

Особенности построения матричных систем распределенного электропитания для АФАР

Александр ГОНЧАРОВ,
к. т. н.
alexann.goncharov@gmail.com

Матричные системы распределенного электропитания (МСРЭП) [1] получают все большее применение в связи с распространением цифровых принципов не только обработки сигналов, но и конструктивного построения блоков для больших систем. Матричные технологии быстро развиваются в аппаратурной реализации цифровых сетевых устройств, суперкомпьютеров, радаров, а также в телевизорах, фотоаппаратах и во многом другом. И повсюду требуются источники и системы электропитания, которые в системном смысле имеют матричные основы построения.

Определение матричной системы распределенного электропитания МСРЭП — это совокупность идентичных источников вторичного электропитания (модулей ИВЭП), распределенных на плоскости условной матрицы и находящихся в точках пересечения строк и столбцов матрицы, связанных, как правило, между собой по шинам управления и обмена информацией о состоянии ИВЭП.

Рассмотрим особенности МСРЭП на примере одного из важных объектов новейшей электроники — радара с активной фазированной антенной решеткой, АФАР [2–5]. Проанализируем некоторые перспективные решения систем электропитания для АФАР, особенности построения и спорные моменты, без которых не обходится ни одно новейшее техническое решение современной жизни.

Итак, что такое АФАР с позиций микроэлектроники?

АФАР — это совокупность (плотно) приемопередающих модулей (ППМ), образующих матрицу (необязательно прямо-

угольную) из строк и столбцов в плоскости, перпендикулярной направлению условного электронного луча. Главная идея АФАР — при передаче и приеме сигнала производить широкоугольное сканирование пространства с помощью не механического перемещения радара, а фазированного управления лучом каждого элемента матрицы, каждого ППМ. Поскольку разрешающая способность таких радаров напрямую связана с высокочастотностью сигнала, а шаг решетки ограничен половиной длины излучаемой и принимаемой волны [2, 6], то с учетом современных рабочих частот — длин волн таких радаров, составляющих десятки и единицы миллиметров, — существует физическое ограничение сверху на линейные размеры ППМ вдоль полотна решетки антенны АФАР. Именно поэтому область силовой электроники для АФАР сопровождается приставками мини-, микро-, микромини-.

Наиважнейшее свойство АФАР — практически равная единице надежность всей решетки совместно с расположенной на ней аппаратурой в виде совокупности ППМ. Правда, при единичных и случайно расположенных отказах ППМ и антенн. Отказ заметной части строки будет все-таки неприятно критичен [2].

Фактически вся аппаратура АФАР, содержащаяся в решетке, находится под защитным «зонтиком» предельной надежности матричной решетки.

Следующая особенность АФАР — импульсное потребление решетки, когда потребляемая мощность может меняться от десятков ватт до десятков (в наземных и более) киловатт за очень короткое время — микросекунды и наносекунды.

На основе вышеизложенного можно сформулировать главные требования к МСРЭП АФАР:

1. Геометрические размеры элементарного модуля ИВЭП АФАР в идеальном случае должны иметь величины не более половины длины волны АФАР вдоль полотна решетки антенны АФАР. Для диапазонов S, C и X это в наилучшем для ИВЭП случае с учетом системы охлаждения составляет не более 33, 15 и 9 мм соответственно [1] (табл. 1).
2. На выходе каждого элементарного модуля ВИП должна быть накопительная весьма высококачественная (с минимальным внутренним активным сопротивлением и с минимальной индуктивностью) емкость для питания передатчика в моменты нарастания тока при включении передатчика, а также на время реакции ИВЭП. О возможности значительного уменьшения этой емкости или даже ее полного исключения автор уже вел полемику и уверен, что наличие таких емкостей принципиально для МСРЭП АФАР [7].
3. МСРЭП должна состоять из элементарных модулей ИВЭП, размещенных в максимальной степени внутри или в непосредственной близости к ППМ — без этого надежность всей АФАР может оказаться катастрофически нарушенной.

Таблица 1. Параметры элементарного модуля ИВЭП АФАР для разных диапазонов

| Обозначение диапазона | Частота излучения, ГГц | Длина волны, мм | ΔL , мм |
|-----------------------|------------------------|-----------------|-----------------|
| S | 2–4 | 150–75 | 70–33 |
| C | 4–8 | 75–37,5 | 33–15 |
| X | 8–12 | 37,5–25 | 15–9 |



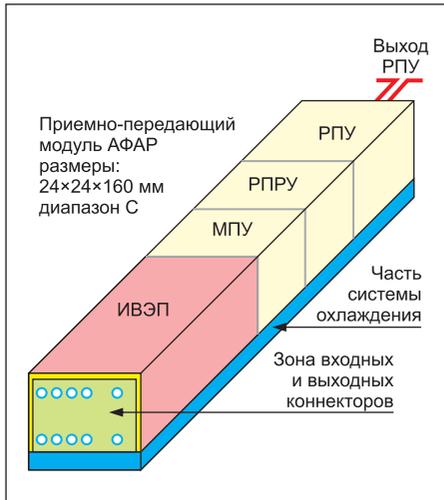


Рис. 1. Приемопередающий модуль АФАР

Существует несколько характерных типов АФАР, в данной работе рассмотрим МСРЭП авиационных АФАР, находящихся за носовым обтекателем, — это наиболее трудный для реализации технический объект с точки зрения системы электропитания.

В качестве нагрузки элементарного модуля ИВЭП имеем в составе ППМ [8] основные с позиций электропитания узлы — радио-передающее устройство (РПУ), фазовращатель, радиоприемное устройство (РПРУ), микропроцессорное устройство обработки и управления (МПУ). Безусловно, есть еще ряд узлов, однако с точки зрения нагрузок их можно отнести к трем перечисленным группам.

На рис. 1 условно показана конструкция ППМ, содержащая элементы системы охлаждения (выделено синим).

В качестве примера рассмотрим одну из типовых задач электропитания, когда наибольшую нагрузку представляет РПУ. Современные радарные передатчики используют выходные транзисторы на основе GaN, чей КПД значительно выше по сравнению с GaAs [9].

Максимальный КПД у модуля ИВЭП с выходным напряжением 10–15 В (при использовании синхронных выпрямителей, но это усложняет конструкцию и предполагает наличие неточных цепей в модуле), а также у модуля с выходным напряжением 27–60 В (что позволяет упростить конструкцию, выполнив ИВЭП без синхронных выпрямителей, и применить цепи с пониженными значениями токов).

Все остальные нагрузки для ИВЭП — РПРУ, МПУ и подобные — имеют значительно меньшую долю потребления энергии, чем РПУ, примерно не более 20%. Для их электропитания, как правило, нужны дополнительные напряжения — например, +5, +2,5–3,3, –5 В. Число дополнительных напряжений демонстрирует степень профессионализма специалистов: чем меньше напряжений удастся реализовать в системе

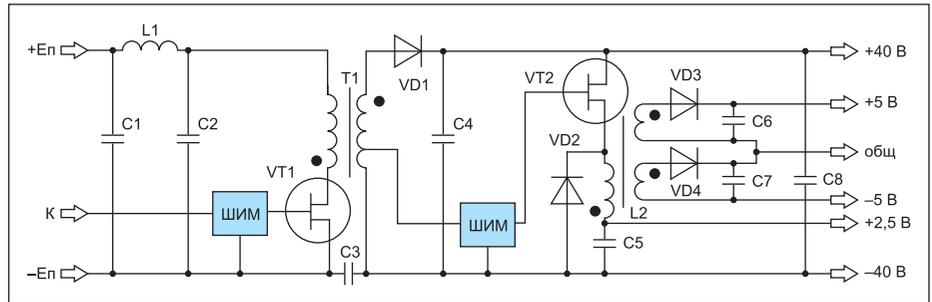


Рис. 2. Упрощенная четырехвыходная схема модуля ИВЭП, размещаемая в одном ППМ

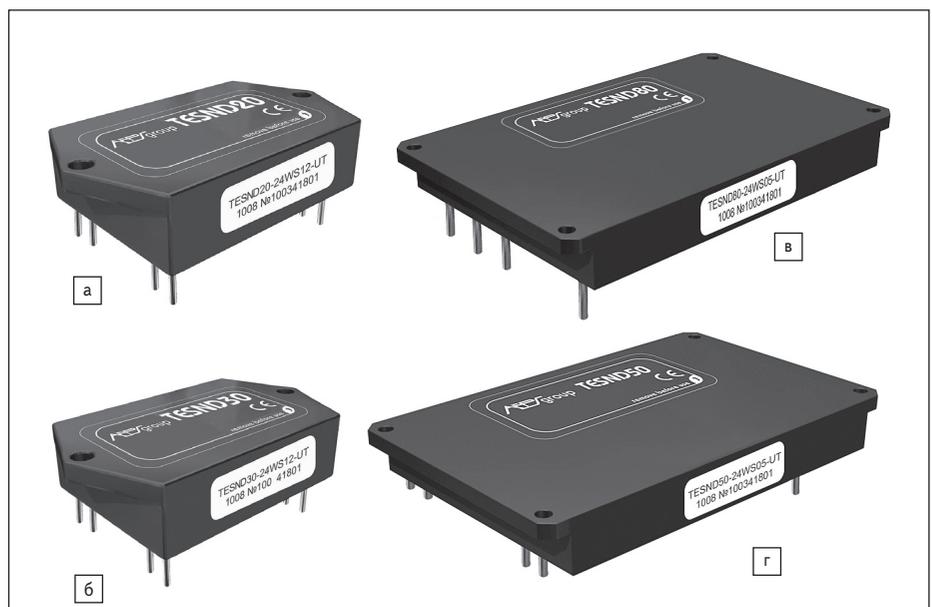
отдельного ППМ, тем выше надежность, проще конструкция и миниатюризация на высоте. Тем не менее обычно не требуется развязки по общим проводам питания разных устройств ППМ, и тогда можно создать весьма малогабаритные импульсные стабилизаторы небольших напряжений, как положительных, так и отрицательных, чья миниатюрность обеспечивается за счет высоких частот преобразования (более 500 кГц). Конечно, при этом должны хорошо поработать и специалисты по электромагнитной совместимости, знакомые не только с СВЧ-устройствами, но и с областью импульсных ИВЭП.

В результате сегодня без особого труда в ППМ, в части, обозначенной на рис. 1 как ИВЭП, можно реализовать микроминиатюрный преобразователь с гальванической развязкой из постоянного входного напряжения 27 или 300 В (дано в качестве ориентира) в постоянное напряжение 28 В, необходимое передатчику РПУ на основе GaN-транзисторов, из которого на вторичной стороне формируются напряжения +5, +2,5, –5 В для РПРУ и МПУ.

Примерный вариант такой схемы приведен на рис. 2.

Для профилей ППМ от 15×15 до 24×24 мм (диапазон С) предпочтительны модифицированные DC/DC-модули ИВЭП серий TESND20, TESND30, TESND50 и TESND80 с высокими удельными мощностями 3–4 кВт/дм³, специально разработанные AEPS-GROUP [10] для решения задач электропитания в аппаратуре АФАР. Внешний вид модулей, выполненных в индивидуальных корпусах и предназначенных для широкого спектра применений, приведен на рис. 3.

Схемотехника и возможности компоновки данных модулей ИВЭП в ППМ АФАР позволяют реализовать импульсный режим с выходной мощностью 30, 45, 75 и 120 Вт, а также режим средней мощности до 20, 30, 50 и 80 Вт соответственно. Подобные характеристики способны удовлетворить потребности большинства авиационных задач АФАР не только сегодня, но и в ближайшей перспективе. В данном примере именно эта часть системы электропитания, начиная от шины 27 или 300 В, подпадает под защитный «зонтик» предельной надежности матричной решетки

Рис. 3. DC/DC-модули в индивидуальных корпусах с высокими удельными мощностями 3–4 кВт/дм³: а) TESND20; б) TESND30; в) TESND50; г) TESND80

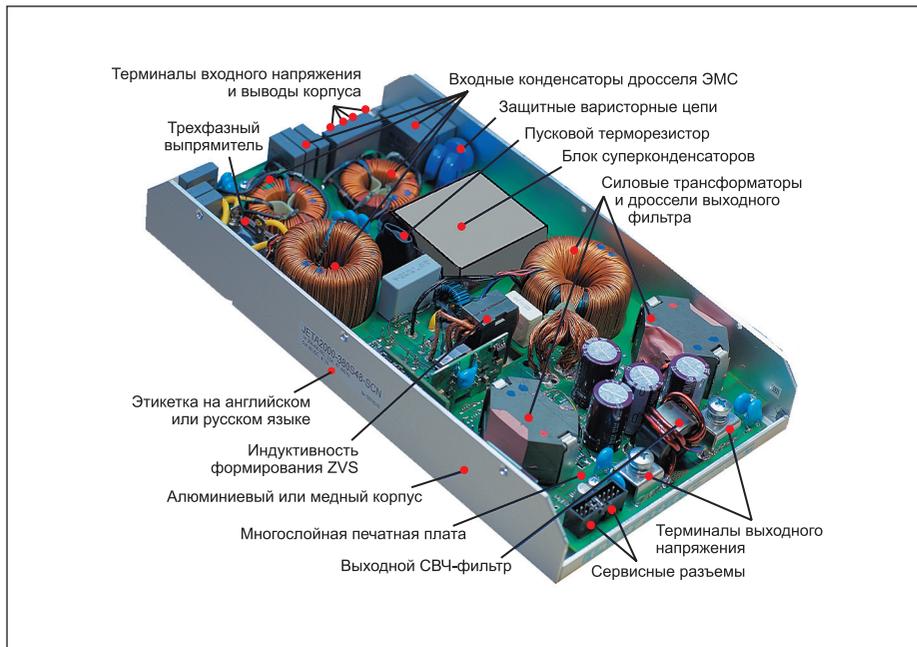


Рис. 4. Типовой трехфазный модуль JETNA2000 без крышки и заливки компаундом

АФАР [2, 5]. А саму систему электропитания (вообще-то укороченную и неполную!) в таком случае называют децентрализованной, отмечая ее главный недостаток — полную неремонтопригодность (с другими, декларируемыми в [5] недостатками автор готов основательно поспорить). В случае выхода из строя модуля ИВЭП при технологических испытаниях придется отправлять в брак весь весьма дорогостоящий ППМ.

Но, к сожалению, в микроминиатюризации системы электропитания АФАР до победы еще далеко. Мы рассмотрели только один из вариантов построения «хвоста» системы, естественно, обращая внимание на дороге ППМ, количество которых в современном авиационном радаре с АФАР превышает 2000 штук. Теперь самое время взглянуть на первичный бортовой источник электроэнергии.

Наиболее часто в качестве первичного источника электропитания используют генератор трехфазного напряжения, например 3×115 В — 3×380 В, 400 Гц или 50 Гц (для тяжелых объектов). Для формирования из трехфазного напряжения первичного источника промежуточной шины 27 или 300 В применяется преобразователь класса AC/DC мощностью от нескольких до десятков киловатт. Очень важно обеспечить более-менее плавную, без больших импульсных составляющих, нагрузку для трехфазного генератора — иначе теряется энергетическая эффективность и генератор перегревается, обычно это осуществляют с помощью корректора коэффициента мощности (ККМ).

В стандартном варианте такой AC/DC-преобразователь начинается с фильтра ЭМС, чтобы помехи, идущие от послестоящих импульсных устройств, не попали в первичную

сеть, и наоборот. Далее следует ККМ и обычно мостовой высокочастотный инвертор, чей трансформаторный выход образует после фильтрации указанную промежуточную шину.

Эта часть системы электропитания АФАР является строго централизованной, и «бороться» ей за свою надежность приходится уже в одиночестве, используя практически единственный способ — резервирование типа N+M.

Теперь уже вся система электропитания АФАР, начиная от выхода трехфазного генератора и заканчивая СВЧ-частью ППМ, относится к смешанному типу — в таком случае ее называют частично централизованной системой электропитания. Однако для автора статьи логичнее двигаться от идеала к реалиям, поэтому идем от децентрализованной к частично децентрализованной системе электропитания, замечая, что важнейшее преимущество самой АФАР — коэффициент надежности, составляющий почти единицу, — перечеркивается ненадежностью централизованного AC/DC-преобразователя. Вот почему к выбору схемотехники и конструкции подобного устройства необходимо подходить весьма осторожно, чтобы свести к минимуму потери в надежности.

Здесь наиболее подходящим вариантом представляются широкотемпературные планарные преобразователи трехфазного исполнения серии JETNA1000–JETNA5000 производства AEPS-GROUP [10]. Устройства имеют беспримечательно низкий профиль — толщина модуля достигает 38 мм при типовом ряде мощностей 1000–5000 Вт. Рабочий диапазон температур на корпусе составляет $-60 \dots +85$ °С. Удельные мощности превышают 2 кВт/дм³. Внешний и внутренний

вид типового модуля JETNA2000 показан на рис. 4.

Для получения высоких значений надежности AC/DC-преобразователя необходимо использовать параллельное включение достаточно большого количества таких устройств [5], работающих с коэффициентом нагрузки не выше 0,7. Так, для мощности 4–6 кВт понадобится 8–12 модулей на 1000 Вт (JETNA1000), для мощности 8–12 кВт — 8–12 модулей на 2000 Вт (JETNA2000). Для 16–24 кВт необходимо 8–12 модулей на 5000 Вт (JETNA5000) и т. д.

Предельно плоская конструкция указанных модулей позволяет выполнить большое количество компоновочных схем централизованного AC/DC-преобразователя совместного с системой охлаждения.

Несмотря на недостатки такой частично децентрализованной системы электропитания АФАР, например снижение надежности АФАР, данное системное и конструктивное решение может широко использоваться, если действительно необходима промежуточная шина на 27 В или на другое напряжение, входящее в типовой аккумуляторный ряд [11–13].

Присутствие шины на 300 В может быть оправдано стремлением уменьшить вес медных проводов в разводке электропитания по полотну АФАР. Есть задачи, в которых применяется несколько бортовых генераторов напряжения и требуется их дублирование, — в таких случаях централизованная система электропитания «имеет право на жизнь». Наконец, простая необходимость осуществления принципа агрегатирования при построении сложной системы, в частности в наземных радарх, может стать серьезным аргументом в пользу децентрализованного решения.

Структура частично децентрализованной системы электропитания АФАР условно показана на рис. 5.

Если в системе радара не предусмотрена аккумуляторная поддержка или отсутствуют дублирующие генераторы, то наличие вышеописанного централизованного AC/DC-преобразователя сомнительно. Другими словами, в ряде случаев такое решение способно значительно ухудшить массо-габаритные и надежность характеристики АФАР, и ее существование может объясняться только субъективными факторами, скажем, отсутствием действительно комплексного подхода к проектированию всей системы радара как единого целого.

Рассмотрим вариант, когда аккумуляторная поддержка и дублирующие генераторы не нужны.

Зададимся вопросом: зачем нужно преобразование переменного тока, в частности 3×380 или 3×115 В, в постоянный ток напряжением около 570 или 170 В, а затем преобразовывать указанное постоянное напряжение в новое, к примеру в 300 В? Здесь наблюда-

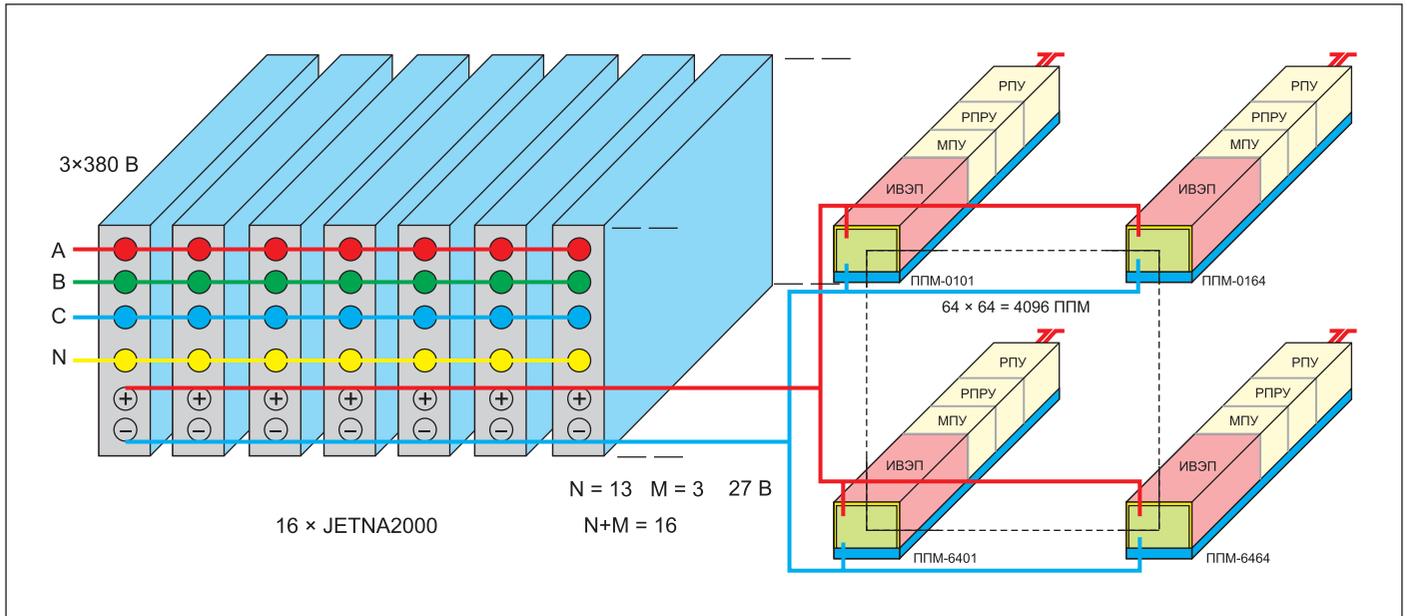


Рис. 5. Частично децентрализованная система электропитания АФАР

ется шесть высокоэнергетических и поэтому затратных в тепловом смысле преобразований: выпрямление, фильтрация, преобразование постоянного напряжения мостом в переменное, трансформирование через индуктивно-магнитный элемент (трансформатор), опять выпрямление и снова фильтрация. На всех шести этапах происходят потери энергии, и суммарный КПД такого преобразования не превысит 92–94%, то есть для мощности уровня, например, 16 кВт в тепло перейдет минимум 1390–1021 Вт.

Если это цена наличия гальванической развязки, необходимой по условиям безопасности для человека и технических устройств, то все равно одно из преобразований — фильтрация после первого выпрямления — явно избыточно, ведь выпрямленное трехфазное напряжение имеет ярко выраженную постоянную составляющую, вполне достаточную для работы современных DC/DC-модулей. Конденсатор в этом случае можно исключить, тем более что в AC/DC-преобразователях входной фильтрующий электролитический конденсатор является элементом повышенной ненадежности, который не позволяет увеличивать максимальную рабочую температуру преобразователя, что крайне важно для повышения эффективности системы охлаждения.

Необходимо также понимать, что функция гальванической развязки уже осуществляется в модуле ИВЭП ППМ, а это в свою очередь позволяет при правильном проектировании полностью исключить все остальные названные преобразования, кроме первого выпрямления. Однако выпрямитель представляет собой элемент повышенной надежности, он в принципе может быть один, и вся масса резервированных AC/DC-модулей в централи-

зованном преобразователе заменяется одним выпрямителем (рис. 6).

В итоге получаем уменьшение веса централизованного AC/DC-преобразователя в десятки раз и близкую к единице надежность при облегченной системе охлаждения. А что же теряется? Исчез потенциальный ККМ — в общем, достаточно нужный для нормальной работы первичного генератора. Тем не менее большой трагедии здесь не происходит, поскольку исключение накопительного конденсатора после выпрямителя резко уменьшает импульсную нагрузку на генератор.

В целом систему электропитания АФАР с одним выпрямителем можно назвать квази-децентрализованной.

Наконец, становится очевидным и новое перспективное развитие МСРЭП АФАР, когда один выпрямитель можно разбить на множество малых и ввести их в состав ППМ (рис. 7).

Результат отличный — мы имеем чистую децентрализованную систему электропитания АФАР, удовлетворяющую всем требованиям, перечисленным в начале данной статьи.

Для этого ничего материального и тяжелого делать не придется, но понадобится выполнить самое трудное — одновременно оптимизировать разработку всей системы АФАР как единого целого, сосредоточив всю электронику в ППМ, то есть под «зонтиком» надежности самой АФАР!

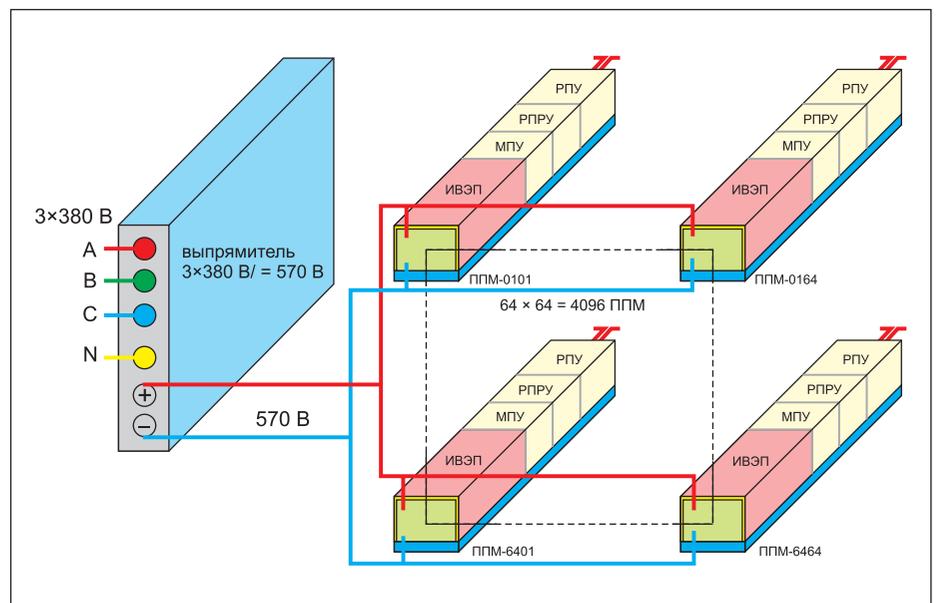


Рис. 6. Квазидецентрализованная МСРЭП

Красноречивым примером, как трудности миниатюризации МСРЭП с количеством ППМ более 2000 штук тормозят реализацию 3D АФАР на истребителе F22 RAPTOR, является информация, опубликованная в американских журналах.

При объеме всех БРЛС 565 дм³ и весе 553 кг, с мощностью МСРЭП АФАР 16530 Вт, объем МСРЭП составляет 40% от общего объема, а вес — 45%. Необходимо заметить, что здесь используется практически централизованная МСРЭП. Она обладает критически низкой надежностью, и на нее приходится большая часть веса системы электропитания ППМ фидерами.

Ниже приводятся расчетные данные оценки объемных, тепловых и надежностных характеристик АФАР при условной реализации всех трех типов систем (табл. 2).

В основу расчета положены следующие значения: мощность СВЧ одного ППМ — 8 Вт; КПД передатчика — 0,5; скажность — 5; КПД модуля ИВЭП ППМ в импульсе — 0,88; КПД модуля ИВЭП ППМ в паузе — 0,75; мощность потребления РПРУ и МПУ — 2 Вт, число ППМ равно 4096.

Выводы

1. Приведенные три варианта построения МСРЭП АФАР — децентрализованная система, квазидецентрализованная система и частично децентрализованная система — являются наиболее жизненными и перспективными.
2. Не рассмотренные в данной статье стандартные варианты систем электропитания с большой степенью централизации, в том числе с объединением (централизацией) электропитания соседних устройств в строки и подобными приемами централизации, являются неперспективными в связи с ненадежностью, большим весом и габаритами. ■

Литература

1. Гончаров А. Ю. Матричные системы электропитания — новый этап развития АФАР // Современная электроника. 2015. № 6.

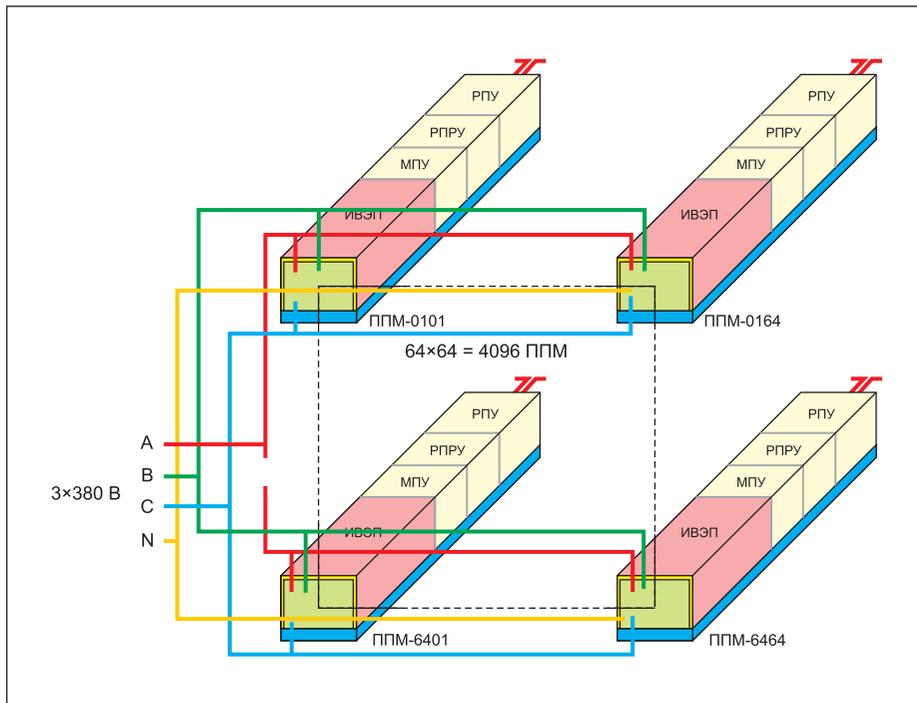


Рис. 7. Полностью децентрализованная МСРЭП АФАР

Таблица 2. Расчетные данные оценки объемных, тепловых и надежностных характеристик АФАР при условной реализации всех трех типов систем

| МСРЭП АФАР | Децентрализованная | Квазидецентрализованная | Частично децентрализованная с резервированием |
|---|--------------------|-------------------------|---|
| Размер ППМ с ИВЭП, мм | 24×24×165 | 24×24×160 | 24×24×160 |
| Объем всех 4096 ИВЭП в ППМ, дм ³ | 153,9 | 141,6 | 141,6 |
| Объем централизованной части МСРЭП, дм ³ | 0 | 2 дм ³ | 23,9 дм ³ |
| Объем всей МСРЭП, дм ³ | 153,9 | 143,6 | 165,5 |
| Объем радара без теплообменника, дм ³ | 390,6 | 379,6 | 401,5 |
| Тепловая мощность ИВЭП в ППМ, Вт | 4366 | 4185 | 4185 |
| Суммарная тепловая мощность МСРЭП, Вт | 4366 | 4608 | 6191 |
| Мощность потребления от генератора, Вт | 18 327 | 18 423 | 19 625 |
| Коэффициент надежности электроники АФАР | 1 | 0,996 | 0,991 |

2. Гостюхин В. Л., Трусов В. Н., Гостюхин А. В. Активные фазированные антенные решетки / Под ред. проф. В. Л. Гостюхина. М.: Радиотехника, 2011.
3. Белый Ю. АФАР подтверждает свою надежность // Взлет. 2013. № 8–9.
4. Доминюк Я. В., Левитан Б. А. Система электропитания активной фазированной антенной решетки импульсного действия // Радиотехника. 2012. № 11.
5. Кушнерев Н. А., Шумов М. А. Система электропитания активных фазированных антенных решеток. www.lib.rus.ec/b/243004/read
6. Коломейцев В. А., Езопов А. В. Электромагнитное взаимодействие компонентов приемного и передающего каналов в приемопередающих модулях АФАР X-диапазона // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2011. № 55.
7. Гончаров А. Ю. Письмо в редакцию: роль емкостных накопителей в проектировании системы электропитания // Современная электроника. 2016. № 3.
8. Парнес Я. М., Киселев И. Г., Комиссаров А. С., Волков В. В., Березняк А. Ф., Вьюгинов В. Н.,

- Грозина М. И., Добров В. А., Земляков В. Е., Зыбин А. А., Савин А. М., Шифман Р. Г. Конструктивно-технологические и метрологические особенности разработки мощных ППМ АФАР S- и C-диапазона. ЗАО «Светлана-электронприбор». www.mwelectronics.ru/2014/Poster/5/P05_07_Parnes%20Ia.M.%20AFAR.pdf
9. Кишинский А. А. Микроволновые транзисторные усилители мощности; состояние и перспективы развития / Материалы 14-й Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь, Вебер, 2004
10. www.aeps-group.ru
11. Лукин А. В. Распределенные системы электропитания // Электронные компоненты. 1997. № 7. 1998. № 2, 3.
12. Воробьев С. Выбор элементной базы для систем вторичного электропитания приемопередающих модулей АФАР // Компоненты и технологии. 2014. № 10.
13. Гончаров А., Кузнецов А., Лукьянов И. Новый способ построения высоконадежных АС/DC-преобразователей // Современная электроника. 2014. № 7.