

# ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ МАТРИЧНЫХ СИСТЕМ РАСПРЕДЕЛЕННОГО ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ДЛЯ АФАР (часть 1)

К.т.н. А.Ю.Гончаров



Краткая справка об авторе. 1949 г.р., участник научной школы по микроэлектронным энергосистемам академика Ю.И.Конева, окончил аспирантуру Московского авиационного института. Много лет проработал в НИИРТА, специализировался по авиационной и артиллерийской силовой электронике. Организатор и главный конструктор ряда научно-производственных фирм, содержащих в названии Александер Электрик. Президент AEPS-GROUP, Прага.

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 в буквальном смысле быстро развиваются в аппаратной реализации цифровых сетевых устройств, суперкомпьютеров, радаров, а также телевизорах, фотоаппаратах и во многом другом. И везде требуются источники и системы электропитания, которые имеют в системном смысле 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 (полотно) приемо-передающих модулей (ППМ), образующих матрицу (не обязательно прямоугольную) из строк и столбцов в плоскости перпендикулярной направлению условного электронного луча. Главная идея АФАР – производить при передаче и приеме сигнала широкоугольное сканирование пространства не за счет механического перемещения радара, а с помощью фазированного управления лучем 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 – практическая 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, входящая в решетку, 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) кВт за очень короткое время, за микросекунды и наносекунды.

На основе вышеизложенного можно сформировать 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 с учетом системы охлаждения составляет не более 33 мм, 15 мм и 9 мм, соответственно [1], таблица 1.

Обозначение диапазона	Частота излучения, ГГц	Длина волны, мм	$\Delta L$ , мм
S	2 - 4	150 - 75	70 - 33
C	4 - 8	75 - 37,5	33 - 15
X	8 - 12	37,5 - 25	15 - 9

2. На выходе каждого элементарного модуля **ИВЭП 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 с ППМ** – без этого надежность всей АФАР может оказаться катастрофически нарушенной.

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

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

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

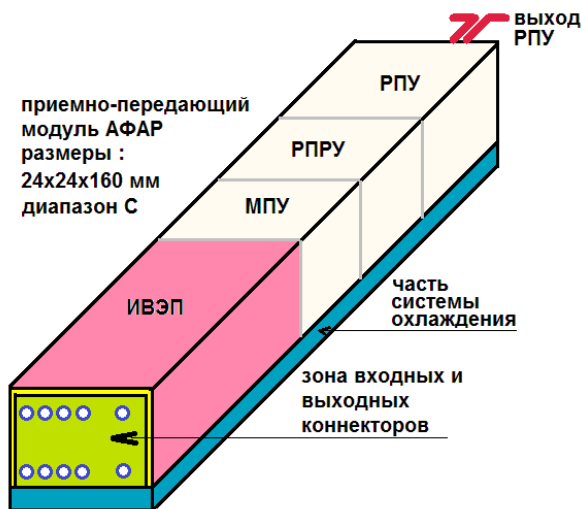


Рис.1. Приемно-передающий модуль АФАР - ППМ

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

Наибольший КПД будет иметь модуль ИВЭП с выходным напряжением в диапазоне 10 В... 15 В при использовании синхронных выпрямителей, что усложняет конструкцию и предполагает наличие силовых цепей в модуле, или с выходным напряжением 27 В...60 В, что позволяет упростить конструкцию, выполнив ИВЭП без синхронных выпрямителей и использовать 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 требуются дополнительные напряжения, например +5 В, +2,5 В, -5 В. Число дополнительных напряжений обычно говорит о степени профессионализма комплексных специалистов – чем меньше напряжений удастся реализовать в системе отдельного ППМ, тем выше надежность, проще конструкция и миниатюризация на высоте. Тем не менее, обычно не требуется развязка по общим проводам питания разных устройств ППМ и тогда можно реализовать весьма малогабаритные импульсные стабилизаторы небольших напряжений, как положительных, так

и отрицательных, миниатюрность которых обеспечивается за счет высоких частот преобразования, более 500 кГц. Конечно, при этом должны хорошо поработать специалисты по электромагнитной совместимости, знакомые не только с СВЧ устройствами, но еще больше с областью импульсных ИВЭП.

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

Примерный вариант такой схемной реализации приведен на рисунке 2.

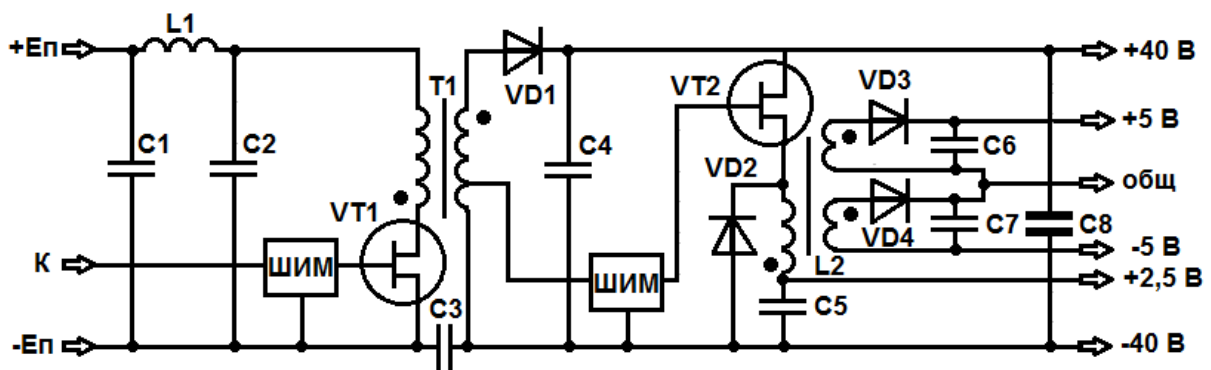


Рис. 2. Упрощенная четырех-выходная схема модуля ИВЭП, размещаемая в одном ППМ

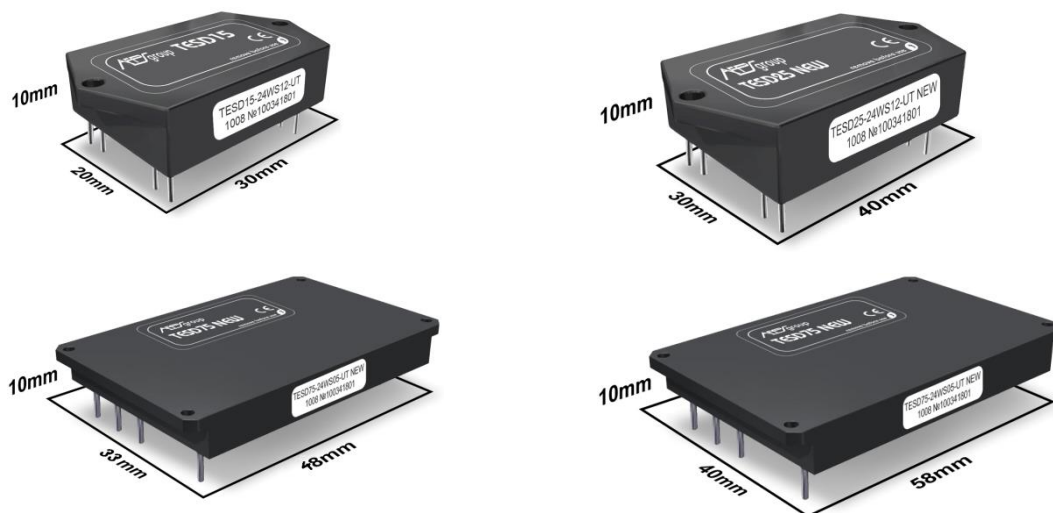


Рис. 3. DC/DC модули в индивидуальных корпусах TESND20, TESND30, TESND50 и TESND80 с высокими удельными мощностями 3...4 кВт/дм3

Для профилей ППМ от 15x15 мм и до 24 мм x 24 мм (диапазон С) хорошо подходит внутреннее наполнение модифицированных DC/DC модулей ИВЭП серии **TESND20, TESND30, TESND50 и TESND80** с высокими удельными мощностями **3...4 кВт/дм<sup>3</sup>** производства AEPS-GROUP [10], специально разработанных для решения задач электропитания в аппаратуре АФАР, рисунок 3. Приведен внешний вид модулей в индивидуальных корпусах для широкого использования.

Схемотехника и возможности компоновки данных модулей ИВЭП в ППМ АФАР позволяют реализовать импульсный режим с выходной мощностью 30 Вт, 45 Вт, 75 Вт и 120 Вт, и режим средней мощности до 20 Вт, 30 Вт, 50 Вт и 80 Вт соответственно. Такие мощностные характеристики перекрывают большинство авиационных задач АФАР сегодня и в ближайшей перспективе. В данном примере именно эта часть системы электропитания, начиная от шины 27В или 300 В, подпадает под **защитный «зонтик» предельной надежности матричной решетки АФАР** [2, 5]. А саму систему электропитания (вообще-то укороченную и неполную !) в таком случае называют **децентрализованной**, отмечая ее главный недостаток – полная неремонтно-пригодность (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, до победы в микроминиатюризации системы электропитания АФАР еще далеко. Мы рассмотрели пока только один из вариантов построения «хвоста» системы, естественно, обращая внимание на дорогие ППМ, количество которых в современном авиационном радаре с АФАР перевалило за 2000 штук, самое время посмотреть на начало – на первичный бортовой источник электроэнергии.

Наиболее часто в качестве первичного источника электропитания используют генератор трехфазного напряжения, например 3X115 В ... 3X380 В, 400 Гц или 50 Гц (для тяжелых объектов). Для формирования из трехфазного напряжения первичного источника промежуточной шины 27В или 300 В используют преобразователь класса AC/DC мощностью от нескольких кВт до десятков кВт. 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 начинается такой AC/DC преобразователь с фильтра ЭМС, чтобы не позволить помехам, идущим от послестоящих импульсных устройств, попадать в первичную сеть и наоборот. Далее следует ККМ и обычно мостовой высокочастотный инвертор, трансформаторный выход которого после фильтрации образует упомянутую промежуточную шину.

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

Теперь уже вся система электропитания АФАР, начиная от выхода трехфазного генератора и до СВЧ-части ППМ, является смешанного типа – обычно это называют частично централизованной системой электропитания. Однако для автора данной статьи логичнее опускаться от идеала к реалиям, поэтому идем от децентрализованной к **частично децентрализованной** системе электропитания, замечая, что важнейшее преимущество самой АФАР – коэффициент надежности практически единица, перечеркивается ненадежностью централизованного AC/DC преобразователя. Поэтому к выбору схемотехники и конструкции такого устройства необходимо подходить весьма осторожно, неся минимальные потери в надежности.

Наиболее подходящими из имеющихся в поставках являются широкотемпературные планарные преобразователи трехфазного исполнения серии JETNA1000 - JETNA5000 производства AEPS-GROUP [10]. Данная серия имеет беспрецедентный низкий профиль – толщину модуля 38 мм при типовом ряде мощностей 1000 Вт ... 5000 Вт. Рабочий диапазон температур на корпусе может достигать от минус 60°C до плюс 85 °С. Удельные мощности составляют величину более **2 кВт/дм<sup>3</sup>**. Внешний вид типового модуля JETNA2000 и его внутренний состав показан на рисунке 4.

Для получения высоких значений надежности AC/DC преобразователя необходимо использовать параллельное включение достаточно большого количества таких устройств [5], работающих с коэффициентом нагрузки не более 0,7. Например для мощности 4 кВт ... 6 кВт типовым является 8 ... 12 модулей на 1000 Вт – JETNA1000. Для мощности 8 кВт ... 12 кВт потребуется 8 ... 12 модулей на 2000 Вт – JETNA2000, для 16 кВт ... 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 совместно с системой охлаждения.

Несмотря на недостатки такой частично децентрализованной системы электропитания АФАР, как например снижение надежности АФАР, данное системное и конструктивное решение может широко использоваться, если действительно необходимо иметь промежуточную шину на 27В или на какое-то напряжение, входящее в типовой аккумуляторный ряд напряжений, например 48 В и т.д. , [11, 12, 13].

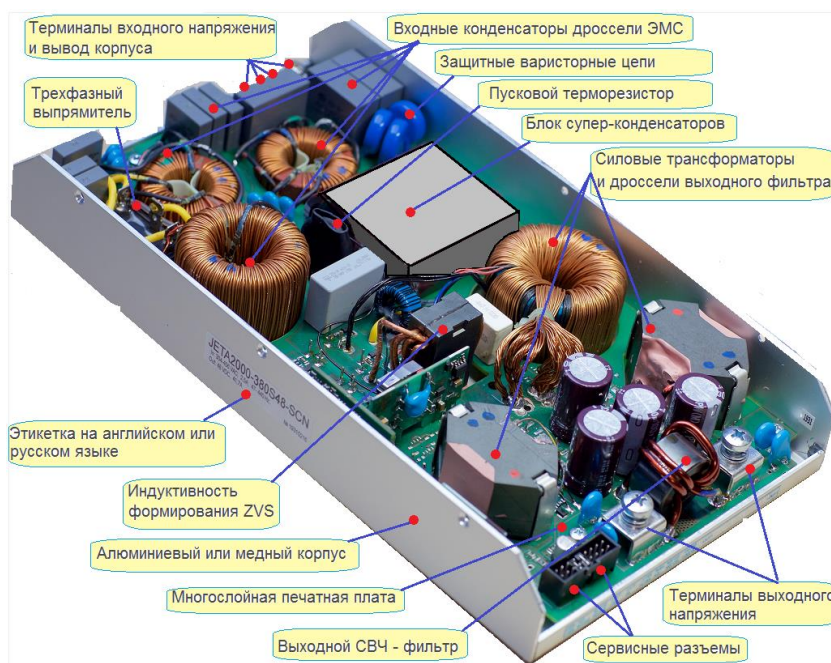


Рис. 4. Типовой трехфазный модуль JETNA2000 без крышки и заливки компаундом

Наличие шины на 300 В может быть оправдано стремлением уменьшить вес медных проводов в разводке электропитания по полотну АФАР. Имеются задачи, в которых используются несколько бортовых генераторов напряжения и необходимо их дублирование – в таких случаях централизованная система электропитания может иметь право на жизнь. Наконец, простая необходимость осуществления принципа агрегатирования при построении сложной системы, например в наземных радарх может быть серьезным аргументом при выборе частично децентрализованного решения .

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

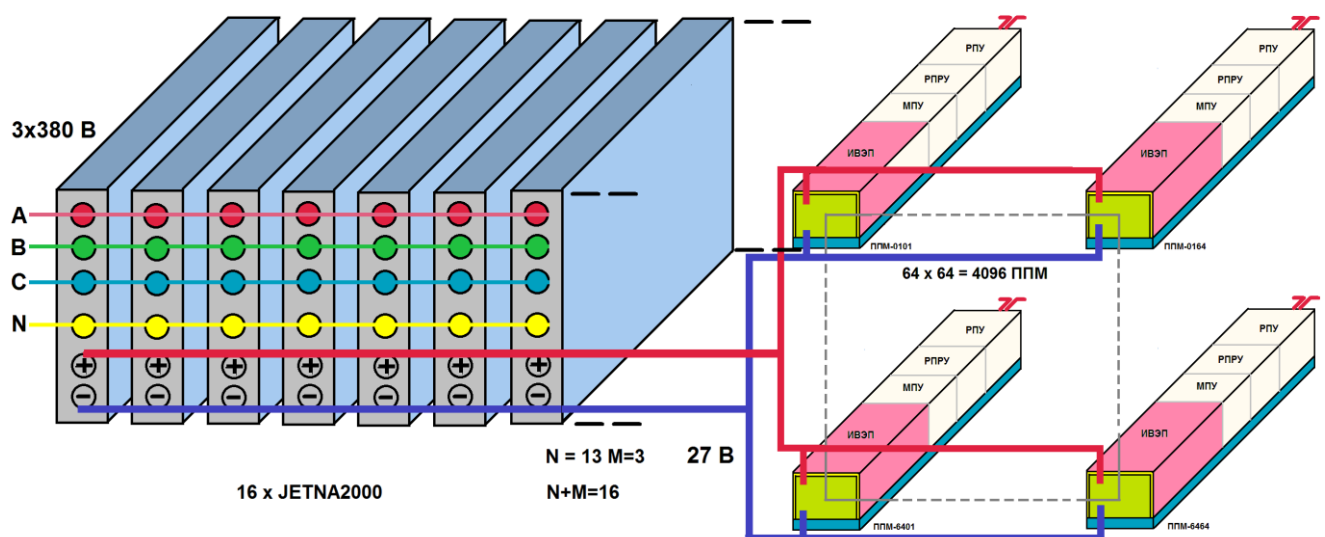


Рис. 5. Частично децентрализованная система электропитания АФАР

Если в системе радара не используется аккумуляторная поддержка или отсутствуют дублирующие генераторы, то необходимость вышеописанного централизованного AC/DC преобразователя сомнительна. Автор считает, что **такое решение в большинстве случаев может значительно ухудшить массо-габаритные и надежность характеристики АФАР**, и его существование может объясняться только субъективными факторами, например отсутствием действительно комплексного подхода к проектированию всей системы радара, как одного целого.

Попытаемся рассмотреть альтернативный вариант для случая отсутствия необходимости аккумуляторной поддержки и дублирующих генераторов.

Зададимся вопросом – зачем нужно преобразование переменного тока например 3x380 В или 3x115В в постоянный ток напряжением около 570 В или 170 В, а затем еще преобразовывать указанное постоянное напряжение в новое постоянное, например 300 В? Здесь явно присутствует шесть высокоэнергетических и поэтому затратных в тепловом смысле преобразований: выпрямление, фильтрация, преобразование постоянного напряжения транзисторным мостом в переменное, трансформирование через индуктивно-магнитный элемент (трансформатор), опять выпрямление и опять фильтрация. На всех шести этапах

существуют потери энергии и суммарный КПД такого преобразования не будет выше 92-94 %, т.е. для мощности уровня, например 16 кВт в тепло перейдет минимум 1390 Вт ... 1021 Вт.

Если это цена наличия гальванической развязки, которая может быть необходима по условиям безопасности для человека и для 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 модулей DC/DC. Конденсатор в этом случае можно исключить, тем более, что в преобразователях AC/DC входной фильтрующий электролитический конденсатор является элементом повышенной **ненадежности**, который не позволяет увеличивать максимальную рабочую температуру преобразователя, что было бы крайне важно для повышения эффективности работы системы охлаждения.

Далее необходимо 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 является элементом повышенной надежности, он в принципе может быть один и вся масса резервированных AC/DC модулей в централизованной части заменяется на один выпрямитель, рис. 6.

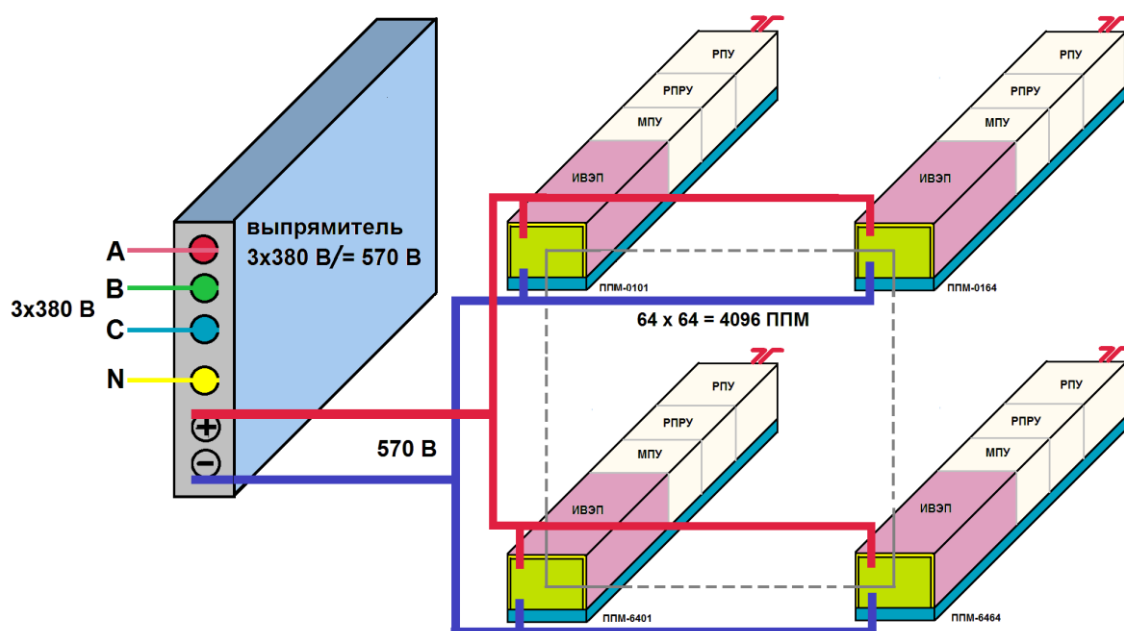


Рис. 6. Квази-децентрализованная МСРЭП

В итоге, получаем уменьшение веса централизованного преобразователя AC/DC в десятки раз и близкую к единице надежность при облегченной системе охлаждения. А что же теряется? Исчез потенциальный ККМ, в общем достаточно необходимый 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 придется выполнять самое трудное – одновременно многокритериально оптимизировать разработку всей системы АФАР, как одно целое, сосредоточив всю электронику в ППМ, т.е. под «зонтиком» надежности самой АФАР !

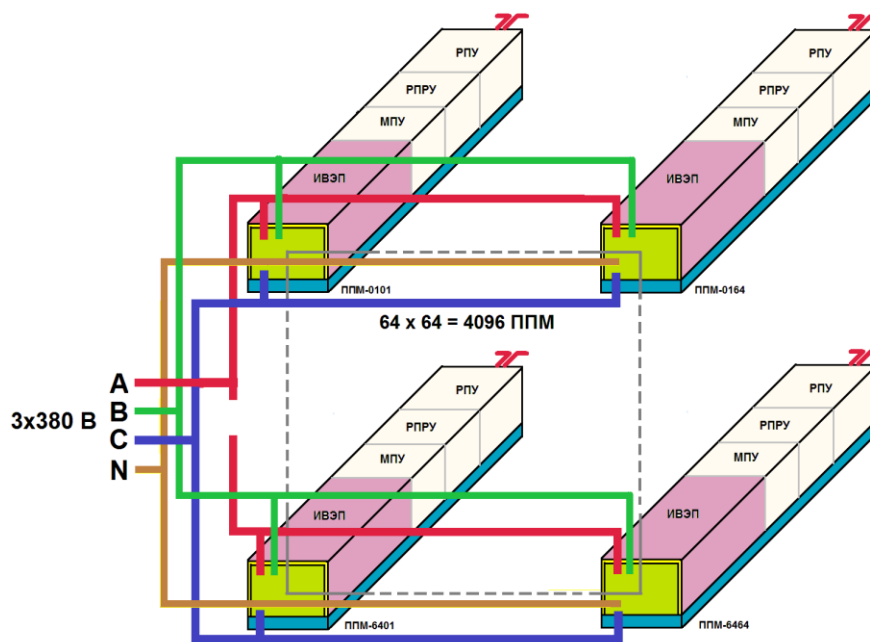


Рис. 7. Полностью децентрализованная МСРЭП АФАР

Красноречивым примером, как трудности миниатюризации МСРЭП с количеством ППМ более 2000 шт. становятся тормозом при реализации 3D АФАР на истребителе F22 RAPTOR, являются данные, опубликованные в американских журналах.

При объеме всех БРЛС 565 дм<sup>3</sup> и весе 553 кг, с мощностью МСРЭП АФАР 16 530 Вт, объем МСРЭП составляет 40% от общего объема, а вес – 45%. Здесь необходимо заметить, что в данном примере используется практически централизованная МСРЭП. **Она обладает критически низкой надежностью и занимает высокую долю в весе системы электропитания ППМ фидерами.**

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

В основе расчета использовались значения: мощность СВЧ одного ППМ – 8 Вт; КПД передатчика – 0,5 ; скважность – 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.

Таблица 2.

МСРЭП АФАР	Децентрализованная	Квази-децентрализованная	Частично децентрализованная с резервированием
Размер ППМ с ИВЭП	24x24x165 мм	24x24x160 мм	24x24x160 мм
Объем всех 4096 ИВЭП в ППМ	153,9 дм <sup>3</sup>	141,6 дм <sup>3</sup>	141,6 дм <sup>3</sup>
Объем централизованной части МСРЭП	0	2,0 дм <sup>3</sup>	23,9 дм <sup>3</sup>
Объем всей МСРЭП	153,9 дм <sup>3</sup>	143,6 дм <sup>3</sup>	165,5
Объем радара без теплообменника	390,6 дм <sup>3</sup>	379,6 дм <sup>3</sup>	401,5 дм <sup>3</sup>
Тепловая мощность ИВЭП в ППМ	4366 Вт	4185 Вт	4185 Вт
Суммарная тепловая мощность МСРЭП	4366 Вт	4608 Вт	6191 Вт
Мощность потребления от генератора	18327 Вт	18423 Вт	19625 Вт
Коэффициент надежности электроники АФАР	1,0	0,996	0,991

#### Выводы.

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

Автор может сотрудничать с предприятиями, которых заинтересуют вопросы выпуска ППМ АФАР нового поколения с модулем ИВЭП на основе решений, приведенных в статье.

*Список литературы:*

1. А.Ю.Гончаров. Матричные системы электропитания – новый этап развития АФАР. Современная электроника, №6, 2015
2. В.Л.Гостюхин, В.Н.Трусов, А.В.Гостюхин. Активные фазированные антенные решетки. По редакции д.т.н., профессора В.Л.Гостюхина. Изд. «Радиотехника», М., 2011
3. АФАР подтверждает свою надежность. Интервью с генеральным директором НИИП им. В.В.Тихомирова Юрием Белым. Взлет. №8-9, 2013
4. Я.В.Доминюк, Б.А.Левитан. Система электропитания активной фазированной антенной решетки импульсного действия. Радиотехника. Вып.176, 2012
5. Н.А.Кушнерев, М.А.Шумов. Система электропитания активных фазированных антенных решеток. 2012 г., <http://lib.rus.ec/b/243004/read>
6. В.А.Коломейцев, А.В.Езопов. Электромагнитное взаимодействие компонентов приемного и передающего каналов в приеме-передающих модулях АФАР X – диапазона. 2011
7. А.Ю.Гончаров. Письмо в редакцию: роль емкостных накопителей в проектировании системы электропитания. Современная электроника, №3, 2016
8. Я.М.Парнес, И.Г.Киселев, А.С.Комиссаров, В.В.Волков, А.Ф.Березняк, В.Н.Вьюгинов, М.И.Грозина, В.А.Добров, В.Е.Земляков, А.А.Зыбин, А.М.Савин, Р.Г. Шифман. Конструктивно-технологические и метрологические особенности разработки мощных ППМ АФАР S- и C- диапазона. ЗАО «Светлана-электронприбор».
9. А.А.Кишинский. 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](http://www.aeps-group.ru)
11. А.В.Лукин. Распределенные системы электропитания.
12. Сергей Воробьев. Выбор элементной базы для систем вторичного электропитания приемопередающих модулей АФАР. Компоненты и технологии. №10, 2014
13. Александр Гончаров, Андрей Кузнецов, Иван Лукьянов (Прага). Новый способ построения высоконадежных AC/DC – преобразователей. Современная электроника. №7, 2014