



## СПОСОБЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА В УСЛОВИЯХ АРКТИКИ

В.А. Шпенст, Е.А. Орел

Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, Россия

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6091-6916>, [shpenst@spmi.ru](mailto:shpenst@spmi.ru)

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4965-0998>, [orel.geny@yandex.ru](mailto:orel.geny@yandex.ru)

**Резюме:** *ЦЕЛЬ.* Рассмотреть особенности разработки и эксплуатации источников вторичного питания постоянного тока для условий работы в Арктике, показать ключевые проблемы и существующие методы их решения, выделить перспективные направления в проектировании данного класса устройств. *МЕТОДЫ.* Работа носит преимущественно обзорный характер и затрагивает вопросы конструирования, схемотехники, принципов управления, поддержания теплового равновесия, выбора элементной базы, миниатюризации. Первая часть работы посвящена обзору научных публикаций и патентов, во второй части рассматривается идея использования в морозоустойчивых источниках питания параллельной архитектуры, которая, в свою очередь, позволяет внедрить модульный принцип построения. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* В работе изучаются вопросы адаптации модульного подхода к специфике морозоустойчивых источников питания. С его помощью можно построить самовосстанавливающийся, конфигурируемый, ремонтпригодный источник широкого применения. При модульной конструкции весь электротехнический комплекс состоит из включенных параллельно однотипных ячеек-модулей, размещенных в одном герметичном, подогреваемом корпусе, наружу которого выведены силовые выводы для подключения первичного источника питания и потребителей, а также простейшие блоки управления и индикации. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Параллельное включение ячеек-модулей позволяет заложить в источник достаточный запас по мощности, выполнить быструю замену неисправных модулей на новые без прекращения питания потребителей, с легкостью увеличить/сократить мощность источника изменением числа работающих ячеек. Система приобретает особые преимущества, если уровни выходных напряжений ячеек регулируемы. В этом случае можно построить универсальный конфигурируемый источник питания широкого применения, являющийся новинкой на рынке. Если сгруппировать ячейки по выходу, можно использовать один источник для одновременного питания нескольких разных потребителей. Комплект запасных частей к источнику максимально прост и представляет собой готовые ячейки-модули и соединительные провода. Результаты работы могут быть использованы при разработке отказоустойчивых вторичных источников питания, работающих в жестких условиях эксплуатации.

**Ключевые слова:** электротехнический комплекс постоянного тока; источник вторичного питания; Арктика; модульность; надежность.

**Для цитирования:** Шпенст В.А., Орел Е.А. Способы обеспечения устойчивости работы электротехнических комплексов постоянного тока в условиях Арктики // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 4. С. 166-179. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-4-166-179.

## METHODS OF ENSURING THE OPERATIONAL STABILITY OF DC-DC POWER SUPPLY IN ARCTIC CONDITIONS

VA. Shpenst, EA. Orel

Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6091-6916>, [shpenst@spmi.ru](mailto:shpenst@spmi.ru)

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4965-0998>, [orel.geny@yandex.ru](mailto:orel.geny@yandex.ru)

**Abstract:** *THE PURPOSE.* To consider the features of development and exploitation of DC-DC power supplies for Arctic conditions, to show the key problems and existing methods of solving them, to identify prospective directions in the design of this type of devices. *METHODS.* The work is mainly an over-view with the questions of construction, circuit design, control principles, maintaining thermal equilibrium, choosing of electric elements and miniaturization. The first part of the article is devoted to the review of scientific publications and patents, in the second part the idea of using a parallel architecture in frost-resistant power supplies is considered, giving an opportunity to adapt modular principle of device construction. *RESULTS.* The article examines the issues of adapting the modular approach to the specifics of frost-resistant power supplies. In this way you can build a self-healing, configurable, easy-to-repair power supply of wide application. With modular construction principle the entire electrical complex consists of parallel-connected cells, placed in one hermetic and heated case (a case with connectors on the surface, as well as the control and display units). *CONCLUSION.* Parallel connection of the cells allows to provide a significant power reserve in the power supply, to perform a quick replacement of faulty modules without interrupting the power supply process, to increase/reduce the system power easily by changing the number of working cells. The system acquires special advantages, if the output voltage levels of the cells are adjustable. In this case, it is possible to build a universal configurable power supply of wide application, which is a novelty on the market. If you group the cells on the output, you can use one power supply for several different consumers. The spare parts for the power supply are as simple as possible and consists of ready-made cells and connecting wires. The obtained results can be used in development of fault-tolerant secondary DC-DC power supplies for hard operating conditions.

**Keywords:** DC-DC electrical complex; secondary power supply; Arctic; modularity; reliability.

**For citation:** Shpenst VA., Orel EA. Methods of ensuring the operational stability of dc-dc power supply in arctic conditions. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2021; 23(4): 166-179. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-4-166-179.

### Введение

Арктика и Антарктика – самые холодные регионы нашей планеты. Температура воздуха в полярных широтах в зимние месяцы опускается ниже  $-45^{\circ}\text{C}$ , особенно на географических полюсах холода [1]. Экстремально низкая температура способна выводить работающую технику из строя, приводить к авариям и остановкам технологических процессов. Поэтому вся используемая аппаратура обязательно должна быть морозоустойчивой, надежной, герметичной и, кроме того, энергоэффективной, экологичной, компактной и ремонтпригодной [2, 3].

Для бесперебойной работы электроаппаратуры необходимы надежные источники электроэнергии, которые в условиях холодного климата приобретают особое, стратегическое значение. Основными первичными источниками энергии в полярных условиях являются горючее жидкое топливо, уголь, природный газ, солнечные и ветряные электроустановки [4 – 9]. Вырабатываемая ими энергия обеспечивает людей отоплением, светом, связью, электричеством для приборов, приводит в движение силовые машины и механизмы.

Однако, для питания электроприборов необходимо преобразовать параметры электроэнергии, выработанной первичным источником, к значениям, необходимым для функционирования конкретного устройства-потребителя. Эту задачу выполняют источники вторичного электропитания (ИВЭП) – энергопреобразующие электротехнические комплексы, конструктивно размещаемые как внутри корпуса электроприбора-потребителя, так и выносимые в отдельное питающее устройство.

Объектом изучения настоящей статьи являются ИВЭП постоянного тока. Постоянный ток необходим для работы измерительных приборов, устройств радиоэлектроники, компьютерной техники, портативной электроаппаратуры, некоторых видов электродвигателей и др. [10]. Вопрос обеспечения устойчивой работы ИВЭП постоянного тока в условиях холода слабо освещен в научном поле. В этой связи, исследование способов построения «арктических» ИВЭП является актуальной задачей.

Цель работы – провести обзор существующих решений, направленных на обеспечение устойчивости работы электротехнических комплексов постоянного тока в условиях Арктики, выделить ключевые проблемы при разработке таких устройств, предложить варианты их решения.

### Методы исследования

В первой части работы проводится анализ научных публикаций и патентов, посвященных проектированию ИВЭП для условий работы на холоде. Формулируются ключевые проблемы, касающиеся разработки данного класса устройств.

Во второй части рассматривается идея использования в морозоустойчивых ИВЭП параллельной архитектуры, которая, в свою очередь, позволяет внедрить модульный принцип построения источников. Изучаются вопросы адаптации модульного подхода к специфике морозоустойчивых источников питания. Обосновываются преимущества и недостатки такого решения.

### Обзор существующих решений

Научные публикации, касающиеся работы ИВЭП на холоде, практически отсутствуют. Однако, в открытом доступе можно найти патенты и авторские свидетельства, посвященные данной тематике.

Как известно, все вторичные источники питания по способу преобразования электрической энергии можно разделить на импульсные и линейные [11]. Линейные обеспечивают лучшее качество питания потребителей, высокоточную регулировку выходного напряжения, хорошую электромагнитную совместимость с работающими поблизости устройствами [12]. Однако, их недостатком является заметное тепловыделение, которое тем выше, чем больше разница между входным и выходным напряжениями источника [13]. На первый взгляд, тепловыделение в условиях холода кажется преимуществом. Но при долговременной работе устройства оно оборачивается недостатком. Причина не только в низком КПД преобразования из-за потери энергии на тепло. Дело в том, что температура внутри корпуса прибора сильно зависит от условий окружающей среды. И если количество порождаемого силовыми транзисторами тепла при стабильной нагрузке и стабильной входной питающей сети можно считать постоянным, то количество отводимого тепла будет варьироваться в зависимости от окружающих условий. С повышением температуры окружающей среды допустимая максимальная мощность источника питания снижается (рис. 1).

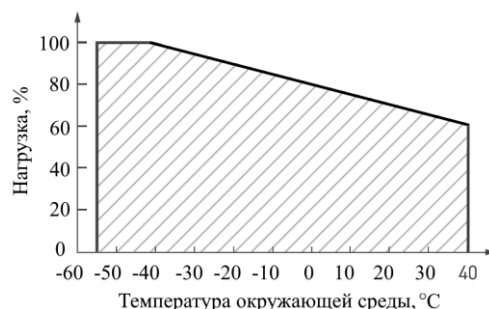


Рис. 1. Зависимость максимальной мощности нагрузки линейного источника питания от температуры окружающей среды

Fig. 1. Dependence of the maximum linear power supply load on the ambient temperature

Для удержания точки теплового равновесия внутри корпуса необходимо ввести дополнительный терморегулирующий элемент. В условиях холода в качестве регулятора логично использовать управляемый подогреватель, размещенный рядом с источником питания. Если использовать энергоэффективный подогреватель, тепловыделение силовой схемы источника следует рассматривать уже как негативный фактор, снижающий суммарный КПД работы всей системы.

Высоким КПД, как правило, обладают импульсные источники питания [14]. Достигается это за счет импульсного (ключевого) режима работы транзисторов, для которого характерен высокий КПД преобразования. Стабилизация выходного напряжения в импульсной схеме осуществляется за счет управления длительностью проводящего состояния транзисторных ключей на каждом такте, в результате чего регулируется мощность, передаваемая от источника питания в нагрузку в единицу времени. За счет высокой рабочей частоты схемы значительно снижаются размеры и вес источника [15, 16], поэтому именно импульсные схемы получили наибольшее распространение. При большой разнице между входным и выходным напряжениями с точки зрения энергоэффективности связка из импульсной схемы, обеспечивающей высокий КПД преобразования, и подогревателя с приемлемым КПД нагрева, расположенных внутри общего корпуса, является наиболее рациональным решением.

При адаптации ИВЭП к холодным климатическим условиям разработчику следует ответить на целый ряд вопросов. Первым является выбор подходящей элементной базы. Микросхемы, транзисторы, конденсаторы, диоды, стабилитроны и т.д. должны удовлетворять требованиям стойкости к воздействию дестабилизирующих температурных факторов [17, 18, 19]. Особенности работы электронных компонентов на холоде посвящено множество научных исследований. Подавляющее их большинство проводится за рубежом и публикуется в зарубежных источниках [20].

Корпус проектируемого устройства должен быть закрыт и герметичен, при большом тепловыделении возможна точечная перфорация специальной формы [21]. Разъемы, тумблеры, светодиоды и т.д. должны иметь соответствующую группу климатического исполнения.

Вторым вопросом, на который должен ответить разработчик при адаптации ИВЭП к холоду, является запуск схемы при отрицательной температуре. Не рассчитанный на работу на холоде источник может попросту не включиться без предварительного подогрева, поскольку на этапе запуска элементы схемы находятся в самых неблагоприятных температурных условиях. Подогреватель должен запускаться раньше источника. Простейший источник тепла может быть образован мощным резистором, через который пропускается сильный электрический ток. Однако, более надёжным решением является использование специального устройства подогрева, представляющего собой компактный электронагреватель со схемой управления, наподобие [22].

Блок-схема устройства приведена на рисунке 2. Устройство получает питание отдельно от основного ИВЭП. Схема включает в себя блоки отслеживания высокой и низкой температуры и исполнительный блок, который осуществляет включение нагревателя при достижении нижнего порога допустимой температуры и выключение при верхнем пороге допустимых значений. В схеме также имеется узел защиты, выключающий устройство при аварийных ситуациях.

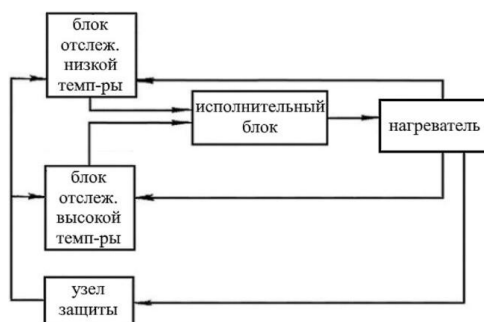


Рис. 2. Функциональная блок-схема устройства подогрева

Fig. 2. Functional block diagram of the heating device

Облегчить задачу запуска позволяет также продуманная схемотехника. Она должна учитывать температурный «уход» параметров элементов на холоде и стараться его скомпенсировать. Примером является работа [23], в которой выход на режим преобразователя в широком диапазоне температур облегчается благодаря введению принципа импульсного запуска схемы (рис. 3). Подача питания на схему приводит к возникновению импульса тока на участке цепи, образованном незаряженным конденсатором 1 с низким начальным сопротивлением и дополнительной обмоткой 5 трансформатора обратной связи 4. Импульс тока наводит на других обмотках трансформатора 4 ЭДС, вызывающую открытие одного из транзисторов преобразователя 3. По мере заряда конденсаторов 1 и 2 входное напряжение от первичной сети поступает к преобразователю 3. Поскольку один из транзисторов схемы из-за ускоренного импульсного запуска оказался открытым, через первичную обмотку силового трансформатора преобразователя 3 потечет ток, который благодаря наличию в схеме обратной связи даст начало циклическому переключению транзисторов преобразователя и выведет устройство электропитания в установившийся режим работы.

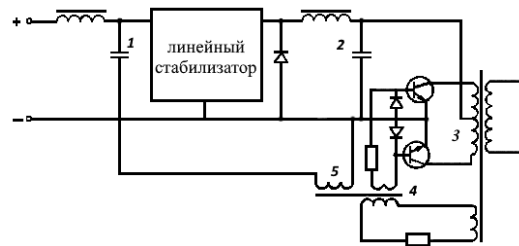


Рис. 3. Схема с импульсным запуском

Fig. 3. The circuit with pulse start

Третьим вопросом, на который необходимо ответить разработчику, является автономность и бесперебойность работы схемы. Способ построения бесперебойного ИВЭП, обеспечивающего нагрузку постоянным стабилизированным напряжением 12 вольт, описан в работе [24]. Функционирование источника в арктических условиях возможно благодаря наличию внутреннего устройства подогрева (рис. 4). Вся система размещается внутри одного корпуса, покрытого изнутри теплоотражающей изоляцией.

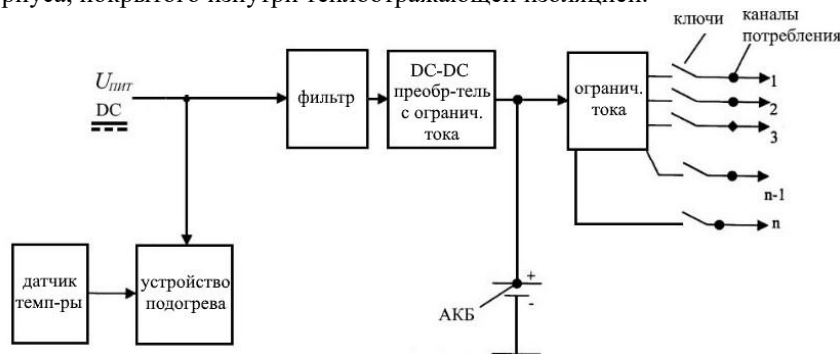


Рис. 4. Функциональная блок-схема морозоустойчивого вторичного питания

блок-схема источника

Fig. 4. Functional block diagram of a frost-resistant power supply

Входное напряжение питания  $U_{пит}$  преобразуется в 12 вольт  $DC-DC$  преобразователем с функцией ограничения по току. К выходу преобразователя подключена аккумуляторная батарея и быстродействующее устройство ограничения тока потребителей. Каждый канал потребления при наличии перегрузки или коротком замыкании во внешней цепи отключается от выходов устройства автономно, не влияя на работу других каналов. Для уменьшения потери емкости аккумуляторной батареи на холоде в составе ИВЭП имеются датчик температуры и устройство подогрева. Система подогрева имеет порог включения -минус  $5^{\circ}C$ , обеспечивая благоприятный режим работы АКБ при пониженной температуре.

Четвертый вопрос разработчику – конструктивное исполнение источника. Пример конструкции прибора мощностью до 100 Вт без АКБ в герметичном корпусе показан в [25, 26]. Для свободной циркуляции воздуха внутри корпуса должно оставаться свободное пространство (рис. 5, а). Рядом с источником компактно размещается подогреватель и соединительные клеммы (рис. 5, b).

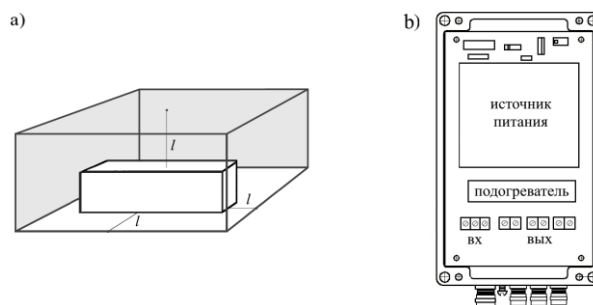


Рис. 5. Конструкция ИВЭП малой мощности: а – обеспечение свободного пространства в корпусе, б – расположение элементов в корпусе (вид сверху)

Fig. 5. Design of low-power supply unit: а – providing free space in the case, б – location of elements in the case (top-view)

Пример конструкции ИВЭП большой мощности показан в работе [27]. Представленный ИВЭП отличается сильным тепловыделением, поэтому главной проблемой здесь является не обогрев, а отвод тепла. На морозе подогреватель такому прибору не требуется. При работе в нормальных температурных условиях прибору нужно принудительное охлаждение. Корпус устройства содержит обечайку 5 с крепежными лапками 6, нижняя сторона которой накрывается крышкой 7, а верхняя закрыта радиатором 3. К радиатору прикреплены модуль питания 9, термодатчик 11 и модуль управления вентиляторами 10. Над внешней поверхностью радиатора 3 располагается крышка 2, которая вместе с ним образует канал охлаждения 8. В крышке 2 проделаны отверстия, над которыми закреплены вентиляторы 1. На обечайке сбоку расположены разъем 15, через который подается входное напряжение, разъем 13 для питания нагрузки выходным напряжением, клемма заземления 14, а также индикатор 4, призванный сигнализировать о наличии напряжения питания от первичного источника (рис. 6).

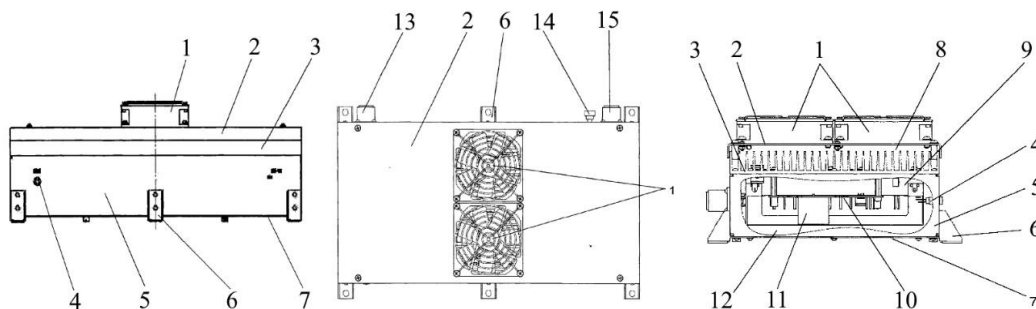


Рис. 6. Конструкция ИВЭП большой мощности для условий работы на холоде

Fig. 6. Design of high-power supply unit for cold working conditions

При работе блока питания на холоде вентиляторы 1 находятся в выключенном состоянии. Выделяемое при работе модуля питания 9 тепло отводится радиатором 3, контроль температуры которого осуществляется термодатчиком 11. В случае перегрева радиатора электронный модуль управления 10 автоматически запускает вентиляторы 1, осуществляющие продувку внутри канала 8. При понижении температуры до уровня, заранее запрограммированного в электронном модуле управления 10, вентиляторы автоматически отключаются. Такое их циклическое включение и выключение обеспечивает устойчивую работу блока питания в заданном диапазоне допустимых температур.

#### *Идея модульного построения морозостойчивого источника*

Надёжность работы источника в значительной мере зависит от архитектуры, по которой он построен. Так, отказоустойчивые системы питания специального назначения обычно имеют параллельную архитектуру [28, 29], благодаря чему удастся достичь резервирования рабочих узлов схемы. Такая система состоит из нескольких однотипных, параллельно соединённых по входу и выходу энергопреобразующих ячеек, между которыми равномерно распределяется мощность нагрузки. Часть ячеек может оставаться в резерве и вводиться в работу взамен вышедшим из строя [30, 31]. Вместе с распределением мощности распределяется и риск аварийных отказов [32, 33]. Поэтому авария в отдельных ячейках не приводит к отключению всего устройства.

По аналогии с такими системами, «арктический» ИВЭП также можно построить на базе параллельной архитектуры, получив целый ряд новых качеств и преимуществ. Одним из них является возможность использования модульной конструкции. ИВЭП может быть образован из  $N$  включённых параллельно однотипных ячеек-модулей. Все ячейки являются быстросъёмными и подключаются друг к другу разъемами или зажимными клеммами. Каждая ячейка представляет собой полноценный импульсный преобразователь постоянного тока со своим контуром регулирования выходного напряжения. Преобразователь может обеспечивать гальваническую изоляцию входной и выходной цепей. С целью защиты, регулировки и телеметрии на вход и выход каждой ячейки последовательно с преобразователем добавлены вспомогательные, многофункциональные транзисторные коммутаторы (электронные ключи), наподобие [34 – 36]. Благодаря им ячейки могут самостоятельно возвращаться из аварийного режима работы в штатный после исчезновения дестабилизирующих факторов, система приобретает свойство самовосстановления. Таким образом, каждая ячейка представляет собой последовательно соединённые входной ключ, преобразователь напряжения и выходной ключ. Данная архитектура подробно описана в патентах [37, 38].

Помимо подключения друг к другу, ячейки подключаются к общей для всего электротехнического комплекса системе управления (рис. 7), которая располагается на отдельной печатной плате и следит за параметрами работы каждой ячейки, наподобие систем [39, 40], выравнивает токи ячеек [41, 42], выполняет преднамеренные отключения и включения ячеек, управляет температурой подогревателя внутри корпуса устройства. Подробное описание особенностей работы системы управления модульного конфигурируемого источника питания приведено в [43].

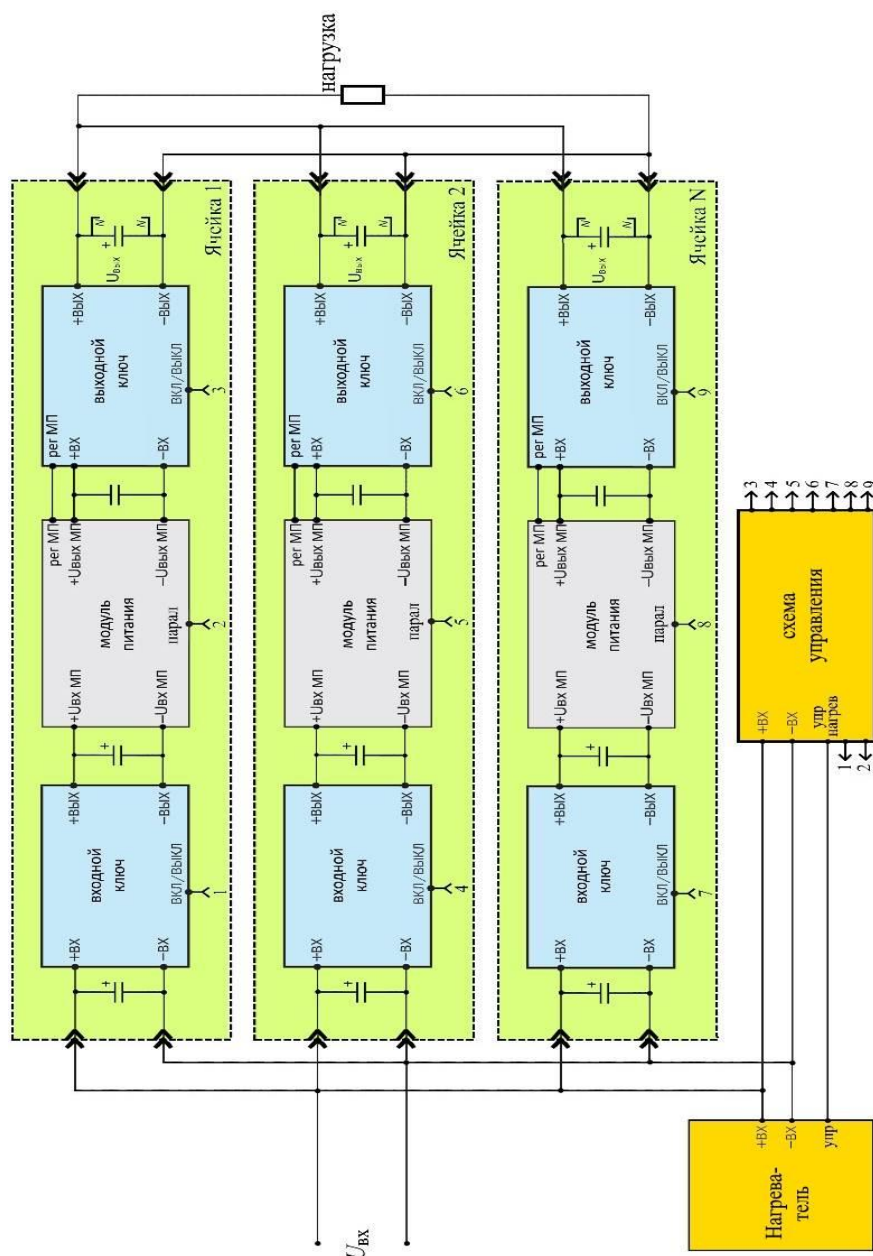


Рис. 7. Архитектура модульного морозоустойчивого источника питания

Fig. 7. Architecture of a modular frost-resistant power supply

При достаточном уровне миниатюризации всю систему можно разместить в одном корпусе, что позволит избежать перегрева отдельных её частей за счет равномерного отвода тепла от основания конструкции. В этом случае морозоустойчивый электротехнический комплекс будет представлять собой «чемоданчик», укомплектованный включенными параллельно модулями-ячейками. Наружу корпуса выведены силовые выводы для подключения первичного источника и потребителей, а также простейшие блоки управления и индикации (при необходимости). Корпус изделия герметичен, внутри имеется устройство-подогреватель. Исследование циркуляции воздуха и тепловых режимов в модульных источниках питания с закрытым корпусом приведено в работах [44 – 48].



Часть ячеек может оставаться в резерве и вступать в работу только при возникновении аварийных ситуаций. Принцип резервирования позволит обеспечить высокую надежность электрической схемы [49, 50]. Модульное исполнение за счет варьирования числа ячеек и управления их параметрами позволяет сделать источник универсальным и гибко настраиваемым, облегчить ремонтпригодность в «полевых» условиях за счет возможности быстрой замены неисправных частей на аналогичные новые. Комплект запасных частей к источнику будет представлять собой готовые модули-ячейки и соединительные провода/разъемы.

Суммарная мощность источника задается наращиванием или сокращением числа работающих ячеек. Система приобретает особые преимущества, если уровни выходных напряжений ячеек можно регулировать. В этом случае можно построить универсальный конфигурируемый источник питания широкого применения, идеи которого были высказаны в работах [38, 43] и который является новинкой на рынке. Если сгруппировать ячейки по выходу, можно использовать один источник для одновременного питания нескольких совершенно разных потребителей. Таким образом, можно использовать один источник питания для множества применений, что в сложных условиях может оказаться весьма полезно.

### **Результаты**

В настоящее время практически нет современных научных публикаций, посвященных надежности работы ИВЭП на холоде, включая построение температурных моделей. Текущее положение дел можно узнать только из анализа патентов и документации представленных на рынке немногочисленных устройств.

ИВЭП, предназначенные для условий работы на холоде, имеют свои особенности. Изменения претерпевают внешний вид, конструкция, схемотехника, элементная база и правила эксплуатации устройства. При создании источника усилия разработчика направлены, главным образом, на решение двух проблем: борьбе с холодом и рациональным использованием электроэнергии, часть которой неминуемо будет расходоваться на работу температурного регулятора.

### **Обсуждение**

Главное требование к морозоустойчивому ИВЭП – это надежность. Повысить её можно, если построить источник на базе параллельной архитектуры, распределив риск отказа между несколькими параллельными каналами и получив возможность их резервирования, как это реализуется в отказоустойчивых системах питания специального назначения.

Полезным следствием использования параллельной архитектуры является возможность модульного построения ИВЭП. На её основе можно построить универсальный конфигурируемый источник питания широкого применения, в котором можно настраивать кратность резерва, мощность, выходное напряжение, ток, группировать ячейки для питания разных потребителей.

Главные задачи, которые необходимо решить в рамках такой системы – обеспечить достаточную миниатюризацию всех составных частей для размещения в одном корпусе устройства, обеспечить равномерное распределение мощности между всеми работающими ячейками и выработать единые механизмы взаимодействия всех ячеек с общей централизованной системой управления.

Такой подход едва ли найдет применение в источниках питания, используемых в повседневной жизни, где он не сможет конкурировать с простыми узко специализированными источниками по соображениям стоимости и избыточности функционала. Однако в специальных условиях эксплуатации, где требуется обеспечить максимальный функционал устройства при минимальных габаритах, а также гарантировать надежность и легкость эксплуатации, предложенный принцип может оказаться весьма полезным.

### **Заключение**

1. Ключевые проблемы разработки морозоустойчивых ИВЭП отражены в патентах по данной тематике. Научные публикации практически отсутствуют. К проблемным вопросам относятся схемотехника, конструкция, обогрев, автономность, КПД работы, миниатюризация.

2. Надежность ИВЭП во многом определяется его архитектурой. По аналогии с системами специального назначения, применить в «арктических» ИВЭП параллельную архитектуру – решение, способное продлить срок службы устройства и повысить его отказоустойчивость.



3. Параллельная архитектура позволяет воспользоваться модульным принципом построения электротехнического комплекса, упрощая процесс проектирования и обслуживания устройства. На её основе можно построить универсальный конфигурируемый источник для широкого круга задач. На сегодняшний момент эта идея в Арктике не была никем реализована, однако, могла бы найти себе применение.

### Литература

1. Гендлер С.Г. Теплофизические аспекты безопасности и эффективности при добыче полезных ископаемых и эксплуатации подземных сооружений в суровых климатических условиях // Записки Горного института. 2006. Т. 168. С. 64-67.
2. Череповицын А.Е., Ларичкин Ф.Д., Ильинова А.А., и др. Формирование концепции рационального природопользования на арктических территориях, способствующей их устойчивому промышленному и социально-экономическому развитию // Вопросы территориального развития. 2018. № 5 (45). С. 1-17.
3. Шклярский Я.Э., Замятина Е.Н., Замятин Е.О. Оценка энергетической эффективности электротехнического комплекса // Известия ТулГУ. Технические науки. 2020. № 3. С. 339-347.
4. Лебедев В.А., Леушева Е.Л., Моренов В.А. Комплексное энергоснабжение при бурении скважин в осложненных климатических условиях // Записки Горного Института. 2015. Т. 213. С. 47-53.
5. Лаврик А.Ю., Жуковский Ю.Л., Булдыско А.Д. Особенности выбора оптимального состава ветро-солнечной электростанции с дизельными генераторами // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 1. С. 10-17.
6. Петрунин А.М., Семенов А.С., Молодых С.С. Анализ перспектив разработки угольных месторождений в арктической зоне Чукотской автономной области // Московский экономический журнал. 2020. №8. С. 74-85.
7. Абрамович Б.Н., Бельский А.А. Выбор параметров ветродизельной установки для энергообеспечения минерально-сырьевого комплекса // Записки горного института. 2012. Т. 195. С. 227-230.
8. Глушенко М. А. Ветроэнергетические установки // Записки Горного Института. 2007. Т. 170, № 1. С. 156-158.
9. Шклярский Я.Э., Салов Р.А. Повышение эффективности работы энергетических центров на попутном газе // Известия ТулГУ. Технические науки. 2017. № 12-2. С. 484-492.
10. Аполлонский С.М., Куклев Ю. В. Низковольтные электрические аппараты // Записки Горного Института. 2016. Т. 218. С. 251-260.
11. Емашкина Т.С., Белов А.Г., Кочегаров И.И. Классификационные признаки источников электропитания // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». 2014. Т. 2. С. 15-16.
12. Amaral A., Cardoso A.J.M. Voltage Doubler for AC-DC Step-Up Linear Power Supplies: Design, Modelling and Simulation // Acta Electrotechnica et Informatica. 2016. V. 6. P. 3-10.
13. Беспалов Н.Н., Пенькин К.Ю. Оптимизация величин некоторых параметров линейных источников питания на основе стабилизаторов напряжения // Огарев-Online. 2018. №13. С. 1-5.
14. Нгуен Тъи Киен, Кашаев Р.С., Козелков О.В. Импульсный блок питания для портативного протонно-магнитного резонансного релаксометра // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2019. Т. 21. № 6. С. 111-117.
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. № 24. P. 225-234.
16. Иванов Д.Н. Пути развития источников электропитания современных радиотехнических систем // Актуальные вопросы современной науки. 2016. № 45. С. 134-139.
17. Володин П.Н. Разработка макромодели интенсивности отказов импульсного ИВЭП // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». 2017. Т. 1. С. 251-254.
18. Попов А.В. Исследование и совершенствование методов расчета надежности элементов электротехнических комплексов и систем. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2015. № 3-4. С. 114-123
19. Ridley R. Results of a Power Supply Failure Survey // Power Systems Design. 2014. P. 1-4.

20. Edmundo A. Gutierrez, Jamal Deen, Cor Claeys. Low Temperature Electronics: Physics, Devices, Circuits, and Applications. Доступно по: [https://books.google.com.tr/books?id=e677kp7OhzAC&hl=tr&source=gbps\\_navlinks\\_s](https://books.google.com.tr/books?id=e677kp7OhzAC&hl=tr&source=gbps_navlinks_s). Ссылка активна на 25 августа 2021.

21. Егоров В. И., Лайне В. А., Калинина М. И. Расчет блока радиоэлектронной аппаратуры с естественной вентиляцией // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2003. № 9. С. 33-36.

22. Смолин Е.В. Система управления предпусковым подогревом электронной аппаратуры в условиях низких температур: патент на полезную модель № 96615, Российская Федерация. Опубликовано 08.10.2010.

23. Попов В.А. Стабилизированный источник постоянного или переменного напряжения: авторское свидетельство на изобретение № 636592, СССР. Опубликовано 05.12.1978. Бюл. № 45.

24. Деревянченко И.Л., Бурмака А.А. Двенадцативольтовый источник бесперебойного питания постоянного тока: патент на полезную модель № 34819, Российская Федерация. Опубликовано 10.12.2003.

25. Паспорт на блок питания БП12-4-3,7А, ЗАО «НТФ ТИРЭКС». Доступно по: <http://ntftirex.ru/docs/BP12-4-3.7A.pdf>. Ссылка активна на 25 августа 2021.

26. Техническое описание, инструкция по эксплуатации и паспорт «Источники напряжения серии ARPV-UH», Sunrise Holdings Ltd. Доступно по: [https://arlight-russia.ru/upload/iblock/6b4/Datasheet\\_ARPV-UH\\_025171-025045-025046.pdf](https://arlight-russia.ru/upload/iblock/6b4/Datasheet_ARPV-UH_025171-025045-025046.pdf). Ссылка активна на 25 августа 2021.

27. Журавлев А.В., Ревнев С.Н., Ревнева Л.А., и др. Блок питания: патент на полезную модель № 106487, Российская Федерация. Опубликовано 10.07.2011.

28. Денисенко Е.А., Тарасов М.М., Кривошей А.А., и др. Источники бесперебойного и автономного электроснабжения // Политематический сетевой электронный научный журнал КубГАУ. 2016. № 115. С. 1337-1349.

29. Карагодин В.В., Полянский К.А., Горин В.А. Структурно-параметрическая оптимизация системы бесперебойного электроснабжения ответственных потребителей // Приборостроение. 2017. Т. 60, № 1. С. 14-23.

30. Hwu K. I., 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. pp. 901–903.

31. Исмаилов Т. А., Муслимов Э. М., Рашидханов А. Т., и др. Обеспечение теплового режима приборов распределенного питания в составе корабельных систем вторичного электропитания на базе унифицированных блоков // Вестник ДГТУ. Технические науки. 2016. Т. 42. № 3. С. 64-72.

32. Мандзий Б. А., Волочий Б. Ю., Озирковский Л. Д., и др. Сравнение надежности источников бесперебойного электропитания с нагруженными и ненагруженными резервными модулями // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество». 2013. Т. 1. С. 132-135.

33. Татунов С.Ю. Разработка программы имитационного моделирования безотказности блоков питания // Новые информационные технологии в автоматизированных системах. 2019. № 22. С. 109-112.

34. Datasheet «TPS2475x 12-A eFuse Circuit Protector with Current Monitor TPS24750, TPS24751», Texas Instruments Inc. 2013, revised December 2018. Доступно по: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps24751.pdf>. Ссылка активна на 25 августа 2021.

35. Datasheet «DVCL28 Series High Reliability Hybrid Inrush Current Limiter», VPT-Inc. 2017. Доступно по: <https://www.vptpower.com/wp-content/uploads/downloads/2017/08/DS-DVCL28-5.0.pdf>. Ссылка активна на 25 августа 2021.

36. Datasheet «MAX17613A/MAX17613B/MAX17613C 4.5V to 60V, 3A Current-Limiter with OV, UV and Reverse Protection», Maxim Integrated. February 2019. Доступно по: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX17613A-MAX17613C.pdf>. Ссылка активна на 25 августа 2021.

37. Берг В.Р., Бродников С.Н., Михеев В.В., и др. Интеллектуальная система преобразования напряжения постоянного тока для динамически изменяющейся нагрузки: патент на изобретение № 2692089, Российская Федерация. Опубликовано 21.06.2019. Бюл. № 18.

38. Федоров А.В., Орел Е.А. Отказоустойчивая система электропитания с возможностью гибкой настройки параметров: патент на изобретение № 2746221, Российская Федерация. Опубликовано 09.04.2021. Бюл. № 10.

39. 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. V. 6. № 6. P. 2615–2626.
40. Hu T., Khan M., Xu K., et al. Design of an Input-Parallel Output-Parallel Multi-Module DC-DC Converter Using a Ring Communication Structure. Journal of Power Electronics. 2015. Vol. 15, №4. P. 886–898.
41. Sun B. How to Parallel Two DC/DC Converters with Digital Controllers // Analog Design Journal. 2018. Iss. 3Q. P. 1–5.
42. Klassen S.V., Klassen T.S., Luft S.V. Current Sharing in Digitally Controlled DC-DC Converters Connected in Parallel. International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM. 2019. pp. 541-546.
43. Каталупов О.И. Модульный источник питания с конфигурируемой структурой // Политематический сетевой электронный научный журнал КубГАУ. 2017. № 131. С. 1192-1203.
44. Данилов Д. А., Егоров В. И., Фадеева С. В., и др. Моделирование тепловых режимов электронных систем с естественной вентиляцией // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2012. Т. 53, № 4. С. 41-45.
45. Повгородний В. О. Проектирование печатных плат с учетом температурного воздействия // АСУ и приборы автоматики. 2007. № 138. С. 66-71.
46. Ефременков И. В., Сорокин М. Ю. Проведение инженерного расчета теплового воздействия элементов электронных плат // Известия Самарского научного центра РАН. 2016. Т. 18, № 4-3. С. 663-668.
47. Шарков А.В., Герасютенко В.В., Минкин Д.А. Моделирование теплового режима электронного оборудования на основе результатов тепловизионной съемки температурных полей элементов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2020. Т. 20, №2. С. 272-276.
48. Исмаилов Т.А., Рашидханов А.Т., Юсуфов Ш.А. Термоэлектрическое устройство для обеспечения теплового режима блоков радиоэлектронных систем // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2015. Т. 37, №2. С. 50-59.
49. Либенко Ю. Н. Эксплуатационные возможности преобразователей напряжения с магистрально-модульной архитектурой // Практическая силовая электроника. 2012. № 4(48). С. 6-9.
50. Жаднов В.В. Модель магистрально-модульного преобразователя напряжения для расчета его наработки до отказа методом статистического моделирования при смешанном резервировании его каналов // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество». 2020. Т. 1. С. 52-55.

#### Авторы публикации

**Шпенст Вадим Анатольевич** – д-р техн. наук, профессор Санкт-Петербургского горного университета.

**Орел Евгений Александрович** – аспирант, Санкт-Петербургский горный университет.

#### References

1. Gendler SG. Teplofizicheskie aspekty bezopasnosti i effektivnosti pri dobyche poleznykh iskopaemykh i ekspluatatsii podzemnykh sooruzhenii v surovyykh klimaticheskikh usloviyakh. *Zapiski Gornogo instituta*. 2006; 168: 64-67.
2. Cherepovitsyn AE, Larichkin FD, Il'ina AA, et al. Formirovanie kontseptsii ratsional'nogo prirodopol'zovaniya na arkticheskikh territoriyakh, sposobstvuyushchei ikh ustoichivomu promyshlennomu i sotsial'no-ekonomicheskomu razvitiyu. *Voprosy territorial'nogo razvitiya*. 2018; 5(45): 1-17.
3. Shklyarskii YaE, Zamyatina EN, Zamyatin EO. Otsenka energeticheskoi effektivnosti elektrotekhnicheskogo kompleksa. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki*. 2020; 3: 339-347.
4. Lebedev VA, Leusheva EL, Morenov VA. Kompleksnoe energosnabzhenie pri burennii skvazhin v oslozhnennykh klimaticheskikh usloviyakh. *Zapiski Gornogo Instituta*. 2015; 213:47-53.
5. Lavrik AYU, Zhukovskii YuL, Buldysko AD. Osobennosti vybora optimal'nogo sostava vetro-solnechnoi elektrostantsii s dizel'nymi generatorami. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. PROBLEMY ENERGETIKI*. 2020; 22 (1): 10-17.

6. Petrunin AM, Semenov AS, Molodykh SS. Analiz perspektiv razrabotki ugol'nykh mestorozhdenii v arkticheskoi zone Chukotskoi avtonomnoi oblasti. *Moskovskii ekonomicheskii zhurnal*. 2020;8:74-85.
7. Abramovich BN, Bel'skii AA. Vybory parametrov vetrodizel'noi ustanovki dlya energoobespecheniya mineral'no-syr'evogo kompleksa. *Zapiski gornogo instituta*. 2012; 195: 227-230.
8. Glushchenko MA. Vetroenergeticheskie ustanovki. *Zapiski Gornogo Instituta*. 2007; 170: 156-158.
9. Shklyarskii YaE, Salov RA. Povyshenie effektivnosti raboty energeticheskikh tsentrov na poputnom gaze. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki*. 2017;12-2:484-492.
10. Apollonskii SM, Kuklev YuV. Nizkovol'tnye elektricheskie apparaty. *Zapiski Gornogo Instituta*. 2016;218:251-260.
11. Emashkina TS, Belov AG, Kochegarov II. Klassifikatsionnye priznaki istochnikov elektropitaniya. *Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma «Nadezhnost' i kachestvo»*. 2014; 2: 15-16.
12. Amaral A, Cardoso AJM. Voltage Doubler for AC-DC Step-Up Linear Power Supplies: Design, Modelling and Simulation. *Acta Electrotechnica et Informatica*. 2016; 6: 3-10.
13. Besspalov NN, Pen'kin KYu. Optimizatsiya velichin nekotorykh parametrov lineinykh istochnikov pitaniya na osnove stabilizatorov napryazheniya. *Ogarev-Online*. 2018; 13: 1-5.
14. Nguyen CK, Kashaev RS, Kozelkov OV. The impulse power unit for a portable proton magnet resonance relaxometer. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2019; 21(6):111-117.
15. Fuerback VB, Dall'Asta MS, Pagliosa MA. et al. Analysis of modular DCM Flyback converters in input parallel connections with parametric mismatches. *Eletrônica de Potência*. 2019; 24: 225-234.
16. Ivanov DN. Puti razvitiya istochnikov elektropitaniya sovremennykh radiotekhnicheskikh sistem. *Aktual'nye voprosy sovremennoy nauki*. 2016; 45: 134-139.
17. Volodin PN. Razrabotka makromodeli intensivnosti otkazov impul'snogo IVEP. *Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma «Nadezhnost' i kachestvo»*. 2017;1:251-254.
18. Popov AV. Issledovanie i sovershenstvovanie metodov rascheta nadezhnosti elementov elektrotekhnicheskikh kompleksov i sistem. *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij. PROBLEMY ENERGETIKI*. 2015; 3-4: 114-123.
19. Ridley R. Results of a Power Supply Failure Survey. *Power Systems Design*. 2014: 1–4.
20. Edmundo A. Gutierrez, Jamal Deen, Cor Claeyss. Low Temperature Electronics: Physics, Devices, Circuits, and Applications. Available at: [https://books.google.com.tr/books?id=e677kp7OhzAC&hl=tr&source=gbps\\_navlinks\\_s](https://books.google.com.tr/books?id=e677kp7OhzAC&hl=tr&source=gbps_navlinks_s). Accessed: 25 Aug 2021.
21. Egorov VI, Lajne VA, Kalinina MI. Raschet bloka radioelektronnoy apparatury s estestvennoy ventilyaciej. *Nauchno-tehnicheskij vestnik informacionnykh tekhnologij, mekhaniki i optiki*. 2003; 9: 33-36.
22. Smolin EV. Sistema upravleniya predpuskovym podogrevom elektronnoi apparatury v usloviyakh nizkikh temperatur: Patent RUS №96615. 08.10.2010. Available at [https://yandex.ru/patents/doc/RU96615U1\\_20100810](https://yandex.ru/patents/doc/RU96615U1_20100810). Accessed: 25 Aug 2021.
23. Popov VA. Stabilizirovannyi istochnik postoyannogo ili peremennogo napryazheniya. Patent USSR №636592. 05.12.1978. Byul. № 45. Available at [https://yandex.ru/patents/doc/SU636592A1\\_19781205](https://yandex.ru/patents/doc/SU636592A1_19781205). Accessed: 25 Aug 2021.
24. Derevyanchenko IL, Burmaka AA. Dvenadtsativol'tovyi istochnik bespereboynogo pitaniya postoyannogo toka. Patent RUS №34819. 10.12.2003. Available at [https://yandex.ru/patents/doc/RU34819U1\\_20031210](https://yandex.ru/patents/doc/RU34819U1_20031210). Accessed: 25 Aug 2021.
25. Passport of power supply BP12-4-3,7A, ZAO «NTF TIREKS». Available at: <http://ntftirex.ru/docs/BP12-4-3.7A.pdf>. Accessed: 25 Aug 2021.
26. Technical description and passport of «Voltage source ARPV-UH series». Available at: [https://arlight-russia.ru/upload/iblock/6b4/Datasheet\\_ARPV-UH\\_025171-025045-025046.pdf](https://arlight-russia.ru/upload/iblock/6b4/Datasheet_ARPV-UH_025171-025045-025046.pdf). Accessed: 25 Aug 2021.
27. Zhuravlev AV, Revnev SN, Revneva LA, et al. Blok pitaniya. Patent RUS №106487. 10.07.2011. Available at [https://yandex.ru/patents/doc/RU106487U1\\_20110710](https://yandex.ru/patents/doc/RU106487U1_20110710). Accessed: 25 Aug 2021.
28. Denisenko EA, Tarasov MM, Krivoshej AA, et al. Istochniki bespereboynogo i avtonomnogo elektroosnabzheniya. *Politematicheskij setevoy elektronnyj nauchnyj zhurnal KubGAU*. 2016; 115: 1337-1349.

29. Karagodin VV, Polyanskij KA, Gorin VA. Strukturno-parametricheskaya optimizaciya sistemy besperebojnogo elektrosnabzheniya otvetstvennyh potrebitel'ej. *Priborostroenie*. 2017;60(1):14-23.
30. Hwu KI, 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. pp. 901–903.
31. Ismailov TA, Muslimov EM., Rashidhanov AT, et al. Obespechenie teplovogo rezhima priborov raspredelennogo pitaniya v sostave korabel'nyh sistem vtorichnogo elektropitaniya na baze unificirovannyh blokov. *Vestnik DGTU. Tekhnicheskie nauki*. 2016;42(3): 64-72.
32. Mandzij BA, Volochij BYU, Ozirkovskij LD, et al. Sravnenie nadezhnosti istochnikov besperebojnogo elektropitaniya s nagruzhennymi i nenagruzhennymi rezervnymi modul'yami. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma «Nadezhnost' i kachestvo»*. 2013;1:132-135.
33. Tatinov SYU. Razrabotka programmy imitacionnogo modelirovaniya bezotkaznosti blokov pitaniya. *Novye informacionnye tekhnologii v avtomatizirovannyh sistemah*. 2019;22: 109-112.
34. Datasheet «TPS2475x 12-A eFuse Circuit Protector with Current Monitor TPS24750, TPS24751», Texas Instruments Inc. 2013, revised December 2018 Available at: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps24751.pdf>. Accessed: 25 Aug 2021.
35. Datasheet «DVCL28 Series High Reliability Hybrid Inrush Current Limiter», VPT-Inc. 2017. Available at: <https://www.vptpower.com/wp-content/uploads/downloads/2017/08/DS-DVCL28-5.0.pdf>. Accessed: 25 Aug 2021.
36. Datasheet «MAX17613A/MAX17613B/MAX17613C 4.5V to 60V, 3A Current-Limiter with OV, UV and Reverse Protection», Maxim Integrated. February 2019. Available at: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX17613A-MAX17613C.pdf>. Accessed: 25 Aug 2021.
37. Berg VR, Brodnikov SN, Mikheev VV, et al. *Intellectual'naya sistema preobrazovaniya napryazheniya postoyannogo toka dlya dinamicheski izmenyayushcheysya nagruzki*. Patent RUS №2692089. 21.06.2019. Byul. №18 Available at: [https://yandex.ru/patents/doc/RU2692089C2\\_20190621](https://yandex.ru/patents/doc/RU2692089C2_20190621). Accessed: 25 Aug 2021.
38. Fedorov AV, Orel EA. *Otkazoustoichivaya sistema elektropitaniya s vozmozhnost'yu gibkoi nastroiки parametrov*. Patent RUS №2746221. 09.04.2021. Byul. №10. Available at: [https://yandex.ru/patents/doc/RU2020127684A\\_20210118](https://yandex.ru/patents/doc/RU2020127684A_20210118) Accessed: 25 Aug 2021.
39. 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;6(6):2615–2626.
40. Hu T., Khan M., Xu K., et al. Design of an Input-Parallel Output-Parallel Multi-Module DC-DC Converter Using a Ring Communication Structure. *Journal of Power Electronics*. 2015;15(4):886–898.
41. Sun B. How to Parallel Two DC/DC Converters with Digital Controllers. *Analog Design Journal*. 2018;3Q:1–5.
42. Klassen SV, Klassen TS, Luft SV. Current Sharing in Digitally Controlled DC-DC Converters Connected in Parallel. *International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM*; 2019. pp. 541-546.
43. Katalupov OI. Modul'nyj istochnik pitaniya s konfiguriruemoj strukturoj. *Politematicheskij setevoy elektronnyj nauchnyj zhurnal KubGAU*. 2017;131:1192-1203.
44. Danilov DA, Egorov VI, Fadeeva SV, et al. Modelirovanie teplovyh rezhimov elektronnyh sistem s estestvennoj ventilyaciej. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Priborostroenie*. 2012;53(4): 41-45.
45. Povgorodnij VO. Proektirovanie pechatnyh plat s uchetom temperaturnogo vozdejstviya. *ASU i pribory avtomatiki*. 2007;138: 66-71.
46. Efremenkov IV, Sorokin MYU. Provedenie inzhenernogo rascheta teplovogo vozdejstviya elementov elektronnyh plat. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra RAN*. 2016;18(4-3):663-668
47. SHarkov AV, Gerasiyutenko VV, Minkin DA. Modelirovanie teplovogo rezhima elektronnogo oborudovaniya na osnove rezul'tatov teplovizionnoj s"emki temperaturnykh polej elementov. *Nauchno-tekhnicheskij vestnik informacionnyh tekhnologij, mekhaniki i optiki*. 2020;20(2):272-276.
48. Ismailov TA, Rashidhanov AT, YUsufov SHA. Termoelektricheskoe ustrojstvo dlya obespecheniya teplovogo rezhima blokov radioelektronnyh sistem. *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. 2015;37(2):50-59

49. Libenko YUN. Ekspluatatsionnye vozmozhnosti preobrazovatelej napryazheniya s magistral'no-modul'noj arhitekturoj. *Prakticheskaya silovaya elektronika*. 2012;4(48):6-9

50. ZHаднов V.V. Model' magistral'no-modul'nogo preobrazovatelya napryazheniya dlya rascheta ego narabotki do otkaza metodom statisticheskogo modelirovaniya pri smeshannom rezervirovanii ego kanalov. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma «Nadezhnost' i kachestvo»*. 2020;1:52-55.

#### **Authors of the publication**

**Vadim A. Shpenst** - Saint-Petersburg Mining University, Russia.

**Evgeniy A. Orel** - Saint-Petersburg Mining University, Russia.

**Получено**

**29 июля 2021г.**

**Отредактировано**

**12 августа 2021г.**

**Принято**

**13 августа 2021г.**