

DOI: 10.18721/JEST.26201
УДК 621.311.6

Е.А. Орел

Акционерное общество "Научно-исследовательский институт "Вектор",
Санкт-Петербург, Россия

РАСШИРЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА С ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ АРХИТЕКТУРОЙ ВВЕДЕНИЕМ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ СВОЙСТВ КЛЮЧЕЙ

Рассматривается способ повышения качества работы системы электропитания, образованной включенными параллельно преобразователями напряжения постоянного тока, добавлением в схему ключей с особыми функциональными свойствами. Приведена структурная схема предлагаемой системы и перечислены основные, в том числе новые, её возможности. Описан принцип работы ключей, являющихся отдельными самостоятельными устройствами, реализующими целый ряд защитных, регулирующих, коммутационных и телеметрических функций, позволяющих достичь новых качеств в работе системы электропитания при одновременном снижении требований к схемам используемых в ней преобразователей. Приведена вольт-амперная характеристика токовой защиты, реализуемой ключами, показан принцип соединения ключей с другими элементами системы и особенности подключения к ней потребителей. Приведён физический макет системы, работающей на одного потребителя, описаны дальнейшие возможности его улучшения.

Ключевые слова: система электропитания постоянного тока, параллельное включение преобразователей, силовые ключи, резервирование, отказоустойчивость, токовая защита, защита от перенапряжения, энергосбережение, изменение структуры подключений, регулировка параметров работы.

Ссылка при цитировании:

Орел Е.А. Расширение функциональных возможностей системы электропитания постоянного тока с параллельной архитектурой введением дополнительных свойств ключей // Материаловедение. Энергетика. 2020. Т. 26, № 2. С. 8–19. DOI: 10.18721/JEST.26201

Это статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Е.А. Орел

NII Vector, St. Petersburg, Russia

EXPANDING THE FUNCTIONALITY OF A DC POWER SUPPLY SYSTEM WITH A PARALLEL ARCHITECTURE BY INTRODUCING ADDITIONAL PROPERTIES FOR SWITCHES

The paper considers a way to improve quality of a power supply system, formed by DC-DC converters connected in parallel, by introducing the switches with special functional properties into the circuit. We present a block diagram of the proposed system and its main features. The paper describes the principle of operation of switches which are separate independent devices implementing a number of protective, regulatory, switching and telemetry functions. That

allows to achieve new qualities in the operation of the power supply system while reducing the requirements for converter circuits. We show the volt-ampere characteristic of the switches over-current protection and describe the principle of connecting the switches to other system elements and loads. The paper demonstrates a physical model of a single load system and ways to improve it.

Keywords: DC-DC power supply system, parallel connection of converters, power switches, reserving, fault-tolerance, overcurrent protection, overvoltage protection, energy saving, changes in the structure of connections, adjusting the operating mode parameters.

Citation:

E.A. Orel, Expanding the functionality of a DC power supply system with a parallel architecture by introducing additional properties for switches, Materials Science. Power Engineering, 26 (02) (2020) 8–19, DOI: 10.18721/JEST.26201

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Введение. Разработка мощных отказоустойчивых вторичных источников питания постоянного тока является важной задачей для многих электротехнических отраслей промышленности. Распространённым вариантом построения таких источников является параллельное соединение однотипных преобразователей напряжения постоянно тока по входу и выходу для совместной работы на общую нагрузку [1]. Данный принцип позволяет повысить надёжность электропитания как за счёт возможности резервирования части преобразователей [2, 3], так и за счёт безопасного перераспределения мощности в аварийной ситуации от «сгоревших» частей к работающим в случае, если каждый преобразователь работает не на пределе своих эксплуатационных параметров. Кроме того, использование параллельной архитектуры обеспечивает источнику питания такие дополнительные преимущества, как сокращение размера моточных элементов, [4], уменьшение токовой и тепловой нагрузки на отдельные части схемы, однотипность применяемых схемотехнических решений [5]. Несмотря на все достоинства, подобные системы характеризуются также и серьёзными недостатками, описать которые и предложить пути решения является целью данной работы.

Проблемы систем с параллельной архитектурой

Главным недостатком таких систем является проблема неравномерного распределения мощности между параллельно работающими преобразователями, вызванная разбросом параметров их элементов [6–9]. На практике выходные напряжения преобразователей отличаются между собой, и большая часть токовой нагрузки приходится на схему с более высоким выходным напряжением, в то время как остальные оказываются не нагруженными должным образом. Это приводит к снижению суммарного КПД системы. Решение проблемы заключается в принудительном уравнивании токов преобразователей и основано на использовании принципов пассивного или активного распределения нагрузки [10–12]. В пассивных схемах подключение выходов преобразователей к нагрузке осуществляется через выравнивающие резисторы или распределительные диоды, которые помимо функции распределения тока выполняют также функцию защиты источника от короткого замыкания в отдельном преобразователе. Недостатком такого подхода являются существенные потери мощности в виде тепла на выравнивающих резисторах или распределительных диодах [13]. Принцип активного распределения тока лишён этого недостатка и основан на введении контуров обратной связи, устанавливающих жёсткое соотношение между током нагрузки и током каждого преобразователя. Активные схемы уравнивания токов можно разделить на две условные группы: с выравниванием при помощи специализированных микросхем [14–16] и введением узлов параллельной работы в схемотехнику преобразователей [17].

Для улучшения возможностей управления и повышения качества работы схем защиты к параллельно работающим преобразователям, в роли которых могут выступать готовые серийно

выпускаемые модули питания, наподобие [18], добавляют входные и выходные коммутационные аппараты (далее ключи). Подобная система по своей структуре оказывается образованной из включенных параллельно ячеек, каждая из которых представляет собой последовательно соединенные друг с другом входной ключ, модуль питания (МП) и выходной ключ. Примером такого источника является система преобразования напряжения постоянного тока [19], обладающая широким набором функциональных возможностей: локальное и дистанционное управление, стабилизация выходного напряжения, равномерное распределение нагрузки между параллельно работающими преобразователями, защита от перегрузок, токов коротких замыканий, перегрева и возгорания. Входной и выходной ключи связаны с централизованной системой управления и отключаются по сигналам защит от токов перегрузки, короткого замыкания и перегрева.

Несмотря на все достоинства, системы с подобной архитектурой обладают рядом ограничений, впрочем, легко решаемых расширением функциональных возможностей входных и выходных ключей ячеек. Примером такого ограничения является возможная уязвимость системы в момент её запуска, когда без принятых заранее мер по причине заряда ёмкостных накопителей образуется значительный пусковой ток, способный создавать сильные электромагнитные помехи и приводить в действие цепи защиты, размыкающие входные и выходные ключи и препятствующие нормальному запуску системы. Добавление в этом случае на вход ячеек устройств плавного пуска, наподобие [20, 21], позволяет выйти из ситуации, но, увеличивает количество функциональных узлов системы и ухудшит её габаритные показатели. Другим ограничением является дискретность рабочих состояний ячеек (работает/отключена), обеспечиваемая ключами. Внезапное возникновение дестабилизирующего факторов, таких как бросок тока, критическое превышение входного напряжения или короткое замыкание, приводит к срабатыванию цепей защиты и размыканию соответствующего ключа перегруженной ячейки, однако при исчезновении данного фактора безопасное возобновление её работы ничем не гарантировано. Замыкание ключа и введение модуля ячейки обратно в работу производится без полной уверенности в его работоспособности, обеспечить которую может лишь его замена или перезапуск системы. Новым и многообещающим решением, предлагаемым мировыми производителями электроники, является использование электронных ключей-предохранителей (англ. «eFuse Circuit Protectors») наподобие [22], принцип действия которых основан на регулировании проводимости силового транзисторного коммутатора внутренней схемой управления с контурами обратной связи. Это позволяет решить вопросы защиты схемы как от «бросков» тока, так и от критически малых или высоких значений входного напряжения. Пороговые уровни защит являются настраиваемыми, а наличие внутреннего таймера позволяет управлять длительностью процессов по времени. Тем не менее, потенциал функциональных возможностей и энергоэффективности подобных устройств всё ещё раскрыт не полностью.

Предлагаемый подход к построению системы

Нововведением, предлагаемым в настоящей работе, является повышение качества работы системы электропитания введением дополнительных свойств работы ключей и совершенствованием принципа группировки и настройки ячеек при одновременном снижении требований к модулям питания ячеек, сохранении архитектуры системы и минимизации числа используемых в ней элементов. С помощью ключей можно отдельно настраивать токовые защиты, выполнять защиту от превышения входного напряжения МП и регулировку его выходного напряжения, диагностировать состояние отдельных частей системы, обеспечивать защиту от перегрева, группировать ячейки, изменять структуру подключений МП и потребителей, аварийно отключать «сгоревшие» модули и часть нагрузок, ограничивать ток заряда ёмкостных накопителей

и, таким образом, уйти от необходимости учитывать величину их ёмкости для нормального функционирования системы. С помощью ключей можно реализовать двойную токовую защиту (рис. 3), отличительным свойством которой являются два разных режима ограничения тока: штатный режим с защитой от превышения заданного уровня срабатывания по току и ограниченный режим с фиксированным, значительно уменьшенным током, переход к которому осуществляется в момент запуска системы, либо при длительном срабатывании защиты от превышения заданного уровня тока. Такое свойство позволяет преодолеть проблему ограничения пускового тока и одновременно реализовать принцип самовосстановления системы после неисправностей работы части её ячеек, который, помимо дублирования и работы с запасом по мощности, заключается в самостоятельном, не связанном с остальными узлами и блоками устройства переходе неисправных ячеек с внутренним коротким замыканием в ограниченный режим работы с крайне низким энергопотреблением и таким же самостоятельным восстановлением штатного режима их работы в случае сохранности элементов схемы сразу же после исчезновения дестабилизирующих факторов.

Структурная схема предлагаемой системы электропитания приведена на рис. 1. Система осуществляет преобразование энергии первичного источника 30. Последовательно соединенные входной ключ 19, модуль питания 20 и выходной ключ 21 составляют одну элементарную ячейку преобразования 28. N включенных параллельно ячеек, часть которых работает на потребителей 31, 32, другая остается в резерве, и система управления 24...26, связанные между собой каналами управления 1...18, образуют единый самовосстанавливающийся модуль питания (СМП) 27. Ячейки можно группировать для обеспечения питанием как одного мощного, так и нескольких маломощных потребителей с возможностью при необходимости перераспределения их подключений к устройству. Выходные напряжения для разных потребителей могут отличаться. Задание уровней выходных напряжений осуществляется сменой или регулировкой соответствующих модулей питания 20 и настройкой системы управления 24...26. Группировка ячеек осуществляется с помощью двухуровневой коммутации, на первом уровне которой выполняется соединение (перемычками, либо отдельными коммутаторами, рассчитанными на соответствующий уровень напряжения и тока) между собой силовых выходных выводов ячеек для образования группы, на втором уровне коммутацией входных и выходных ключей определяется, какая часть ячеек образует резерв (см. рис. 4).

Подробная структурная схема одной ячейки приведена на рис. 2. Нумерация элементов согласована с нумерацией рис. 1 и продолжает её. Входной, и выходной ключи объединяют в себе транзисторный коммутатор 32, 36, токовую защиту 33, 37, контур обратной связи 35, 39 и схему управления 34, 38. Для полного открытия силовых элементов входных и выходных ключей используются маломощные источники DC-DC (блоки 22, 23 на рис. 1 и рис. 2), питающие входные и выходные ключи и имеющие различные выходные напряжения для различных структур силовых транзисторов ключей (от 3,3 В до 12 В). Для компенсации потерь на выходном ключе в ячейку добавлена обратная связь по напряжению ОСН. Для внешнего по отношению к ячейке управления работой МП и ключами используются два типа управляющих сигналов: ДУ – сигналы дистанционного управления и СИ – сигналы информирования о состоянии отдельных частей схемы.

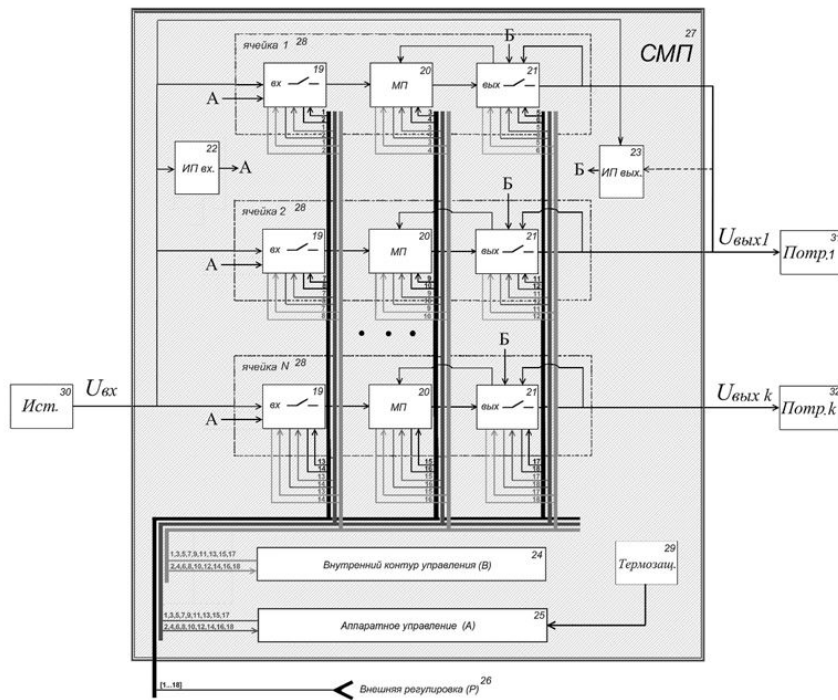


Рис. 1. Структурная схема предлагаемой системы электропитания
 Fig. 1. Block diagram of the proposed power supply system

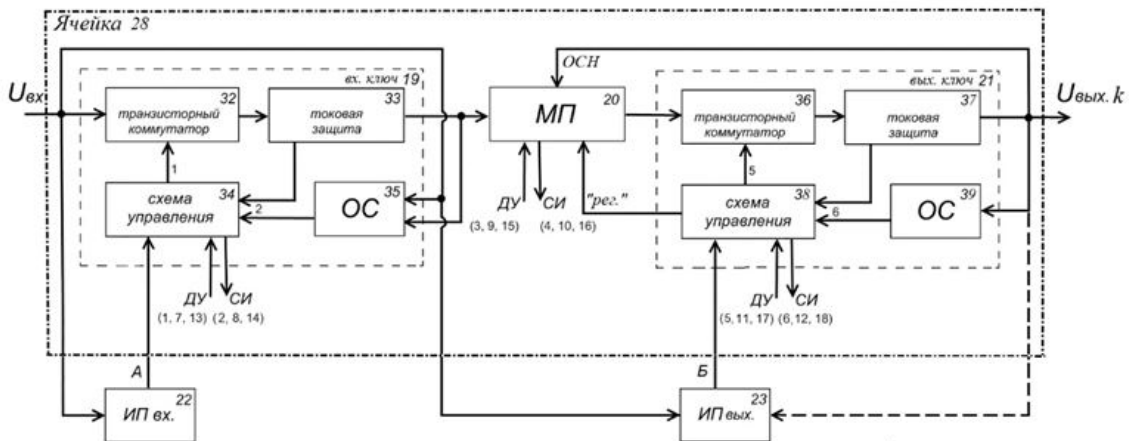


Рис. 2. Структурная схема одной ячейки в составе СМП
 Fig. 2. Block diagram of a single cell in the power supply system

Принцип работы системы

Защита по току входных и выходных ключей выполняется по схеме ограничения мощности за счет увеличения падения напряжения на транзисторном коммутаторе ключа, в результате чего организуется дополнительное сопротивление в цепи коммутации тока и, таким образом, происходит его ограничение на заданном уровне. Поскольку ключи соединены последовательно с модулями питания, токовая защита МП ячеек не является в рассматриваемой концепции основополагающей. Если МП содержит внутри токовую защиту, уровень её срабатывания выставляется выше аналогичного уровня токовой защиты ключа (см. рис. 3).

Используя известный физический принцип работы, ключи реализуют новые качества защиты по ограничению входного (выходного) тока: во время запуска системы, либо при продолжительном превышении током ячейки порогового значения I_3 напряжение на выходе ключа ограничивается величиной $U_{огр}$, вследствие чего ток ключа уменьшается до неизменной величины $I_{огр}$, характеризующейся малой мощностью, приходящейся на ячейку. Недостаток такой защиты – более длительное время срабатывания, прежде чем значение тока уменьшится до уровня $I_{огр}$, по сравнению с включением с одной токовой защитой I_3 . Однако, в отличие от других распространенных устройств [21, 22] защиты (пунктирная линия на рис. 3), такая постановка вопроса к работе защиты выгодно отличается своим энергопотреблением.

Вольт-амперная характеристика, поясняющая работу предлагаемой токовой защиты ключей, приведена на рис. 3 и характеризуется тремя основными уровнями:

1. ток штатного режима защиты от короткого замыкания I_3 ,
2. ток режима ограничения $I_{огр}$,
3. напряжение ограничения $U_{огр}$.

Причём сами уровни являются настраиваемыми.

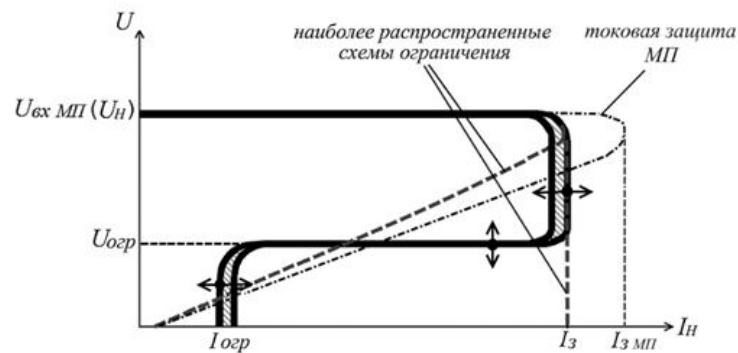


Рис. 3. Вольт-амперная характеристика токовой защиты, реализуемой входными и выходными ключами ячеек

Fig. 3. Volt-ampere characteristics of over-current protection implemented by input and output switches of the cells

При исчезновении дестабилизирующих факторов (значительный пусковой ток, короткое замыкание во входной или выходной цепях) ячейки самостоятельно восстанавливают свои функции, возвращаясь из режима ограниченного функционирования в номинальный режим работы в случае, если не потребовалось их полного отключения системой управления, что также возможно и реализуется подачей сигнала $ДУ$ для размыкания силового транзисторного коммутатора в составе ключей.

Работа в режиме ограничения позволяет увеличить ёмкость выходных конденсаторов ключей (соответственно, входного и выходного конденсаторов МП) без потери работоспособности при включении ячейки. Используя режим ограничения, входным ключом можно ограничить величину пускового тока, а с помощью выходного ключа задать величину ёмкости выходного конденсатора. За счет ограничения входного тока ячейки при запуске изменение напряжения на входе МП происходит не по экспоненциальному закону, а по ломаному линейному. Скорость нарастания напряжения пропорциональна току ячейки.

В штатном режиме работы токовой защиты превышающий номинальное значение ($I_{ном}$) входной ток ограничивается максимальной величиной, определяемой входным ключом, например,

$$I_{\text{ВХ max}} = I_{\text{З ВХ}} = 1,1I_{\text{ВХ НОМ}}$$

Использование выходного ключа позволяет ограничить выходной ток по аналогии с входным ключом, например,

$$I_{\text{ВЫХ max}} = I_{\text{З ВЫХ}} = 1,1I_{\text{ВЫХ НОМ}}$$

Входной ключ позволяет задавать уровень стабилизации входного напряжения МП, поступающего от первичного источника. При ограничении входного напряжения $U_{\text{вх}}$ с ростом температуры на входном ключе может включиться тепловая защита 29 (рис. 1), обеспечивающая размыкание ключа и полное выключение ячейки до момента остывания и прекращения работы термозащиты.

Выходной ключ обладает функцией коррекции выходного напряжения модуля питания своей ячейки, для чего у него предусмотрен отдельный управляющий вывод, подключаемый к выводу «Reg.» модуля при его наличии. Учитывая выполняемую задачу, данный вывод ключа на рис. 2 также обозначен как «reg.». Вследствие изменения качества токовой защиты ячеек в МП потенциально появляется возможность расширить диапазон регулировки выходного напряжения до величин гораздо больших, чем в готовых покупных серийно выпускаемых модулях питания. Также выходной ключ, помимо регулировки выходного напряжения МП, осуществляет его ограничение в случае нештатного увеличения сверх необходимого уровня $U_{\text{ВЫХ ст}}$ по аналогии с ограничением напряжения $U_{\text{вх}}$ входным ключом.

Возможность включения и выключения ячейки в системе может осуществляться несколькими способами: путем включения (выключения) как входного или выходного ключей, так и МП ячеек, если в нём предусмотрена возможность дистанционного выключения; таким образом организуется возможность создания сложной структуры управления всей системой.

Выходные ключи выполняют защитную функцию распределительного диода (проводят ток в одну сторону), что осуществляется за счёт управления проводимостью ключа со стороны его внутренней схемы управления, реагирующей на изменение направления тока, но в отличие от распределительных диодов падение напряжения на ключах будет значительно меньше (0,1 – 0,2 В). В условиях большой мощности выходные ключи позволяют использовать их параллельное соединение на одного потребителя. Выравнивание мощности по ячейкам осуществляется изменением времени открытого состояния силовых транзисторов МП, которое регулируется в зависимости от мощности, приходящейся на одну ячейку.

Для реализации заявленных целей система управления СМП должна иметь ряд отличительных особенностей. Она имеет трехуровневую иерархию, задачи между уровнями которой распределены следующим образом. Внутреннее управление осуществляется локально внутри каждой ячейки, обеспечивая её саморегулирование для поддержания уровня выходного напряжения и перехода в ограниченный режим работы в момент запуска и в случае неполадок. Данный уровень управления реализуется за счет внутренних управляющих схем входных, выходных ключей и модулей питания и показан на рис. 1 в виде отдельного блока 24 исключительно для удобства восприятия. Аппаратный уровень управления призван добиться высокоэффективной и безопасной совместной работы ячеек. Для этого он включает или выключает ячейки через сигналы ДУ, позволяя изменить количество находящихся в резерве ячеек для перераспределения мощности питания, не допустить случаев перегрева и исключить из схемы «сгоревшие» ячейки. Помимо этого, на аппаратном уровне реализуется задача выравнивания мощности между параллельно работающими в штатном режиме в пределах своей группы ячейками путем считывания и обработки информационных сигналов о значениях токов каждой ячейки и формирования ответного управляющего воздействия на МП и выходной ключ с целью их выравнивания. Внешнее управление используется в случаях, когда два из перечисленных выше

метода не позволяют полностью решить вопросы функционирования аппаратуры вследствие недостаточной оставшейся мощности СМП. Оно призвано обеспечить такое вмешательство в работу системы, при котором происходит восстановление её работоспособности путём перераспределения подключений потребителей (см. рис. 4). Иначе говоря, на данном уровне производится перегруппировка ячеек. Также в рамках предлагаемой концепции использование внешнего управления с помощью управляющих сигналов ДУ, либо ручной регулировкой параметров подстроечных элементов схем управления ячеек позволяет изменить параметры их функционирования: $U_{\text{вых}}$, $I_{\text{з вх}}$, $I_{\text{огр вх}}$, $I_{\text{з вых}}$, $I_{\text{огр вых}}$, $U_{\text{огр вх}}$, $U_{\text{огр вых}}$ (см рис. 3), входное $U_{\text{вх ст}}$ и выходное $U_{\text{вых ст}}$ напряжение стабилизации.

С целью обеспечения требуемых значений выходных напряжений для разных потребителей допускается возможность выставить на выходном выводе каждой ячейки значение из доступного набора уровней: +5 В, +12 В и т.д. при условии, что в ячейках используются модули питания с соответствующей предусмотренной возможностью настройки. Пример реализации подобного принципа показан на рис. 5. Использовать МП с жестко заданным значением выходного напряжения и варьировать уровень выходного напряжения ячейки за счет падения напряжения на выходном ключе возможно, однако приведёт к значительному тепловыделению на ключе, ухудшая КПД преобразования. Альтернативой также является смена модуля на новый, обеспечивающий иное значение выходного напряжения, но данное решение ограничит универсальность и не позволит использовать одну из отличительных возможностей предлагаемой системы.

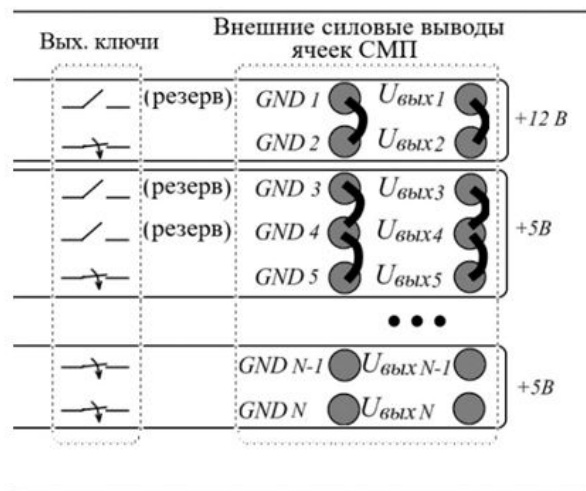


Рис. 4. Принцип группирования ячеек для питания разных потребителей
 Fig. 4. The principle of grouping cells for power supply to different consumers

Набор уровней выходных напряжений закладывается в систему управления разработчиком и может быть изменен только внешним управлением. С целью упрощения переключения между уровнями выходных напряжений ячеек предлагается использовать кодированный сигнал. В зависимости от подачи на группу выводов управления МП различных комбинаций логических уровней «0» и «1» изменяется опорный сигнал ШИМ-контроллера, благодаря чему на силовых выходах ячеек выставляются необходимые потребителям уровни напряжения (рис. 5). При этом следует не забывать также скорректировать уровень стабилизации выходного напряжения, обеспечиваемый выходным ключом ячейки. Таким образом, соединив внешние силовые выводы ячеек между собой, установив на них требуемое значение выходного напряжения и осуществив коммутацию входного и выходного ключей, можно сгруппировать ячейки, как показано на рис. 4, для питания нескольких отдельных потребителей.

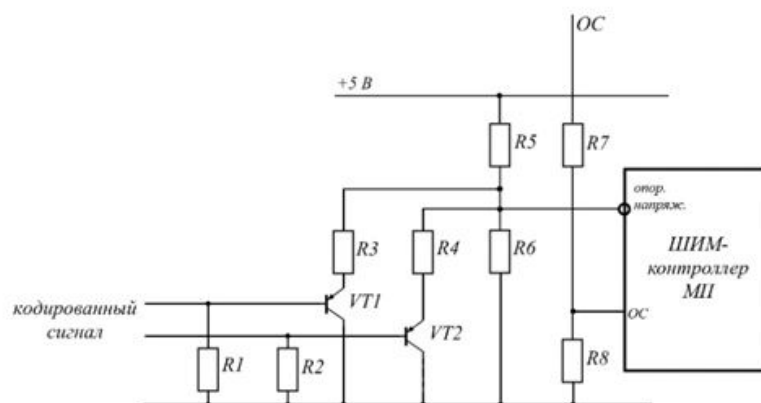


Рис. 5. Реализация принципа использования кодированного сигнала для задания уровня выходного напряжения ячейки

Fig. 5. Implementation of the principle of using an encoded signal to set the output voltage level of the cell

Реализовывать аппаратный и внешний уровни управления под силу одному микроконтроллеру, размещённому отдельно от ячеек внутри корпуса СМП. Управление достигается посредством обмена данными между микроконтроллером и остальными устройствами. На внешнем уровне управления получаемые от внешнего по отношению к СМП управляющего устройства данные обрабатываются микроконтроллером, который далее по каналам управления производит коррекцию параметров режима работы ячеек (изменяет сигнал задания на выходное напряжение МП и параметры функционирования ключей на внутреннем контуре управления), а также изменяет количество работающих ячеек.

Результат реализации подхода

Физический макет системы в случае использования двух ячеек, работающих на одного потребителя представлен на рис. 6. Входное напряжение питания от первичного источника $E_{\text{п}} = 27 \text{ В}$, напряжение нагрузки $U_{\text{н}} = 12 \text{ В}$, сопротивление нагрузки $R_{\text{н}} = 5 \text{ Ом}$.

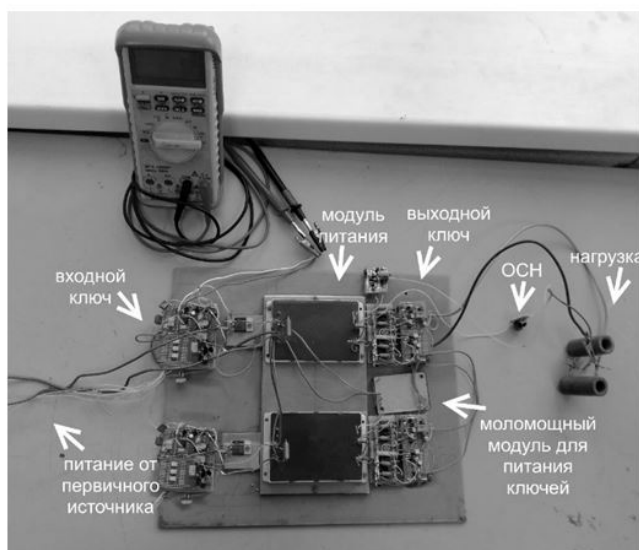


Рис. 6. Опытный макет предлагаемой системы

Fig. 6. Prototype of the proposed system

Заключение

Представленный принцип построения системы электропитания не требует значительных затрат, но позволяет значительно повысить отказоустойчивость системы и качество её работы. Тем не менее, до конца не решённым вопросом функционирования системы является критерий КПД. Разные режимы работы схемы будут характеризоваться разными показателями эффективности. В предложенной модели упор сделан на простоту, надёжность и универсальность, что не позволяет до конца решить вопрос эффективности, которая, впрочем, неизбежно возрастёт при оптимизации режимов работы и использовании более совершенной элементной базы. Данная статья может быть полезна специалистам, занимающимся разработкой вторичных источников питания для специальных областей техники. Достигнутое улучшение ряда качеств системы позволяют использовать её в объектах космического, военного и промышленного назначения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Altowati A., Zenger K.** Analysis and robust control design of multimodule parallel DC-DC converter systems, 2011 IEEE GCC Conference and Exhibition. (2011) 89–92.
- [2] **Sun B., Bower I.** How to parallel two DC/DC converters with digital controllers, Analog Design Journal, (2018) 1–4.
- [3] **Klassen S., Klassen T., Luft S.** Current Sharing in Digitally Controlled DC-DC Converters Connected in Parallel, 20th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM), (2019) 541–546.
- [4] **Renaudineau H., Houari A., Shahin A., Martin J.P., Pierfederici S., Meibody-Tabar F., Gerardin B.** Efficiency optimization through current-sharing for paralleled DC–DC boost converters with parameter estimation, IEEE Transactions on power electronics, 2(29) (2014) 759–767.
- [5] **Chen W., Ruan X., Yan H., Tse Chi K.** DC/DC conversion systems consisting of multiple converter modules: stability, control, and experimental verifications, IEEE Transactions on power electronics, 6(24) (2009) 1463–1477.
- [6] **Fuerback V., Dall’Asta M., Pagliosa M., Lazzarin T.B.** Analysis of modular DCM Flyback converters in input parallel connections with parametric mismatches, Eletrônica de Potência, 2(24) (2019) 225–234.
- [7] **You J., Vilathgamuwa M., Ghasemi N.** Loop-Shaping Method Based Current Sharing Controller Design for Parallel DC/DC Converters, IET Power Electronics, 12(11) (2018) 1937–1945.
- [8] **Gordillo J., Aguilar C.** A Simple Sensorless Current Sharing Technique for Multiphase DC-DC Buck Converters. IEEE Transactions on Power Electronics, 5(32) (2016) 3480–3489.
- [9] **Hu T., Khan M., Xu K., Zhou L., Rana A.** Design of an Input-Parallel Output-Parallel Multi-Module DC-DC Converter Using a Ring Communication Structure. Journal of Power Electronics, 15(4) (2015) 886-898.
- [10] **Cilio E., Mitchell G., Schupbach M., Lostetter A.** SiC intelligent multi module DC/DC converter system for space applications, 2009 IEEE Aerospace conference, (2009) 1–19.
- [11] **Meng L., Dragicevic T., Guerrero J., Vasquez J.** Stability constrained efficiency optimization for droop controlled DC-DC conversion system, IECON 2013 – 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, (2013) 7222–7227.
- [12] **Cheng P., Ding G., Song C., Chai H., Xu G.** Stability Analysis of Identical Paralleled DC-DC Converters with Average Current Sharing, 2019 IEEE Asia Power and Energy Engineering Conference (APEEC), (2019) 60–64.
- [13] Application note 3, rev. A, Parallel operation of DC power modules, Wall Industries, inc, (2016) 1–3.
- [14] **Jordan M.** UC3907 Load share IC simplifies parallel power supply design, Texas Instruments, (1999) 203–212.

[15] **Meng L., Dragicevic T., Vasquez J., Guerrero J.** Tertiary and Secondary Control Levels for Efficiency Optimization and System Damping in Droop Controlled DC-DC Converters, *IEEE Transactions on Smart Grid*, 6(6) (2015) 2615–2626.

[16] **Wang H., Han M., Han R., Guerrero J., Vasquez J.** A Decentralized Current-Sharing Controller Endows Fast Transient Response to Parallel DC-DC Converters, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 5(33) (2018) 4362–4372.

[17] **Panov Y., Jovanovic M.** Loop Gain Measurement of Paralleled DC-DC Converters With Average-Current-Sharing Control, *IEEE Transactions on power electronics*, 6(23) (2008) 1048–1053.

[18] ООО АЕДОН. МДМ-П DC/DC преобразователи. Режим доступа: <https://aedon.ru/catalog/dcdc/series/11> (дата обращения: 18.05.2020).

[19] **Берг В.Р., Бродников С.Н., Михеев В.В., Гуров А.А., Буланов Р.Н.** Интеллектуальная система преобразования напряжения постоянного тока для динамически изменяющейся нагрузки. Пат. 2692089 Российская Федерация, МПК H02J 1/14; патентообладатель Российская Федерация, от имени которой выступает Министерство обороны Российской Федерации. № 2017137591; заявл. 26.10.2017; опубл. 21.06.2019, Бюл. № 18. 12 с.: ил.

[20] **Гончаров М.Ю.** Устройство защиты от выбросов входного тока. Пат. 144731 Российская Федерация, МПК H02M 1/16; патентообладатель ООО АЕДОН. № 2014105019/07; заявл. 11.02.2014; опубл. 27.08.2014, Бюл. № 24. 16 с.: ил.

[21] **Миронов А.А.** Ограничитель тока. Пат. 182804 Российская Федерация, МПК G05F 1/56; патентообладатель ООО Александр Электрик источники электропитания. № 2017146897; заявл. 28.12.2017; опубл. 04.09.2018, Бюл. № 25. 7 с.: ил.

[22] Datasheet, TPS2475x 12-A eFuse Circuit Protector with Current Monitor TPS24750, TPS24751, Texas Instruments Inc, (2018) 1–39.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ОРЕЛ Евгений Александрович – инженер, Акционерное общество "Научно-исследовательский институт "Вектор", без степени.
E-mail: orel.geny@yandex.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 17.05.2020

REFERENCES

[1] **A. Altowati, K. Zenger**, Analysis and robust control design of multimodule parallel DC-DC converter systems, 2011 IEEE GCC Conference and Exhibition. (2011) 89–92.

[2] **B. Sun, I. Bower**, How to parallel two DC/DC converters with digital controllers, *Analog Design Journal*, (2018) 1–4.

[3] **S. Klassen, T. Klassen, S. Luft**, Current Sharing in Digitally Controlled DC-DC Converters Connected in Parallel, 20th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM), (2019) 541–546.

[4] **H. Renaudineau, A. Houari, A. Shahin, J.P. Martin, S. Pierfederici, F. Meibody-Tabar, B. Gerardin**, Efficiency optimization through current-sharing for paralleled DC–DC boost converters with parameter estimation, *IEEE Transactions on power electronics*, 2(29) (2014) 759–767.

[5] **W. Chen, X. Ruan, H. Yan, K. Tse Chi**, DC/DC conversion systems consisting of multiple converter modules: stability, control, and experimental verifications, *IEEE Transactions on power electronics*, 6(24) (2009) 1463–1477.

[6] **V. Fuerback, M. Dall’Asta, M. Pagliosa, T.B. Lazzarin**, Analysis of modular DCM Flyback converters in input parallel connections with parametric mismatches, *Eletrônica de Potência*, 2(24) (2019) 225–234.

- [7] **J. You, M. Vilathgamuwa, N. Ghasemi**, Loop-Shaping Method Based Current Sharing Controller Design for Parallel DC/DC Converters, *IET Power Electronics*, 12(11) (2018) 1937–1945.
- [8] **J. Gordillo, C. Aguilar**, A Simple Sensorless Current Sharing Technique for Multiphase DC-DC Buck Converters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 5(32) (2016) 3480–3489.
- [9] **T. Hu, M. Khan, K. Xu, L. Zhou, A. Rana**, Design of an Input-Parallel Output-Parallel Multi-Module DC-DC Converter Using a Ring Communication Structure. *Journal of Power Electronics*, 15(4) (2015) 886–898.
- [10] **E. Cilio, G. Mitchell, M. Schupbach, A. Lostetter**, SiC intelligent multi module DC/DC converter system for space applications, 2009 IEEE Aerospace conference, (2009) 1–19.
- [11] **L. Meng, T. Dragicevic, J. Guerrero, J. Vasquez**, Stability constrained efficiency optimization for droop controlled DC-DC conversion system, *IECON 2013 – 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, (2013) 7222–7227.
- [12] **P. Cheng, G. Ding, C. Song, H. Chai, G. Xu**, Stability Analysis of Identical Paralleled DC-DC Converters with Average Current Sharing, 2019 IEEE Asia Power and Energy Engineering Conference (APEC), (2019) 60–64.
- [13] Application note 3, rev. A, Parallel operation of DC power modules, Wall Industries, inc, (2016) 1–3.
- [14] **M. Jordan**, UC3907 Load share IS simplifies parallel power supply design, Texas Instruments, (1999) 203–212.
- [15] **L. Meng, T. Dragicevic, J. Vasquez, J. Guerrero**, Tertiary and Secondary Control Levels for Efficiency Optimization and System Damping in Droop Controlled DC-DC Converters, *IEEE Transactions on Smart Grid*, 6(6) (2015) 2615–2626.
- [16] **H. Wang, M. Han, R. Han, J. Guerrero, J. Vasquez**, A Decentralized Current-Sharing Controller Endows Fast Transient Response to Parallel DC-DC Converters, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 5(33) (2018) 4362–4372.
- [17] **Y. Panov, M. Jovanovic**, Loop Gain Measurement of Paralleled DC-DC Converters With Average-Current-Sharing Control, *IEEE Transactions on power electronics*, 6(23) (2008) 1048–1053.
- [18] ООО AEDON. MDM-P DC/DC преобразователи. Режим доступа: <https://aedon.ru/catalog/dcdc/series/11> (дата обращения: 18.05.2020).
- [19] **V.R. Berg, S.N. Brodnikov, V.V. Mikheyev, A.A. Gurov, R.N. Bulanov**, Интеллектуальная система преобразования напряжения постоянного тока для динамически изменяющейся нагрузки. Пат. 2692089 Российская Федерация, МПК H02J 1/14; патентообладатель Российская Федерация, от имени которой выступает Министерство обороны Российской Федерации. № 2017137591; заявл. 26.10.2017; опubl. 21.06.2019, *Byul. № 18. 12 s.: il.*
- [20] **M.Yu. Goncharov**, Устройство защиты от выбросов входного тока. Пат. 144731 Российская Федерация, МПК H02M 1/16; патентообладатель ООО AEDON. № 2014105019/07; заявл. 11.02.2014; опubl. 27.08.2014, *Byul. № 24. 16 s.: il.*
- [21] **A.A. Mironov**, Ограничитель тока. Пат. 182804 Российская Федерация, МПК G05F 1/56; патентообладатель ООО Александр Электрик источники электропитания. № 2017146897; заявл. 28.12.2017; опubl. 04.09.2018, *Byud. № 25. 7 s.: il.*
- [22] Datasheet, TPS2475x 12-A eFuse Circuit Protector with Current Monitor TPS24750, TPS24751, Texas Instruments Inc, (2018) 1–39.

THE AUTHORS

OREL Evgeniy A. – *NII Vector*.
E-mail: orel.geny@yandex.ru

Received: 17.05.2020