

# Миниатюрные высоковольтные модули электропитания нового поколения

Виктор ЖДАНКИН  
victor@prosoft.ru

**Первое поколение высоковольтных модулей электропитания изменило способ применения разработчиками высокого напряжения, а перспективная серия высоковольтных модулей раздвинула границы последующих достижений.**

**П**ерспективные миниатюрные высоковольтные модули электропитания предоставляют разработчикам и конечным пользователям непрерывно увеличивающееся количество вариантов в готовых миниатюрных решениях, предназначенных для удовлетворения потребностей в высоком напряжении.

Новое поколение высоковольтных модулей электропитания отличается большей удельной мощностью, сниженной потребляемой мощностью с дополнительными интеллектуальными свойствами для управления и обеспечения безопасности. Поскольку число применений, нуждающихся в высоком напряжении, увеличивается, надежная работа с ограничениями в размерах и весе ставит сложные задачи. В настоящей статье, написанной на основе материалов, представленных компанией XP EMCО [1, 2], рассказывается о решении этих проблем.

## Изменение в построении систем электропитания низкого напряжения

Широкая доступность компактных низковольтных модулей электропитания способствовала полному изменению архитектуры распределения энергии. Компактные легкие модули могут быть установлены непосредственно в устройства, которые они снабжают электроэнергией. Не надо больше создавать основной источник питания, формирующий различные напряжения и уровни мощности, необходимые обширному ряду подсистем и схем. Это требовало протяженной разводки проводов, соответствующих полным потребностям системы, — по одному комплекту для каждого напряжения. Модульный подход к построению распределенных систем электропитания сделал возможным применение одной изолированной шины постоянного напряжения с питанием каждой схемы стандартным способом.

## Создание высоковольтных систем электропитания стоит перед таким же выбором

Создание высоковольтных систем электропитания также быстро продвинулось к модульным локализованным решениям, но формирование высокого напряжения должно рассматриваться совсем иначе. Разработчик высоковольтного источника питания сталкивается с такими же проблемами, как и разработчики низковольтных источников питания, но с дополнительными ограничивающими физическими, химическими и топологическими условиями. Прежде подобная задача поручалась специалистам, которые, как правило, создавали новую оригинальную конструкцию для каждого применения, поскольку стандартизация была очень незначительной. При номинальной мощности высоковольтные источники электро-

питания имели склонность к завышенным габаритам, чтобы обеспечить дополнительное место для внутренней проводки и компонентов. К тому же существовала проблема безопасной трассировки печатных проводников высоковольтного выхода к нагрузке. Так как число применений, требующих высокого напряжения, возросло, возникла необходимость изменить прежнюю методику проектирования.

Для решения этой проблемы производители высоковольтных источников питания разработали собственные методы построения стандартных модулей в очень компактных стандартных корпусах, которые можно использовать почти таким же способом, как низковольтные модули электропитания. Формирование высокого напряжения предполагает применение трансформатора, а также выпрямителей и конденсаторов, однако на частоте 50 Гц эти компоненты будут отличаться большими размерами. Поэтому разработчики первого поколения высоковольтных модулей электропитания поняли, что ключ к значительному уменьшению размеров — работа на относительно высокой частоте, выше, чем частота питающей сети 50 Гц. Новый метод формирования высокого напряжения должен начинаться с низкого напряжения постоянного тока, обычно в диапазоне 12–28 В, и далее использовать генератор на основе инверторной схемы для формирования низкого напряжения, высокочастотный входной сигнал для трансформатора. Подробно особенности работы схемы получения высокого напряжения на повышенной частоте при сравнительно невысоком входном напряжении с применением инвертора представлены, например, в [3].

Высокая частота позволяет значительно уменьшить габариты, особенно для трансформаторов и конденсаторов. Тем не менее инженеры-высоковольтники все же столкнулись с серьезной проблемой, о которой специалистам, занятым созданием низковольтной аппаратуры, не приходилось задумываться, — это возможность образования дугового разряда между точками высокого напряжения и между высоким напряжением и заземлением. Другими словами, при разработке источника электропитания следовало учитывать определенные ограничения и в то же время обеспечивать компактность и надежность проектируемого устройства. Впрочем, специалисты-высоковольтники никогда не останавливались в поисках новых путей, позволяющих избавиться от подобных ограничений; поэтому в результате появились уникальные топологии для достижения долговременной надежности, отвечающей задачам конечных пользователей. Существовал и другой аспект проблемы — требовались иные методы герметизации, которые обеспечили бы возможность не только значительно уменьшить объем для высокого напряжения, но и наряду с этим в достаточной степени рассеивать тепло.

## Первое поколение высоковольтных источников питания добивается успеха

Специалисты фирмы XP EMCO и других компаний разработали семейства надежных, миниатюрных, стандартных высоковольтных модулей электропитания с небольшими объемами, которые производились в больших количествах, что позволяло заказчикам рассчитывать на их доступность для применения в новых проектах. Модули высоковольтного электропитания предлагаются в двух основных классах:

- пропорциональный источник;
- стабилизированный источник.

## Пропорциональные высоковольтные модули электропитания

Менее дорогие и обеспечивающие больше мощности в единице объема, пропорциональные модули источников питания используются в разнообразных областях, где выходное напряжение изменяется как функция входного сигнала:

- в том случае, когда напряжение, требуемое нагрузкой, не является критическим — например, для электростатических очистителей воздуха — пропорциональный источник питания может применяться без специальных цепей регулирования. Выходное напряжение может быть установлено изменением входного напряжения;
- если высокое напряжение должно быть постоянным и ток нагрузки не изменяется в значительной степени, возможно, достаточно использовать стабильное низкое напряжение на входе.

Пример применения, представленный на рис. 1, показывает высоковольтный пропорциональный источник питания, прикладывающий смещение к сетке фотоэлектронного умножителя (ФЭУ). Так как сетка потребляет фактически нулевой ток нагрузки, высоковольтное смещение может просто сохраняться на постоянном уровне, потому что его низковольтный вход получает питание от стабилизированного источника.

## Стабилизированные источники питания

Стабилизированные источники питания применяются там, где выход стабилизируется и управляется внутренними компонентами, как описано в приведенных далее примерах.

- Выполнить регулирование чрезвычайно стабильного выхода от колебаний тока нагрузки, входного напряжения, температуры и временного дрейфа позволяет выборка выходного напряжения и подача его на усилитель сигнала ошибки, управляющий входом постоянного напряжения.

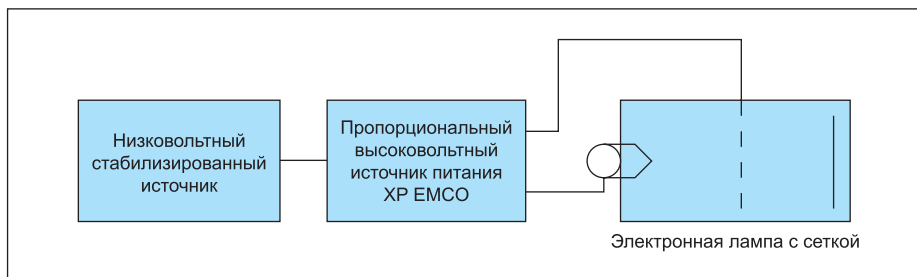


Рис. 1. Пример применения высоковольтного источника питания: смещение сетки

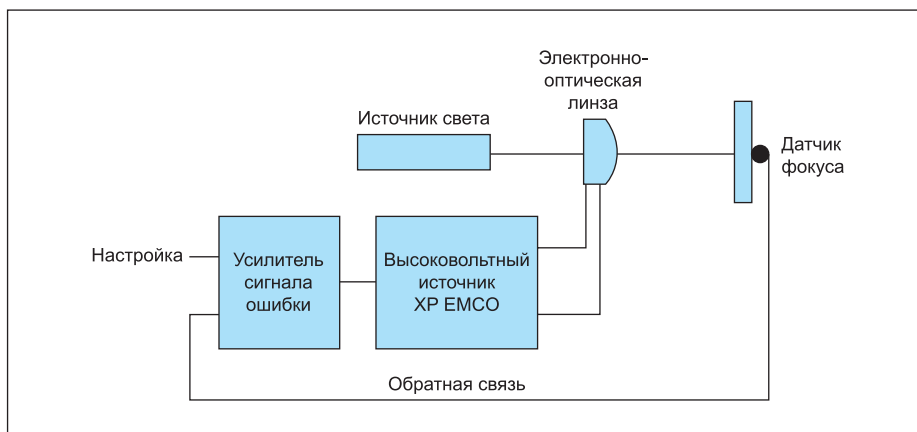


Рис. 2. Пример применения высоковольтного источника питания: высокое напряжение, регулируемое параметром процесса

- Установка высоковольтного источника в устройство, которое является частью производственного или измерительного процесса. Снятие обратной связи для усилителя ошибки из регулируемого параметра процесса предпочтительней, чем непосредственно с высоковольтного выхода, — таков один из вариантов решения задачи. На рис. 2 представлен высоковольтный источник, управляющий электронно-оптической линзой. Система в целом сохраняет стабильность, так как сигнал обратной связи, который управляет высоким напряжением, снимается с датчика оптического фокуса. Этот метод регулирует весь процесс в целом, а не только высокое напряжение.

## Источники нового поколения уже созданы

За последние более чем десять лет DC/DC-преобразователи высокого напряжения проявили себя как эффективные и надежные изделия. Перспективные технологии сохраняют эти качества и являются дальнейшим расширением пределов удельной мощности Вт/дм<sup>3</sup>, уменьшением потребляемой мощности и дополнением интеллектуальных свойств для управления и обеспечения безопасности оператора и специалиста, контактирующего с оборудованием. Сравнение нескольких высоковольтных источников напряжения текущего поколения с моделями, которые они заменили, обеспечивает хорошую иллюстрацию этих тенденций.

## Пропорциональные высоковольтные преобразователи напряжения серии F

В таблице 1 сравнивается текущее поколение 10-Вт источников питания серии FS с их предшественниками — модулями серии F.

Модули серии FS оснащены дополнительными сервисными функциями, такими как защита от дугового разряда, короткого замыкания, ограничение тока перегрузки и защита от перегрева. Важные интеллектуальные функции добавлены в модулях серии FS:

- высокий уровень TTL-совместимого сигнала, подаваемого на вывод 8 с управляющего узла, отключает выход;
- сигнал высокого уровня на выводе 6 сигнализирует управляющему узлу, что превышена температура или возникло перенапряжение;
- устранение причины аварийного состояния автоматически восстанавливает выходное напряжение (сигнал опасности сохраняется до тех пор, пока не будет произведен сброс).

Таблица 1. Сравнение параметров преобразователей напряжения серий FS и F

	FS	F	Изменение
Объем, дм <sup>3</sup>	0,021	0,067	Меньше на 68%
Вес, г	45	142	Меньше на 68%
Удельная мощность, Вт/дм <sup>3</sup>	476,2	149,3	Более чем в 3 раза
Входная мощность, Вт	15	18	Меньше на 17%
Высота, мм	12,7	21,6	Меньше на 42%
Площадь основания, см <sup>2</sup>	16,29	30,7	Меньше на 48%

Структурная схема высоковольтного модуля серии FS представлена на рис. 3.

### Серия Q

Серия Q ультракомпактных модулей включает несколько новых моделей с дополнительными свойствами. Постоянное развитие модулей гарантирует непрерывный статус источника промышленного стандарта в будущем:

- серия QH имеет выходную мощность в 2,5 раза больше в таком же корпусе, выходное напряжение до 5 кВ;
- вариант с выводом от средней точки обеспечивает положительный и отрицательный симметричные выходы относительно «земли» до  $\pm 450$  В;
- доступно заказное исполнение с высотой корпуса 10,16 мм;
- опциональный управляющий вывод с высоким импедансом (для моделей с выходом до 5 кВ) может быть использован для следующих целей:
  - управление высоковольтным выходом от усилителя ошибки для применения в схеме регулятора с замкнутой обратной связью;
  - управление включением/выключением от логической схемы.

### Серия A

Серия A ультракомпактных модулей отличается еще большей миниатюризацией. Основанные на топологии серии Q, модели A-серии обеспечивают большую выходную мощность, но при этом значительно меньше

Таблица 2. Модули электропитания серий A и Q

	Модули со стандартной мощностью		Модули с повышенной мощностью	
	A (до 2 кВ)	Q	AH (до 2 кВ)	QH
Выходная мощность, Вт	1	0,5	1,5	1,25
Объем, см <sup>3</sup>	1,696	2,05	1,696	2,05
Вес, г	5,66	4,25	5,66	4,25
Удельная мощность, Вт/дм <sup>3</sup>	625	250	937,5	625
Высота, мм	6,35	12,7	6,35	12,7
Площадь основания, см <sup>2</sup>	2,67	1,6	2,67	1,6



Рис. 4. Внешний вид миниатюрного пропорционального изолированного высоковольтного преобразователя напряжения серии A

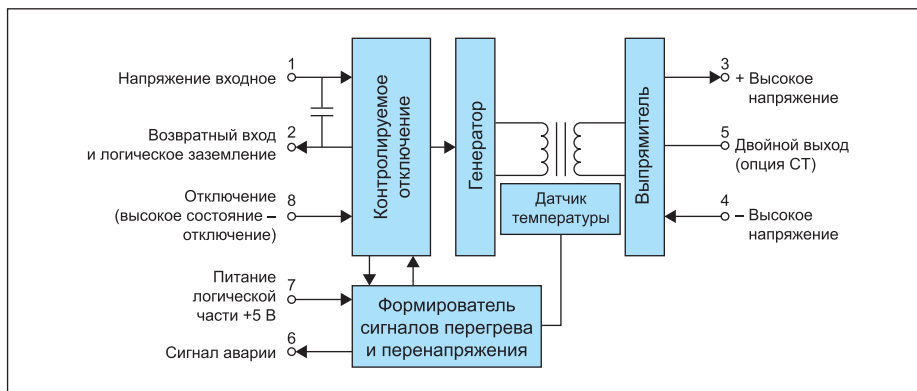


Рис. 3. Структурная схема пропорционального высоковольтного преобразователя напряжения серии FS

и легче. В таблице 2 сравниваются модули электропитания серий A и Q.

Преобразователи серии A обеспечивают выходные напряжения в пределах 100–6000 В. Эти преобразователи, размером с электронный компонент, оптимальны для применений, где требуются минимальные габариты и вес. Использование резонансного генератора с квазисинусоидальной формой сигнала (частота 50–350 кГц) и полностью экранированный трансформатор обеспечивают чистое и надежное преобразование высокого напряжения с низкой пульсацией напряжения и низким уровнем пульсации входного тока, что делает эти устройства идеальными для встраивания в чувствительное к шуму оборудование. Применение собственного специального процесса герметизации обеспечивает достижение отличных высоковольтных и температурных характеристик. Ток утечки с входа на выход имеет очень низкое значение — менее 100 нА, а раздельная емкость — менее 250 пФ.

Внешний вид миниатюрных и изящных высоковольтных преобразователей напряжения серии A приведен на рис. 4.

### Серия ULP

Миниатюрные стабилизированные и программируемые высоковольтные модули питания серии ULP разработаны для портативного оборудования с батарейным питанием. В мобильной и бортовой аппаратуре применяется серия ULP, когда требуется малый вес, небольшие размеры полезной нагрузки и длительный срок работы. Обеспечивая выходную мощность до 2 Вт, ULP-модули способны действовать в режиме холостого хода до 4500 ч, работая от двух литиевых аккумуляторов типа AA. На выходе обеспечивает напряжение 500 В – 5 кВ, в зависимости от модели. Предлагаются устройства, выдерживающие диапазон температур  $-55...+85$  °C на основании корпуса.

Характеристики модулей питания серии ULP:

- Выходная мощность: 4 Вт.
- Объем: 36,87 см<sup>3</sup>.
- Вес: 51 г.

- Удельная мощность: 108 Вт/дм<sup>3</sup>.
- Высота: 12,7 мм.
- Площадь основания: 29,03 см<sup>2</sup>.
- Внешние подключения:
  - вход: 5,4–7,4 В;
  - входной сигнал управления: выключение TTL-совместимым сигналом, активный уровень — высокий;
  - выход: текущий контроль напряжения 0–2,5 В;
  - выход: опорное напряжение +2,5 В;
  - вход программирования: 0–2,5 В.

### Современное положение дел

Тенденции, представленные здесь, показывают, что поставщики высоковольтных модулей непрерывно ищут новые пути для обеспечения заказчиков все более совершенными и разнообразными вариантами исполнения модулей — стандартными, сменными, миниатюрными решениями, предназначенными для высоковольтных систем.

### Обеспечение надежности высоковольтных модулей электропитания

Разработке и производству модулей высокого напряжения сопутствует ряд дополнительных дисциплин, необходимых для того, чтобы выпускать изделия, имеющие долговременную надежность и предназначенные для эксплуатации в жестких условиях окружающей среды. Поскольку высоковольтные источники питания становятся все более компактными и миниатюрными, усваивание этих дисциплин становится весьма важным для обеспечения долговременной и бесперебойной работы в производственных условиях. Небрежность в правильном применении принципов конструирования и изготовления может привести к резкому ухудшению заложённых при проектировании показателей.

В этом разделе хотелось бы поделиться некоторыми из наиболее важных соображений, имеющих отношение к разработке надежных высоковольтных источников.

Один из основных аспектов влияния на надежность — циклическое температур-

ное воздействие, которое может происходить в источнике питания. Помимо влияния температурных изменений, внимание должно быть уделено несогласованным или несовместимым материалам с разными коэффициентами температурного расширения и механическими напряжениями, со временем способными привести к разрушению изоляции. Другие факторы, в частности недостаточная адгезия, возникающая со временем хрупкость, обусловленная потерей пластификаторов, чрезмерными колебаниями температуры, воздействием ультрафиолетового излучения, влиянием коронного разряда, озона, нефтепродуктов, жестких моющих средств и растворителей, также могут привести к преждевременному отказу в работе.

Сочетание свойств материалов, факторов внешней среды и конструкции изделия иногда вызывает совершенно неожиданные побочные эффекты. Например, со временем токи утечки могут увеличиться с вероятным образованием дугового разряда и, как следствие, привести к катастрофическому отказу. Чрезмерные токи утечки создают отклонения в схемах обратной связи с высоким импедансом, приводящие к дрейфу напряжения и проблемам со стабильностью и изменениям в температуре. Основания печатной платы из стеклотекстолита FR4 могут быть в высокой степени не защищенными от загрязнения и поглощаемой влажности.

Поглощаемая влажность снижает температуру стеклования стеклотекстолита ( $T_g$ ) FR4, делая узел чувствительным к эксплуатационным отказам в применениях с динамичными температурными изменениями. Загрязнения, неправильные наполнители или недостаточное отверждение в системах герметизации могут служить причиной чрезвычайно высоких токов утечки, которые являются нелинейными и изменчивыми непостоянными во времени и температурах и потенциально дестабилизируют высоковольтную систему. Другим примером является то обстоятельство, что высоковольтные схемы уязвимы к электрохимической миграции. Влажность может способствовать ионной коррозии, формирующей проводящие дорожки (волокна).

Древовидное расширение может возникнуть от перераспределенных ионов металлов. Высоковольтные нагрузки ускоряют эти электрохимические процессы, однако оловянные контактные волоски (дорожки) способны образовываться без напряженности электромагнитного поля. Кристаллические микроструктуры, сформированные ионной миграцией, создают весьма высоковольтные градиенты и напряженности электрического поля, что становится причиной преждевременного пробоя между узлами напряжений. Вот почему особое значение приобретают правильное конструирование и производственные проверки, которые к тому же должны превосходить документированные промышленные стандарты.

### Преждевременные отказы

Наведенные (индуцированные) электростатические эмиссии электронов становятся причиной преждевременного ресурсного отказа системы изоляции, особенно при высокой температуре окружающей среды. Электрический пробой происходит, когда электрическое поле в изолирующем материале достаточно сильно, оно может ускорить носители свободных зарядов (электроны или ионы) до высокой скорости, чтобы выбить электроны из атомов, ионизируя их. Свободные электроны и ионы, в свою очередь, ускоряются и сталкиваются с другими атомами, создавая больше носителей заряда в лавинной каскадной реакции. Следовательно, изолятор заполняется подвижными носителями заряда и его сопротивление значительно снижается. Эта бомбардировка ионами, наряду с возможностью внешнего воздействия на поверхность изолятора частичным разрядом, коронным разрядом и озоном, быстро разрушает изоляционный материал до тех пор, пока не произойдет отказ в работе.

Примеси в изолирующем материале, такие как воздушный пузырь, жидкости, влага и посторонние частицы, снижают напряжение пробоя. Герметизация в вакууме уменьшает содержание воздуха и хорошо развита, поэтому тщательно контролируемый технологический процесс весьма важен для обеспечения качественной и надежной герметизации. Кроме того, несовместимые материалы могут вызвать формирование локальных карманов неотвержденного герметика, обусловленного катализатором и вытянутого по направлению к постороннему материалу и из основного материала. Система изоляции должна быть негигроскопичной.

Градиент напряжения также относится к факторам, требующим внимания при обсуждении предмета изоляции. Отсутствие правильного контроля градиента напряжения создает чрезвычайную напряженность локального электрического поля. Существует нелинейная связь уровней напряжения пробоя в газах при различных давлениях. В частности, авиационные системы должны работать вблизи наиболее восприимчивой зоны, требующей методики проектирования и производственных процессов, соответствующих наивысшему стандарту.

Кому-то может показаться хорошей идеей смешать различные изолирующие материалы, чтобы обеспечить достаточную стойкость к воздействию напряжения. Тем не менее неправильный подбор в диэлектрической проницаемости изоляторов приведет к неравномерной напряженности электрического поля параллельно изолятору (закон Кирхгофа). Усиленная напряженность электрического поля может служить причиной пробоя изолятора, а паразитная емкость — неравномерного распределения напряжения, особенно в применениях с переменным то-

ком. Выбросы напряжения и тока, приложенные к компонентам и материалам, способны вызвать немедленный катастрофический отказ, или разрушение может накапливаться продолжительное время и снизить запас прочности системы, пока не произойдет отказ. Так как энергия (выраженная в джоулях) равна  $1/2 CV^2$ , накопленная энергия, переданная во время разряда, повышается очень быстро с увеличением напряжения.

Частые кратковременные импульсы, подобные тем, что происходят во время внешних явлений образования дуги, могут прикладывать скачкообразное напряжение и оказывать температурные воздействия на компоненты и материалы. Вместе с тем паразитные элементы, такие как емкость и индуктивность, начинают действовать во время переходных событий, что приводит к резкому изменению индуктивности на высоковольтном выходе или неравномерному распределению напряжения на внутренних компонентах. Компоненты и материалы, используемые в конструкции, должны быть отобраны таким образом, чтобы выдерживать подобные воздействия.

Забота о здоровье и окружающей среде подразумевает замену замедлителей горения на основе брома другими материалами, в частности компаундом из тригидрата алюминия, поскольку добавки к герметизирующим материалам должны соответствовать требованиям к возгораемости. Об этом, например, говорится в стандарте UL94-V0, где приведена оценка характеристик сопротивляемости материалов воспламенению и горению. При температурах 220 °C и выше тригидрат алюминия распадается и теряет 35% своего веса в виде водяного пара. Когда в высоковольтной системе происходит дуговой разряд, он может создать плазму с температурой, превышающей 2000 °C. Тем не менее некоторые материалы разрушаются при температурах значительно ниже опубликованных спецификаций, при электрическом поле с небольшой напряженностью. Выделение водяного пара тригидратом алюминия уменьшает распространение пламени, но нежелательно в высоковольтных системах изоляции.

Мы рассмотрели только некоторые проблемы, которые могут возникнуть в процессе проектирования и производства высоковольтных систем. Ведь недочеты и ошибки при конструировании могут проявиться спустя длительное время, поэтому каждый элемент разработки должен быть понят и тщательно продуман, прежде чем будет реализован новый продукт или процесс. Во время проектирования и производства изделий требуется самое пристальное внимание к деталям, чтобы избежать появления скрытых дефектов. Правильное применение законов электротехники, машиностроения, химии и физики — все это необходимо при создании высоконадежных высоковольтных

решений и внедрении производственных процессов. Испытанные процессы действительно существуют и позволяют изготавливать высоковольтные устройства, способные работать десятилетиями, даже в жестких условиях эксплуатации.

Примером высоковольтного решения, действующего в жестких условиях, является система, в которой более 5000 датчиков нейтрино установлены на глубине более 2 км во льдах Антарктиды на Южном полюсе. Каждый датчик содержит цифровой оптический модуль, в котором предусмотрен высоковольтный источник питания — модифицированный стабилизированный источник питания SA20P-5T компании XP EMCО, формирующий напряжение 2050 В с уровнем пульсации менее чем 2 мВ (!). Непрерывное функционирование при температурах ниже  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  в течение 20 лет и высокая надежность здесь становятся решающим фактором, поскольку в экстремальных условиях эксплуатации нет возможности для ремонта датчика. Цифровые оптические модули работают более 10 лет, и пока не было

сообщений о выходе из строя таких изделий. Вычисленное значение среднего времени до критического отказа источника питания равно 123 годам. Подробно проект нейтринного телескопа IceCube для обнаружения нейтрино описан в [4]. ■

## Литература

1. Next-Generation, Miniature High-Voltage Power Modules. WP02-01. XP EMCО, 2017.
2. Doherty M. Designing for reliability in high voltage applications. EDN Network. September 30, 2016.
3. Березин О.К., Костиков В.Г., Шахнов В.А. Источники электропитания радиоэлектронной аппаратуры. М.: «Три Л», 2000.
4. Жданкин В.К. Высоковольтные преобразователи напряжения в виде стандартных модулей: просто, компактно, экономно // Современная электроника. 2016. № 4.