

# Некоторые аспекты организации систем электропитания АФАР

## Часть 2. Нужно ли усреднять импульсную нагрузку на источник электропитания?

В первой части статьи [1] описаны преимущества и недостатки централизованной и децентрализованной систем электропитания приемопередающих модулей (ППМ) активных фазированных антенных решеток (АФАР), а также требования к помехоэмиссии источников электропитания (ИП), применяющихся в таких системах. Во второй части будут рассмотрены примеры конфигураций систем электропитания любых импульсных нагрузок с усреднением и без усреднения импульсной мощности, проанализированы подходы к выбору ИП, показаны особенности, преимущества и недостатки каждой из этих структур.

Олег Негреба

onegreba@aedon.ru

При разработке концепции построения ИП различных импульсных нагрузок (и не только ППМ АФАР) разработчики могут прибегнуть к двум различным подходам: либо

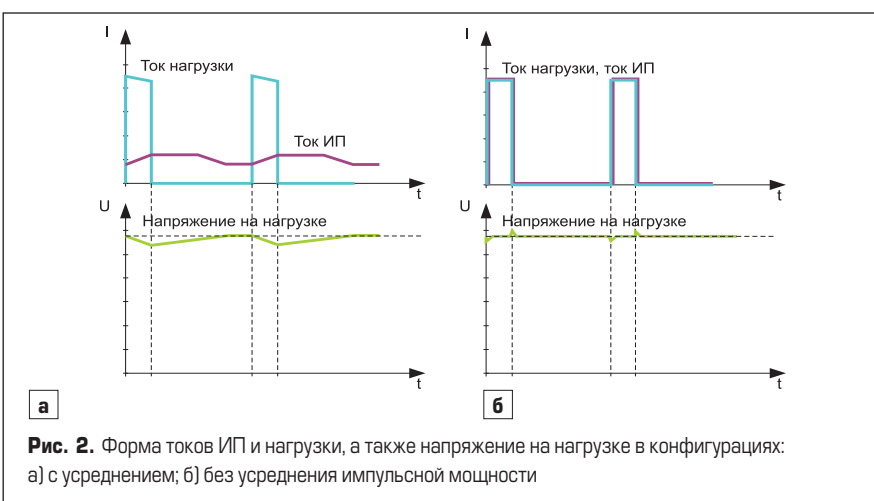
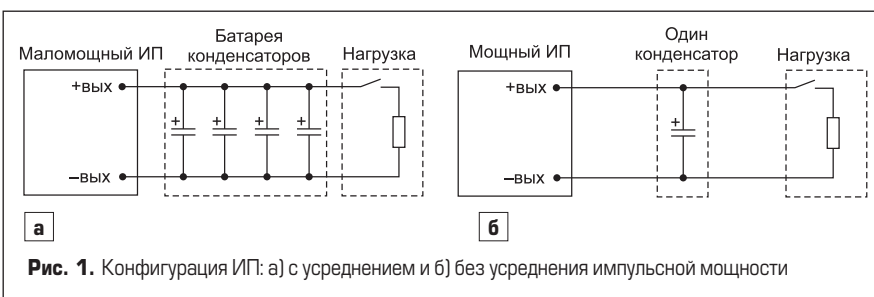
применить мощный ИП, который обеспечит полную импульсную мощность, либо усреднить импульсную мощность нагрузки большой батареей конденсаторов и использовать ИП меньшей мощности.

На рис. 1 изображены структуры таких систем, а на рис. 2 приведены формы токов, выдаваемого ИП и потребляемого нагрузкой, а также проиллюстрировано напряжение на ней.

Один из лидеров мирового рынка модульных ИП американская компания Vicor Corporation показала [2], что во многих случаях система электропитания будет компактнее, дешевле и надежнее, если использовать усреднение мощности, потребляемой импульсной нагрузкой. При этом отмечена особенно высокая эффективность такого подхода для приложений, в которых нагрузка допускает существенную нестабильность напряжения, вызванную разрядом и зарядом накопительных конденсаторов, подключенных к ней параллельно.

Несмотря на то, что некоторые источники [3, 4] указывают на необходимость подключения емкостных или индуктивно-емкостных накопителей энергии рядом с каждым ППМ при любом построении системы электропитания, все же в некоторых случаях возможно уменьшить их величину, а иногда и полностью исключить такие накопители из структуры, улучшив при этом массогабаритные и надежные показатели системы электропитания [5].

Рассмотрим один из типовых примеров системы электропитания ППМ АФАР. Итак, напряжение питания ППМ составляет 28 В, импульсная потребляемая мощность 450 Вт, максимальная длительность импульса 5 мс, скважность импульсов — 5



(что соответствует коэффициенту заполнения 20%). В таблице сведены исходные данные такого технического задания.

В первом варианте для энергоснабжения ППМ АФАР используем ИП мощностью 500 Вт, который будет полноценно обеспечивать все 450 Вт мощности, потребляемой периодической импульсной нагрузкой. Во втором случае, ввиду того что средняя мощность нагрузки составляет всего 90 Вт, применим источник мощностью 150 Вт совместно с большой батареей конденсаторов, усредняющей потребляемый нагрузкой ток.

Поскольку от стабильности напряжения питания передатчика ППМ напрямую зависят показатели его СВЧ-излучения, типовое требование по нестабильности этого напряжения составляет  $\pm 1-4\%$ . Для того чтобы обеспечить указанное качество напряжения питания нагрузки в конфигурации без усреднения импульсной мощности, достаточно одного небольшого конденсатора емкостью около 220 мкФ, работающего только во время переходных процессов на фронте и спаде импульса нагрузки, а для системы с усреднением мощности необходима целая батарея конденсаторов суммарной емкостью примерно 70 000 мкФ, снабжающая нагрузку энергией в течение всего ее рабочего импульса. В работе [2] описано несколько проблем, с которыми могут столкнуться разработчики систем электропитания, использующие накопительную емкость настолько большой величины. В частности, для многих серийных модульных ИП включение на такую существенную емкость приводит к срабатыванию защиты преобразователя от перегрузки по выходному току, кроме этого, конденсаторная батарея большой емкости может дестабилизировать в ИП контур обратной связи по напряжению.

В свою очередь, для схемы без усреднения импульсной мощности следует отметить, что величина требуемой емкости конденсатора на выходе ИП напрямую зависит от быстродействия его петли обратной связи по напряжению, которое также во многом ограничивается частотой преобразования ИП — высокая частота преобразования позволяет получить

**Таблица.** Исходные данные системы электропитания ППМ АФАР

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Входная сеть (постоянный ток), В</b>       | 300       |
| <b>Параметры нагрузки</b>                     |           |
| <b>Напряжение питания, В</b>                  | 28        |
| <b>Импульсная потребляемая мощность, Вт</b>   | 450       |
| <b>Максимальная длительность импульса, мс</b> | 5         |
| <b>Сквозность импульсов</b>                   | 5         |
| <b>Климатические условия</b>                  |           |
| <b>Температура окружающей среды, °С</b>       | -40...+60 |

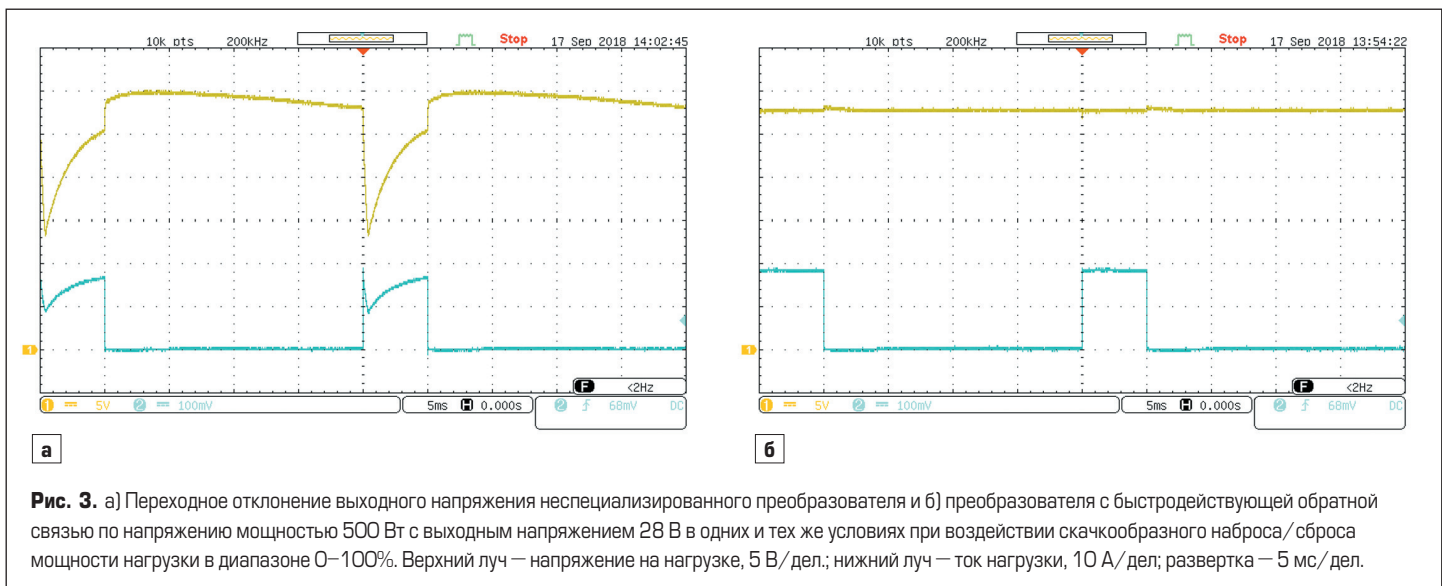
быстрый отклик преобразователя на скачкообразное изменение его нагрузки.

В документации на унифицированные модульные преобразователи напряжения часто размещают осциллограммы переходного процесса, иллюстрирующие реакцию выходного напряжения на воздействие импульсной нагрузки, которые помогают сравнить между собой время отклика их обратной связи на динамическую нагрузку. Анализируя величину переходного отклонения выходного напряжения на фронтах наброса и сброса тока на таких осциллограммах, следует обращать внимание на размах изменения тока нагрузки в процентах от максимальной мощности ИП, на минимальное значение динамической нагрузки во время испытаний, а также на скорость изменения импульсного тока. Большинство производителей ИП проводят испытания своей продукции на динамическую нагрузку в достаточно щадящих условиях, чтобы продемонстрировать приемлемые показатели стабильности выходного напряжения, — например, задают размах изменения нагрузки ИП в диапазоне только 25 или 50%, сброс нагрузки осуществляют не до холостого хода, а фронты изменения тока устанавливают достаточно медленными, продолжительностью в десятки и сотни микросекунд. В приложениях с питанием ППМ без усреднения импульсной мощности ни один из перечисленных подходов к испытаниям не является приемлемым — изменение выходного тока ИП происходит за микро- и даже наносекунды, мощность, потребляемая нагрузкой во время

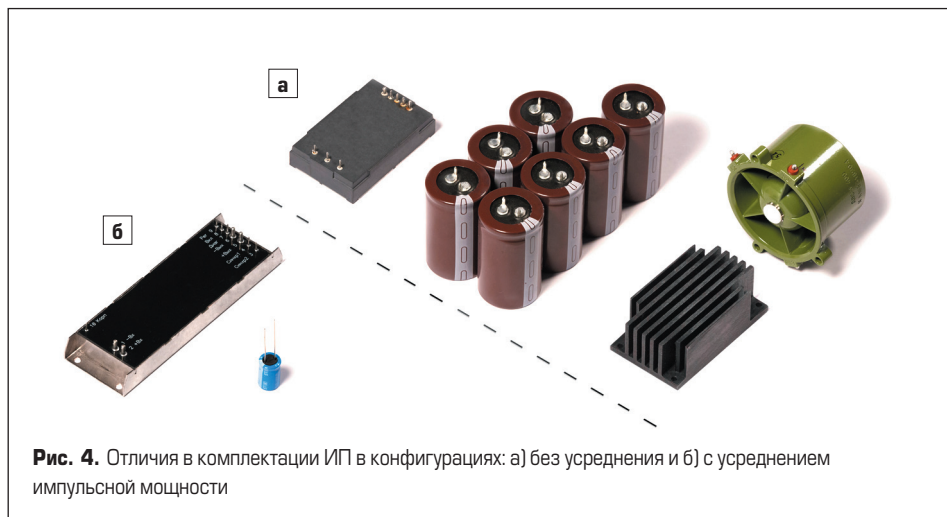
пауз, близка к нулю, а во время рабочего импульса составляет 70–100% от максимальной мощности ИП. Для того чтобы объективно оценить качество отработки преобразователем импульсной нагрузки, необходимо либо запрашивать у техподдержки производителя осциллограммы переходных процессов выходного напряжения преобразователя в требуемом для системы электропитания режиме, либо проводить такие измерения самостоятельно.

В качестве примера на рис. 3 показано сравнение двух различных серийных изолированных преобразователей напряжения мощностью 500 Вт с выходным напряжением 28 В при подключенном к их выходу конденсаторе емкостью 220 мкФ и набросе/сбросе нагрузки в пределах 0–100% и обратно с фронтами изменения тока, равными 200 нс. В одних и тех же условиях величина переходного отклонения выходного напряжения при набросе мощности нагрузки у преобразователя с быстродействующей обратной связью примерно в 15 раз меньше, чем у аналогичного неспециализированного преобразователя. Быстродействие контура обратной связи по напряжению и величина емкости собственных выходных конденсаторов второго преобразователя оказались достаточны для обеспечения в данных условиях 3%-ной стабильности выходного напряжения без каких-либо значительных внешних фильтров.

Продолжим сравнение комплектации ИП для конфигураций с усреднением и без усреднения импульсной мощности. Поскольку более мощные преобразователи обычно имеют и более высокий КПД, то в рассматриваемом примере эффективность 500-Вт преобразователя при выходной мощности 450 Вт составляет 92% и приводит к тепловыделению 7,8 Вт, а у 150-Вт преобразователя, выбранного нами для системы с усреднением импульсной мощности, КПД при средней мощности нагрузки 90 Вт равен 87,5%, что влечет за собой 12,5 Вт тепловыделения. В результате, для того чтобы работать без перегрева, более мощному преобразователю оказалось достаточно собственной по-



**Рис. 3.** а) Переходное отклонение выходного напряжения неспециализированного преобразователя и б) преобразователя с быстродействующей обратной связью по напряжению мощностью 500 Вт с выходным напряжением 28 В в одних и тех же условиях при воздействии скачкообразного наброса/сброса мощности нагрузки в диапазоне 0–100%. Верхний луч — напряжение на нагрузке, 5 В/дел.; нижний луч — ток нагрузки, 10 А/дел.; развертка — 5 мс/дел.



явно выраженная пилообразная составляющая, вызванная разрядом и зарядом батареи накопительных конденсаторов, а во второй структуре, без усреднения выходной мощности, форма напряжения — практически прямая линия с короткими переходными процессами в моменты включения и выключения нагрузки.

На следующих осциллограммах приведены формы тока, который выдавали преобразователи (рис. 6). Здесь видно, как первый преобразователь действительно работает постоянно со средней мощностью около 90 Вт, а второй отдает в нагрузку импульсы мощности амплитудой 450 Вт.

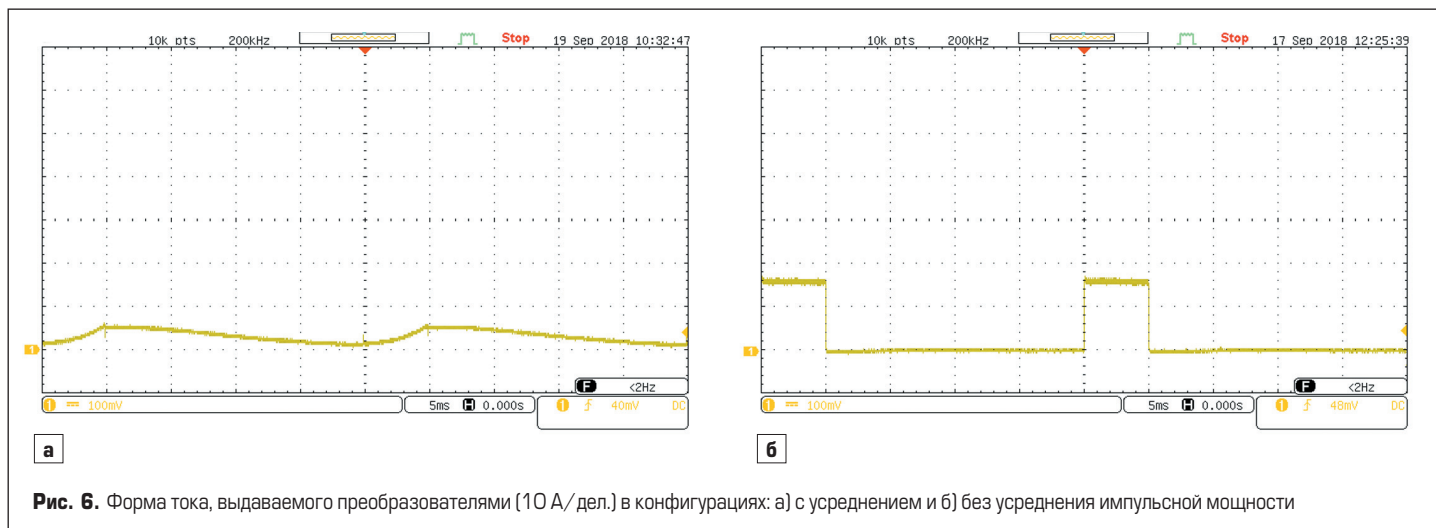
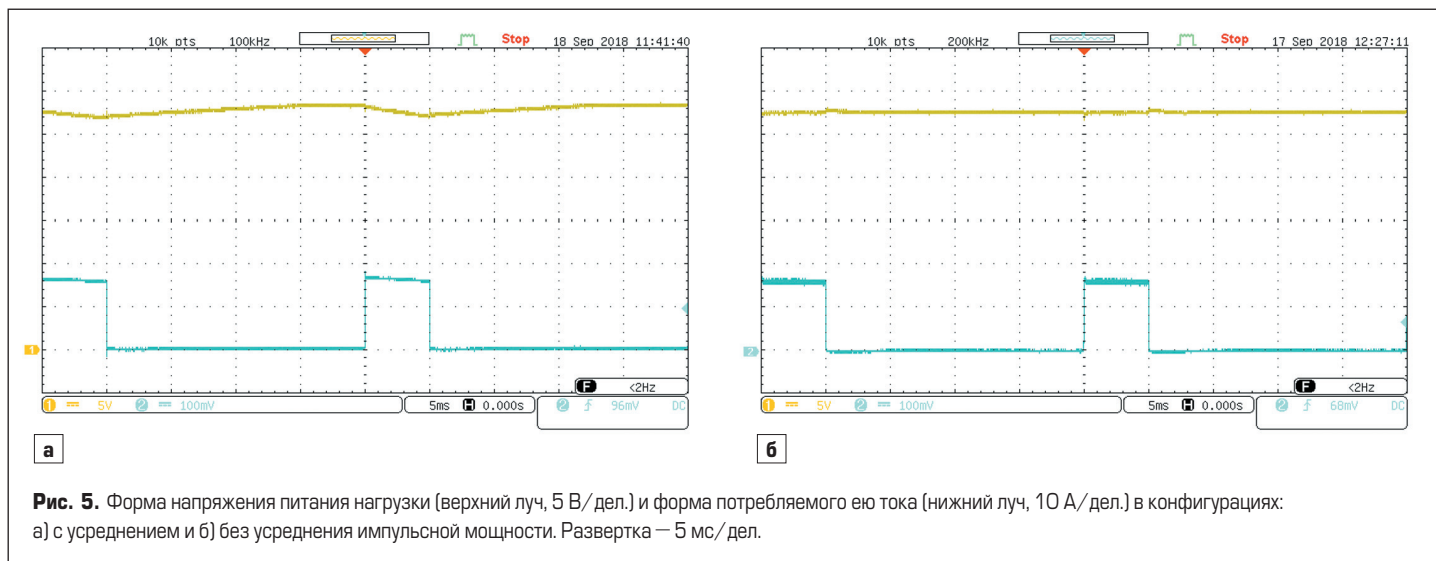
Следует отметить, что форма выходного тока преобразователя, изображенная на осциллограмме (рис. 6б), указывает на одну из особенностей систем электропитания импульсных нагрузок без усреднения импульсной мощности. Поскольку ИП в данной конфигурации обеспечивает полноценное энергоснабжение нагрузки в течение всего рабочего импульса, потребляемый им из сети ток носит также явно выраженный импульсный характер, что допустимо не для всех приложений. Нагрузка на входную сеть в примере с усреднением импульсного тока в несколько раз меньше. Если входная сеть способна обеспечивать полную импульсную мощность

верхности корпуса, а 150-Вт преобразователь потребовал дополнительный радиатор и принудительный обдув. Даже в случае, когда ИП крепится на общую с ППМ жидкостную систему охлаждения, повышенное тепловыделение вызовет нежелательное снижение ее эффективности.

Таким образом, мы видим, что в рассматриваемом примере попытка сэкономить на мощности ИП вызывает существенные трудности при реализации системы электропитания и за-

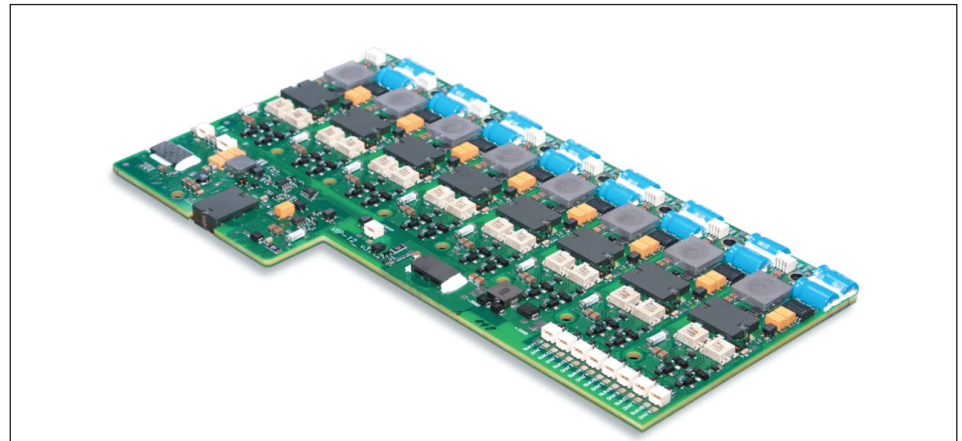
метно осложняет использование подобной конфигурации (рис. 4).

На рис. 5 показаны экспериментально снятые осциллограммы, которые иллюстрируют форму напряжения на нагрузке и форму потребляемого ею тока для первого и второго вариантов. В обоих примерах форма тока, потребляемого нагрузкой, одинаково импульсная и прямоугольная, что видно по нижним осциллограммам, но в конфигурации с усреднением мощности на нагрузке присутствует



нагрузки с учетом КПД ИП, то проблем с использованием конфигурации без усреднения импульсной мощности обычно не возникает, но в случае, когда ее мощность ограничена и не позволяет питать нагрузку полноценной импульсной мощностью, приходится применять специальные меры по приведению характера потребляемого тока от импульсного к постоянному с некоторой допустимой пульсацией с помощью входных активных или пассивных токовых фильтров. Во время импульса нагрузки такой фильтр должен ограничивать потребляемый от входной сети ток, но в то же время питать ИП требуемой импульсной мощностью, а во время паузы — восполнять от сети разницу между отданной и потребленной мощностью. Очевидно, что такие устройства, функционально представляющие собой фильтр тока, должны служить накопителями энергии. Применение пассивных индуктивных или емкостных накопителей энергии почти всегда сопряжено с неприемлемыми массогабаритными и стоимостными показателями, поэтому наиболее оптимальным вариантом является использование в качестве токового фильтра высокочастотного преобразователя напряжения без гальванической развязки с фильтрующим конденсатором на выходе. Причем целесообразно использовать повышающие, а не понижающие преобразователи, поскольку обычно энергетически выгоднее накапливать энергию при более высоком напряжении, так как накапливаемая в конденсаторе энергия пропорциональна квадрату напряжения ( $E = CU^2 / 2$ ). Во многих случаях, если изначально система питается от сети переменного тока, роль токового фильтра берет на себя корректор коэффициента мощности.

Итак, что мы имеем в итоге? Для построения системы электропитания импульсной нагрузки без усреднения импульсной мощности нам потребовался один преобразователь мощностью 500 Вт с небольшим конденсатором на выходе. Однако при этом мы должны быть уверены, что входная сеть сможет выдержать импульсное потребление амплитудой около 500 Вт. Для построения системы с усреднением импульсной мощности помимо преобразователя нам потребовались дополнительные средства по сглаживанию выходного импульсного тока, а также эффективная система отвода тепла, что приведет к однозначному снижению надежности такой конфигурации: электролитические конденсаторы со временем высыхают, а электромеханический компонент, вентилятор, также имея ограниченный ресурс, подвергается влиянию пыли и песка и является источником шума и вибрации. В случае использования системы жидкостного охлаждения повышенные теплотери снизят ее эффективность. К тому же, если коэффициент заполнения импульсов тока нагрузки во время работы системы или при ее модернизации увеличится с 20%, например, до 40%, то на работе 500-Вт преобразователя это практически не отразится, тогда как 150-Вт перейдет в аварийный режим перегрузки и может выйти из строя. Сравнение рассмотренных конфигу-



**Рис. 7.** Двенадцатиканальная система электропитания, обеспечивающая энергоснабжение восьми ППМ АФАР напряжением +28 В без усреднения импульсной мощности

раций системы электропитания по стоимости реализации практически не оставляет шансов на существование для варианта с усреднением мощности.

В качестве практического примера использования преимуществ подхода к электропитанию импульсных нагрузок без усреднения импульсной мощности на рис. 7 приведен внешний вид двенадцатиканальной системы электропитания [6], обеспечивающей энергоснабжение восьми ППМ напряжением +28 В, а также питание служебных узлов напряжением +5, +12, -6 и -50 В. Конденсаторы, установленные по выходам +28 В, поддерживают требуемое качество напряжения лишь во время переходных процессов на фронте и спаде импульса нагрузки и не оказывают влияния на размах импульсного тока. Кроме этого, в данном изделии был реализован принцип децентрализации электропитания ППМ, за счет чего удалось получить высокую надежность системы, ее малую высоту (11 мм), а также другие преимущества, свойственные децентрализованным системам электропитания. Влияние импульсной нагрузки на первичную сеть питания переменного тока блокируется там, где это рациональнее, то есть на стороне высокого напряжения, батареей конденсаторов, подключенной к выходу преобразователя, формирующего шину +300 В из входного переменного напряжения.

Приведенный анализ показал, что существуют такие требования к системам электропитания АФАР, в которых однозначное преимущество будет иметь вариант питания нагрузки без усреднения импульсной мощности. Но все же есть ряд приложений, в которых усреднение мощности будет выгоднее. В первую очередь — в структурах со значительной скважностью импульсов, то есть для коэффициента заполнения менее 10%, или если длительность этих импульсов составляет не миллисекунды, как в рассмотренном примере, а единицы и доли микросекунд — время, сравнимое с временем отклика обратной связи по напряжению. Еще одно из возможных применений системы с усреднением мощности — в системах, когда нагрузка конвертера способна выдерживать широкий диапазон

входного напряжения, например, если это PDL-преобразователь.

В каждом конкретном случае разработчик систем электропитания АФАР должен обращать внимание на все имеющиеся в его распоряжении факторы, учитывать все требования, предъявляемые в техническом задании к построению системы, и принимать решение по ее конфигурации, только комплексно рассмотрев преимущества и недостатки всех возможных вариантов ее реализации.

*Автор выражает искреннюю признательность за помощь в подготовке материалов для статьи главному конструктору ООО «ЭЛИАРС» М. В. Съедину, заместителю генерального директора АО «НПП «Радий» по научной работе, главному конструктору М. Г. Виткову, ведущему конструктору, начальнику сектора АО «Микроволновые системы» А. Д. Матвееву, ведущему инженеру ООО «Алмаз-Антей Телекоммуникации» А. В. Гуринову, начальнику отдела АО «ВНИИРТ» И. Н. Володину, а также сотрудникам ООО «АЕДОН» Н. В. Четверикову, А. Н. Проценко, Д. С. Ермакову и А. И. Постникову.*

## Литература

1. Негреба О. Л. Некоторые аспекты организации систем электропитания АФАР. Часть 1 // Силовая электроника. 2018. № 5.
2. Берри Д. (Berry D.). Системы электропитания с усреднением импульсной мощности. Пер. с англ. О. Негребы // Силовая электроника. 2018. № 4.
3. Кириенко В. П. Регулируемые преобразователи систем импульсного электропитания. ЧГУ им. И. Н. Ульянова, 2008.
4. Кушнерев Н. А., Шумов М. А. Система электропитания активных фазированных антенных решеток // Радиотехника. 2007. № 12.
5. Негреба О. Л. Обеспечение качества энергоснабжения импульсных нагрузок. Практические решения // Современная электроника. 2015. № 8.
6. Индивидуальные разработки ООО «АЕДОН». [www.aedon.ru/catalog/custom](http://www.aedon.ru/catalog/custom)