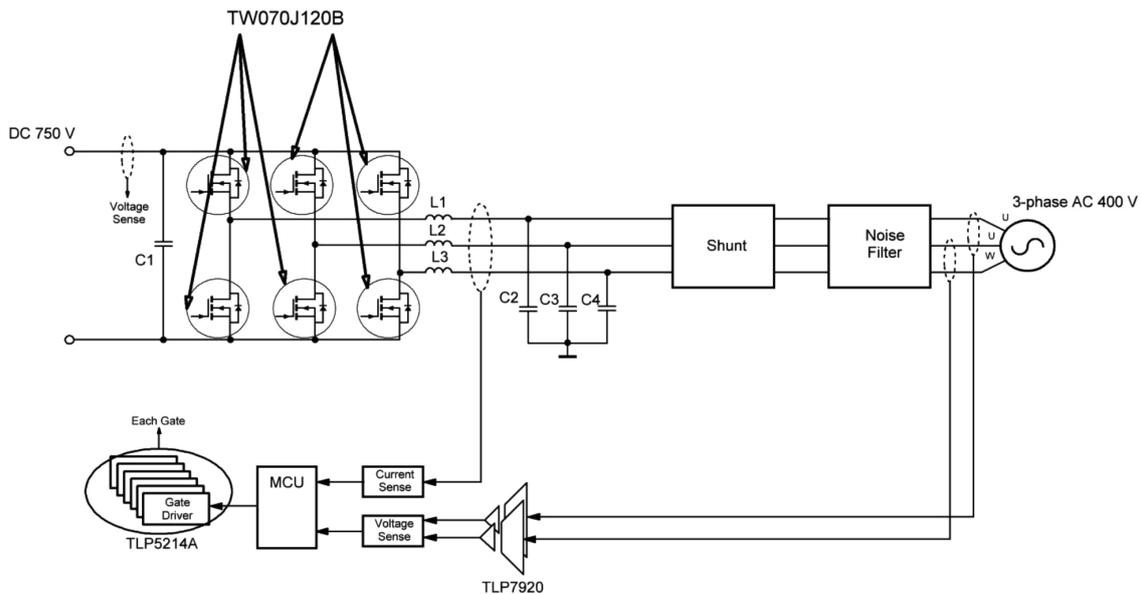


Рис. 4. Структурная схема SiC-инвертора

Для формирования схемы отрицательного смещения применен стабилитрон VD1. Напряжение на затворе транзистора VT1 становится отрицательным, когда нижний ключ полумоста выключен, что исключает возможность возникновения короткого замыкания в стойке полумоста. Данный стабилитрон создает отрицательное смещение в -2В.

Реализация трехфазного инвертора на SiC-транзисторах

На рис. 4 показана схема трехфазного инвертора, реализованного на драйверах TLP5214A. В схеме используется TW070J120B – SiC-транзистор с максималь-

ным напряжением сток-исток 1200 В и максимальным током стока 36 А. Также применяется элемент TLP7920 – оптически изолированный усилитель.

Для уменьшения пульсации тока на выходе преобразователя рассчитаем индуктивность сглаживающих дросселей. Зададим выходную мощность инвертора P_{out} равной 4 кВт, напряжение шины DC V_{DC} $V = 750$ В, КПД $\eta = 97\%$, частота формируемого инвертором напряжения $F_c = 50$ кГц, пульсация входного тока $I_{puls} = 30\%$, минимальное фазное напряжение инвертора $V_{in_min_phas} = 180$ В. Тогда индуктивность сглаживающих дросселей будет равна:

$$L1 = L2 = L3 = \frac{(V_{DC} - \sqrt{2} \cdot V_{in_min_phas}) \cdot \eta \cdot 0.01 \cdot V_{in_min_phas}^2}{F_c \cdot 0.01 \cdot I_{puls} \cdot P_{out} \cdot V_{DC}} = 3.46 \cdot 10^{-4} = 346 \text{ мкГн.}$$

Для расчета входной емкости инвертора (рис. 5) примем время задержки шины DC Th равным 6,4 мс и минимальное отклонение напряжения шины DC $V_{min_DC} = 700$ В. Таким образом, требуемая емкость конденсаторов равна:

$$C_{in} = \frac{Th \cdot 2 \cdot P_{out}}{V_{DC}^2 - V_{min_DC}^2} = 7.04 \cdot 10^{-4} = 704 \text{ мкФ.}$$

Резисторы R1, R2, R3, R4 на рис. 5 формируют цепь разряда емкости при отключении шины DC.

Предзаряд емкости при включении шины DC осуществляется через зарядные резисторы HSC10082RJ, и по достижении заданного уровня напряжения DC резисто-

ры шунтируются контактором LC1D126BD (на рисунках не показаны).

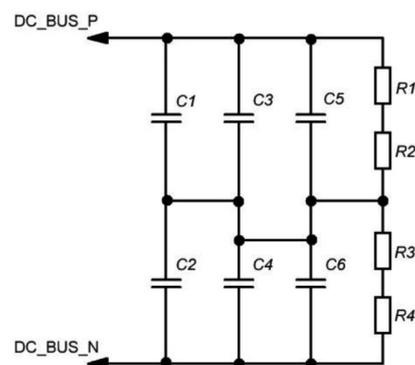


Рис. 5. Входная емкость инвертора

SiC-модуль SK80MB120CR03TE1

Для построения систем энергетики будет интересен SiC Modules SK80MB120CR03TE1 (полумост) компании SEMIKRON, оснащенный встроенным датчиком температуры, причем корпус модуля позволяет выполнить всю схему управления непосредственно на самом модуле.

Данный модуль обладает следующими характеристиками:

- класс по напряжению 12;
- при температуре 70 °C ток стока 82 А;

– напряжение затвор-исток: -8...19 В.

Рекомендованное применение данного модуля согласно документации: системы накопления электрической энергии, источники бесперебойного питания, преобразователи частоты.

Приведем результаты моделирования данной топологии на основе силового модуля SK80MB120CR03TE1 (использовалась официальная программа моделирования от Semicron для подбора и моделирования силовых модулей). На рис. 6 показаны начальные условия для моделирования.

Nominal load

Input voltage (V_{in})	Output voltage (V_{out})
750 V	400 Vrms
Output current (I_{out})	Output power (P_{out})
36 Arms	21.6 kW
Power factor ($\cos \varphi$)	Output frequency (f_{out})
0.866	50 Hz
Switching frequency (f_{sw})	Modulation (M)
30 kHz	Sinus triangle PWM
Additional losses per heatsink (P_{HS})	
0 W	

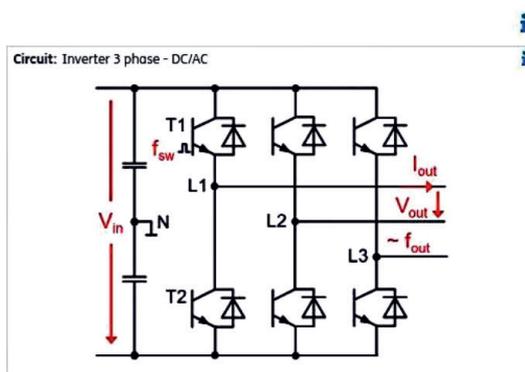


Рис. 6. Номинальная нагрузка модулей SK80MB120CR03TE1

В качестве модуля выберем SK80MB120CR03TE1 (рис. 7).

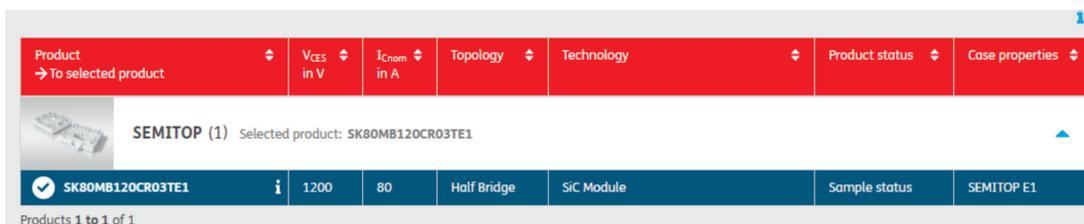


Рис. 7. Выбор силового модуля

Выбор расположения силовых модулей на охладителе показан на рис. 8.

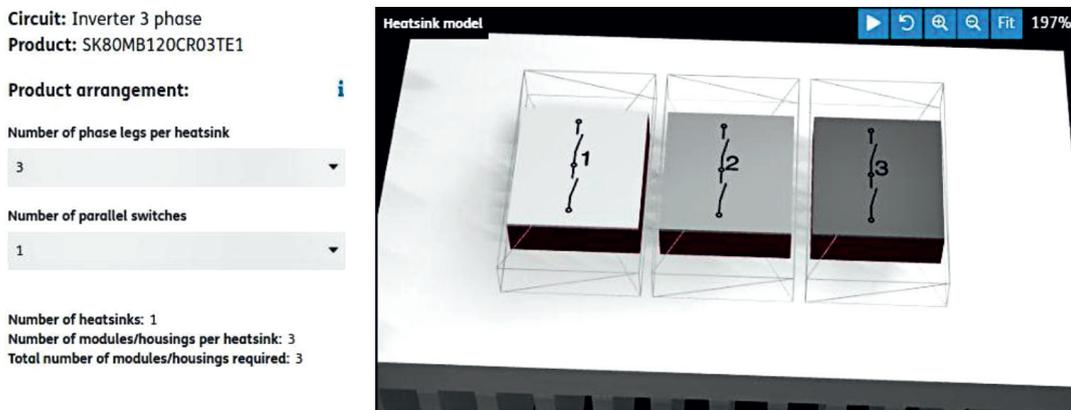


Рис. 8. Компоновка силовых модулей на охладителе с воздушным охлаждением

Результаты проверки сборки SK80MB120CR03TE1 показаны на рис. 9.



Рис. 9. Результат проверки силовой сборки

После проверки работоспособности системы была выявлена ее работа при заданных параметрах нагрузки (рис. 10).

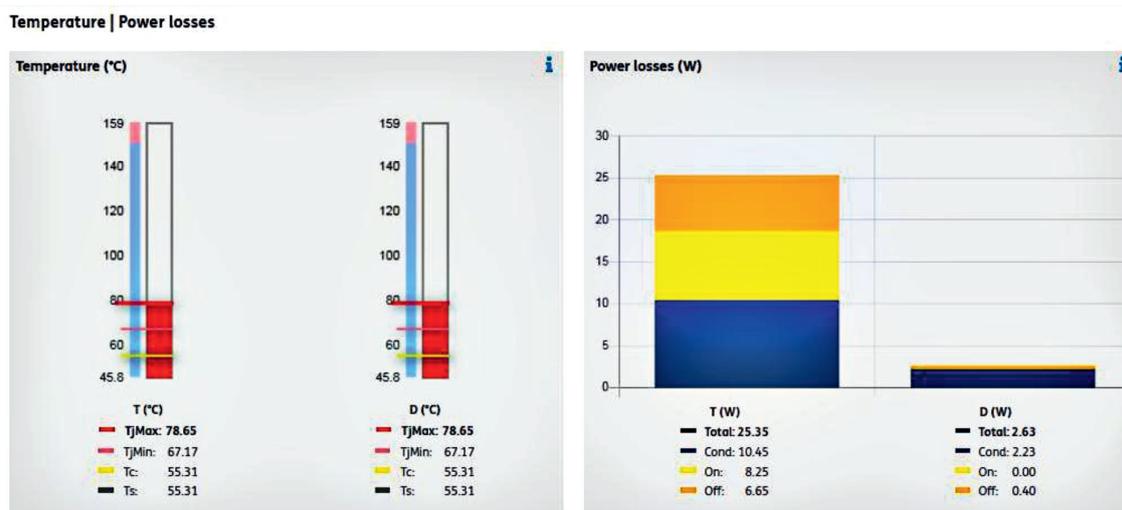


Рис. 10. Рабочая температура силового модуля и потери мощности

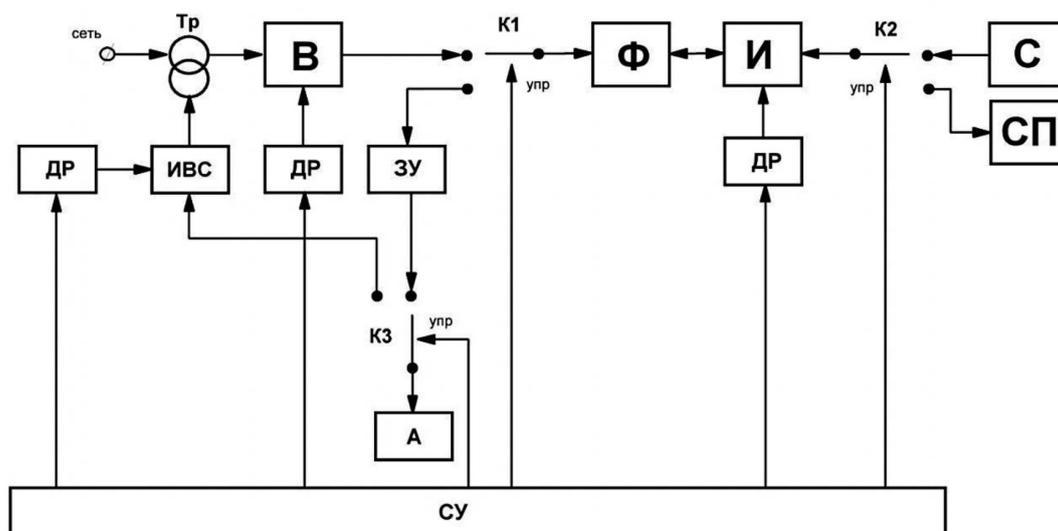
Использование силовых преобразовательных блоков на SiC-транзисторах для построения осветительной линии

По статистическим данным, на освещение тратится более 10% от всей вырабатываемой в нашей стране энергии, следовательно, построение экономичных систем – достаточно актуальная задача [5]. SiC-транзисторы и описанные выше элементы могут применяться для решения данной задачи (например, для энергопитания и управления осветительной линией (однофазный вариант использования)).

На сегодняшний день возрастает применение наружных светильников с солнечной панелью (рис. 11).



Рис. 11. Наружный светильник с солнечной панелью



*Тр – трансформатор; В – выпрямитель; Ф – сглаживающий фильтр;
И – основной инвертор; С – светильники; СП – солнечные панели; Др – драйверы;
ИВС – инвертор, ведомый сетью; ЗУ – зарядное устройство; А – аккумулятор;
К1, К2, К3 – электронные коммутаторы; СУ – система управления*

Рис. 12. Система энергопитания и управления осветительной линией

В дневное время светильник пассивен, а энергия, вырабатываемая солнечной панелью, аккумулируется. В ночное время светильник активен и потребляет энергию из сети и накопленную за день в аккумуляторе. Солнечные панели соединяются параллельно. Панели выгодно крепить на светильники из-за экономии места. Структура системы показана на рис. 12.

Конфигурация системы настраивается при помощи коммутаторов. В ночное время выстраивается прямой ход энергии от сети в светильники с добавлением энергии от аккумулятора при помощи инвертора, ведомого сетью. В дневное время организуется заряд аккумулятора от солнечных панелей, при этом управление основным инвертором меняется, и он работает как выпрямитель. При соответствующем управлении система может формировать команды управления по каналу MPLC [6, 7].

Выводы

1. Карбид кремния позволяет реализовать силовые полупроводниковые приборы с улучшенными по сравнению с традиционными кремниевыми МОП-транзисторами (MOSFET, IGBT) свойствами.

2. Устройства с SiC-транзисторами обладают повышенными КПД и удельной мощностью.

3. Для управления SiC-транзисторами наиболее целесообразно использовать специализированные драйверы.

4. Для оптимизации конструкции и превосходных тепловых характеристик следует применять модульный принцип построения силовых модулей на основе SiC. Например, применение модулей SK80MB120CR03TE1 и драйвера TLP5214A позволяет выполнить конструкцию с минимальной паразитной индуктивностью и максимальной энергоэффективностью.

5. Имеются перспективы использования силовых SiC-модулей для построения высокоэффективных «интеллектуальных» систем уличного освещения с накоплением солнечной энергии в дневной период и рациональным использованием в ночной период.

6. Технология Press-Fit contact помогает располагать схемы управления непосредственно на самой сборке силовых модулей, что уменьшает протяженность линий передачи информации для управления инвертором.

Список литературы

1. Эдгар Айербе, Адам Баркли, Джон Муккен (Wolfspeed). Новые транзисторы SiC MOSFET с трехкратным снижением потерь на переключение. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.compel.ru/lib/141266> (дата обращения: 27.07.2021).

2. Джованбаттиста Маггиуси, Диого Варахао. Преимущества SiC-технологии и их использование: MOSFET и драйверы

ры затвора Infineon. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.compel.ru/lib/142692> (дата обращения: 28.07.2021).

3. Гавриков В.А. Управление SiC-транзисторами. [Электронный ресурс]. URL: <https://khabarovsk.terraelectronica.ru/news/6334> (дата обращения: 28.07.2021).

4. Шунков В.К. SiC: микроэлектроника – это не только кремний. [Электронный ресурс]. URL: <https://habr.com/ru/post/478506/> (дата обращения: 29.07.2021).

5. Бонати А. Энергосбережение посредством интеллектуальных систем светорегулирования // Светотехника. 2009. № 4. С. 41–44.

6. Копытов С.М., Ульянов А.В., Шибeko P.B. Коммутатор сетевого напряжения для управления светодиодными осветительными приборами с помощью низкочастотной PLC-технологии // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 9. С. 152–161. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-9-152-161.

7. Kopytov S.M., Ulyanov A.V. Modification of the Dimming Control Method for LED Lighting Using PLC Technology, 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). Vladivostok, 2018. P. 1–4. DOI: 10.1109/FarEastCon.2018.8602739.