

Трехуровневые инверторы:

теория и практика

Инверторы напряжения, выполненные по трехуровневой схеме (3L NPC), применяются в устройствах, работающих на высокой частоте коммутации и отличающихся особыми требованиями по КПД и качеству выходного сигнала: источниках бесперебойного питания (UPS) и инверторах солнечных батарей. Как правило, снижение уровня гармонических искажений достигается в результате повышения рабочей частоты f_{sw} , что, в свою очередь, ведет к росту динамических потерь. Многоуровневая схема позволяет при относительно низком значении f_{sw} решить эту проблему и, кроме того, снизить требования к выходному фильтру, габариты и стоимость которого существенно влияют на показатели всего изделия. Еще одним достоинством 3L-топологии является низкий уровень излучаемых электромагнитных шумов, что особенно важно для таких применений, как UPS.

**Инго Стаудт (Ingo Staudt),
SEMIKRON International**

Андрей Колпаков

Andrey.Kolpakov@semikron.com

Принцип работы многоуровневой схемы (MLI — Multi Level Inverter) прост: модули или инверторные ячейки соединяются последовательно, вследствие чего напряжение питания устройства может превысить блокирующую способность отдельных компонентов. Подобное решение позволяет формировать «многоступенчатый» выходной сигнал, что приведет к снижению уровня гармонических искажений и отказу от дорогостоящих и громоздких выходных фильтров. Однако очевидно, что при этом все ключи инвертора должны управляться гальванически изолированными сигналами.

Частным случаем MLI является трехуровневая схема с фиксированной нейтралью 3L NPC (3-Level Neutral Point Clamped). Поскольку в цепи коммутации участвуют четыре IGBT (рис. 1), потери проводимости у 3L NPC-инвертора несколько выше, чем у традиционного двухуровневого. Однако существенное снижение потерь переключения позволяет уменьшить общее значение рассеиваемой мощности примерно на 40%, и это достоинство особенно ярко проявляется на высоких частотах коммутации.

Специально для тех устройств, где применение подобных схем дает ощутимые технические преимущества, компания SEMIKRON разработала серию специализированных модулей, выполненных в соответствии с 3L NPC-топологией. Подобные компоненты доступны в четырех конструктивах: SEMITOP (миниатюрные с паяным подключением); MiniSKiiP (миниатюрные с пружинными контактами); SEMITRANS (стандартные 62-мм корпуса с винтовыми терминалами); SKiM («безбазовые» ключи прижимного типа с винтовыми терминалами).

Для построения инверторов в диапазоне до 100 кВ·А предлагаются модули SEMITOP и MiniSKiiP. Штырьевые выводы компонентов серии

SEMITOP соединяются с интерфейсной платой методом пайки. Особенностью конструкции MiniSKiiP является использование пружинных контактов для силовых и сигнальных подключений. Установка MiniSKiiP и соединение их выводов с интерфейсной платой производится одним винтом за одну

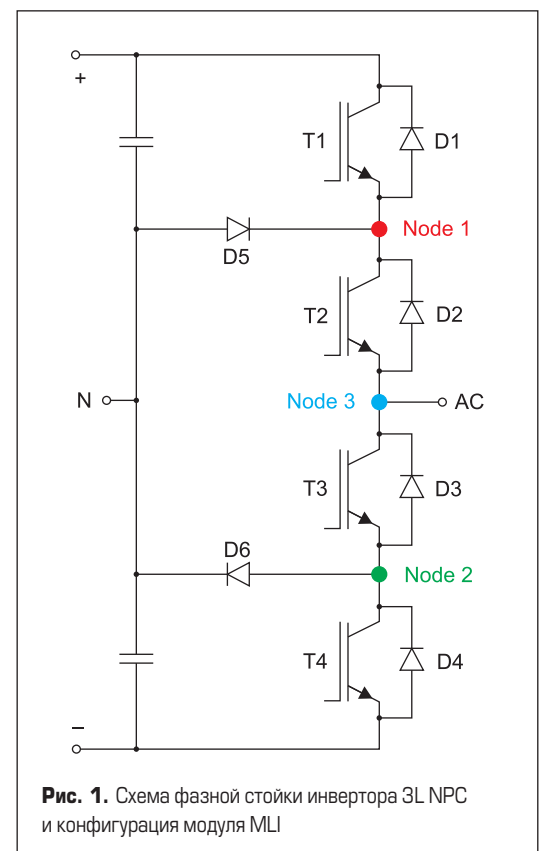




Рис. 2. Сборка 3L NPT-инвертора на базе модуля SKiiP 28MLI 06R6

технологическую операцию, что обеспечивает предельную простоту сборки и обслуживания изделия. За 14 лет выпущено более 12 млн модулей MiniSKiiP, которые успешно работают в различных отраслях преобразовательной техники.

Топология соединительных шин компонентов MLI выбрана с учетом минимальной длины путей коммутации, что обеспечивает низкую величину распределенных

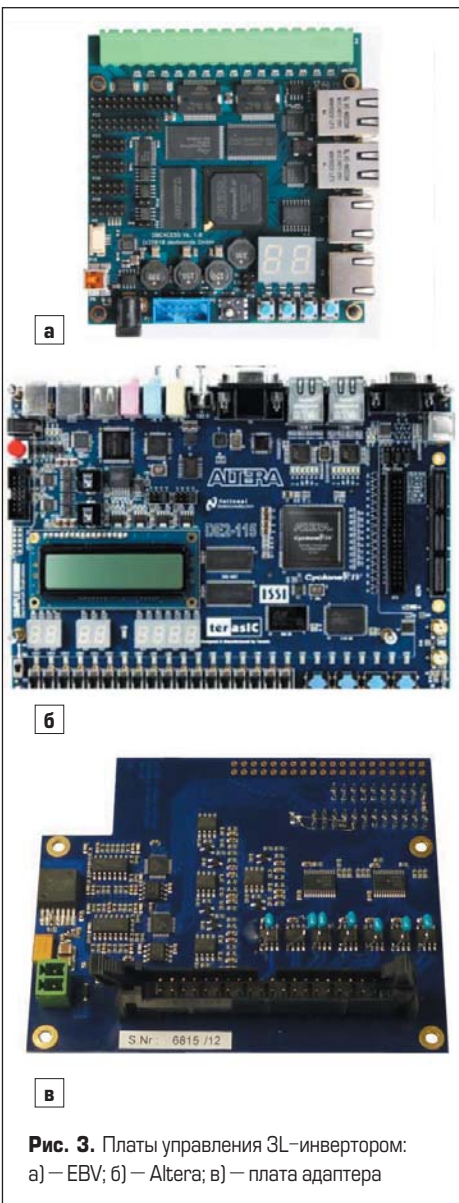


Рис. 3. Платы управления 3L-инвертором: а) – EBV; б) – Altera; в) – плата адаптера

индуктивностей и коммутационных пере- напряжений.

Схема 3L NPC включена в меню программы теплового расчета SEMiSEL [6], on-line версия которой доступна на сайте www.semikron.com. Благодаря использованию метода численной аппроксимации и разработке экспериментальных трехмерных тепловых моделей компонентов, программа позволяет проводить быстрый и точный анализ тепловых характеристик практических схем используемых в силовой электронике схем.

Общие сведения об инверторе 3L EVA

Чтобы облегчить разработчикам освоение трехуровневой топологии, компания SEMIKRON разработала демонстрационный преобразователь «3L EVA Inverter» (рис. 2). Инвертор, созданный на основе 600-В модуля SKiiP 28MLI 06R6, обеспечивает выходной ток до 100 А при напряжении звена постоянного тока $V_{DC} = 750$ В. Блок «3L EVA Inverter» представляет собой функционально законченное изделие. В схеме предусмотрены все традиционные виды защит: от перенапряжения, перегрузки по току и КЗ, а также перегрева. Кроме того, встроенный драйвер IGBT отключает силовые транзисторы при возникновении сквозного тока в паре транзисторов. В инверторе также предусмотрена функция активного ограничения напряжения на отдельных ключах.

Преобразователь «3L EVA Inverter» может быть полезен как начинающим, так и опыт-

ным разработчикам. Работа с инвертором позволяет получить наиболее полное представление об особенностях применения 3L NPC-топологии, отработать алгоритмы управления, а также исследовать специфические для данной конфигурации тепловые режимы.

Чтобы упростить и ускорить ввод инвертора в эксплуатацию, можно заказать готовое устройство управления, производимое EBV и Altera (рис. 3). Компании EBV и Altera поставляют платы, выполненные на основе FPGA Cyclone IV: DBC4CE55 MercuryCode III Platform (EBV) или INK Kit (Altera). Доступно программное обеспечение, ориентированное на управление 3L-схемой. По всем вопросам, касающимся ПО, а также для получения исходных кодов программ следует обращаться к EBV и Altera. Чтобы использовать данные устройства управления, необходима адаптерная плата (рис. 3в), осуществляющая согласование логических уровней контроллера и инвертора (3,3 В → 15 В).

Схема и технические характеристики инвертора 3L EVA

На упрощенной электрической схеме устройства, представленной на рис. 4, выделены цветом две части. Красный фрагмент отвечает за измерение напряжения двух частей звена постоянного тока (ЗПТ). Он содержит конденсаторы DC-шины, изолирующие усилители и пользовательский интерфейс.

Зеленый участок схемы представляет собой одну из трех фаз инвертора EVA. В ее состав входят силовые модули, драйвер, гальвани-

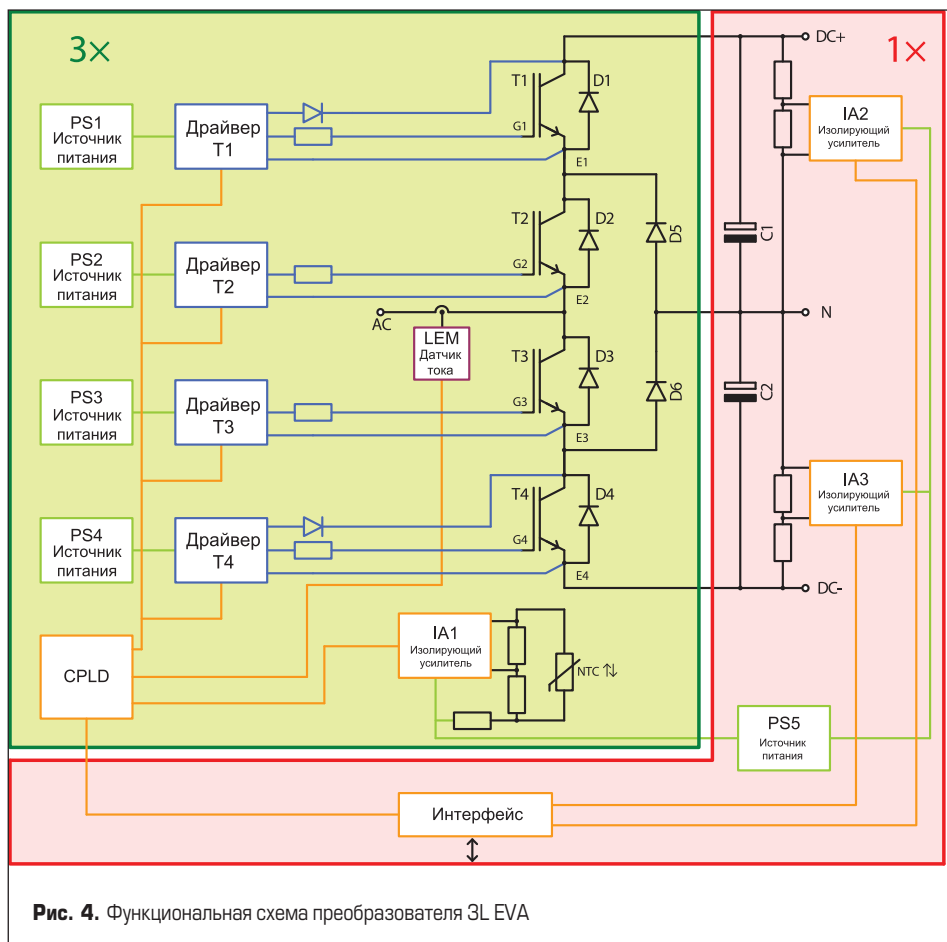


Рис. 4. Функциональная схема преобразователя 3L EVA

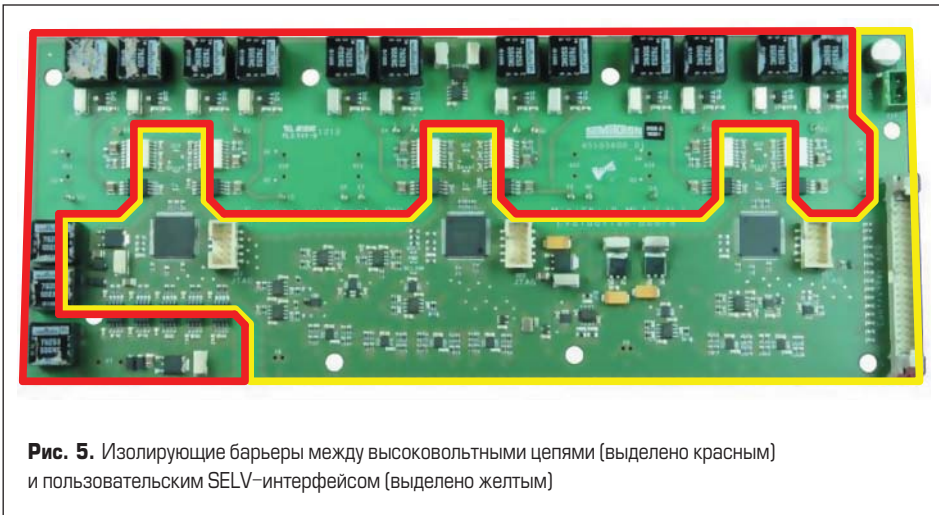


Рис. 5. Изолирующие барьеры между высоковольтными цепями (выделено красным) и пользовательским SELV-интерфейсом (выделено желтым)

чески изолированный источник питания, датчики тока и температуры, а также программируемая интегральная схема (CPLD), формирующая импульсы управления и отвечающая за ограничение предельных электрических режимов.

Предельные условия эксплуатации устройства:

- напряжение DC-шины $V_{DC_max} = 750$ В (400 В на «половину» ЗПТ);
- выходное напряжение переменного тока (линейное) $V_{AC} = 480$ В;
- выходной ток $I_{AC_max} = 100$ A_{RMS};
- частота коммутации $f_{sw_max} = 20$ кГц;
- температура окружающей среды $T_a = 0...40$ °C;
- температура радиатора $T_{s_max} = 80$ °C;
- класс защиты IP00;
- уровень загрязнения PD2;
- климатическое исполнение — 1K1, 2K2, 3K3 (3Z1).

Изоляция преобразователя выполнена в соответствии со стандартами EN50178 и EN61800-5-1. Основная электрическая развязка осуществляется между пользовательским низковольтным интерфейсом (SELV, Safety Extra Low Voltage — желтый фрагмент на рис. 5) и высоковольтными цепями (красный фрагмент на рис. 5). Базовая изоляция разделяет радиатор и высоковольтные цепи.

Мониторинг электрических режимов и защита

Инвертор 3L EVA обеспечивает широкий набор встроенных функций, в частности мониторинг фазных токов. Для контроля нагрузки по всем трем фазам используются гальванически изолированные датчики, выходы которых соединены с соответствующими выводами сигнального коннектора и устройством защиты. Уровень отключения тока перегрузки (OCP) составляет 125% от номинального значения ($150 \text{ A} \times 1,25 = 187,5 \pm 8 \text{ A}$), при его достижении схема управления инвертора блокирует только те силовые ключи, в которых выявлено аварийное состояние.

Сигналы с датчиков температуры трех модулей MiniSKiP поступают на разъем

и схему защиты через оптическую изоляцию. Отключение IGBT производится при достижении уровня (115 ± 4) °C. Таким же образом осуществляется гальваническая развязка сигнала, пропорционального напряжению на DC-шине (V_{DC}). Выбранный пороговый уровень отключения силового каскада ((465 ± 14) В) исключает возможность возникновения опасных для IGBT коммутационных перенапряжений. Инвертор 3L EVA не содержит тормозной чоппер, способный снизить напряжения в звене постоянного тока, поэтому оно должно быть ограничено пользователем на уровне не более 750 В.

Чтобы обеспечить защиту силовых транзисторов от экстремально высоких токов короткого замыкания, в каждой фазе имеется схема детектирования выхода IGBT T1 и T2 из насыщения (DESAT). Если падение напряжения на открытом ключе превышает 3 В (при номинальной нагрузке $V_{CE} \approx 1$ В), драйвер мгновенно отключает соответствующий транзистор и после некоторой временной задержки — все IGBT в фазной стойке. При этом на плате управления загорается светодиод DESAT.

Уникальной особенностью схемы защиты инвертора 3L EVA является наличие функции активного ограничения напряжения по каждому IGBT. При номинальном значении V_{CE} (430–475 В, в зависимости от окружающей температуры и разброса параметров) через ограничительные стабилитроны, установленные между коллектором и затвором, протекает незначительный ток утечки. После достижения порогового уровня напряжения на коллекторе $V_{CE} \approx 600$ В (определяется суммарным падением напряжения на стабилитронах) транзистор

переходит в состояние проводимости (активного ограничения). С учетом предельной блокирующей способности транзисторов ($V_{CEmax} = 650$ В) при этом обеспечивается достаточный запас по перегрузке.

Управляющая логика

Плата драйвера построена на основе трех программируемых логических интегральных схем (ПЛИС, CPLD — по одной на каждую фазу). ПЛИС контролирует последовательность включения и выключения IGBT, длительность «мертвого времени» и формирование ШИМ-импульсов. Схема управления также следит за уровнями аналоговых сигналов и осуществляет необходимые процедуры в аварийных режимах. Алгоритм работы выбран таким образом, чтобы силовые ключи инвертора всегда оставались в рамках области безопасной работы.

- Последовательность коммутации.

Управление организовано таким образом, что «внутренние» транзисторы (T2, T3) всегда включаются раньше, чем «внешние» (T1, T4), которые, в свою очередь, выключаются раньше «внутренних».

- «Мертвое время».

Во всех каскадах схемы оно установлено равным 3 мкс. Если пользователь задает большее значение ($t_{dt} = 5$ мкс), то оно и используется в инверторе. Если «пользовательская» величина $t_{dt} < 3$ мкс, то ПЛИС увеличит его до минимально допустимого значения 3 мкс.

- Последовательность ШИМ.

Импульсы, формируемые управляющим контроллером, поступают на ПЛИС, где они сравниваются с таблицей коммутационных состояний (рис. 6). Если состояние ключей соответствует зеленой зоне таблицы (допустимое), то импульсы проходят на выходной каскад драйвера. Если оно расценивается как потенциально опасное (желтая зона) или опасное (красная зона), ПЛИС отключает инвертор. Нормальное функционирование всех стоек преобразователя продолжается только в том случае, если все коммутационные состояния определяются как допустимые.

- Обработка аналоговых сигналов.

Уровень каждого из измеряемых аналоговых сигналов (ток, температура, напряжение) сравнивается с максимально допустимыми значениями, а полученные результаты анализируются ПЛИС. Если любая из измеренных величин выходит за рамки ОБР, устройство управления отключит соответствующую фазу инвертора.

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------|------------|---|---|---|---|---|----------------------|---|---|---|---|---------|---|---|---|---|
| T1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| T2 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| T3 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| T4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Состояние | Допустимое | | | | | | Потенциально опасное | | | | | Опасное | | | | |

Рис. 6. Коммутационные состояния 3L NPC-инвертора

Плата драйвера

Плату драйвера можно условно разделить на несколько функциональных блоков (нижняя часть изображения на рис. 7). Три идентичные группы являются выходными каскадами драйверов фаз U, V и W (желтые контуры), пять оптопар (две — для передачи сигнала, пропорционального напряжению DC-шины, три — для измерения температуры) выделены красным цветом, каскады гальванической изоляции (голубой прямоугольник) относятся к основным функциональным группам. На плате также находятся несколько источников напряжения и операционных усилителей, предназначенных для согласования уровней сигналов.

В центре платы драйвера (верхняя часть изображения) расположены три светодиода (выделены синей окружностью), информирующие пользователя о текущем статусе инвертора. При подаче напряжения от источника питания начинает мигать индикатор POWER. Светодиод ULVO загорается, если напряжение падает ниже критического значения. В этом случае преобразователь отключается, сигналы ошибки по всем трем фазам имеют нулевой уровень. Индикатор DC предупреждает о

слишком высоком напряжении звена постоянного тока.

Три светодиода в каждой фазной стойке (отмечены красным цветом) отображают ее состояние: мигание OCP означает, что фазный ток превышает предельное значение, DESAT — выход транзистора из насыщения, TEMP — перегрев модуля. Кроме того, на плате отмечены точки контроля потенциалов затворов и эмиттеров всех IGBT инвертора. Их расположение выделено в верхней части рисунка желтым цветом.

Пользовательский интерфейс, характеристики аналоговых сигналов

Положение силовых терминалов для подключения выходов инвертора и силового питания (U, V, W, DC+, N, DC-, PE) отмечено на плате драйвера и радиаторе. Следует применять только рекомендованные типы кабелей, при их монтаже важно соблюдать указанные в документации моменты затяжки крепежных винтов.

Функционирование инвертора 3L EVA возможно в режиме естественного отвода тепла, однако на вывод питания вентилятора реко-

мендуется подавать напряжение постоянного тока не менее 5 В, чтобы обеспечить минимально необходимый поток охлаждающего воздуха.

Сигнальный разъем, имеющий 40 выводов, рассчитан на подключение гибкого кабеля длиной не более 1 м. При этом обеспечивается достаточная устойчивость к электромагнитным шумам. Пороговый уровень напряжения для входных сигналов $V_{ref_in} = 15$ В, при меньшей амплитуде импульсов нормальная работа преобразователя не гарантируется. Перед подключением устройства пользователь должен убедиться в том, что все контрольные сигналы удовлетворяют этим условиям.

Ток по аналоговым выходам (ток, напряжение) не должен превышать 5 мА, погрешность измерения напряжения DC-шины составляет $\pm 2\%$ при $V_{DC} = 500$ В и температуре 25 °С. Защита от перенапряжения срабатывает при $V_{DC} = (465 \pm 14)$ В, что соответствует уровню сигнала на контрольном выходе 9,3 В. Аналогично защита от перегрузки по току активируется при $I_{AC} = 187,5$ А (10 В на контрольном выводе). Допуск на измерение фазного тока — не более $\pm 3\%$ относительно максимального значения 187,5 А при температуре 25 °С.

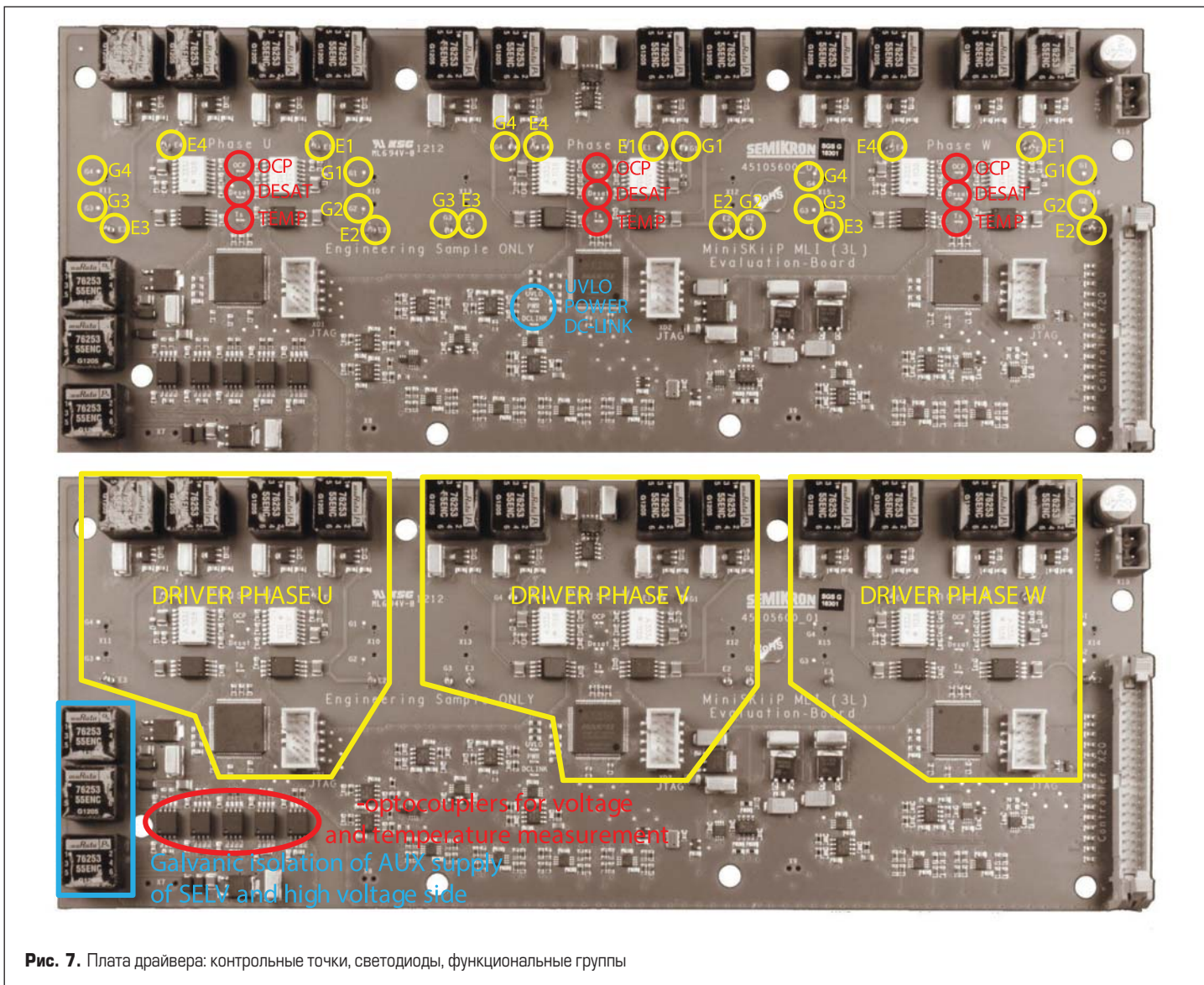
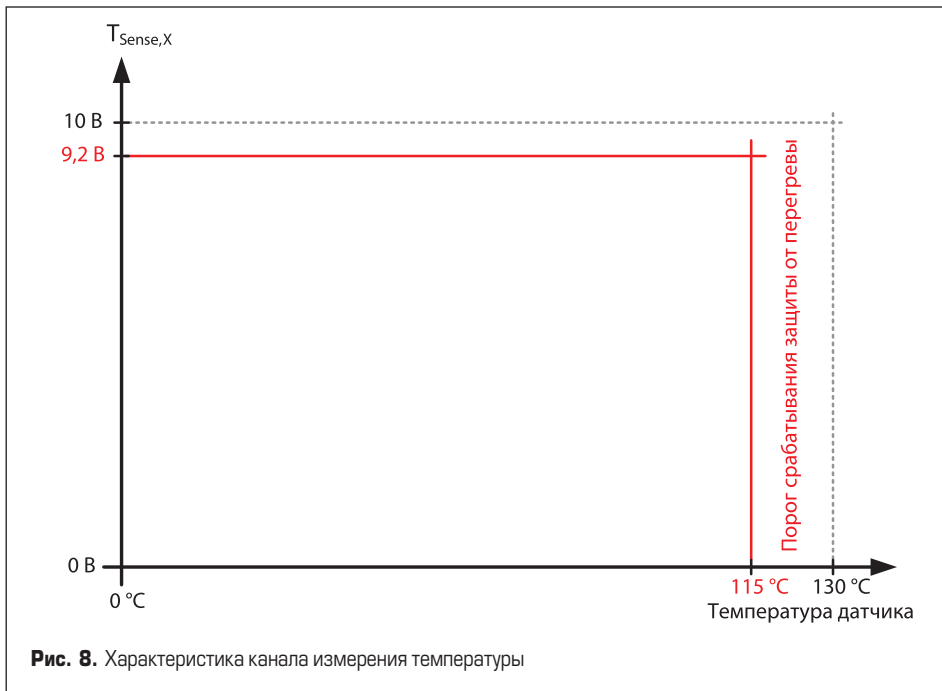


Рис. 7. Плата драйвера: контрольные точки, светодиоды, функциональные группы



Ошибка по каналу измерения температуры T_{Sense} составляет $\pm 0,3$ В, или $\pm 4\%$, соответствующая характеристика показана на рис. 8. Уровень сигнала 10 В по этому выходу соответствует нагреву термодатчика модуля до $130\text{ }^\circ\text{C}$, пороговый уровень срабатывания термозащиты — $115\text{ }^\circ\text{C}$.

Инициализация устройства

Для запуска инвертора EVA необходимо выполнить подключение следующих цепей:

- заземление (PE);
- питание вентилятора (Fan);
- питание драйвера;
- DC-шина (DC+, N, DC-);
- AC-выходы (U, V, W);
- логический интерфейс.

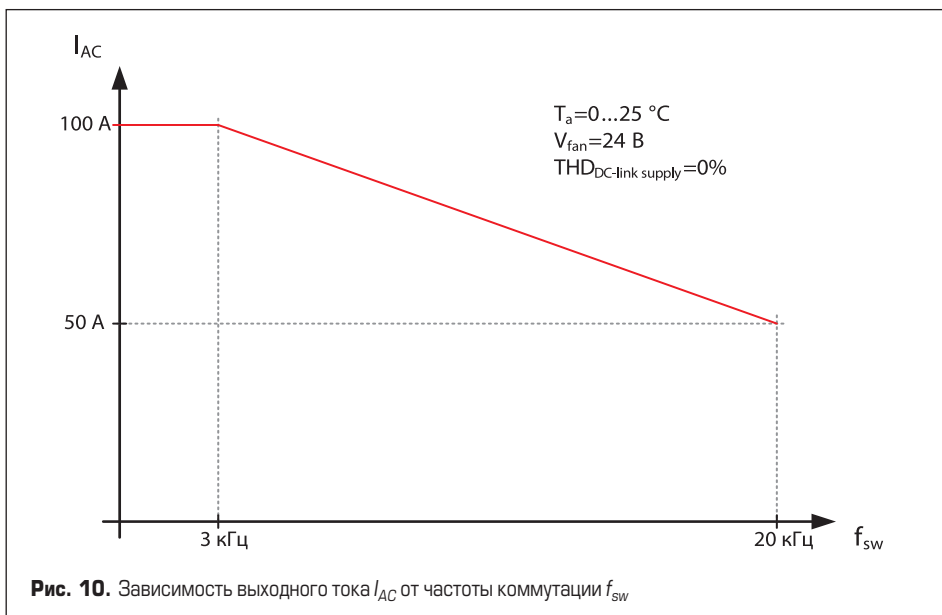
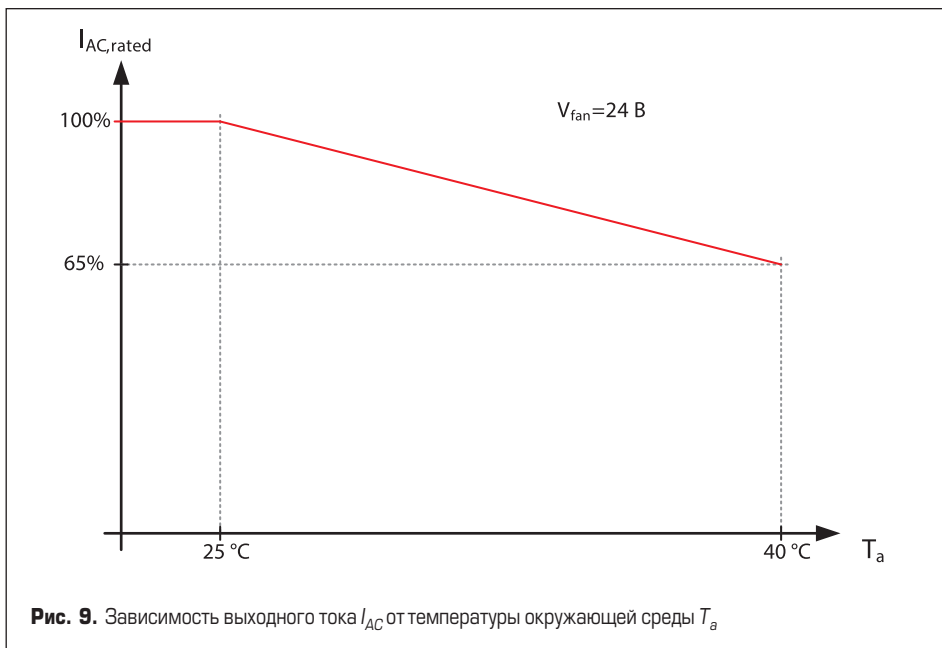
При работе на холостом ходу или с низкой нагрузкой включать вентилятор не обязательно, однако SEMIKRON рекомендует подавать на цепь FAN минимальное напряжение 5 В, обеспечивающее функционирование системы охлаждения.

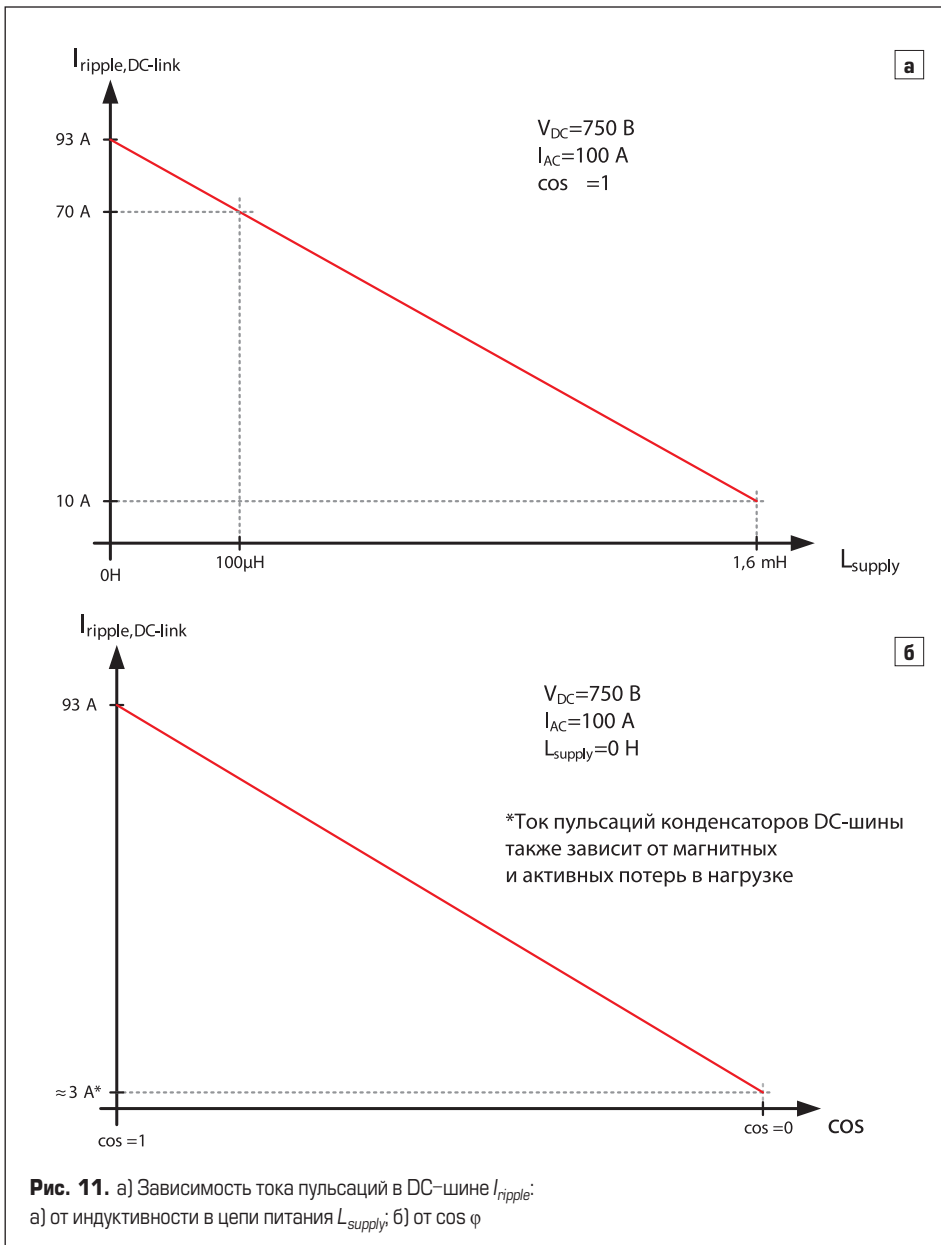
Если потенциал нейтрали N не контролируется, пользователь должен обеспечить балансировку обеих половин ЗПТ путем выбора соответствующего алгоритма ШИМ. Для работы инвертора требуется подача управляющих импульсов на выводы 11–16 сигнального разъема (управление затворами IGBT и цифровая земля), а также выводы 23 (Clear_Faults), 25 (Vref_In) и (цифровая земля). Подключение остальных цепей не обязательно, однако их использование позволяет обеспечить мониторинг всех рабочих режимов.

Нормальное функционирование инвертора 3L EVA гарантируется при температуре радиатора не выше $80\text{ }^\circ\text{C}$ и токе нагрузки I_{AC} до 100 A_{rms} . Тепловое сопротивление $R_{th(s-a)}$ использованного в преобразователе радиатора P21 равно $0,06\text{ K/W}$ при скорости охлаждающего воздуха 5 м/с . При этом три вентилятора (по одному на фазу) обеспечивают интенсивность потока $85\text{ м}^3/\text{ч}$. Такая производительность достигается при напряжении питания 24 В.

При $I_{AC} = 100\text{ A}_{rms}$, частоте коммутации $f_{sw} = 3\text{ кГц}$ и напряжении DC-шины $V_{DC} = 750\text{ В}$ потери мощности на один модуль составляют 300 Вт, или 900 Вт на инвертор. При этих условиях перегрев радиатора достигает $55\text{ }^\circ\text{C}$, т. е. максимально допустимое значение ($80\text{ }^\circ\text{C}$) будет наблюдаться при температуре окружающей среды $T_a = 25\text{ }^\circ\text{C}$. С увеличением T_a следует снижать выходной ток, чтобы не выйти за рамки режимов безопасной работы. Это следует делать и на больших частотах коммутации, например при $f_{sw} = 20\text{ кГц}$ максимальное значение $I_{AC} = 50\text{ A}_{rms}$. Соответствующие кривые приведены на рис. 9 и 10.

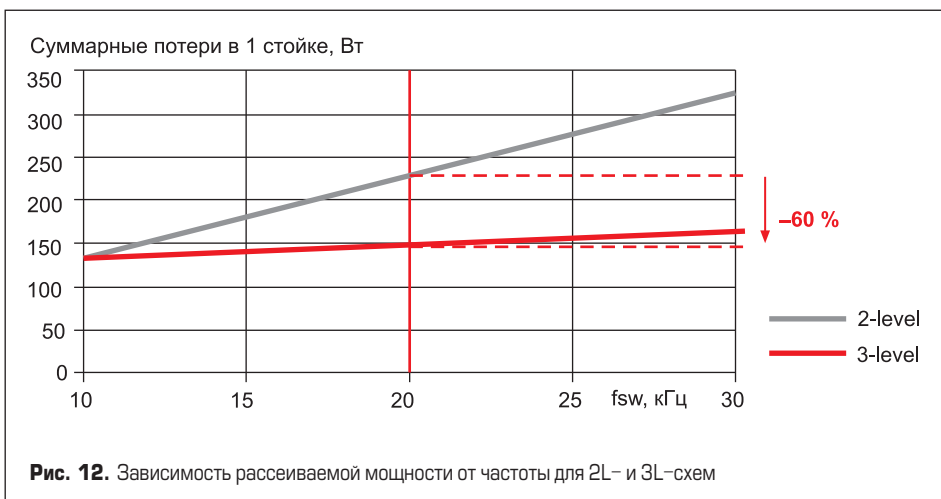
Конденсаторы встроенной DC-шины рассчитаны на ток пульсаций до 9,3 А (на одну емкость) на частоте 300 Гц и 10,3 А при $f_{sw} = 3\text{ кГц}$, суммарный ток при этом достигает 61,8 А. С дальнейшим увеличением частоты нагрузочная способность емкостей DC-шины не возрастает.





Когда инвертор 3L EVA работает на номинальную нагрузку 100 A_{rms} ($\cos \varphi = 1$), ток пульсаций DC-шины I_{ripple} составляет около 60 A_{rms} . Питание силового каскада инвертора должно производиться чистым постоянным напряжением без дополнительной AC-компоненты, в противном

случае перегрев конденсаторов может превысить безопасный уровень. Если питание формируется трехфазным выпрямителем (В6С), то к току емкостей DC-шины добавляется переменная составляющая на частоте 300 Гц. В этом случае уровень пульсаций при нагрузке 100 A_{rms} увеличивается до 93 А.



Для снижения I_{ripple} до приемлемого уровня можно добавить в звено постоянного тока 10 аналогичных конденсаторов или установить дроссель L_{supply} в цепь питания. При величине индуктивности $L_{supply} = 100\text{ мкГн}$ ток пульсаций снижается до 70 А, если $L_{supply} = 1,6\text{ мГн}$, то $I_{ripple} = 10\text{ А}$. В этом случае к каждой «полуцепи» DC-шины достаточно добавить всего один конденсатор (рис. 11а). Кроме того, возможно сочетание обоих методов.

На чисто активной нагрузке ($\cos \varphi = 1$) ток пульсаций на частоте 300 Гц составляет 93 А. С ростом реактивной составляющей его значение падает (до 3 А при $\cos \varphi = 0$, рис. 11б). Величина I_{ripple} зависит от уровня магнитных и активных потерь в нагрузке и инверторе.

Закключение

Концепция трехуровневого преобразователя, несмотря на кажущуюся сложность, имеет очевидные технические преимущества как в высокочастотных схемах, так и в преобразователях с высокими требованиями к качеству выходного сигнала. На рис. 12 показана зависимость мощности, рассеиваемой в одном плече инвертора, от частоты переключений. В качестве референтного выбрано значение f_{sw} , находящееся выше порога слышимости (20 кГц).

В низковольтном диапазоне применительно к таким устройствам, как UPS, трехуровневая схема (рис. 13) оказывается предпочтительнее и с экономической точки зрения, поскольку общая стоимость 600-В специализированных силовых ключей примерно на 25% ниже, чем трех стандартных полумостов 12-го класса. Кроме того, использование компонентов в конфигурации MLI упрощает конструкцию соединительных шин и всего инвертора.

Главными достоинствами трехуровневой топологии являются низкий уровень потерь, а также близкая к синусоидальной форма выходного сигнала. Меньшее значение рассеиваемой мощности, в свою очередь, означает пониженные требования к системе охлаждения и больший срок службы сило-



Рис. 13. Конструктивы специализированных модулей IGBT конфигурации MLI

вых модулей. Применение специализированных IGBT позволяет создавать компактные устройства, отличающиеся хорошими техническими и экономическими показателями. Для решения проблем, связанных с вычислениями потерь трехуровневого конвертера с фиксированной нейтралью, схема 3L NPC включена в программу теплового расчета SEMISEL.

Инвертор EVA можно заказать у официальных представителей SEMIKRON в России по номеру 91287001.

Литература

1. Pluschke Norbert, Grasshoff Thomas. More efficiency for 3-level inverters. SEMIKRON International, 2009.
2. Tomta Gjermund, Nielsen Roy. Analytical Equations for Three Level NPC Converters / 9th European Conference on Power Electronics and Applications. EPE 2001. Graz, 27—29 August.
3. Nabae A., Takahashi I., Akagi H., A new neutral-point clamped PWM inverter. IEEE Trans. Ind. // Applicat., Vol. IA-17., 1981. Sept./ Oct. P. 518—523.
4. Staut I. 3L SKiiP 28MLI07E3V1 Evaluation inverter. SEMIKRON Technical Explanation, 2013.
5. Staudt I. AN11001 – 3L NPC & TNPC Topology. SEMIKRON Application Note. 2011.
6. Колпаков А. SEMISEL V3.1 — новые возможности, новые перспективы // Силовая электроника. 2008. № 3.
7. Колпаков А. 3-уровневые преобразователи: инструкция по эксплуатации // Силовая электроника. 2012. № 1.