

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПОСТРОЕНИЯ МОДУЛЬНЫХ DC/DC ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ПО КОНФИГУРИРУЕМОМУ ПРИНЦИПУ

Рассмотрены проблемы построения источников вторичного питания для автономных электротехнических комплексов. Показано, что срок их службы и эффективность работы могут быть улучшены при использовании двух основополагающих принципов: модульном построении системы и внедрении интеллектуальных принципов ее управления. Предлагается идея построения конфигурируемого источника питания мощностью до 10 кВт, состоящего из однотипных, серийно выпускаемых модулей, образующих вместе структуру $M \times N$, в рамках которой можно изменять конфигурацию их подключений, а также управлять током и напряжением каждого модуля.

Ключевые слова: автономный электротехнический комплекс, отказоустойчивость, энергоэффективность, цифровое управление.

Введение. Источники вторичного электропитания (ИВЭП) — ключевой элемент любого электронного устройства, занимающий до 30 % его объема и составляющий в некоторых случаях до 50 % его стоимости [1].

Надежность источника питания во многом определяет срок службы устройства: известно, что около трети всех отказов электрооборудования вызвано неполадками в ИВЭП [2, 3]. Кроме того, ИВЭП входят в состав любого электротехнического комплекса [4–6], и от качества их работы нередко зависят объекты критически важной инфраструктуры [7–9].

Функционирование многих электротехнических комплексов ведется в труднодоступной местности, в условиях, где нет обслуживающего персонала и некому выполнить ремонтно-восстановительные работы. Условия могут включать холод, жару, повышенную влажность, запыленность, тряску и т.д. При автономной работе отремонтировать источник питания будет некому, поэтому он должен быть как можно более надежен и энергоэффективен.

Цель исследования — показать, что добиться повышения данных качеств в ИВЭП мощностью до 10 кВт возможно при использовании двух основополагающих принципов: модульном построении системы и внедрении интеллектуальных принципов её управления. Актуальность работы связана с постоянно растущими требованиями к качеству работы ИВЭП и их функциональным возможностям [10, 11], особенно в период повсеместного внедрения цифровых и энергосберегающих технологий [12, 13].

Материалы и методы исследования. ИВЭП, предназначенные для уличных условий эксплуата-

ции, как правило, располагаются в закрытом герметичном корпусе и имеют вид наподобие рис. 1. По мере необходимости внутрь корпуса могут добавляться датчики температуры, аккумуляторная батарея, устройства охлаждения или подогрева, тамперные контакты и т.д. Конструкция источников в большинстве случаев является типовой. Унификация обеспечивает взаимозаменяемость элементов и является одним из основных способов повышения надежности [14].

Помимо конструкции, к методам повышения надежности ИВЭП относятся применение качественных электронных компонентов, использование проверенных схемотехнических решений, минимизация количества исполнительных блоков, нагрузка элементов с запасом по току и напряжению, добавление защит, использование резервирования, внедрение углубленной самодиагностики, интеллектуальных принципов управления и др.

Данные принципы давно и широко известны. Однако по мере развития силовой электроники многие старые идеи, предложенные десятилетиями назад, но не нашедшие должного применения, сегодня могут обрести второе дыхание. К одной из таких идей относится использование модульного принципа построения источника питания. Наиболее распространенным вариантом реализации этого принципа являются системы с параллельной архитектурой, состоящие из нескольких N однотипных ячеек, работающих на общую нагрузку [15]. Параллельную архитектуру обычно используют с тремя целями: получить необходимую выходную мощность, повысить отказоустойчивость системы и снизить значение пульсаций выходного напряжения путем фазового сдвига управляющих сигналов

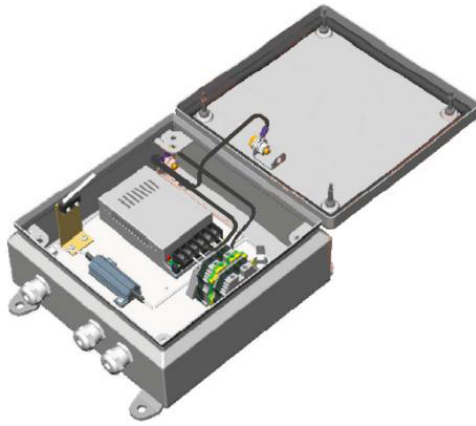


Рис. 1. ИВЭП для уличных условий эксплуатации

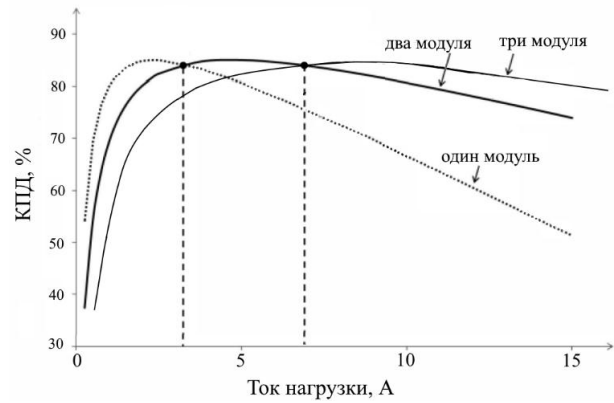


Рис. 2. Зависимость КПД источника питания от числа работающих параллельно модулей

ячеек, что повышает общую эквивалентную частоту преобразования [16].

Главными препятствиями распространению модульных ИВЭП всегда являлись увеличение стоимости, массогабаритов, числа элементов, трудности с равномерным распределением мощности между модулями [17]. Однако на настоящий момент большинство из этих проблем могут быть успешно преодолены. Современные модули питания стали гораздо компактнее [18–20], дешевле [21, 22], энергоэффективнее [23–25] и надежнее [26–28]. Поэтому использование нескольких маломощных модулей питания становится равнозначно использованию одного мощного источника практически по всем критериям: цене, габаритам, КПД и надежности. Все возможные проблемы и пути их решения приведены в табл. 1.

При использовании единственного мощного источника питания на его силовую схему приходится полная мощность, потребляемая нагрузкой, что вызывает перегрев отдельных электронных компонентов и вынуждает использовать более дорогостоящую элементную базу. В модульном решении нагрузка распределяется между несколькими каналами, в результате чего элементы внутри модулей оказываются дешевле, а срок службы — дольше [40, 41].

Если нагрузка источника питания не статична, а динамически меняется, то модульная архитектура позволяет оптимизировать работу источника

во всем диапазоне изменения тока нагрузки. При использовании единственного мощного источника его КПД при слишком малых и слишком больших токах нагрузки будет заметно снижаться [42, 43], в то время как использование нескольких параллельных модулей при условии контролируемого процесса их включения и выключения позволяет поддерживать эффективность преобразования стабильно высокой (рис. 2) [44, 45].

Модульная архитектура позволяет также контролировать и замедлять процесс устаревания элементов источника [46]. При использовании скользящего способа резервирования $N+1+K$ [47] возможна автоматическая временная ротация, при которой через заранее установленные промежутки времени происходит замена отработавших $(N+1)$ модулей на ненагруженные K модули. Таким образом, модули постоянно чередуются, в разы продлевая срок своей службы.

Модули питания можно соединять по выходу не только параллельно, но и последовательно, получая увеличение выходного напряжения. При большом числе модулей возможно организовать их параллельно-последовательное соединение. При этом, если научиться управлять структурой соединений модулей друг с другом, а также воздействовать на каждый отдельно взятый модуль с единого управляющего устройства, то такая система будет значительно отличаться от простой модульной архитектуры. Появляется возможность обеспечить

Таблица 1

Преодоление ограничений модульных источников питания

№	Проблема	Решение
1	Высокая цена	Удешевление модулей питания благодаря новым технологиям [29, 30]
2	Увеличение габаритов	Рост удельной электрической мощности модулей (3–6 кВт/дм ³ и более) [31, 32]
3	Неравномерное распределение мощности	Использование активных методов выравнивания мощности [33, 34]
4	Увеличение числа компонентов	Оптимизация маршрута протекания тока [35], выключение части модулей при легкой нагрузке [36]
5	Долговечность работы	Удержание части модулей в резерве [37], чередование работающих модулей с целью замедления их устаревания [38]
6	Сложность схемотехники для согласования работы модулей	Замена схемотехники на цифровое управление с программным кодом
7	Малый КПД при работе на слишком малую или слишком большую нагрузку	Изменение числа работающих модулей с целью оптимизации КПД системы [39]

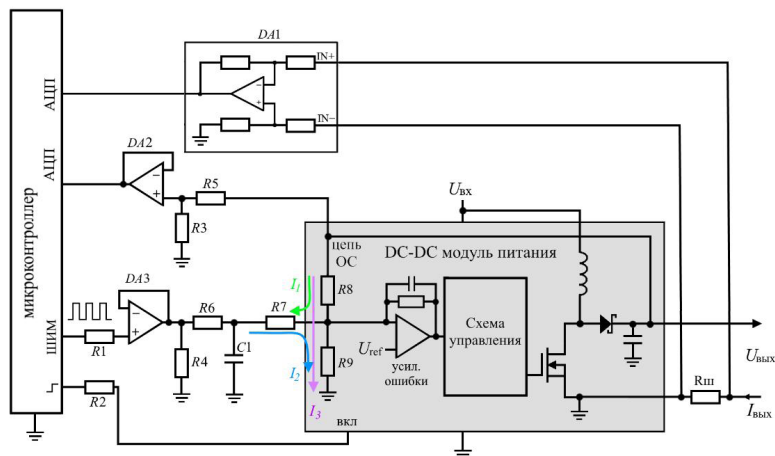


Рис. 3. Принцип управления модулем питания с микроконтроллера

определенный уровень технического интеллекта и, как следствие, достигнуть свойства адаптивности в виде оперативно изменяемых функций и значений параметров в зависимости от решаемой задачи. Такую систему можно назвать не просто регулируемой, а конфигурируемой.

Реализация конфигурируемого источника питания. В рамках конфигурируемой системы работа всех модулей питания корректируется одним микроконтроллером (МК) посредством использования обратных связей (ОС). В качестве модулей питания могут выступать не специально разработанные для этой системы преобразователи, а покупные однотипные модули. Если на них имеются регулировочные потенциометры, следует их установить в одинаковое (например, среднее) положение. Поскольку внутри каждого модуля реализуется аналоговое управление, а МК осуществляет цифровое управление, результирующий способ регулирования выходного напряжения и тока модулей будет смешанным. Схема подключения одного модуля питания, на который подано входное постоянное напряжение $U_{вх}$, к МК показана на рис. 3. Чтобы осуществить управление модулем, необходимо соединиться с ним в трех точках, а также добавить на выход модуля токовый шунт $R_{ш}$ с целью измерения выходного тока.

На схеме видно (рис. 3), что управление модулем задействует у МК четыре ножки: один выход с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ), два канала аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и один выход для дистанционного включения/выключения модуля через его управляющий вход «вкл». Модуль и МК также должны иметь общую землю. При помощи АЦП МК измеряет значение выходного напряжения $U_{вых}$ и тока $I_{вых}$ модуля. Для согласования уровней измерительных сигналов используются микросхемы $DA1$ и $DA2$. Микросхема $DA1$ осуществляет усиление сигнала с токового шунта $R_{ш}$. А резистивный делитель $R3-R5$ и повторитель напряжения на операционном усилителе (ОУ) $DA2$ масштабируют сигнал ОС о значении выходного напряжения модуля.

Операционный усилитель $DA3$ является повторителем напряжения, однако благодаря сглаживающему конденсатору $C1$ прямоугольные импульсы ШИМ с МК преобразуются в постоянный уровень напряжения, равный среднему за период значению прямоугольного сигнала. Этот уровень вносит свою

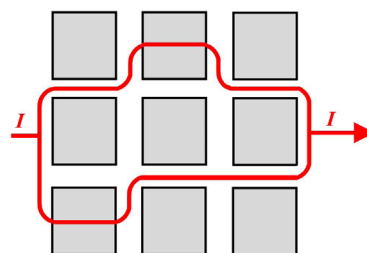


Рис. 4. Формирование разных путей протекания тока в источнике

добавку к напряжению на резистивном делителе $R8-R9$ цепи ОС модуля питания, изменяя значение выходного напряжения $U_{вых}$. Изменяя скважность импульсов ШИМ на выводе МК, можно варьировать уровень постоянного напряжения на конденсаторе $C1$, в результате чего к току I_3 , протекающему через делитель $R8-R9$, добавляется управляемый ток I_2 (или вычитается ток I_1).

Таким образом, один мощный источник питания может быть заменен на несколько маломощных модулей, образующих в общем случае структуру $M \times N$. По входу все модули соединены параллельно, но соединения по выходу можно настраивать. На рис. 4 показана структура 3×3 , в рамках которой возможно организовать различные пути протекания тока, обеспечивая скользкое резервирование или решая оптимизационные задачи.

Модули, находящиеся в одном ряду, можно включать по выходу параллельно друг другу. Модули из разных рядов можно включать либо последовательно, либо параллельно друг другу в зависимости от решаемой задачи. Конфигурация системы происходит автоматически в соответствии с программным кодом, заложенным в центральное управляющее устройство (микроконтроллер). Оно же занимается выравниванием мощности между всеми параллельно работающими ячейками. Для этого внутри управляющего МК должен вестись учет числа работающих модулей и структуры их подключения. Существуют разные способы выравнивания токов параллельно работающих преобразователей [48–50]. Пример реализации алгоритма выравнивания токов показан на рис. 5. МК при помощи АЦП измеряет значение выходных токов и напряжений модулей. Значения измеренных то-

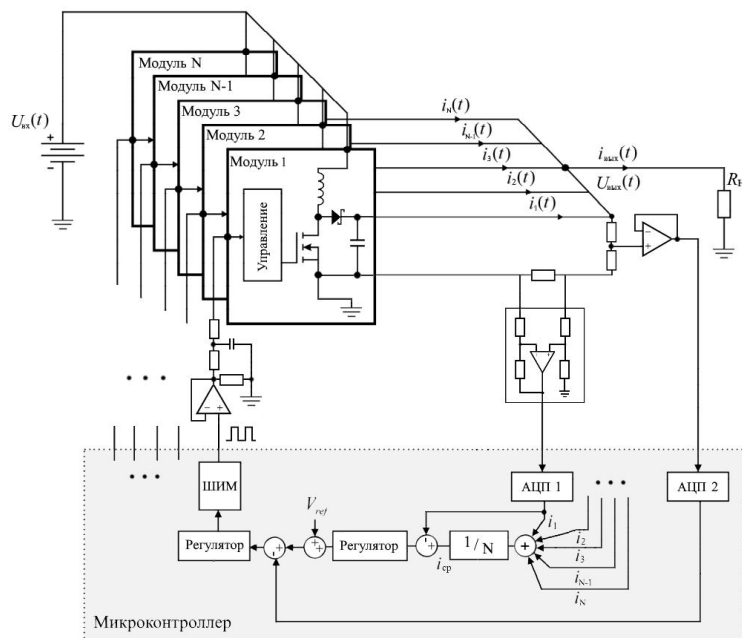


Рис. 5. Выравнивание выходных токов параллельно работающих модулей питания

ков $i_1...i_N$ суммируются, полученная сумма делится на N , в результате чего получается среднее значение тока $i_{ср}$ преобразователей. После этого выходной ток каждого отдельного модуля сравнивается с вычисленным средним током $i_{ср}$, полученное значение после прохождения регулятора добавляется к напряжению задания U_{ref}

В результате выходное напряжение модуля питания корректируется таким образом, чтобы его выходной ток сравнился со средним значением тока всех преобразователей. Реализации алгоритма в программном коде позволяет обойтись без усложнений схемотехники и повышает общую надежность системы.

Коммутация модулей питания друг с другом осуществляется транзисторными ключами. Схема соединений модулей друг с другом, а также с центральным управляющим МК показана на рис. 6. Для структуры 3×3 модулей понадобится, по меньшей мере, 20 ключей $Q1...Q20$. Желательно, чтобы значение их внутреннего сопротивления $R_{си}$ в открытом состоянии было как можно меньше. Однако, поскольку единственная функция этих ключей — соединять модули, требования к ним являются минимальными, позволяя использовать недорогие решения. Управление ключами займет 20 ножек МК, но это количество может быть в разы сокращено добавлением микросхемы-расширителя порта. Ключи $Q1...Q4$, $Q7...Q10$ и $Q15$, $Q16$, $Q19$, $Q20$ отвечают за параллельное соединение модулей в одном ряду. Ключи $Q5$, $Q6$, $Q11$, $Q12$ обеспечивают параллельное соединение рядов друг с другом. Ключи $Q13$, $Q14$, $Q17$, $Q18$ соединяют ряды последовательно по выходу. Замыканием соответствующих ключей МК создает в источнике нужную конфигурируемую архитектуру. Серыми толстыми линиями показаны шины входного напряжения $U_{вх}$, черными толстыми — шины выходного напряжения $U_{вых}$ модулей, линиями «изм 1...9» — измерительные цепи выходных токов модулей, линиями «упр 1...9» — цепи управления модулями.

Поскольку каждый модуль обладает на выходе фильтрующим конденсатором, суммарная выход-

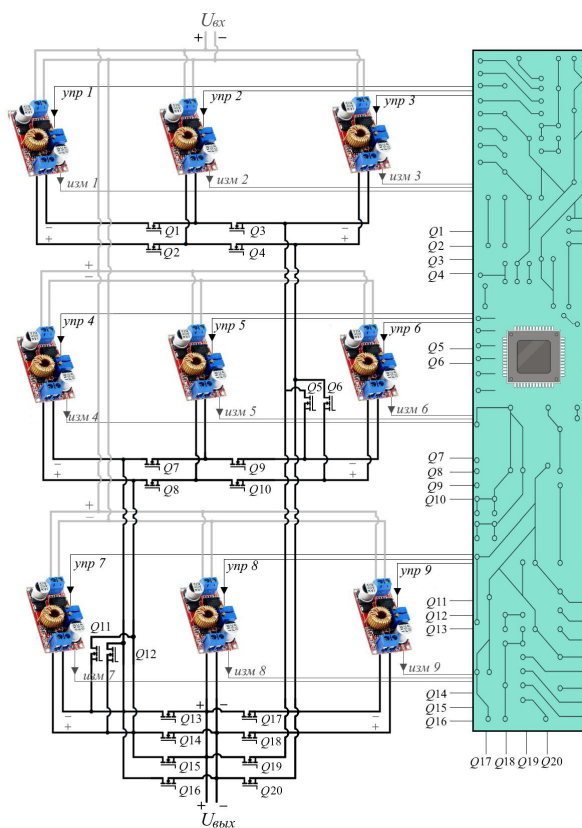


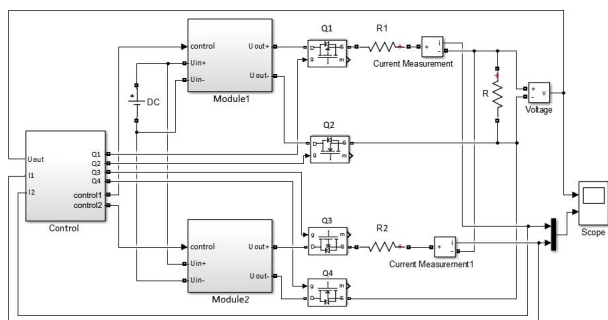
Рис. 6. Схема соединения модулей питания в структуре 3×3

ная емкость при параллельном соединении модулей друг с другом кратна их числу P :

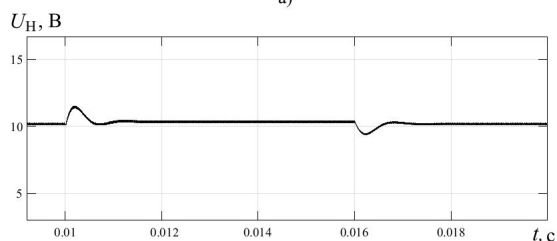
$$C_{вых} = P \cdot C_{вых1}. \quad (1)$$

Суммарная входная емкость будет равна сумме входных емкостей всех установленных модулей:

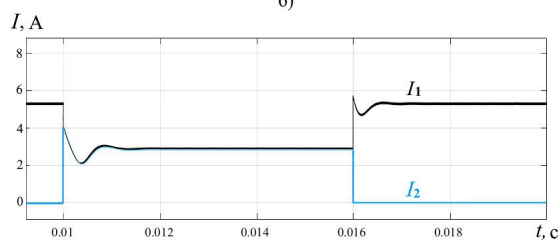
$$C_{вх} = \sum C_{вх i}. \quad (2)$$



а)



б)



в)

Рис. 7. Модель параллельно соединенных модулей:
а) схема модели;
б) осциллограмма напряжения на нагрузке;
в) осциллограммы выходных токов модулей

При последовательном соединении по выходу трех рядов модулей питания максимально достижимое выходное напряжение источника равно

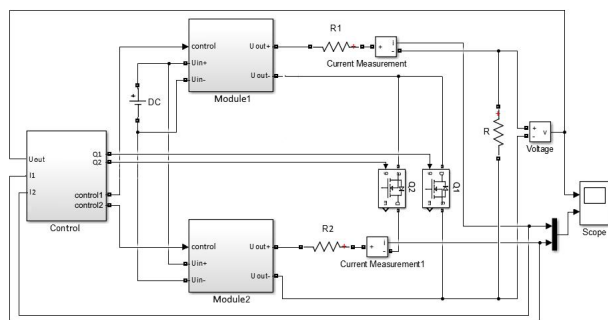
$$U_{\text{вых max}} = 3U_{\text{вых1 max}}. \quad (3)$$

При параллельном соединении по выходу всех модулей питания структуры 3×3 максимальный выходной ток равен

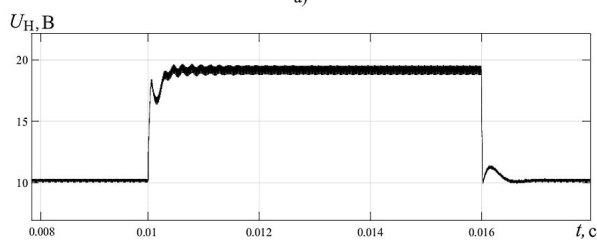
$$I_{\text{вых max}} = 9I_{\text{вых1 max}}. \quad (4)$$

Количественная оценка показывает, что для управления структурой 3×3 модулей потребуется не менее 30 ножек микроконтроллера при условии использования микросхемы-расширителя портов. Внутри МК необходимо иметь многоканальные АЦП и таймеры, работающие в режиме ШИМ-генерации. В качестве дополнительных электронных компонентов понадобятся микросхемы ОУ и микросхемы усиления сигнала с датчиков тока. Количество коммутирующих транзисторов Q_i с ростом числа модулей растет в геометрической прогрессии, поэтому число модулей не должно быть слишком большим, но не должно быть и слишком маленьким. Для каждой решаемой задачи существует свое оптимальное количество модулей структуры $M \times N$.

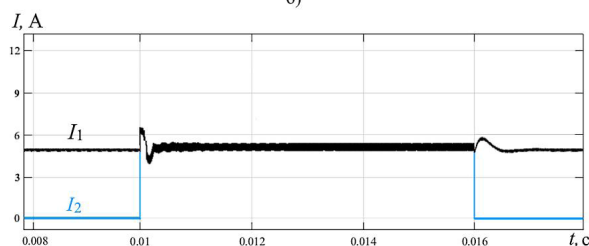
При использовании на выходе источника дополнительных ключей Q_i и большого общего числа модулей, возможно организовать одновременное питание нескольких различных потребителей с настройкой параметров питания каждого из них.



а)



б)



в)

Рис. 8. Модель последовательно соединенных модулей:
а) схема модели;
б) осциллограмма напряжения на нагрузке;
в) осциллограммы выходных токов модулей

При наступлении аварийной ситуации в каком-либо модуле сначала срабатывают внутренние схемы его защиты. После этого центральный МК, зафиксировав значительное отклонение выходных параметров модуля от его номинальных значений, проводит полное отключение данного модуля, размыкает транзисторные ключи на его выходе и запускает резервный модуль, включенный параллельно. По окончании этих действий состояние системы стабилизируется.

Результаты и обсуждение. Для проверки качества коммутационных процессов при переключении модулей в программной среде Matlab/Simulink была создана компьютерная модель, имитирующая подключение друг к другу работающих модулей при бесперебойном питании нагрузки.

На рис. 7а показано включение двух модулей параллельно при работе на общую нагрузку R . Коммутация происходит при помощи транзисторных ключей $Q1...Q4$, управляемых с центрального управляющего устройства, имитирующего работу МК. Первоначально ключи $Q1$ и $Q2$ в модели замкнуты, ключи $Q3$ и $Q4$ разомкнуты. В момент времени $t = 0,01$ с второй модуль питания включается параллельно первому путем замыкания транзисторов $Q3$ и $Q4$. В момент $t = 0,016$ с эти же транзисторы размыкаются, в результате чего второй модуль отключается от нагрузки. Коммутация модулей сопровождается кратковременными переходными процессами: на рис. 7б показана осциллограмма напряжения на нагрузке U_H , на рис. 7в показаны осциллограммы изменения выходных токов модулей I_1 и I_2 .

На рис. 8а показана модель соединения двух модулей питания последовательно по выходу для питания нагрузки R .

Осуществление коммутации происходит при помощи транзисторных ключей $Q1$ и $Q2$, управляемых с центрального управляющего устройства.

Изначально ключ $Q1$ замкнут, $Q2$ — разомкнут.

В момент времени $t = 0,01$ с второй модуль включается последовательно первому путем одновременного замыкания $Q2$ и размыкания $Q1$. В момент $t = 0,016$ с ключи $Q1$ и $Q2$ возвращаются в свое первоначальное состояние, вследствие чего второй модуль прекращает питать нагрузку. На рис. 8б показаны переходные процессы напряжения на нагрузке $U_{нр}$, на рис. 8в показаны осциллограммы выходных токов модулей I_1 и I_2 .

Качество переходных процессов зависит от запаса устойчивости системы, которая, в свою очередь, определяется значением выходных импедансов модулей, значением коэффициентов регуляторов в контурах ОС внутри модулей, а также значениями коэффициентов цифрового регулятора в контуре ОС внутри МК.

Выводы.

1. Конфигурируемый источник питания — это модульный источник, в котором имеется возможность изменять структуру подключения модулей к друг другу, а также регулировать значение их выходных токов и напряжений. Идея конфигурируемого источника является развитием принципов построения модульных систем электропитания.

2. Благодаря гибкости настройки конфигурируемый источник может быть адаптирован для разных условий. Характеристики источника могут быть значительно улучшены, если заложить в него интеллектуальные принципы управления. Достаточно реализуемой выглядит идея, чтобы всё, что требовалось на этапе запуска системы, — это вставить однотипные модули питания в предусмотренные под них «гнезда» (принцип «plug-and-play»), после чего система сама выполнит самодиагностику и выберет наиболее оптимальный способ питания нагрузки в зависимости от решаемой задачи.

3. Благодаря развитию силовой электроники современные модули питания стали гораздо компактнее, эффективнее и дешевле своих предшественников. Поэтому использование нескольких маломощных модулей питания становится равнозначно использованию одного мощного источника практически по всем критериям: цене, габаритам, КПД и надежности. Переход к более низкому уровню разукрупнения приводит к важному недостатку — более сложной организации управления, однако позволяет улучшить возможности использования источника.

4. ИВЭП в составе автономных электротехнических комплексов должны отличаться повышенной долговечностью и эффективностью работы. В источниках мощностью до 10 кВт этих требований можно достичь, если выполнить их по конфигурируемому принципу. Такой источник сможет отслеживать свое состояние, оптимизировать КПД, изолировать неисправные модули и продлевать срок своей службы благодаря скользящему резервированию.

Выбор конфигурации системы осуществляет центральный управляющий микроконтроллер. Реализации управления в программном коде позволяет обойтись без усложнений схемотехники и повышает общую надежность системы.

1. Заика П. Н., Исаев В. М., Колосов В. А. [и др.] Совершенствование систем вторичного электропитания отечественных объектов // Электропитание. 2009. № 1. С. 5–7.
2. Аполонский С. М., Куклев Ю. В. Низковольтные электрические аппараты // Записки Горного института. 2016. Т. 218. С. 251–260.
3. Falck J., Felgemacher C., Rojko A. [et al.] Reliability of Power Electronic Systems: An Industry Perspective // IEEE Industrial Electronics Magazine. 2018. Vol. 12 (2). P. 24–35. DOI: 10.1109/MIE.2018.2825481.
4. Колесниченко С. В., Афанасьева О. В. Теоретические аспекты оценки технического уровня электротехнических комплексов // Записки Горного института. 2018. Т. 230. С. 167–175. DOI: 10.25515/PMI.2018.2.167.
5. Шклярский Я. Э., Замятина Е. Н., Замятин Е. О. Оценка энергетической эффективности электротехнического комплекса // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. № 3. С. 339–347.
6. Abramovich B., Sychev Y., Prokhorova V. Electrical complex of combined power supply on the base of renewables and hybrid correction device // Proceedings of the XXth Conference of Open Innovations Association FRUCT. 2017. P. 3–9.
7. Паньков И. А., Фролов В. Я. Моделирование судовой электроэнергетической системы малого гидрографического судна «Вайгач» // Записки Горного института. 2016. Т. 222. С. 852–857. DOI: 10.18454/PMI.2016.6.852.
8. Belsky A., Dobush V., Ivanchenko D. [et al.] Electrotechnical complex for autonomous power supply of oil leakage detection systems and stop valves drive control systems for pipelines in arctic region // Journal of Physics: Conference Series. 2021. № 1441. P. 1–7. DOI: 10.1088/1742-6596/1753/1/012062.
9. Орлов П. С. Инженерно-технические мероприятия по повышению надежности электроснабжения объектов строительства // Записки Горного института. 2016. Т. 222. С. 845–851. DOI: 10.18454/pmi.2016.6.845.
10. Каталупов О. И. Модульный источник питания с конфигурируемой структурой // Научный журнал КубГАУ. 2017. № 131. С. 1192–1203. DOI: 10.21515/1990-4665-131-099.
11. Аверин С. В., Крючков В. В., Следков Ю. Г. [и др.] Силовые каскады однотактных преобразователей постоянного напряжения повышенной эффективности // Электропитание. 2015. № 1. С. 34–40.
12. Сафиуллин Р. Н., Афанасьев А. С., Резниченко В. В. Концепция развития систем мониторинга и управления интеллектуальных технических комплексов // Записки Горного института. 2019. Т. 237. С. 322–330. DOI: 10.31897/pmi.2019.3.322.
13. Kovalchuk M., Skamyin A. Developing the System of Monitoring and Diagnostics to Increase the Availability of Equipment // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2017. Vol. 66 (1). P. 1–7. DOI: 10.1088/1742-6596/755/1/011001.
14. Эраносян С. Унификация — это основной путь создания высоконадежных систем вторичного электропитания для комплексов военного и коммерческого назначения. Часть 1 // Силовая электроника. 2014. № 5. С. 74–78.
15. Fuerback V. B., Dall'Asta M. S., Pagliosa M. A. [et al.] Analysis of modular DCM Flyback converters in input parallel connections with parametric mismatches // Eletrônica de Potência. 2019. Vol. 24 (2). P. 225–234. DOI: 10.18618/REP.2019.2.0052.
16. Dutta S., Lu M., Johnson B. Decentralized PWM Interleaving for Ripple Minimization in both Symmetric and Asymmetric Parallel-connected DC-DC Converters // 2021 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). 2021. P. 2894–2901. DOI: 10.1109/ECCE47101.2021.9595611.
17. Конев Ю. И. Техничко-экономические проблемы энергетической электроники // Электропитание. 2014. № 1. С. 6–10.

18. Butler W. Enabling a Powerful Decade of Changes [Flyback] // IEEE Power Electronics Magazine. 2019. Vol. 6 (1). P. 18–26. DOI: 10.1109/MPPEL.2018.2886103.
19. Fei C., Lee F., Li Q. High-Efficiency high-power-density LLC converter with an integrated planar matrix transformer for high output-current Applications // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2017. Vol. 64 (11). P. 9072–9082. DOI: 10.1109/TIE.2017.2674599.
20. Лукин А. В., Макаров В. В. Современные DC-DC преобразователи электрической энергии // Электропитание. 2014. № 2. С. 42–44.
21. Mahesh M., Kumar K., Abebe M. [et al.] A review on enabling technologies for high power density power electronic applications // Materials Today: Proceedings. Vol. 46 (11). P. 3888–3892. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.02.340.
22. Iannaccone G., Sbrana C., Morelli I. [et al.] Power Electronics Based on Wide-Bandgap Semiconductors: Opportunities and Challenges // IEEE Access. 2021. Vol. 9. P. 139446–139456. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3118897.
23. Овчинников Д. А., Куиман Д. В. Построение высокоэффективных телекоммуникационных выпрямителей с КПД более 95 % // Электропитание. 2014. № 4. С. 29–33.
24. Tan D. Emerging System Applications and Technological Trends in Power Electronics: Power electronics is increasingly cutting across traditional boundaries // IEEE Power Electronics Magazine. 2015. Vol. 2 (2). P. 38–47. DOI: 10.1109/MPPEL.2015.2422051.
25. Nakao H., Yonezawa Y., Nakashima Y. Recent Trend in Power Electronics for ICT Systems // 2018 International Power Electronics Conference (IPEC-Niigata 2018 — ECCE Asia). P. 196–200. DOI: 10.23919/IPEC.2018.8507607.
26. Афанасьев А. А., Шашола Д. А. Радиационно стойкие модули питания на отечественной элементной базе // Электропитание. 2015. № 3. С. 39–42.
27. Zhang W., Xu D., Enjeti P. [et al.] Survey on Fault-Tolerant Techniques for Power Electronic Converters // IEEE Transactions on Power Electronics. 2014. Vol. 29 (12). P. 6319–6331. DOI: 10.1109/TPEL.2014.2304561.
28. Ашировская А. В., Тотай А. В., Зяблова Е. С. Прогнозирование потенциально ненадежных силовых модулей по изменению тока утечки на основе метода Монте-Карло // Вестник Брянского государственного технического университета. 2017. № 8 (61). С. 86–92. DOI: 10.12737/article_5a377a0024f012.91270652.
29. Мелешин В. И. О глубине и темпах развития силовой электроники // Электропитание. 2014. № 1. С. 11–16.
30. Pilawa-Podgurski R. The Future of Power Electronics Circuits: New Technologies and Managed Complexity Will Drive the Future // IEEE Power Electronics Magazine. 2020. Vol. 7 (2). P. 41–43. DOI: 10.1109/MPPEL.2020.2988078.
31. Morroni J., Pradeep S. Understanding the Trade-offs and Technologies to Increase Power Density // TI Power. Texas Instruments. 2020. P. 1–13.
32. Usman C. Powerful Solutions Come in small Packages // Texas Instruments. 2016. P. 1–7.
33. Cheng P., Ding G., Song C. [et al.] Stability Analysis of Identical Paralleled DC-DC Converters with Average Current Sharing // 2019 IEEE Asia Power and Energy Engineering Conference (APEEC). Chengdu, 2019. P. 60–64. DOI: 10.1109/APEEC.2019.8720726.
34. You J., Vilathgamuwa M., Ghasemi N. Loop-Sharing Method Based Current Sharing Controller Design for Parallel DC/DC Converters // IET Power Electronics. 2018. Vol. 12 (11). P. 1937–1945. DOI: 10.1049/iet-pel.2017.0146.
35. Meng L., Dragicevic T., Guerrero J. [et al.] Stability constrained efficiency optimization for droop controlled DC-DC conversion system // IECON 2013 — 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. 2013. P. 7222–7227. DOI: 10.1109/IECON.2013.6700333.
36. Vogt T., Peters A., Norbert F. [et al.] Power profile based selection and operation optimization of parallel-connected power converter combinations // 2014 International Power Electronics Conference (IPEC-Hiroshima 2014 — ECCE ASIA). 2014. P. 2887–2892. DOI: 10.1109/IPEC.2014.6870091.
37. Hwu K., Shieh J. Applying Module-Link Method to Multiple Power Supplies Paralleled // IEEE IECON 2017 — 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Beijing, 2017. P. 901–903. DOI: 10.1109/IECON.2017.8216155.
38. Andresen M., Kurpat J., Raveendran V. [et al.] Active thermal control for delaying maintenance of power electronics converters // Chinese Journal of Electrical Engineering. 2018. Vol. 4 (3). P. 13–20. DOI: 10.23919/CJEE.2018.8471285.
39. Valshin A., Vildanov R. A Parallel Connection of the Power Supplies // 2006 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering. 2006. P. 316–323. DOI: 10.1109/APEDE.2006.307431.
40. Liserre M., Andresen M., Costa L. [et al.] Power Routing in Modular Smart Transformers // IEEE Industrial Electronics Magazine. 2016. Vol. 10 (3). P. 43–53. DOI: 10.1109/MIE.2016.2588898.
41. Liserre M., Buticchi G., Leon J. [et al.] Power Routing: A New Paradigm for Maintenance Scheduling // IEEE Industrial Electronics Magazine. 2020. Vol. 14 (3). P. 33–45. DOI: 10.1109/MIE.2020.2975049.
42. Belsky A., Dobush V., Ivanchenko D. Wind-diesel hybrid system with flexible DC-bus voltage level // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). 2015. P. 1–4. DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7146996.
43. Meng L., Dragicevic T., Vasquez J. [et al.] Tertiary and Secondary Control Levels for Efficiency Optimization and System Damping in Droop Controlled DC-DC Converters // IEEE Transactions on Smart Grid. 2015. Vol. 6 (6). P. 2615–2626. DOI: 10.1109/TSG.2015.2435055.
44. Kohama T., Takeshita K., Tsuji S. Simple estimating method for voltage fluctuation in paralleled converter system with optimized on-off control // 2015 IEEE International Telecommunications Energy Conference (INTELEC). 2015. P. 1–6. DOI: 10.1109/INTLEEC.2015.7572342.
45. Kohama T., Sogawa Y., Tsuji S. Design of optimized on-off control to improve efficiency of paralleled converter system // 2014 International Power Electronics Conference (IPEC-Hiroshima 2014 — ECCE ASIA). 2014. P. 2781–2786. DOI: 10.1109/IPEC.2014.6870075.
46. Andresen M., Raveendran V., Buticchi G. [et al.] Lifetime-Based Power Routing in Parallel Converters for Smart Transformer Application // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2018. Vol. 65 (2). P. 1675–1684. DOI: 10.1109/TIE.2017.2733426.
47. Либенко Ю. Н. Повышение эффективности преобразователей напряжения с параллельной структурой силовой части путем применения в них магистрально-модульной идеологии // Электропитание. 2014. № 3. С. 13–19.
48. Huang Y., Tse C. Circuit Theoretic Classification of Parallel Connected DC-DC Converters // IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers. 2007. Vol. 54 (5). P. 1099–1108. DOI: 10.1109/TCSI.2007.890631.
49. Altowati A., Zenger K. Analysis and robust control design of multimodule parallel DC-DC converter systems // 2011 IEEE GCC Conference and Exhibition (GCC). 2011. P. 89–92. DOI: 10.1109/IEEEGCC.2011.5752627.
50. 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. P. 541–546. DOI: 10.1109/EDM.2019.8823233.

«Электроэнергетика и электромеханика», декан энергетического факультета Санкт-Петербургского горного университета, г. Санкт-Петербург.

SPIN-код: 2013-7319

AuthorID (РИНЦ): 621595

ORCID: 0000-0001-6091-6916

AuthorID (SCOPUS): 57202303975

ResearcherID: 1913073

Адрес для переписки: shpenst@spmi.ru

ОРЕЛ Евгений Александрович, аспирант по направлению «Электротехнические комплексы и системы» Санкт-Петербургского горного университета, г. Санкт-Петербург.

SPIN-код: 2206-3690

AuthorID (РИНЦ): 964191

ORCID: 0000-0003-4965-0998

AuthorID (SCOPUS): 57317689900

Адрес для переписки: orel.geny@yandex.ru

Для цитирования

Шпенст В. А., Орел Е. А. Оценка возможности построения модульных DC/DC источников электропитания по конфигурируемому принципу // Омский научный вестник. 2022. № 2 (182). С. 64 – 71. DOI: 10.25206/1813-8225-2022-182-64-71.

Статья поступила в редакцию 22.01.2022 г.

© В. А. Шпенст, Е. А. Орел