

Особенности проектирования преобразователей с SiC-модулями Cree.

Часть 2. Методы минимизации паразитных индуктивностей

В данном руководстве описаны методы минимизации паразитных индуктивностей печатных плат, обеспечивающие максимальные преимущества от применения карбидокремниевых модулей. В качестве примеров использованы полумостовой 50-мм модуль Cree CAS100H12AM1 (1200 В, 100 А) и трехфазный CCS050M12CM2 (1200 В, 50 А).

Перевод:
Евгений Карташов
Валерия Смирнова

cree@macrogroup.ru

Введение

Модули SiC MOSFET обеспечивают уникальное сочетание высокого рабочего напряжения, тока и скорости переключения. Эта комбинация требует более тщательного анализа паразитных элементов схемы, чем при использовании модулей Si IGBT. Влияние распределенных параметров уже обсуждалось в первой части статьи (Силовая электроника, №2'2018, с. 34) в разделе «Минимизация паразитарных эффектов в модулях SiC MOSFET», во второй части даны рекомендации по их подавлению.

Паразитная индуктивность блока конденсаторов и их соединения с SiC-модулем представляет собой основную проблему. Ее решение начинается с теоретического обсуждения источников паразитной индуктивности, на основе чего вырабатываются рекомендации по компоновке промежуточных соединений, а также даются предложения по выбору типа конденсаторов с точки зрения электрических характеристик и стоимости. Здесь представлены два варианта конструкции, основанных на этих рекомендациях и измерениях паразитных параметров. Рассматривается проектирование блока конденсаторов с учетом динамических параметров полумостового модуля CAS100H12AM1 и трехфазного модуля CCS050M12CM2.

Обсуждаемые вопросы

В работе использован интуитивный подход к вопросу минимизации паразитной индуктивности в банке конденсаторов и его соединении с SiC-модулем. Можно моделировать паразитные элементы методом конечных элементов, однако этот подход является сложным и трудоемким. Далее будут обсуждены следующие вопросы:

- Паразитные параметры: краткое обсуждение электромагнитных принципов, связанных с рекомендациями по геометрии проводников.
- Выбор компонентов: компромисс первого порядка по выбору конденсаторов DC-шины с учетом паразитной индуктивности и экономических показателей.
- Пример конструкции низкоиндуктивного банка конденсаторов для полумостового модуля Cree 50 мм.
- Пример конструкции низкоиндуктивного банка конденсаторов для трехфазного модуля Cree.

Паразитные параметры

Понятие «индуктивность» основано на двух фундаментальных открытиях в физике. Эрстед обнаружил, что сила взаимодействия между двумя заряженными объектами зависит от скорости заряда, то есть тока. Ампер измерил «силу», создаваемую током, и выразил эту зависимость в форме уравнения. «Сила на расстоянии» создается магнитным полем. Закон Ампера (его также называют законом взаимодействия электрических токов) в векторной форме выглядит следующим образом (жирным шрифтом выделены векторные величины):

$$\Delta \times B = \mu J.$$

Выражение говорит о том, что индукция магнитного поля B определяется произведением магнитной проницаемости материала μ и плотности электрического тока J , оно обычно иллюстрируется правилом правой руки, как показано на рис. 1.

В соответствии с законом Ленца электродвижущая сила, индуцируемая в проводящем контуре, равна

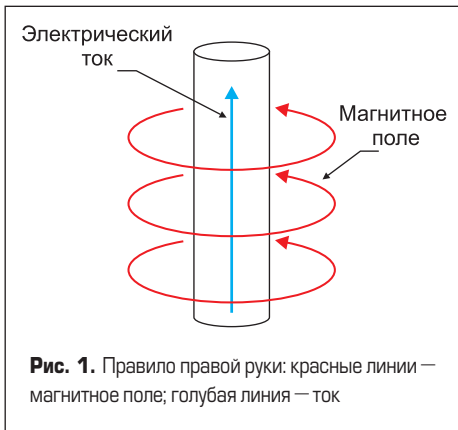


Рис. 1. Правило правой руки: красные линии — магнитное поле; голубая линия — ток

скорости изменения магнитного потока, сцепляющегося с этим контуром. Ток, индуцируемый при изменении магнитного поля, проходящего через контур, своим магнитным полем препятствует этому изменению. Таким образом, в электрической цепи с индуктивностью, изменяющей электрический ток, присутствует индуктивность, наводящая напряжение, противоположное изменению тока:

$$V = L \times di/dt$$

Ключевой вопрос заключается в том, что магнитное поле порождает индуктивность. Закон полного тока Ампера позволяет рассчитать стационарное магнитное поле на основе установившегося тока.

Очевидным путем снижения индуктивности является подавление магнитного поля. Иллюстрацией этого принципа является витая пара проводников и коаксиальный кабель. Существует два основных способа трассировки пары проводников на печатной плате или в шинном проводе. Первый путь — это плоскостное параллельное размещение проводников по вертикали, как показано на рис. 2. Второй способ заключается в размещении проводников в одной горизонтальной плоскости с образованием копланарной структуры, как показано на рис. 3. Копланарная шина часто используется в инверторах на основе IGBT-модулей, это упрощает подключение к IGBT-терминалам и конденсаторам, поскольку оба проводника находятся в одной плоскости.

Оба метода обеспечивают низкую индуктивность за счет размещения проводников в непосредственной близости и соответствующей компенсации поля. Степень его подавления может быть рассчитана с помощью закона Ампера, однако для детального понимания процесса следует проанализировать геометрию и последующее образование магнитного поля. Для лучшей иллюстрации геометрических эффектов сначала рассмотрим магнитное поле, создаваемое одиночным прямоугольным проводником, как показано на рис. 4 и 5. Направление тока и магнитного поля подчиняется правилу «правой руки».

Теперь рассмотрим пары проводников с токами, протекающими в противоположных направлениях. Сплошная красная линия — это поле, созданное током, выходящим «из страницы»; пунктирная линия — поле, созданное током, приходящим «на страницу». У плоскостных параллельных плат магнитное поле перекрывается, как показано на рис. 6, перекрытие поля у копланарных плат показано на рис. 7.

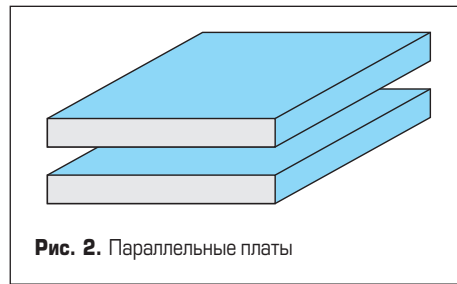


Рис. 2. Параллельные платы

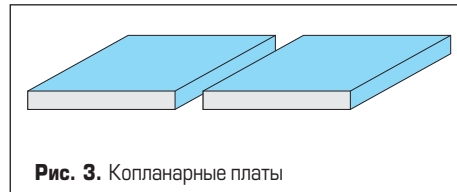


Рис. 3. Копланарные платы

скопараллельных плат магнитное поле перекрывается, как показано на рис. 6, перекрытие поля у копланарных плат показано на рис. 7.

Этот простой графический пример показывает, что параллельная структура дает значительно больше перекрытий и, следовательно, подавляет магнитное поле лучше, чем копланарная. Параллельная и копланарная пластины являются наиболее популярными формами передающих линий, индуктивность на единицу длины — их стандартная характеристика. Расчет этого параметра для параллельных и копланарных геометрий есть в разных источниках. Оценка так называемой индуктивности свободного пространства (относительная проницаемость и диэлектрическая проницаемость равны единице) для двух данных структур показана на рис. 8 и 9.

Разницу можно оценить на примере, в котором ширина пластины (w) в обоих случаях составляет 20 мм, а зазор является минимальным для рабочего напряжения 1,2 кВ.

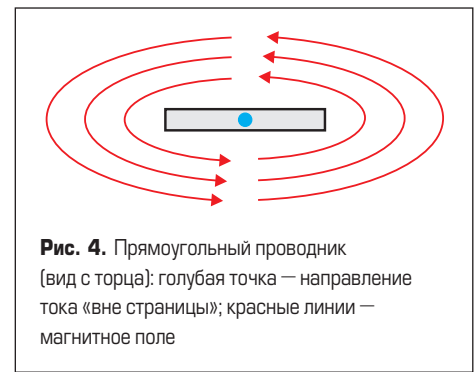


Рис. 4. Прямоугольный проводник (вид с торца): голубая точка — направление тока «вне страницы»; красные линии — магнитное поле

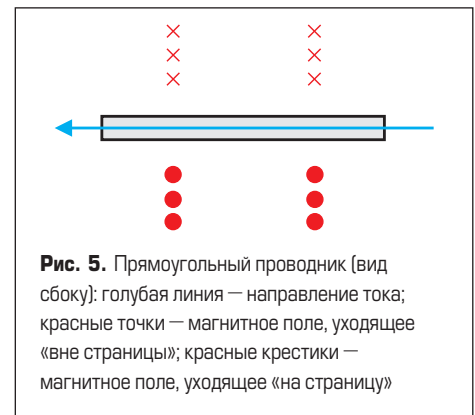


Рис. 5. Прямоугольный проводник (вид сбоку): голубая линия — направление тока; красные точки — магнитное поле, уходящее «вне страницы»; красные крестики — магнитное поле, уходящее «на страницу»

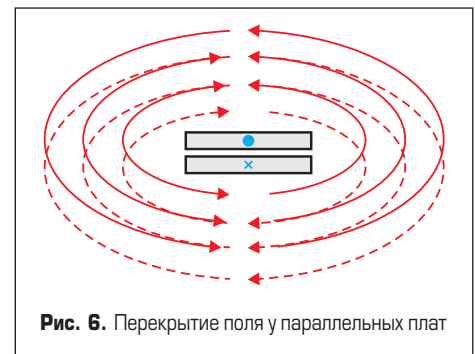


Рис. 6. Перекрытие поля у параллельных плат

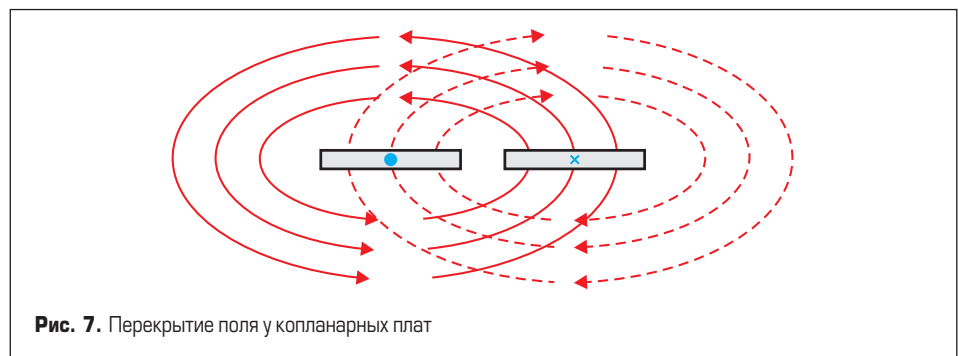


Рис. 7. Перекрытие поля у копланарных плат

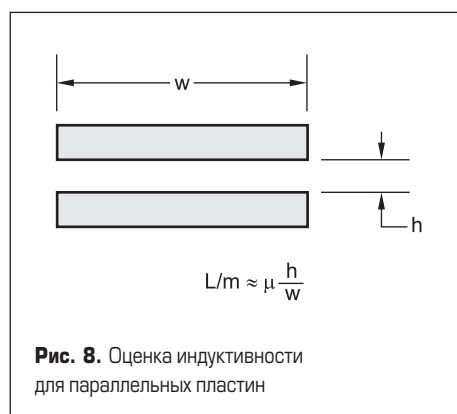


Рис. 8. Оценка индуктивности для параллельных пластин

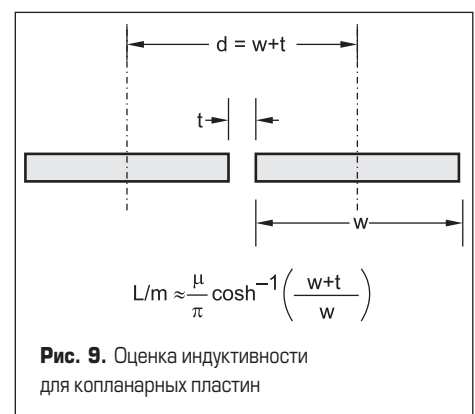


Рис. 9. Оценка индуктивности для копланарных пластин

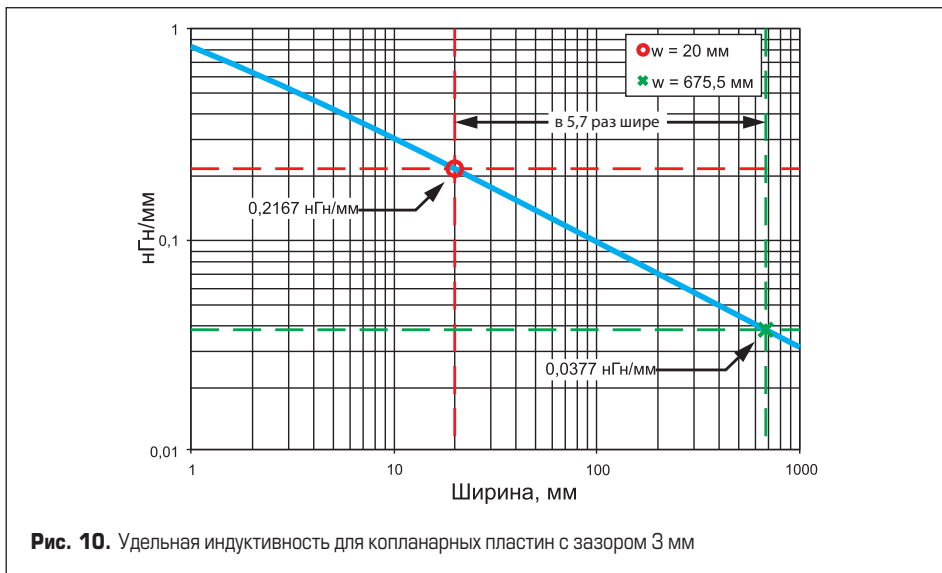


Рис. 10. Удельная индуктивность для копланарных пластин с зазором 3 мм

При параллельном расположении пластин величина зазора (консервативная оценка) между параллельными проводниками (h) составляет приблизительно 1/10 кратковременной диэлектрической прочности для печатной платы FR-4. Кратковременное напряжение диэлектрического пробоя для FR-4 примерно равно 20 кВ/мм, что

дает величину зазора 0,6 мм для напряжения 1,2 кВ. Индуктивность на 1 мм длины для этой геометрии определяется простым соотношением: она обратно пропорциональна зазору (h). Таким образом, при $w = 20$ мм и $h = 0,6$ мм удельная индуктивность составляет 0,0377 нГн/мм.

В отношении копланарной конструкции стандарт IPC-2221 рекомендует зазор 3 мм на 1,2 кВ (t на рис. 9) для плат с полимерным или конформным (A5/B4) покрытием. В этом случае величина 3 мм определяет минимальное расстояние t . Единственный оставшийся параметр, которым можно оперировать для минимизации удельной индуктивности, — это увеличение ширины w . Зависимость удельной индуктивности от ширины w представляет собой обратную гиперболическую функцию косинуса, показанную на рис. 10. При тех же размерах ($w = 20$ мм, $t = 3$ мм) она составляет 0,2167 нГн/мм.

В условиях, описанных выше, индуктивность на единицу длины для копланарного расположения проводников примерно в 5,7 раза выше, чем для параллельных пластин. Очевидным вопросом является выбор ширины проводника, обеспечивающий такую же индуктивность копланарной конфигурации, как у параллельного варианта. На рис. 10 приведена зависимость индуктивности на 1 мм длины от ширины для копланарных пластин. График показывает, что удельная индуктивность медленно уменьшается с увеличением ширины. Результат для $w = 20$ мм выделен красным

кругом, вариант для индуктивности 0,0377 нГн показан зеленым крестиком. То есть копланарные проводники шириной 675,5 мм позволяют получить такую же индуктивность на 1 мм, как у параллельных проводников шириной 20 мм, что ясно демонстрирует преимущество параллельной конфигурации.

В отношении показателей индуктивности, магнитных полей и конфигурации проводника можно сделать следующие выводы:

- Снижение паразитной индуктивности, помимо минимизации длины проводника, лучше всего достигается путем максимального подавления распределенных магнитных полей.
- Геометрия близко размещенных проводников является фактором подавления магнитного поля для уменьшения индуктивности.
- Для проводников с прямоугольным поперечным сечением плоскопараллельное положение обеспечивает лучшее подавление паразитной индуктивности, чем копланарное.

Выбор компонентов

Снижение паразитной индуктивности является критически важным требованием, поэтому выбраны полипропиленовые пленочные конденсаторы, имеющие малые потери на высоких частотах. Банк конденсаторов должен иметь среднюю точку, чтобы в случае необходимости можно было подключить нейтраль. Существует два подхода к проектированию конденсаторной батареи. Первый и наиболее очевидный — применение одного большого конденсатора (на самом деле их должно быть два для формирования средней точки). Другой подход — использование параллельного соединения нескольких конденсаторов меньшей емкости. Было проведено исследование для определения того, какой вариант обеспечивает наименьшую эквивалентную последовательную индуктивность (ESL). В первом случае выбран большой полипропиленовый конденсатор AVX FFVS6K0147K 140 мкФ/600 В (рис. 11), имеющий весьма низкий показатель ESL для такого форм-фактора. Для параллельного соединения выбран конденсатор Epcos B32796G3166K 16 мкФ/700 В (рис. 12).

Для сопоставления использованы эквивалентные схемы последовательного соединения двух емкостей по 140 мкФ (рис. 13) и параллельно-последовательного соединения 18 емкостей по 16 мкФ (рис. 14).



Рис. 11. Большой конденсатор AVX



Рис. 12. Конденсатор Epcos

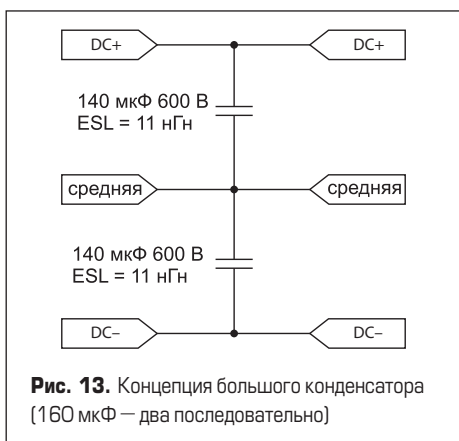


Рис. 13. Концепция большого конденсатора (160 мкФ — два последовательно)

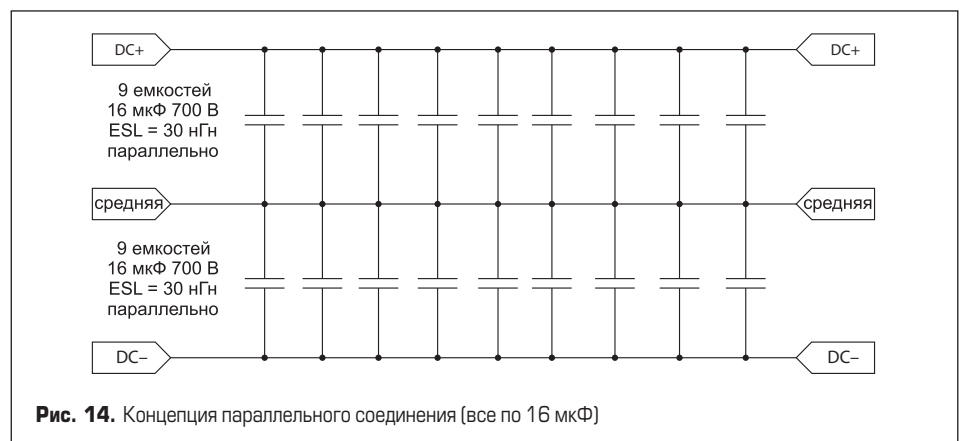


Рис. 14. Концепция параллельного соединения (все по 16 мкФ)

Таблица 1. Сравнение концепций банка конденсаторов

Параметр	Большой конденсатор	Параллельное соединение
Емкость, мкФ	70	72
Номинальное напряжение, В	1200	1400
ESL, нГн	22	6,67
Стоимость, \$	204	114

Результаты сравнения по общей емкости, номинальному напряжению, ESL и стоимости приведены в таблице 1. Параллельное соединение дает более высокую емкость и напряжение, 1/3 от ESL и около половины стоимости, поэтому такой подход имеет явное преимущество.

Конструкция банка конденсаторов для полумостового модуля Cree 50 мм

Концепция подавления магнитного поля, как средства уменьшения паразитной индуктивности была использована при проектировании банка конденсаторов для полумостового 50-мм модуля Cree 1200 В/100 А. Фактически для проведения двухимпульсного теста требуется емкость всего 50 мкФ.

В этом случае батарея состояла из 12 конденсаторов Epcos V32796G3166K 16 мкФ/700 В с последовательно-параллельным соединением (рис. 15). Две емкости V32794D3805K 8 мкФ/700 В добавлены для того, чтобы занять неиспользуемое пространство на печатной плате. Ее топология показана на рис. 16. Параллельная структура занимает весь верхний слой для подключения цепи DC-, средние слои предназначены для подключения средней точки, нижний слой — для подключения цепи DC+. Общая толщина платы — 1,57 мм (0,062”), толщина наружного медного слоя — 0,139 мм, внутренних слоев — 0,0694 мм. У слоев 2 и 3 одинаковый потенциал, поэтому средний слой FR4 может иметь минимальную толщину (в этом случае 0,254 мм, или 0,010”). Остальные два слоя FR4 толщиной 0,450 мм (0,0177”) каждый.

Цель использования параллельного банка конденсаторов — минимизация индуктивности, но необходимость последовательного соединения мешает достижению цели. Для смягчения этого эффекта был применен метод подавления магнитного поля, проиллюстрированный на рис. 17. Такая схема



Рис. 16. Топология печатной платы конденсаторов

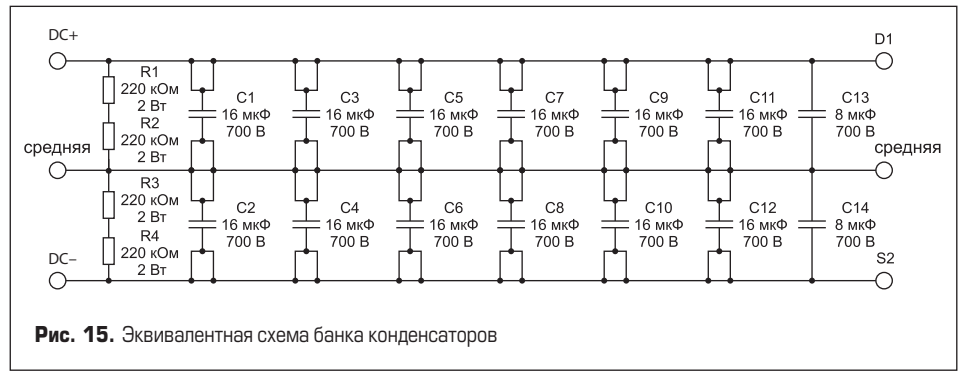


Рис. 15. Эквивалентная схема банка конденсаторов

позволяет уменьшить площадь токовых петель за счет размещения последовательного соединения MID на двух внутренних слоях, а соединений DC- и DC+ — на двух внешних слоях. Путь тока показан пунктирной черной линией.

Концепция подавления магнитного поля также применялась к параллельным рядам конденсаторов. Это лучше всего проиллюстрировано эскизами компоновки шины DC- на рис. 18 и DC+ на рис. 19. Соединения от каждой пары последовательных конденсаторов

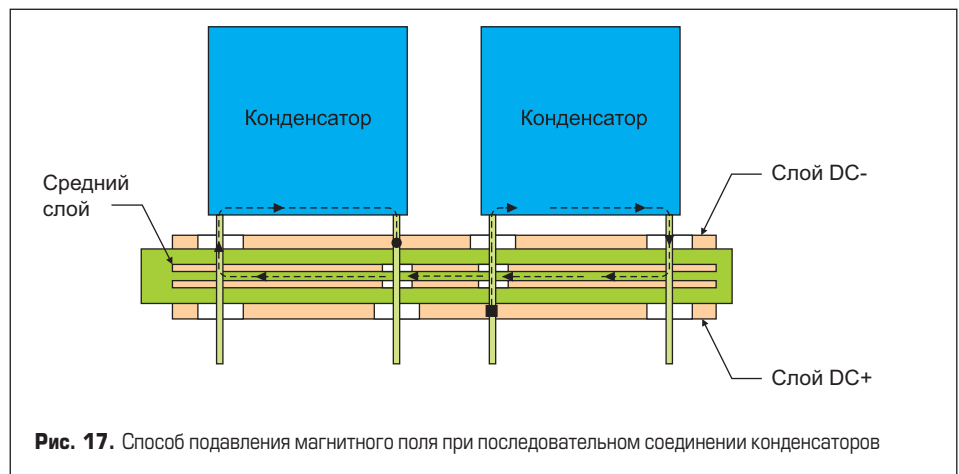


Рис. 17. Способ подавления магнитного поля при последовательном соединении конденсаторов

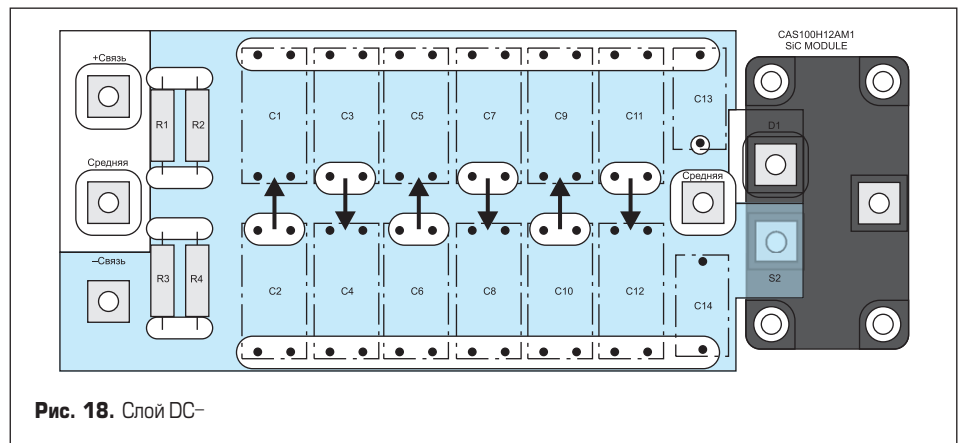


Рис. 18. Слой DC-

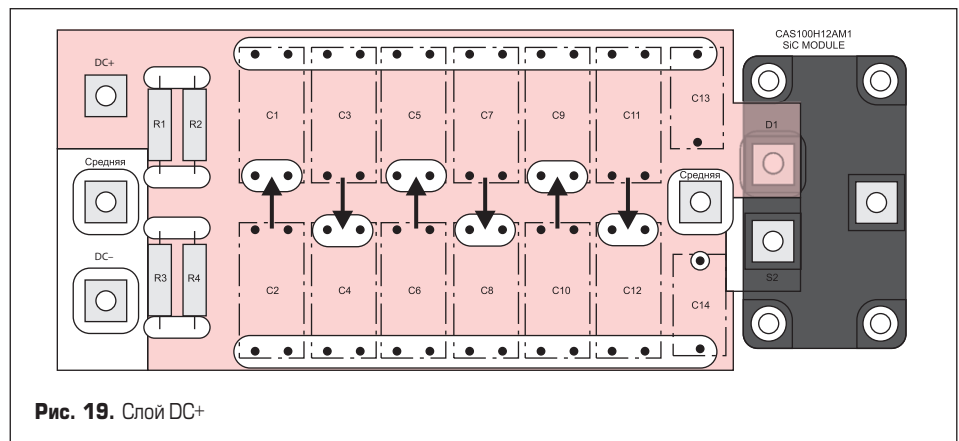


Рис. 19. Слой DC+

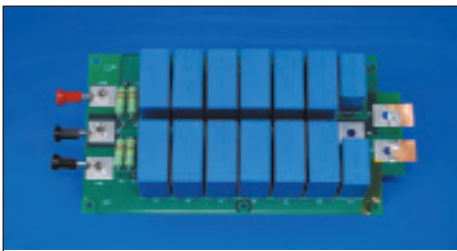


Рис. 20. Плата конденсаторов, вид сверху

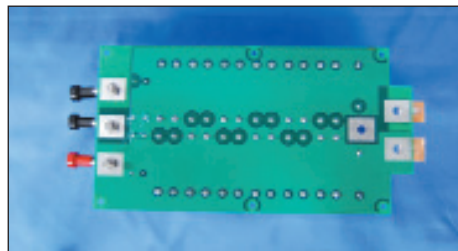


Рис. 21. Плата конденсаторов, вид снизу

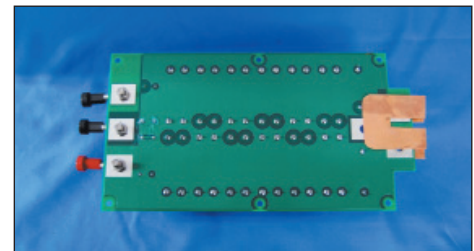


Рис. 22. Калибровочная перемычка

к слоям DC- и DC+ расположены в шахматном порядке, поэтому ток проходит через массив параллельных конденсаторов в противоположных направлениях, что позволяет подавить магнитное поле. Ток в каждой паре последовательных емкостей показан черными стрелками.

Фотографии верхней и нижней сторон платы конденсаторов приведены на рис. 20 и 21 соответственно.

Эквивалентная последовательная индуктивность (ESL) конденсаторов 16 мкФ составляет 30 нГн, для конденсаторов 8 мкФ — 27 нГн. Общая индуктивность параллельно-последовательной сборки (без учета подавления магнитного поля) — 7,3 нГн. Показатель ESL

платы конденсаторов, как было показано в первой части статьи, составляет 5,3 нГн. Измерение проводилось в отверстиях для подключения модуля, которые не имеют параллельной геометрии, поскольку вокруг монтажных поверхностей модуля сделан зазор для исключения замыканий. Следовательно, величина 5,3 нГн состоит из индуктивности параллельных плат массива конденсаторов и небольшого непараллельного «выступания» над точками промежуточных соединений модуля.

Было выполнено новое тщательное измерение ESL, чтобы убедиться в том, что точки измерений находятся в сборке параллельных пластин. Оно было сделано с помощью замыкающего калибровочного приспособления,

которое переместило калибровочную пластину обратно в плоскопараллельную сборку. Сказанное поясняется на рис. 22: «калибровочная перемычка» расположена на обратной стороне печатной платы. Выводы «перемычки» имеют такую же длину, как и промежуточные соединения модуля.

Импеданс и общая индуктивность платы конденсаторов оценивались с помощью измерителя LRC, результаты показаны на рис. 23. Измеренная величина ESL — 2,07 нГн на частоте 1 МГц, что в 2,5 раза лучше, чем в простой параллельной сборке.

Данное простое исследование дает ценную информацию для проектирования низкоиндуктивных банков конденсаторов для модулей SiC MOSFET. Отметим некоторые ключевые моменты:

- В общем случае сборка параллельных конденсаторов небольшой емкости обеспечивает лучшие характеристики ESL по сравнению с одним большим конденсатором при одинаковой емкости. В первом случае величина ESL оказывается примерно в три раза меньше.
- Стоимость сборки небольших конденсаторов, как правило, ниже, чем одного большого (в данном случае примерно в два раза).
- Применение схемы параллельных промежуточных соединений позволяет вместе с подавлением магнитного поля снизить ESL в 2,5 раза по сравнению с простым параллельным включением.

Конструкция банка конденсаторов для трехфазного модуля Cree

Недавно выпущенный CCS050M12CM2 (1200 В/50 А) — первый коммерчески доступный трехфазный модуль SiC MOSFET. Он обеспечивает гораздо более высокую скорость переключения по сравнению с Si IGBT, однако это свойство способствует и образованию паразитных осцилляций. Ключевым методом их подавления является минимизация паразитных индуктивностей. Далее рассматриваются шаги, предпринятые для решения этой задачи с помощью установки для проведения «двухимпульсного» теста, используемого для оценки динамического поведения модулей.

Модуль, показанный на рис. 24, имеет традиционный для шестиключевой конфигурации корпус с двумя группами DC-выводов на правой и левой стороне, три AC-вывода расположены в верхнем ряду выводов, шесть сигнальных выводов затворов находятся в нижнем ряду.

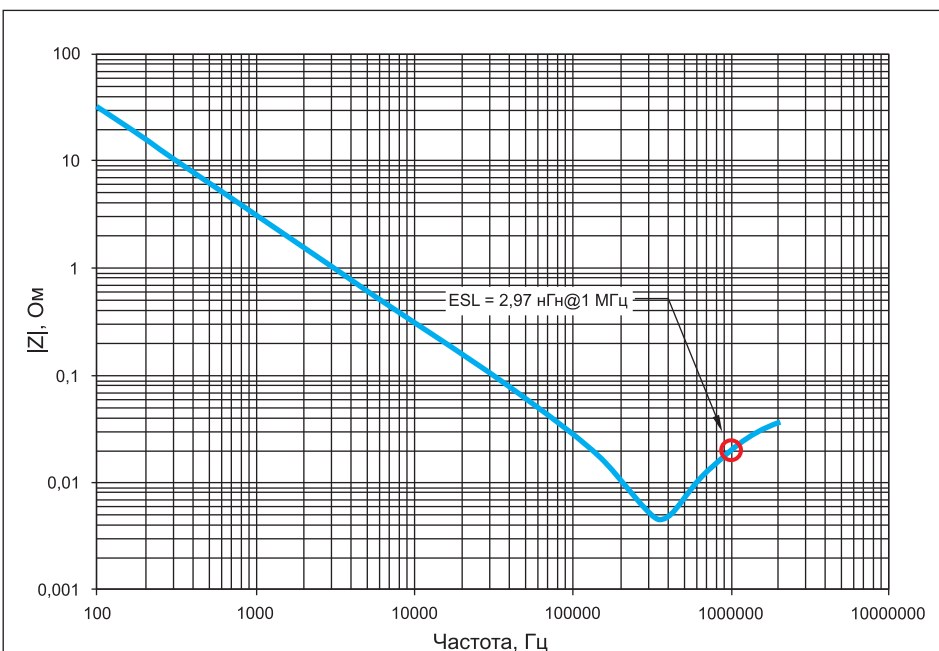


Рис. 23. Измеренный импеданс платы конденсаторов



Рис. 24. Трехфазный модуль SiC MOSFET (1200 В/50 А)

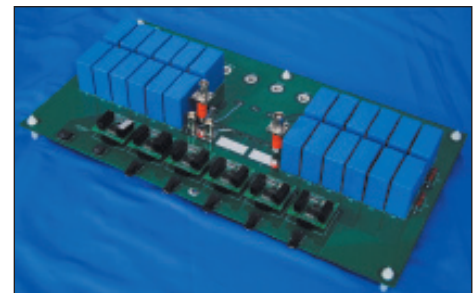
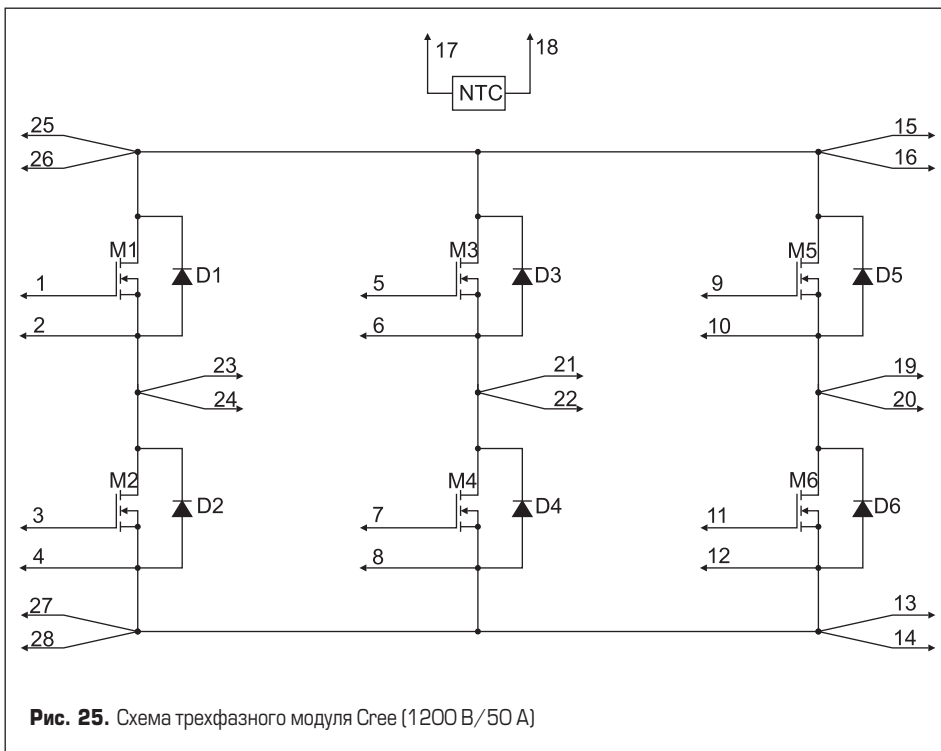


Рис. 26. Тестовая плата (вид спереди)

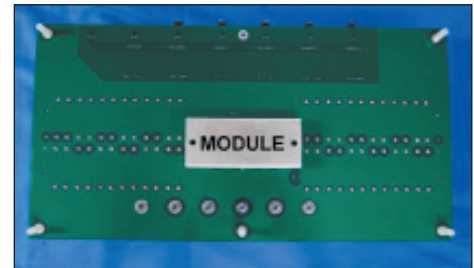


Рис. 27. Тестовая плата (вид сзади)

Схема модуля показана на рис. 25. Такой корпус разработан для удобства формирования функциональных блоков, содержащих ключи и диоды, необходимые для трехфазного инвертора. Однако это создает некоторые трудности при конструировании низкоиндуктивного блока конденсаторов. Ключевым фактором для анализа здесь служат две группы DC-терминалов. Минимизация паразитной индуктивности требует, чтобы они использовались одновременно: подключать только один DC-терминал не рекомендуется, поскольку индуктивность корпуса создает асимметрию паразитных индуктивностей между полумостовыми секциями. Кроме того, батарея конденсаторов должна быть расположена симметрично относительно осевой линии модуля. И наконец, следует использовать все

ранее описанные методы минимизации индуктивности.

Установка Cree для проведения «двухимпульсного» теста соответствует всем указанным требованиям. Испытательная плата, содержащая батарею конденсаторов, драйвер затворов и блок диагностики для динамического тестирования модуля SiC MOSFET, показана на рис. 26 и 27. Модуль смонтирован на задней стороне платы, остальные компоненты установлены на ее верхней стороне, что обеспечивает простоту монтажа на теплоотвод или нагревательную плиту.

Упрощенная схема тестовой платы приведена на рис. 28 (на схеме не показаны индивидуальные драйверы затворов).

Как видно на рис. 29, ключевые компоненты схемы расположены симметрично относительно осевой линии печатной платы.

Модуль имеет две группы DC-выводов, обе группы следует задействовать, чтобы сохранить симметрию. Конденсаторная батарея состоит из двух идентичных параллельных сборок, соединенных последовательно. Та же топология и такие же емкости использованы в конденсаторной плате, детально рассмотренной выше. Есть вероятность, что ток, проходящий по DC-шине, не будет симметричным, поэтому два резистивных шунта T&M SDN-404-01 использованы для его контроля в обоих DC-подключениях модуля. Суммарный сигнал формируется для измерения общей величины тока модуля. Важно, чтобы коаксиальные кабели, соединяющие резистивные шунты, имели одинаковую длину для согласования времени задержки распространения.

Отметим, что подключения измерителей тока и напряжения могут образовывать контуры заземления, в результате чего могут появиться ложные переходные процессы. Для исключения этого в измерительных цепях следует применять дроссели на основе феррита с высокой проницаемостью. Основной характеристикой LCR-тестера является зависимость импеданса от частоты. Измерение позволяет определить суммарную паразитную индуктивность

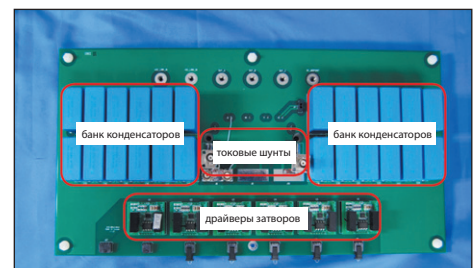
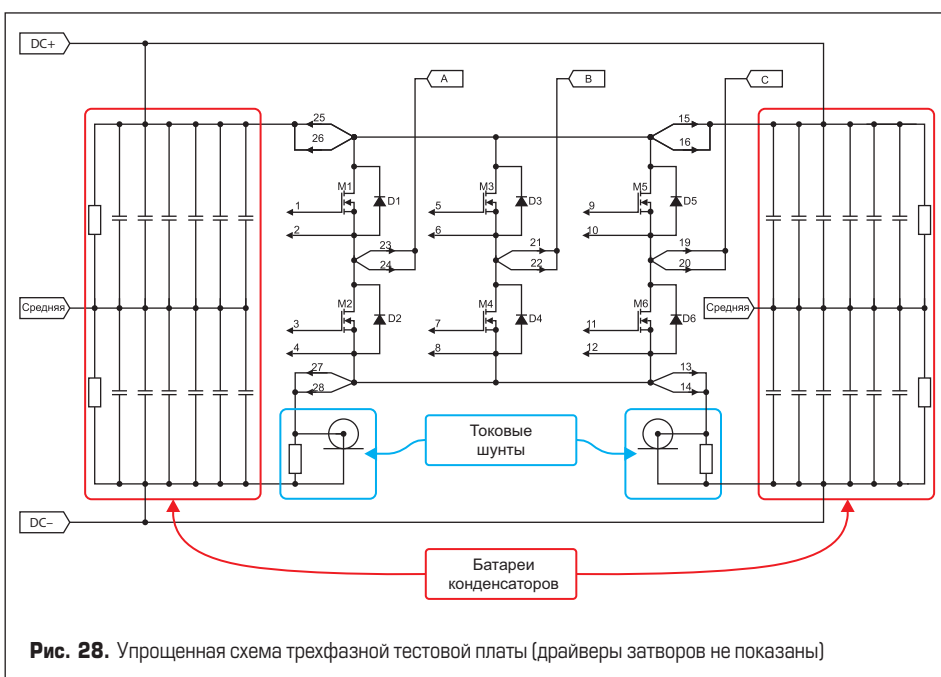
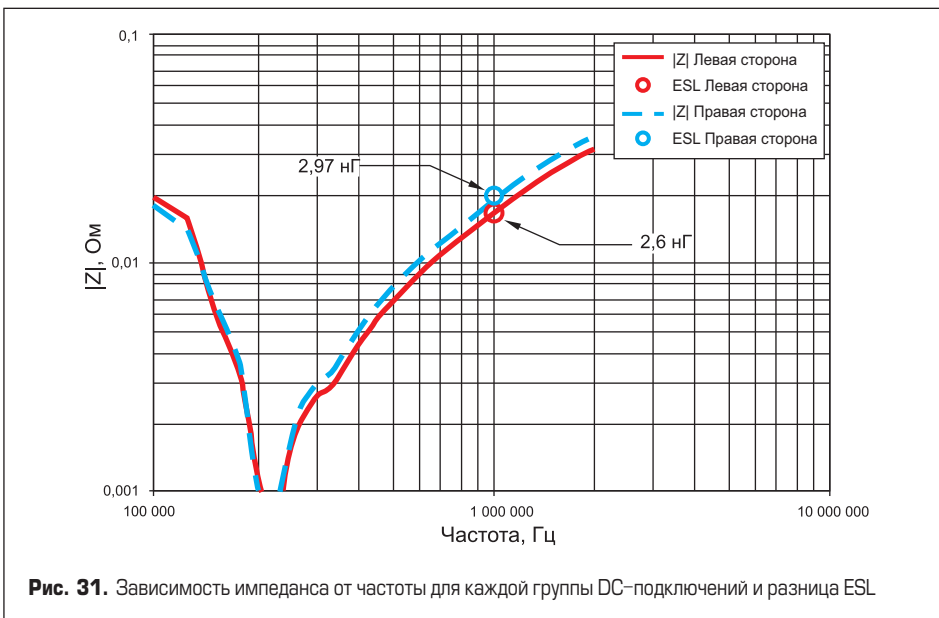
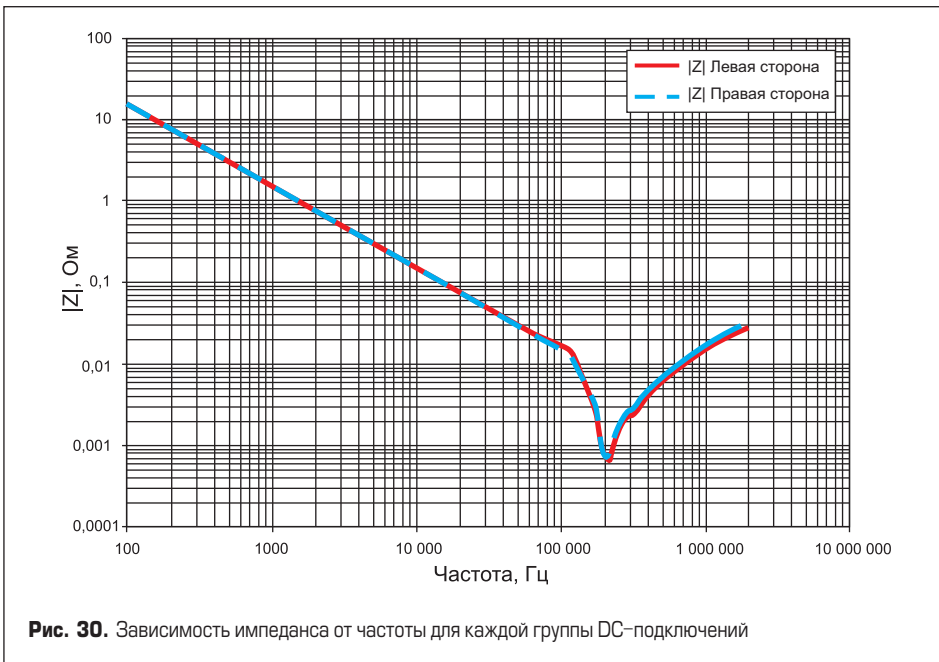


Рис. 29. Основные узлы трехфазной тестовой платы



банка конденсаторов путем замены токочувствительных резисторов на перемычки. Трехфазный модуль имеет две группы

входных DC-терминалов, поэтому были проведены два отдельных измерения импеданса для левой и правой группы DC+

и DC-. Результаты обоих измерений импеданса приведены на рис. 30.

Импеданс обеих групп почти идентичен на частотах ниже 200 кГц; у правой DC-группы он немного выше, чем у левой. Подробная зависимость импеданса от частоты показана на рис. 31, чтобы подчеркнуть разницу ESL на частоте 1 МГц.

Поскольку существует небольшая разница в топологии правой и левой сторон печатной платы, измеренная величина ESL правой части составляет 2,97 нГн, а левой — 2,6 нГн. Верхняя плоскость DC-шины на правой стороне имеет вырез для подключения термистора NTC, поэтому разумно предположить, что ESL там будет несколько выше.

Заключения и рекомендации

Ключевым фактором получения максимальной эффективности от использования модулей SiC MOSFET является минимизация параметра ESL банка конденсаторов и паразитной индуктивности интерфейса между ним и модулем. Для достижения этой цели необходимо следующее:

- Паразитная индуктивность представляет собой меру магнитного поля, создаваемого вокруг проводника с током. Использование геометрии проводника, подавляющей магнитное поле, позволяет в свою очередь уменьшить паразитную индуктивность.
- Плоско-параллельное расположение проводников обеспечивает значительно большее снижение паразитной индуктивности, чем копланарное.
- В общем случае сборка параллельных конденсаторов небольшой емкости имеет преимущество перед одной крупной емкостью, обеспечивая меньшую паразитную индуктивность и общую стоимость. Это относится только к конденсаторам в стандартных корпусах.
- Использование технологии подавления магнитного поля в сборке параллельных конденсаторов позволяет снизить ESL более чем в два раза по сравнению с обычной параллельной сборкой.