



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК

H02M 1/126 (2019.08); H02M 1/143 (2019.08); H02M 1/15 (2019.08)

(21)(22) Заявка: 2018104099, 23.06.2016

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
23.06.2016Дата регистрации:
04.10.2019

Приоритет(ы):

(30) Конвенционный приоритет:
09.07.2015 EP 15176078.2;
20.11.2015 EP 15195518.4

(43) Дата публикации заявки: 09.08.2019 Бюл. № 22

(45) Опубликовано: 04.10.2019 Бюл. № 28

(85) Дата начала рассмотрения заявки РСТ на
национальной фазе: 09.02.2018(86) Заявка РСТ:
EP 2016/064615 (23.06.2016)(87) Публикация заявки РСТ:
WO 2017/005505 (12.01.2017)

Адрес для переписки:

191002, Санкт-Петербург, а/я 5, Общество с
ограниченной ответственностью "Ляпунов и
партнеры"

(72) Автор(ы):

БЛЁ Поль (ВЕ),
ЖОАНН Тьерри (ВЕ),
МИЛСТЕЙН Франсуа (ВЕ),
СТАССЕН Пьер (ВЕ),
ФРЕБЕЛЬ Фабрис (ВЕ)

(73) Патентообладатель(и):

СиИ+Ти ПАУЭР ЛЮКСЕМБУРГ (LU)

(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: EP 2675054 A1, 18.12.2013. EP 2879475
A1, 03.06.2015. EP 2149973 A2, 03.02.2010. RU
2499349 C2, 20.11.2013.

(54) ИНВЕРТОР С ВЫСОКОЙ УДЕЛЬНОЙ МОЩНОСТЬЮ

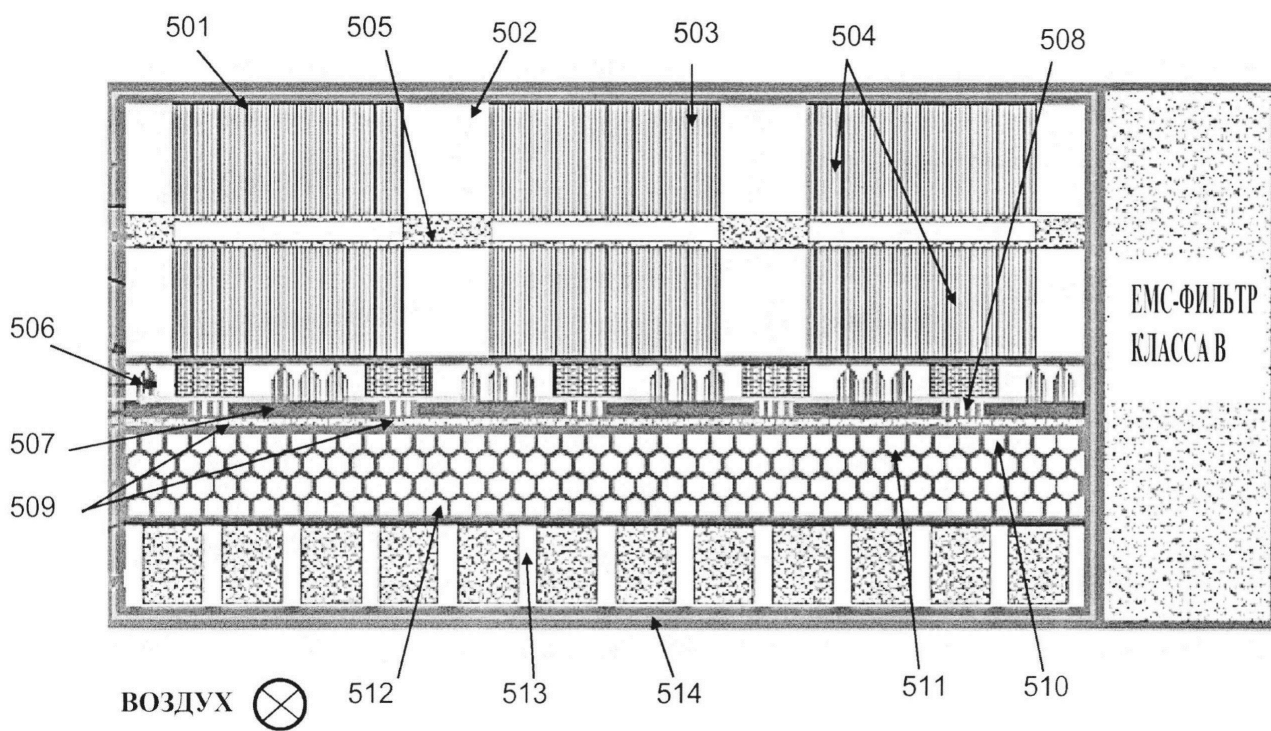
(57) Реферат:

Изобретение относится к области электротехники в частности однофазному, неизолированному, миниатюрному силовому инвертору для преобразования постоянного тока в переменный и предназначено для создания силового инвертора с выходной удельной мощностью более 3000 Вт/дм³. Силовой инвертор помещен в корпус, изготовленный в виде наружной электропроводящей оболочки, вмещающей в себя вентилятор, выполненный с возможностью нагнетать воздух в осевом

направлении к боковой поверхности корпуса, и многоуровневую вертикальную структуру, последовательно от нижней стороны до верхней стороны содержащую: слой активных фильтрующих конденсаторов, теплоотвод, слой переключателей из широкозонных полупроводников, соединенных с печатной платой тепловыми сквозными перемычками, и слой активных фильтрующих индукторов, причем вентилятор и многоуровневая структура компонентов выполнены так, что в процессе

эксплуатации наружная температура корпуса не превышает 60°C в любой точке при максимальной

температуре окружающей среды 30°C и максимальной нагрузке 2 кВА. 8 з.п. ф-лы, 6 ил.



Фиг. 5

RU 2702103 C2

RU 2702103 C2



FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(52) CPC

H02M 1/126 (2019.08); H02M 1/143 (2019.08); H02M 1/15 (2019.08)(21)(22) Application: **2018104099, 23.06.2016**(24) Effective date for property rights:
23.06.2016Registration date:
04.10.2019

Priority:

(30) Convention priority:
09.07.2015 EP 15176078.2;
20.11.2015 EP 15195518.4(43) Application published: **09.08.2019 Bull. № 22**(45) Date of publication: **04.10.2019 Bull. № 28**(85) Commencement of national phase: **09.02.2018**(86) PCT application:
EP 2016/064615 (23.06.2016)(87) PCT publication:
WO 2017/005505 (12.01.2017)

Mail address:

**191002, Sankt-Peterburg, a/ya 5, Obshchestvo s
ogranichennoj otvetstvennostyu "Lyapunov i
partnery"**

(72) Inventor(s):

BLE Pol (BE),
ZHOANN Terri (BE),
MILSTEJN Fransua (BE),
STASSEN Per (BE),
FREBEL Fabris (BE)

(73) Proprietor(s):

SiI+Ti PAUER LYUKSEMBURG (LU)(54) **INVERTER WITH HIGH SPECIFIC POWER**

(57) Abstract:

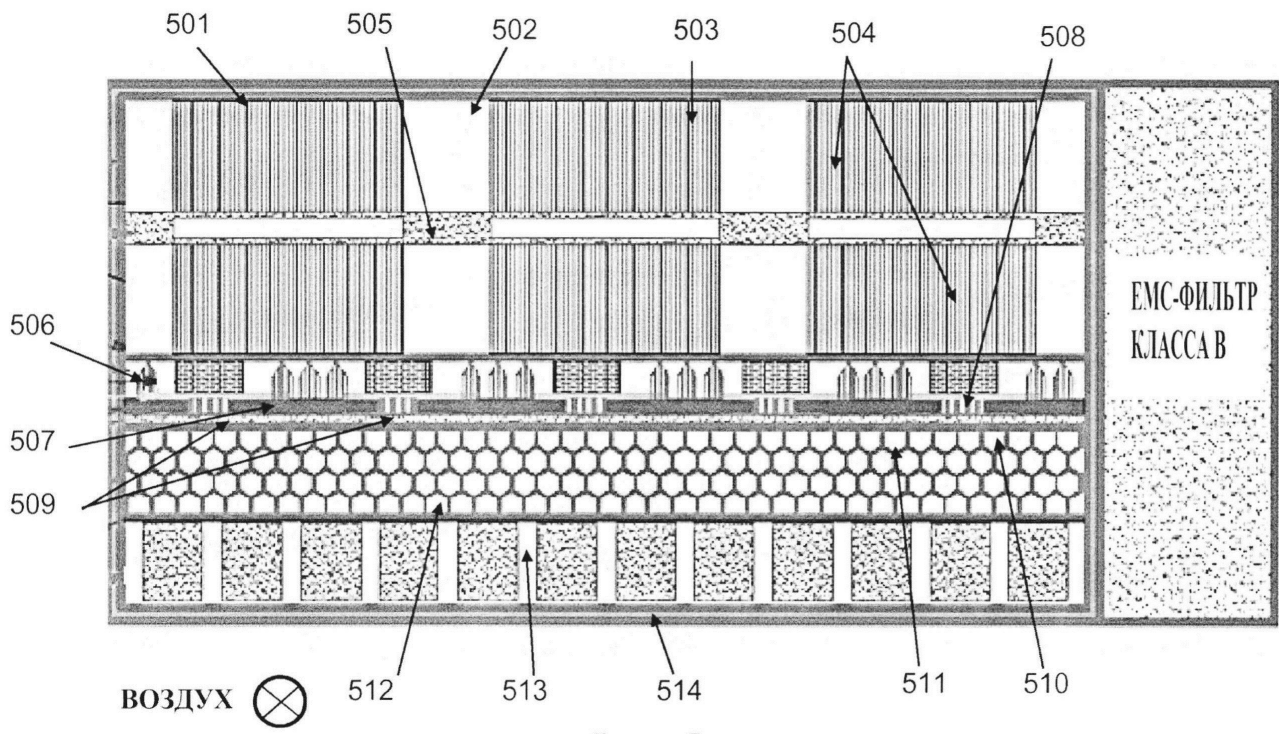
FIELD: electrical engineering.

SUBSTANCE: invention relates to the field of electrical engineering, in particular, to single-phase, non-insulated, miniaturized power inverter for conversion of direct current into alternating current. Power inverter is placed in housing made in form of external electrically conductive shell containing fan, made with possibility to inject air in axial direction to side surface of housing, and a multilevel vertical structure, in series from the lower side to the upper side comprising: a layer of active filtering capacitors, a heat sink, a layer of switches from wide-gap semiconductors

connected to the printed circuit board by thermal through bridges, and a layer of active filter inductors, wherein the fan and the multilevel structure of the components are configured such that during operation the outer temperature of the housing does not exceed 60 °C in any point at maximum ambient temperature of 30 °C and maximum load of 2 kVA.

EFFECT: invention is intended to create power inverter with output specific power of more than 3000 W/dm³.

9 cl, 6 dwg



Фиг. 5

RU 2702103 C2

RU 2702103 C2

Область техники, к которой относится изобретение

[0001] Настоящее изобретение относится к однофазному, неизолированному, миниатюрному силовому DC/AC инвертору (то есть, инвертору для преобразования постоянного тока в переменный), имеющему очень высокую, предпочтительно
5 сверхвысокую, выходную удельную мощность.

Уровень техники

[0002] Силовые инверторы (или просто инверторы) представляют собой электронные устройства, преобразующие постоянный ток (DC) в переменный ток (AC). В частности,
10 в настоящее время инверторам в экономике и охране окружающей среды отводится все большая роль в контексте преобразования постоянного тока, генерируемого солнечными панелями, батареями и другими подобными источниками, в переменный ток для домашнего или промышленного использования, а также для использования в электромобилях.

[0003] Инверторы, производимые заявителем для коммерческих и промышленных
15 компаний, позволяют во время выхода из строя распределительной сети сохранить их критические приложения за счет использования энергии, накопленной в батареях. Инверторы Media™, изготавливаемые заявителем, уже сейчас позволяют обеспечить удельную мощность 680 Вт/л при 2 кВА.

[0004] Инверторы, используемые, например, на станциях выработки электроэнергии
20 из солнечной энергии, имеют значительные размеры (обычно 50 л или размеры портативного холодильника). Уменьшение объема более чем в 10 раз, то есть, как правило, уменьшение его до объекта, размер которого меньше размера небольшого ноутбука, обеспечило бы возможность снабжения большего количества домов солнечной энергией, а также повысило бы эффективность распределения и дальность расстояний
25 распространения электрических сетей. Таким образом, возникла потребность в создании более устойчивых, более надежных и более интеллектуальных силовых инверторов.

[0005] При создании преобразовательных систем со сверхвысокой удельной мощностью и, следовательно, меньших размеров, конструкторы топологий инверторов в первую очередь нацелены на увеличение эффективности и снижение синфазного (CM,
30 Common Mode) шума. Повышение эффективности удалось обеспечить благодаря усовершенствованиям в области полупроводниковых материалов и их обработки, а также в области магнитных материалов. Использование полупроводников с широкой запрещенной зоной (карбида кремния - SiC или нитрида галлия - GaN) позволяет повысить эффективность в высокочастотных силовых преобразователях, что, в свою
35 очередь, позволяет увеличить частоту переключения и, таким образом, уменьшить размер пассивных компонентов.

[0006] Известно, что шум, вызванный электромагнитными помехами (EMI шум, ElectroMagnetic Interference), представлен в виде кондуктивных электромагнитных помех,
40 то есть, шума, распространяющегося по проводам или токопроводящим дорожкам и через электронные компоненты, а также в виде радиопомех (RFI, Radio Frequency Interference), то есть, шума, распространяющегося по воздуху в форме электромагнитных полей или радиоволн. В высокоскоростных импульсных преобразователях (как правило, с частотой от 50 кГц до 1 МГц), большая часть кондуктивных электромагнитных помех возникает в переключающих транзисторах и в выпрямителях. Для предотвращения
45 такого EMI шума, в основном, используют EMI-фильтры, состоящие из пассивных компонентов, таких как конденсаторы и индукторы, образующие индуктивно-емкостные цепи (LC-цепи). Кондуктивные электромагнитные помехи делятся на синфазный шум (CMN) и противофазный шум (DMN, Differential-Mode Noise). Синфазный шум проходят

в одном и том же направлении в линии электропитания и нейтральных силовых проводах переменного тока, находится в фазе с самим собой относительно земли и возвращается к земле. Соответствующий CMN-фильтр содержит индукторы L100, L200, расположенные последовательно с каждой линией электропитания, и соответствующие конденсаторы Y-типа C100, C200, соединяющие каждый силовой провод с землей (например, CMN-фильтр 100 на фиг. 1 в случае DC/AC преобразователя). Протофазный шум присутствует между линией передачи переменного тока и нейтральным проводом отстает по фазе на 180° от самого себя. Соответствующий DMN-фильтр содержит конденсаторы X-типа C340, соединяющие линии электропитания, возможно оснащенные индукторами L300, L400 подавления протофазных помех (см., например, DMN-фильтр 101 на фиг. 1 в случае DC/AC преобразователя).

Проблемы, на решение которых направлено изобретение

[0007] Проблема, на решение которой направлено настоящее изобретение, заключается в создании силового инвертора со сверхвысокой выходной удельной мощностью.

[0008] В частности, проблема, на решение которой направлено настоящее изобретение, заключается в создании инвертора с выходной удельной мощностью более 50 Вт/дюйм^3 (или 3051 Вт/дм^3 или Вт/л) при максимальной нагрузке в 2 кВА.

[0009] Другая проблема, на решение которой направлено настоящее изобретение, заключается в обеспечении возможности использования полупроводниковых переключателей из широкозонных полупроводников, а также возможности их плавного переключения для уменьшения потерь от переключения с сохранением в допустимых пределах EMI шума, генерируемого из-за очень высокой скорости переключения указанных компонентов, и с возможностью соответствующего управления значением dV/dt в командах переключения.

Раскрытие сущности изобретения

[0010] Настоящее изобретение относится к однофазному, неизолированному, миниатюрному силовому DC/AC инвертору с выходной удельной мощностью более 3000 Вт/дм^3 и содержащему:

вход постоянного тока,
выход переменного тока,

по меньшей мере цепь переключения H-типа с полной мостовой топологией, имеющую вход, соединенный с входом постоянного тока, и выход, соединенный с выходом переменного тока, и содержащую переключатели, изготовленные из широкозонных полупроводников, предпочтительно из полупроводников из нитрида галлия или GaN;

по меньшей мере один EMI-фильтр синфазного шума, подсоединенный между входом постоянного тока и входом полной мостовой цепи переключения H-типа, между выходом полной мостовой цепи переключения H-типа и выходом переменного тока, соответственно, причем указанные фильтры синфазного шума связаны с заземленным экраном или напрямую с землей, причем указанные фильтры синфазного шума содержат фильтрующие индукторы и так называемые конденсаторы Y-типа;

по меньшей мере один EMI-фильтр противофазного шума, подсоединенный последовательно с соответствующим фильтром синфазного шума между входом постоянного тока и входом полной мостовой цепи переключения H-типа, между выходом полной мостовой цепи переключения H-типа и выходом переменного тока, соответственно, причем указанные фильтры противофазного шума содержат так называемые фильтрующие конденсаторы X-типа и опционально индукторы;

активный фильтр компенсации пульсации, содержащий полумостовую топологию

переключения, расположенную параллельно с полной мостовой цепью переключения H-типа и соединенную с LC-фильтром, состоящим из по меньшей мере одного индуктора (L6) и множества накопительных конденсаторов (C5);

5 при этом указанный силовой инвертор помещен в корпус, изготовленный в виде наружной электропроводящей оболочки, вмещающей в себя вентилятор, выполненный с возможностью нагнетать воздух в осевом направлении к боковой поверхности корпуса, и многоуровневую вертикальную структуру, последовательно от нижней стороны до верхней стороны содержащую: слой активных фильтрующих конденсаторов, теплоотвод, слой переключателей из широкозонных полупроводников, соединенных с печатной
10 платой (PCB, Printed Circuit Board) тепловыми сквозными перемычками, и слой активных фильтрующих индукторов, причем вентилятор и многоуровневая структура компонентов выполнены так, что в процессе эксплуатации наружная температура корпуса не превышает 60°C в любой точке при максимальной температуре окружающей среды 30°C и максимальной нагрузке 2 кВА.

15 [0011] Согласно предпочтительным вариантам осуществления, силовой DC/AC инвертор согласно настоящему изобретению дополнительно содержит по меньшей мере один из следующих признаков или их соответствующую комбинацию:

слой активных фильтрующих конденсаторов образован установленными на печатной плате рядами равномерно распределенных многослойных керамических конденсаторов
20 (MLCC, Multilayer Ceramic Capacitor), причем указанные конденсаторы разделены зазором, причем указанный зазор предпочтительно составляет примерно 1 мм и ориентирован в направлении нагнетания вентилятора;

теплоотвод представляет собой цельный механически обработанный металлический теплоотвод, выбранный из группы, состоящей из многодисковых, ячеистых
25 теплоотводов, теплоотводов с чередующимися ребрами и теплоотводов из металлической пены, причем указанный теплоотвод прилегает к слою активных фильтрующих конденсаторов;

наружная проводящая оболочка корпуса окружает проводящий экран, отделенный от нее теплопроводящим пограничным слоем, образованным прокладкой;

30 активные фильтрующие индукторы состоят из ферритовых сердечников, на которые непосредственно намотан литцендрат без каркаса для намотки катушки, причем каждый индуктор образован двумя катушками, разделенными керамической фольгой, расположенной между ферритами для создания воздушного зазора, а также теплового отвода;

35 слой переключателей из широкозонных полупроводников, соединенных с печатной платой тепловыми сквозными перемычками, прилегает к теплоотводу благодаря керамической изоляции и микропружинным контактам, причем в зазорах расположен кремнийорганический пенопласт для равномерного распределения давления переключающих контактов на теплоотвод;

40 оболочка корпуса, проводящий экран и теплоотвод изготовлены из меди;

пассивные фильтры, то есть, синфазные и противофазные ЕМІ-фильтры, отделены от остальных частей в корпусе;

часть активных фильтрующих индукторов термически прикреплена к проводящему экрану.

45 Краткое описание чертежей

[0012] На фиг. 1, как уже упомянуто выше, показан пример проектирования базового решения для осуществления фильтрации электромагнитных помех (синфазной и противофазной фильтрации) в силовом DC/AC преобразователе.

[0013] На фиг. 2 схематично показан примерный вариант осуществления инвертора согласно настоящему изобретению, при этом инвертор имеет топологию с пятью плечами (или полумостомами).

5 [0014] На фиг. 3 схематично показан предпочтительный вариант осуществления защиты привода GaN от синфазных электромагнитных помех с высоким значением dV/dt согласно настоящему изобретению.

[0015] На фиг. 4 на виде сверху показана тепловая карта для примера реализации компонентов инвертора согласно настоящему изобретению, причем самые горячие части расположены в прямом воздушном потоке.

10 [0016] На фиг. 5 в разрезе по высоте подробно показана структура тепловых пограничных слоев в инверторе согласно одному из вариантов осуществления настоящего изобретения.

[0017] На фиг. 6 показано несколько примеров смоделированных теплоотводов, пригодных для использования в настоящем изобретении.

15 **Осуществление изобретения**

[0018] Согласно одному из вариантов осуществления настоящего изобретения, предлагаемый инвертор сконфигурирован так, чтобы соответствовать требованиям, изложенным в Таблице №1.

20 [0019] Таким образом, ключевыми факторами, способствующими достижению такой высокой удельной мощности, являются транзисторы из GaN, работающие в так называемом режиме мягкого переключения или в режиме переключения при нулевом напряжении (ZVC, Zero Voltage Switching), объединенные с конкретной топологией с параллельными активными фильтрами и с использованием многослойных керамических конденсаторов (MLCC) в качестве накопительных компонентов. Форма теплоотвода, 25 геометрическая компоновка керамических конденсаторов и оптимизация тепловых пограничных слоев также способствуют получению низкой температуры устройства во время функционирования на полной нагрузке. Оптимизированная работа программного обеспечения в быстром микропроцессоре, связанном со специализированной логической схемой (сложной программируемой логической 30 интегральной схемой (CPLD)), обеспечивает возможность работы в режиме ZVC на протяжении всего рабочего диапазона и уменьшает электромагнитный шум. Благодаря двойному экрану и оптимизированному набору фильтров инвертор может соответствовать требованиям электромагнитной совместимости.

Предпочтительные варианты осуществления изобретения

35 [0020] К применяемым методам конструирования относятся: точное определение размеров с аналитическими вычислениями и моделирование по методу конечных элементов; использование имитационных моделей, полученных с помощью симулятора электронных схем общего назначения с открытым кодом (SPICE), для питания и 40 управления; трехмерное механическое моделирование и использование имитаций тепловых условий, что позволило создать инверторное устройство, отвечающее всем требованиям, изложенным в таблице №1, за один прогон вычислительной программы.

[0021] Согласно одному из предпочтительных вариантов осуществления настоящего изобретения, использование технологии на основе GaN позволяет получить удельную 45 мощность примерно в 143 Вт/дюйм^3 для инвертора при 2 кВА, спроектированного согласно настоящему изобретению. Его размеры составляют приблизительно $2,5 \times 1,6 \times 3,5$ дюймов, что соответствует объему примерно в 14 дюйм^3 (или 0,2 л).

[0022] Транзисторы из GaN имеют высокоэффективные электрические характеристики

(низкое R_{ds_on} , низкие Q_{gate} и C_{ds} , сверхнизкое Q_{rr}). Эти характеристики, очевидно, обеспечивают технологические преимущества по сравнению с используемыми в настоящее время и вошедшими в повседневную практику устройствами на полевых транзисторах с изолированным затвором (MOSFET, Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) и устройствами на биполярных транзисторах с изолированным затвором (IGBT, Insulated Gate Bipolar Transistor), причем и те, и другие имеют небольшие размеры и низкие производственные затраты. К сожалению, они также имеют серьезные недостатки, обусловленные их очень высокими параметрами переключения (например, сверхвысоким значением dV/dt): довольно сложно обеспечить их привод, а также они требуют чувствительного управления уровнем электромагнитного шума. Другой недостаток заключается в высоком падении напряжения из-за обратного тока, возникающего при выключении транзисторов из GaN. Одно из решений, направленных на устранение указанных недостатков и выбранных в настоящем изобретении, заключается в управлении всеми транзисторами из GaN с использованием мягкого переключения (или режима ZVS) в течение всего рабочего диапазона.

[0023] Для объединения постоянного тока на входной ступени 450 В и переменного выходного напряжения в 240 В, выбирают инвертор 1 с топологией с по меньшей мере тремя плечами (полная мостовая топология или топология с двумя плечами с резервным активным фильтром). Предпочтительно, в предпочтительном варианте осуществления, показанном на фиг. 2, выбрана топология с пятью плечами, поскольку она сводит к минимуму передачу энергии внутри инвертора. Соответственно, каждый полумост, а именно первый полумост и второй полумост, предпочтительно разделен с помощью дополнительного полумоста, установленного на нем параллельно. Это позволяет сглаживать высокий ток и небольшие разности по времени переключения.

Два полумоста 201 (НВ, Half Bridge) создают линейное напряжение, два других полумоста 202 создают нейтральное напряжение, а последний полумост 203 используется в качестве вышеупомянутого активного фильтра.

[0024] Согласно рассматриваемому предпочтительному варианту осуществления (см. также фиг. 2) индукторы с L1 по L6 рассчитаны на диапазон от 10 мкГн до 50 мкГн. Благодаря активному фильтру 203 (с C5/L6), входной конденсатор C1 доведен до емкости менее 15 мкФ, а C5 рассчитан на емкость менее 150 мкФ. Синфазные индукторы (L7-L16, см. перевернутый символ «C») рассчитаны на диапазон от 200 мкГн до 1 мГн. Общий коэффициент соответствующих конденсаторов Y-типа (C7, C8, C10-C17, C21, C22) превышает 500 нФ, с сохранением остаточных токов ниже допустимого значения (изначально 5 мА), поскольку выходная синусоидальная волна является симметричной между L+ и L-, то есть $(V_L + V_N)/2 \approx (V_{L+} + V_{L-})/2 \approx V_{земля}$ с конфигурацией заземления с расщепленными фазами, и гасит остаточный ток, а также поскольку некоторые конденсаторы Y-типа (C7, C8) замыкаются на землю. Противофазные ЕМС-индукторы (L17-L22, см., символ «Z») рассчитаны на диапазон от 10 мкГн до 20 мкГн, а конденсаторы X-типа (C2, C6, C9, C18-C20) работают в диапазоне от 1 мкФ до 5 мкФ.

[0025] Высокая удельная мощность и высокая эффективность данного инвертора обусловлены оптимизированным управлением пяти плеч посредством переключения. Для нагрузки любого типа, такое управление обеспечит функционирование с мягким переключением всех устройств из GaN и позволит свести к минимуму обратные токи во время простоев. Алгоритм управления гарантирует, что модуль оказывается естественным образом защищенным от перезагрузки по току. Во время фазы отладки, авторы настоящего изобретения столкнулись с рядом проблем, связанных с тем, что алгоритм управления требует высокой вычислительной нагрузки. В результате,

процессор был обновлен с помощью поэлементно совместимой модели, скорость которой на 40% выше.

[0026] Цели управления достигнуты за счет применения следующих принципов:

- 5 цифровое управление, основанное на быстром микроконтроллере, объединенном со специализированной логической схемой (CPLD);
- быстрое измерение входных/выходных токов и напряжений;
- эффективная обратная связь на события переключения полумостов;
- алгоритм обучения для приведения в действие активного фильтра;
- 10 оптимизация частоты переключения между 35 и 240 кГц в зависимости от выходного тока; регулируемый фазовый сдвиг между полумостами (0° или 90°) и модуляция времени простоя пяти полумостов (от 50 нс до 3 мкс). Таким образом, потери от переключения почти исключены, а увеличение частоты способствует оптимизации (уменьшению) размера пассивных компонентов.

[0027] Применение фазового сдвига между нейтральными и линейными полумостами 15 (2 или 4, соответственно) является обязательным, поскольку фильтрующие индукторы DMN оптимизированы при нулевом фазовом сдвиге. Таким образом, мягкое переключение больше не происходит в каждом переключателе из GaN. Кроме того, поскольку переключение осуществляется при сверхвысокой скорости, и с некоторой неопределенностью в отношении тока, протекающего в фильтрующих индукторах 20 DMN, следующее переключение тока может произойти при значении тока, которое (еще) не обнулилось, что приводит к режиму «без ZVS». Найденное решение для обеспечения приближения тока к нулевому значению состоит в увеличении времени простоя переключателя (не показано).

[0028] Благодаря высокоскоростному переключению в предлагаемом 25 преобразователе, согласно одному из вариантов осуществления настоящего изобретения, выполняют не измерение постоянного тока, а за счет использования емкостного делителя 301 напряжения (C33, C34) выявляют, когда ток стремится к нулю (см. фиг. 3). Благодаря соответствующему выбору конденсаторов, такой емкостный делитель позволяет процессору управлять измерением допустимого напряжения (как правило, примерно 30 5 В вместо максимального пикового напряжения в 450 В).

[0029] В настоящем изобретении устойчивость управления GaN является критическим параметром. На самом деле, транзисторы из GaN переключаются очень быстро, так что они обеспечивают высокое значение dV/dt при отключении управления, далеко за пределами допустимых значений для большинства приводов, имеющих в настоящее 35 время в продаже. Кроме того, пороговое значение напряжения управления является очень низким. Более того, согласно настоящему изобретению, была разработана очень компактная, недорогая и чрезвычайно устойчивая схема привода, которая способна приводить в действие транзисторы из GaN в их нормативных пределах (см. фиг. 3). Согласно варианту осуществления, проиллюстрированному на фиг. 3, используют 40 дополнительный источник и затворные катушки индуктивности (L31, L32) для устранения CMN, проходящего в транзисторах из GaN непосредственно в землю, без влияния на привод 303 из GaN. Для этого расположен CMN-фильтр 302 (L31, C31, L32, C32).

[0030] Выбор правильного корпуса GaN также играет важную роль. Согласно одному 45 из вариантов осуществления, для такого проектного решения наилучшим выбором оказалась модель для поверхностного монтажа (SMD) с доступом к двум источникам, один из которых предназначен для обеспечения электропитания, а другой - для подачи команды. Это обеспечивает безопасное управление транзистором. Кроме того,

небольшой корпус снижает индукционные помехи и, следовательно, функциональное электрическое перенапряжение. Разводка печатной платы и расположение разделяющих конденсаторов играют важнейшую роль для надлежащего функционирования компонентов из GaN.

5 Входной ток частотой 120 Гц и требование пульсации напряжения/тока
[0031] Для того чтобы удовлетворить требование пульсации на входе напряжения DC/тока, был разработан параллельный активный фильтр, который может компенсировать пульсацию более эффективно, чем в случае использования большого конденсатора на стороне входа. Принятое решение также является более надежным
10 по сравнению с использованием топологии, основанной на «повышении напряжения», для которой рабочие напряжения могут повышаться до предельного $V_{\text{макс}}$ транзисторов из GaN.

[0032] Активный фильтр работает с более высокими перепадами напряжения (примерно $200 V_{\text{pk-pk}}$) и сохраняет соответствующую энергию в керамических
15 конденсаторах, емкость которых возрастает при уменьшении напряжения, что приводит к трем преимуществам:

уменьшение размера входного конденсатора C1 параллельного резонансного контура (менее 15 мкФ);

уменьшение размера фильтрующего конденсатора C5 до величины менее 150 мкФ;
20 устойчивость инвертора благодаря использованию компонентов из GaN ниже $450 V_{\text{dc}}$.

[0033] Программное обеспечение также способствует этому; алгоритм сохраняет $V_{\text{вх}}$ постоянным и обеспечивает возможность более крупных пульсаций в активном
25 фильтре. Кроме того, алгоритм обучения также уменьшает входные пульсации (на 3 порядка) за счет исправления ошибок моделирования благодаря наличию периодов простоя.

Миниатюризация компонентов для преобразования постоянного тока в переменный

[0034] Согласно одному из вариантов осуществления настоящего изобретения,
30 использование MLCC-конденсаторов (то есть, керамических конденсаторов) для сохранения энергии обеспечивает получение более компактного и эффективного модуля.

[0035] Кроме того, магнитные компоненты, в основном, состоят из феррита, причем известно, что их магнитные потери являются очень низкими при высоких частотах. Использование литцендрата сводит к минимуму потери благодаря поверхностному
35 эффекту и эффекту близости. Для дальнейшей минимизации, провода наматывают непосредственно на феррит, без каркаса для намотки катушки. Их охлаждение осуществляется посредством воздушного потока вентилятора и за счет использования фольги из оксида алюминия, расположенной в середине феррита для создания требуемого воздушного зазора и теплового отвода. Размер фильтрующих конденсаторов
40 и индукторов оптимизирован благодаря увеличению допустимого пульсирующего тока.

[0036] Что касается выходного тока, то датчик Холла с разомкнутой петлей, объединенный с электромагнитным экраном, обеспечивает получение очень компактного измерительного устройства, предоставляющего гальваническую развязку
45 и уменьшение чувствительности к синфазному и индукционному шуму. Время его срабатывания является очень малым, что способствует защите инвертора от короткого замыкания или высоких ударов нагрузки.

[0037] Следует отметить, что все другие результаты оценки тока ($I_{\text{индуктор}}$, и т.д.)

получены благодаря наблюдателям состояния без датчиков тока (бессенсорное измерение, например, напряжений), что снижает габаритный размер инвертора.

5 [0038] Благодаря особой модуляции по управлению компонентами из GaN, которая уменьшает ток в фильтрующих индукторах L7-L8 (см., фиг. 2), размер их сердечника уменьшается без достижения уровня насыщения.

[0039] Обеспечение слоистой структуры для всех печатных плат и теплоотвода представляет собой серьезную трудность. Как показано на фиг. 5, она была получена за счет использования микропружинных контактов 507, специального теплоотвода 10 512, изготовленного посредством электроимпульсной обработки (EDM, Electrical Discharge Machining), ультратонких печатных плат 510, 513, и т.д. (толщиной 0,012 дюйма), силиконового пенопласта 508 для распределения контактного давления компонентов из GaN на теплоотвод 512. Все эти технические признаки в значительной степени способствовали уменьшению размера инвертора.

[0040] Согласно одному из вариантов осуществления, инверторный модуль содержит, 15 в основном, две части. Первая часть включает в себя управление устройством, вспомогательный источник питания, плечи (или полумосты) в количестве пяти штук и их соответствующие приводы совместно с теплоотводом. Вторая часть включает в себя пассивные фильтры.

[0041] Предпочтительно, резонансная топология мягкого переключения LLC 20 использована для изолированного вспомогательного источника питания 12 В/5 В/3,3 В (примерно 10 Вт). Это позволяет уменьшить его объем до величины менее 0,128 дюйм³ (0,8*0,8*0,2 дюймов), что, в свою очередь, обеспечивает возможность надлежащей интеграции внутри упомянутой выше управляющей части на единственной печатной плате.

25 Управление тепловым процессом

[0042] С учетом оцененных и моделируемых потерь, принудительное воздушное охлаждение является единственным эффективным решением, способным в достаточной степени уменьшить тепловое сопротивление до окружающего воздуха. Согласно одному из вариантов осуществления, эффективный осевой вентилятор (примерные размеры 30 1,57*1,57*0,6 дюймов) расположен в середине передней пластины.

[0043] Карта теплового моделирования с фиг. 4 демонстрирует результат, когда все компоненты оптимальным образом расположены вокруг вентилятора, а именно: 35 самые горячие компоненты находятся в прямом воздушном потоке; площади теплообменной поверхности увеличены до максимума; потери давления сведены к минимуму; скорость воздуха рядом с боковой стороной оптимизирована и вход свежего воздуха рядом с теплоотводом из GaN сводит к минимуму тепловое сопротивление, что повышает до максимума эффективность инвертора.

[0044] Таким образом, выбор подходящих тепловых пограничных слоев имеет 40 решающее значение для уменьшения мест локального перегрева на наружной поверхности инвертора. На фиг. 5 показана тепловая многоуровневая или слоистая структура согласно одному из вариантов осуществления (вид в разрезе по высоте). Температура перехода GaN не превышает 60° при температуре окружающей среды в 30°C и нагрузке 2 кВт.

45 [0045] На фиг. 5 показана подробная структура тепловых пограничных слоев согласно одному из вариантов осуществления. Для одного транзистора 509 из GaN (потери примерно 2 Вт), тепловые сопротивления имеют следующий вид: переход GaN - тепловая прокладка: 0,5°C/Вт;

конструкция печатной платы 510, увеличивающая перенос тепла от транзистора 509 из GaN к теплоотводу 512: $1,1^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$;

термопаста с пылью из оксида алюминия: $0,3^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$;

керамическая теплоизоляционная фольга с нитридом алюминия 511: $0,02^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$;

5 теплопроводящий клей с серебряной пылью: $0,15^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$ и

ячеистый теплоотвод 512 с принудительно подаваемым воздухом (см. ниже): $13^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$ (относительно единственного компонента из GaN).

[0046] И наружный экран 501, 503, и теплоотвод 512 изготовлены из меди, а накопительные конденсаторы 514 представляют собой керамические MLCC. Оба
10 материала выбраны для повышения теплового потока и площади теплообменной поверхности. Узел конденсаторов, образующий активный фильтр, представляет собой устройство накопления энергии, но также является продолжением теплоотвода 512. Воздушный поток между каждым рядом из MLCC (предпочтительно с зазором $\pm 0,04$ дюйма или 1 мм между конденсаторами) повышает охлаждающий эффект, поскольку
15 конденсаторы играют роль ребер. Объем, занимаемый накопителем энергии, выступает в качестве второго теплоотвода, благодаря геометрической форме узла и типу конденсатора (хороший проводник тепла).

[0047] Несколько типов теплоотводов, показанных на фиг. 6, термически смоделировали и сравнили с упомянутой выше трехмерной моделью (множество дисков
20 601, ячеистая структура 602, ребра с чередованием 603 или нет, медный пенопласт 604 и т.д.).

[0048] Предпочтительно, был выбран ячеистый теплоотвод 602 ($R_{th_total} = 1,3^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$ (10 GaN); $L2,79 * W0,83 * H0,26$ дюймов), поскольку он сводит к минимуму температуру GaN и имеет отверстия, достаточно большие для того, чтобы избежать закупорки
25 пылью. Двухмерная структура распределяет по поверхности температуру и дополнительно уменьшает количество мест локального перегрева.

[0049] Несколько индукторов 504 (но не все из них) предпочтительно термически прикреплены к медному экрану 503. Для того чтобы наружный корпус соответствовал предельно допустимому температурному режиму в 60°C , прокладка 502 обеспечивает
30 электроизоляционный, но теплопроводящий пограничный слой между экраном 503 и наружным корпусом 501. Таким образом, тепловое сопротивление пограничного слоя способствует отведению тепла из самых горячих внутренних компонентов и предотвращает рассеивание этого тепла локально наружным корпусом.

Электромагнитная совместимость (EMC, Electromagnetic Compliance)

[0050] Для того чтобы обеспечить удовлетворение требований, относящихся к части
35 15 правил Федеральной комиссии по связи (FCC, Federal Communications Commission) класса «В» (для бытового оборудования, который является более жестким по сравнению с классом «А», для коммерческого или промышленного оборудования), выбор топологии и тип модуляции был основан на моделях источников шума. Каждый фильтр был
40 смоделирован на установленной модели шума для оптимизации конструкции инвертора и разводки печатной платы. Ключевые факторы согласно настоящему изобретению для удовлетворения требований класса «В» можно суммировать следующим образом:

Мягкое переключение основных переключателей и вспомогательного источника питания независимо от нагрузки;

45 регулируемая частота и особая спектральная модуляция;

первый внутренний экран, электрически соединенный с (L- = O В DC);

второй экран (наружный корпус) и экран последней фильтрующей ступени;

фильтр выходного переменного тока ($AC_{\text{ВЫХ}}$), связанный с (L-);

использование нескольких небольших фильтров вместо одного большого;
подавление всех резонирующих полюсов на частотах выше 50 кГц;
использование керамических конденсаторов для сведения к минимуму индукционные
помехи и их размера;

- 5 сведение к минимуму связи между фильтрами;
сведение к минимуму емкостной связи в конструкции индуктора.
Перечень ссылочных обозначений
100 Фильтр синфазного шума
101 Фильтр противофазного шума
10 201 Полумост линейного выключателя
202 Полумост переключателя нейтрали
203 Полумост активного фильтра
204 Заземленный экран или соединение на землю
301 Емкостный делитель для выявления перехода через нулевой ток
15 302 CMN-фильтр для переключателя GaN без подвижных частей
303 Привод GaN
501 Медный корпус
502 Изоляционный/тепловой пограничный слой
503 Медный экран
20 504 Индуктор(ы)
505 Зазор керамического индуктора
506 Внутреннее соединение печатной платы
507 Микропружинные контакты
508 Кремнийорганический пенопласт
25 509 Переключатель GaN
510 Печатная плата с тепловыми сквозными перемычками
511 Керамическая изоляция
512 Ячеистый теплоотвод
513 Печатная плата для установки накопительных конденсаторов
30 514 Керамический активный фильтрующий конденсатор
601 Многодисковый теплоотвод
602 Ячеистый теплоотвод
603 Теплоотвод с чередующимися ребрами
604 Теплоотвод из медного пенопласта

35

40

45

Таблица №1

5	Параметр	Требование	Комментарий
	Максимальная нагрузка	2 кВА	При среднеквадратичном напряжении АС в 240 В на частоте 60 Гц
	Плотность энергии	> 50 Вт/дюйм ³	
	Объем	< 40 дюйм ³ (0,66 л)	Прямоугольный кожух, макс. размер 20 дюймов, мин. 0,5 дюйма
10	Входное напряжение	450 В DC, R = 10 Ом	
	Выходное напряжение	240 ± 12 В АС	Одна фаза
	Выходная частота	60 ± 0,3 Гц	Одна фаза
	Коэффициент нагрузки	0,7-1	Опережение или запаздывание
15	THD + N для V _{вых}	< 5%	Суммарный коэффициент нелинейных искажений + помехи
	THD + N для I _{вых}	< 5%	Суммарный коэффициент нелинейных искажений + помехи
20	Эффективность	> 95%	Измеренная по средневзвешенному значению при разных нагрузках (переменная в способе СЕС)
	Входной пульсирующий ток (120 Гц)	< 20%	Измеренный как I _{pp} /I _{av} от источника питания 450 В последовательно с резистором 10 Ом
25	Входное пульсирующее напряжение (120 Гц)	< 3%	Измеренное как V _{pp} /V _{av} от источника питания 450 В последовательно с резистором 10 Ом
	Максимальная наружная температура	< 60°C	Испытания при температуре окружающей среды в 15-30°C (любая наружная точка контакта < 60°C)
30	Электромагнитная совместимость	Часть 15 FCC класс «В»	
	Макс. ток при заземлении на массу	< 5 мА	

(57) Формула изобретения

- 35 1. Однофазный, неизолированный, миниатюрный силовой инвертор (1) для преобразования постоянного тока в переменный с выходной удельной мощностью более 3000 Вт/дм³, содержащий
- вход постоянного тока;
 - выход переменного тока;
- 40 по меньшей мере цепь (201, 202) переключения с полной мостовой топологией Н-типа, имеющую вход, соединенный с входом постоянного тока, и выход, соединенный с выходом переменного тока, и содержащую переключатели, изготовленные из широкозонных полупроводников, предпочтительно из полупроводников из нитрида галлия или GaN;
- 45 по меньшей мере один ЕМІ-фильтр (100) синфазного шума, подсоединенный между входом постоянного тока и входом полной мостовой цепи переключения Н-типа, между выходом полной мостовой цепи переключения Н-типа и выходом переменного тока, соответственно, причем фильтры (100) синфазного шума связаны с заземленным экраном

или напрямую с землей (204), причем фильтры (100) синфазного шума содержат фильтрующие индукторы и так называемые конденсаторы Y-типа;

по меньшей мере один ЕМI-фильтр (101) противофазного шума, подсоединенный последовательно с соответствующим фильтром (100) синфазного шума между входом постоянного тока и входом полной мостовой цепи переключения H-типа, между выходом полной мостовой цепи переключения H-типа и выходом переменного тока, соответственно, причем указанные фильтры (101) противофазного шума содержат так называемые фильтрующие конденсаторы X-типа и, опционально, индукторы;

активный фильтр компенсации пульсации, содержащий полумостовую топологию (203) переключения, расположенную параллельно с полной мостовой цепью переключения H-типа и соединенную с LC-фильтром, состоящим из по меньшей мере одного индуктора (L6) и множества накопительных конденсаторов (C5);

причем указанный силовой инвертор (1) помещен в корпус, изготовленный в виде наружной электропроводящей оболочки (501), вмещающей в себя вентилятор, выполненный с возможностью нагнетать воздух в осевом направлении к боковой поверхности корпуса, и многоуровневую вертикальную структуру, последовательно от нижней стороны до верхней стороны содержащую слой активных фильтрующих конденсаторов (514), теплоотвод (512), слой переключателей (509) из широкозонных полупроводников, соединенных с печатной платой тепловыми сквозными перемычками (510), и слой активных фильтрующих индукторов (504), при этом вентилятор и многоуровневая структура компонентов выполнены так, что в процессе эксплуатации наружная температура корпуса не превышает 60°C в любой точке при максимальной температуре окружающей среды 30°C и максимальной нагрузке 2 кВА.

2. Силовой инвертор по п. 1, отличающийся тем, что слой активных фильтрующих конденсаторов (514) образован установленными на печатной плате (513) рядами равномерно распределенных многослойных керамических конденсаторов (MLCC), причем указанные конденсаторы разделены зазором, при этом зазор предпочтительно составляет примерно 1 мм и ориентирован в направлении нагнетания вентилятора.

3. Силовой инвертор по п. 1, отличающийся тем, что теплоотвод (512) представляет собой цельный механически обработанный металлический теплоотвод, выбранный из группы, состоящей из многодисковых, ячеистых теплоотводов, теплоотводов с чередующимися ребрами и теплоотводов из металлической пены, причем указанный теплоотвод (512) прилегает к слою активных фильтрующих конденсаторов (514).

4. Силовой инвертор по п. 1, отличающийся тем, что наружная проводящая оболочка (501) корпуса окружает проводящий экран (503), отделенный от нее теплопроводящим пограничным слоем, образованным прокладкой (502).

5. Силовой инвертор по п. 1, отличающийся тем, что активные фильтрующие индукторы (504) состоят из ферритовых сердечников, на которые непосредственно намотан литцендрат без каркаса для намотки катушки, причем каждый индуктор (504) образован двумя катушками, разделенными керамической фольгой (505), расположенной между ферритами для создания воздушного зазора, а также теплового отвода.

6. Силовой инвертор по п. 1, отличающийся тем, что слой переключателей (509) из широкозонных полупроводников, соединенных с печатной платой тепловыми сквозными перемычками (510), прилегает к теплоотводу благодаря керамической изоляции (511) и микропружинным контактам (507), причем в зазорах расположен кремнийорганический пенопласт (508) для равномерного распределения давления переключающих контактов на теплоотвод (512).

7. Силовой инвертор по п. 4, отличающийся тем, что оболочка (501) корпуса,

проводящий экран (503) и теплоотвод (512) изготовлены из меди.

8. Силовой инвертор по п. 1, отличающийся тем, что пассивные фильтры, то есть, синфазные и противофазные ЕМІ-фильтры, отделены от остальных частей в корпусе.

9. Силовой инвертор по п. 1, отличающийся тем, что часть активных фильтрующих
5 индукторов (504) термически прикреплены к проводящему экрану (503).

10

15

20

25

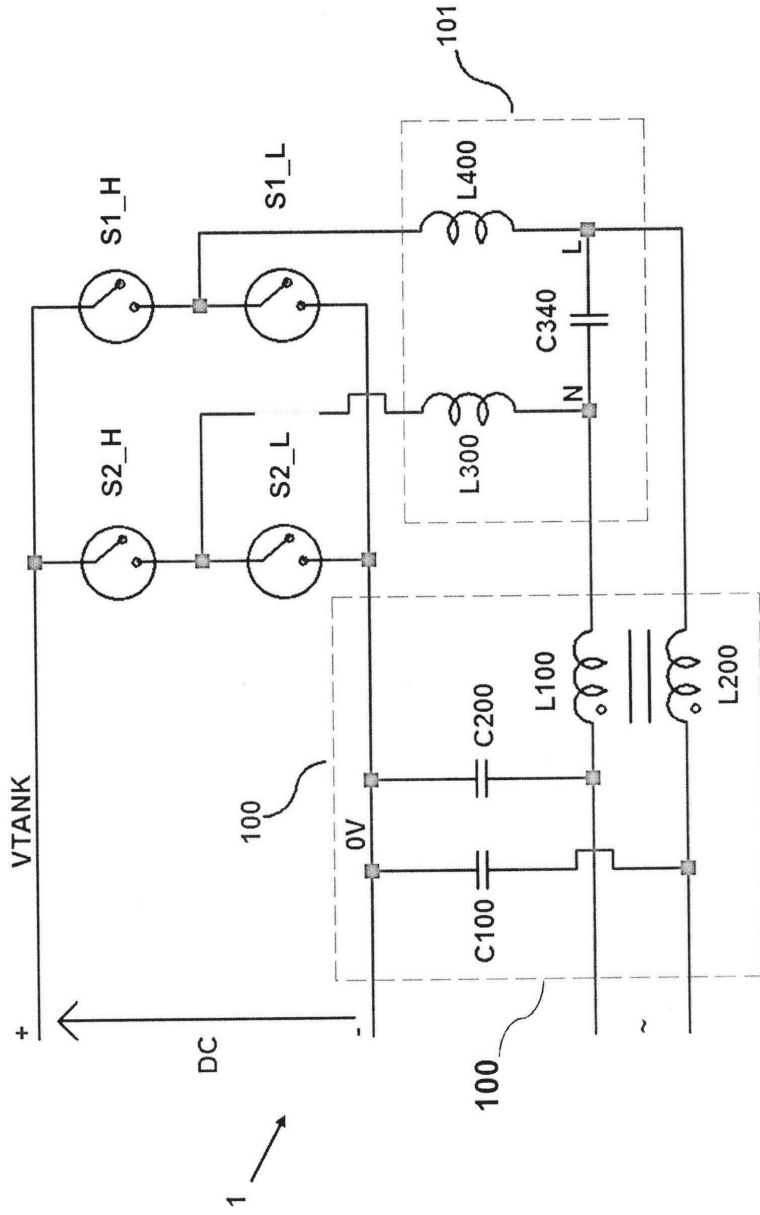
30

35

40

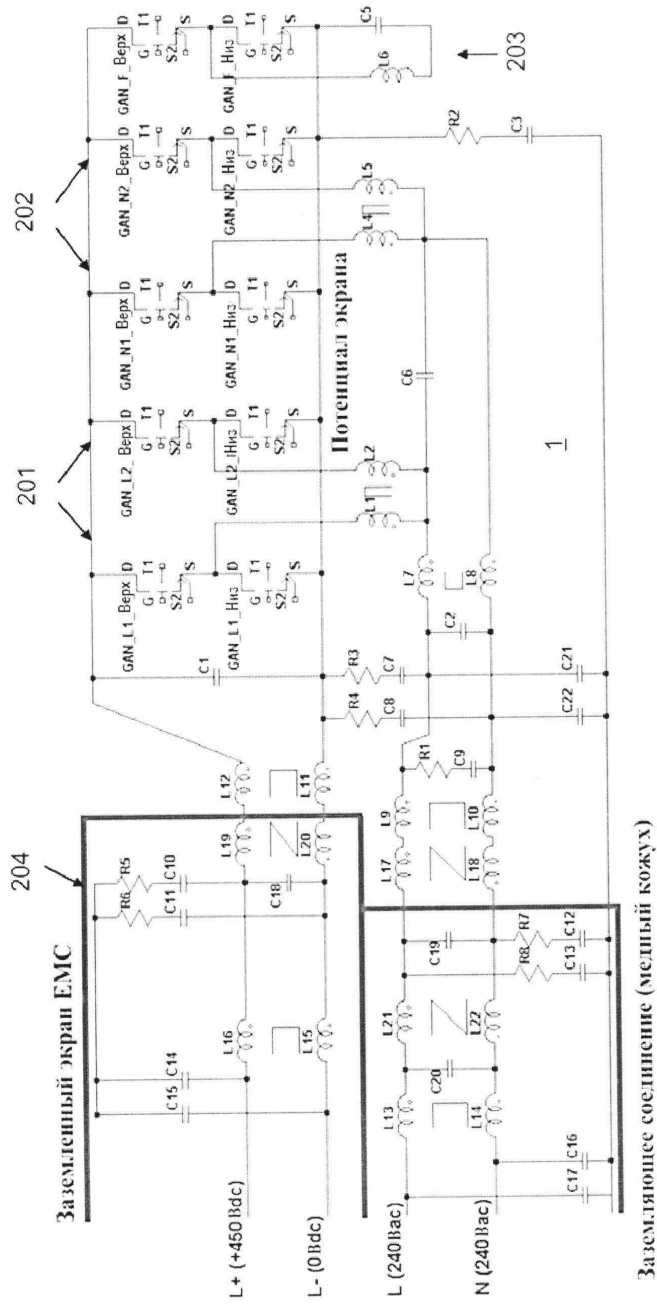
45

1

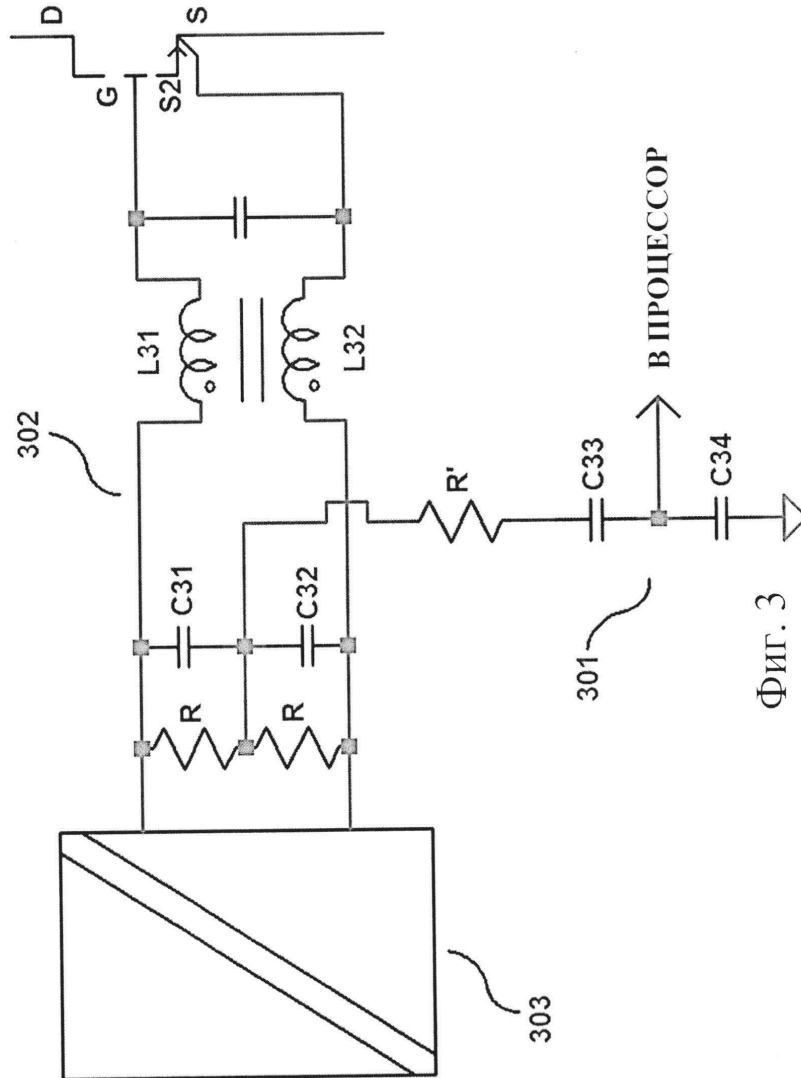


Фиг. 1

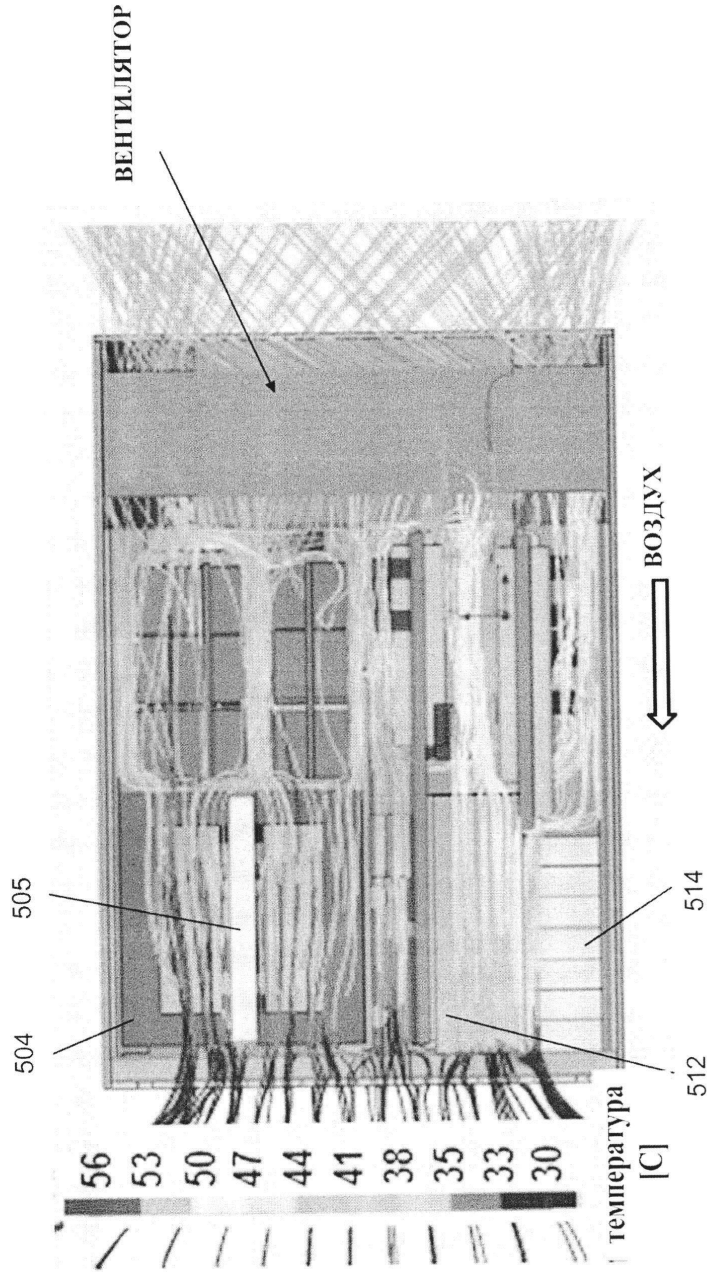
2



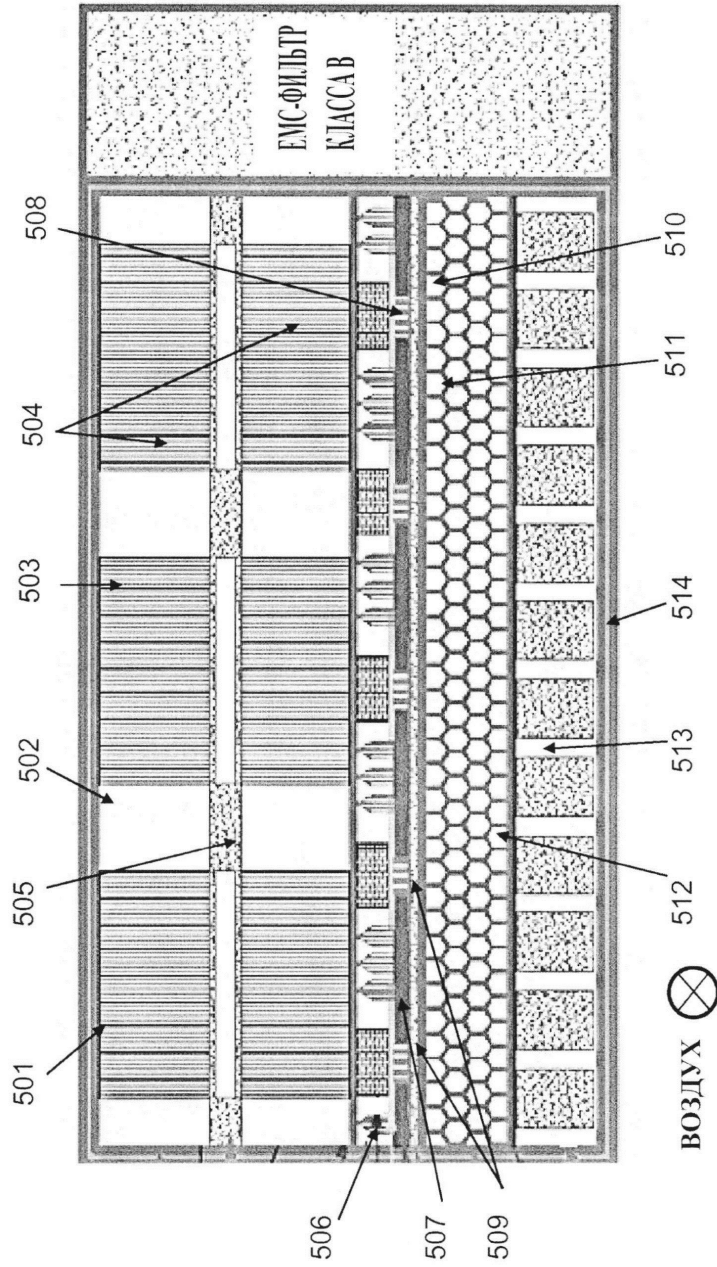
Фиг. 2



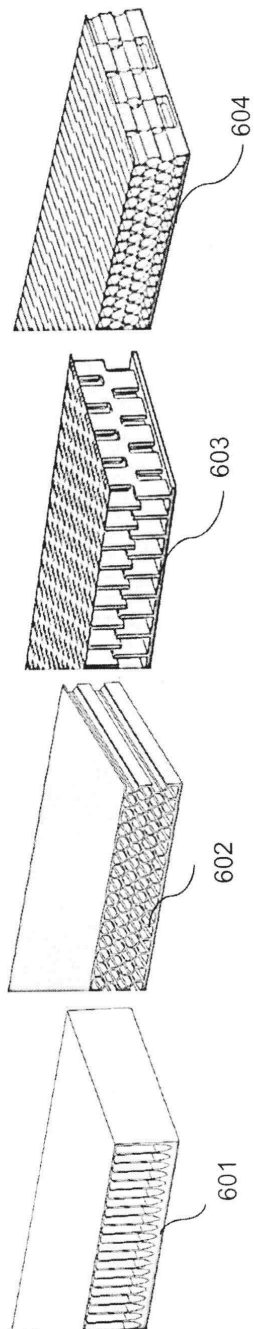
Фиг. 3



Фиг. 4



Фиг. 5



Фиг. 6