

## Восьмиканальный мощный передающий модуль S-диапазона

*Евстигнеев А. С., Евстигнеев Д. А.*

*В статье изложено описание конструкции восьмиканального передающего модуля S-диапазона, подробно описаны его основные узлы, особое внимание уделено усилителю СВЧ мощности, изложены главные технические проблемы, возникшие при разработке модуля, а также некоторые вопросы, связанные с его производством.*

### **Введение**

Современное развитие РЛС привело к созданию полностью твердотельных станций в L- и S-диапазонах частот. Данная работа посвящена описанию мощного многоканального широкополосного длинноимпульсного СВЧ модуля S-диапазона для построения передатчика трёхкоординатной радиолокационной станции. Создание такой станции существенно расширяет возможности системы наблюдения за воздушным пространством. Планируемая излучаемая средняя мощность 8 кВт в сочетании с параметрами радиоимпульсного режима обеспечит необходимую дальность РЛС.

### **1. Основные характеристики передающего модуля и его структурная схема**

Полотно АФАР, для которой разработан данный модуль, состоит из двух отдельных частей – передающей и приёмной. Это приводит к существенным упрощениям как самой АФАР, так и реализации СВЧ модулей [1]. В этом случае нет необходимости построения полнофункциональных приёмо-передающих модулей [2]. Разделение модулей на приёмные и передающие позволило увеличить как число каналов, так и мощность каждого из них.

Основные технические требования на передающий модуль:

- количество передающих каналов 8;
- рабочая полоса частот 2,7-2,9 ГГц;
- выходная импульсная мощность каждого передающего канала не менее 40 Вт;
- входная импульсная мощность не менее 2,0 Вт;
- длительность импульса до 300 мкс при скважности не менее 10;
- фазовый дискрет фазовращателей 22,5 град;
- напряжение питания – трёхфазная сеть 380 В, 50 Гц.

Структурная схема модуля представлена на рис. 1, эскиз компоновки представлен на рис. 2. Габаритные размеры модуля 420x430x50 мм, охлаждение модуля воздушное принудительное. Основными элементами модуля являются:

- выходной усилитель мощности – обеспечивает получение требуемого уровня выходной импульсной мощности в заданной полосе частот;
- предварительный усилитель мощности – обеспечивает стабильную работу выходных усилителей мощности;
- восьмиканальный делитель – обеспечивает равномерное деление мощности предварительного усилителя по восьми каналам;
- фазовращатель – обеспечивает значения фазового дискрета 22,5 град и точности установки фазы  $\pm 11$  град;
- коммутатор контрольного канала – отвечает за формирование контрольного сигнала от каждого из восьми каналов;

- плата управления – формирует требуемые сигналы управления усилителями мощности, фазовращателями и переключателями;
- блок питания.

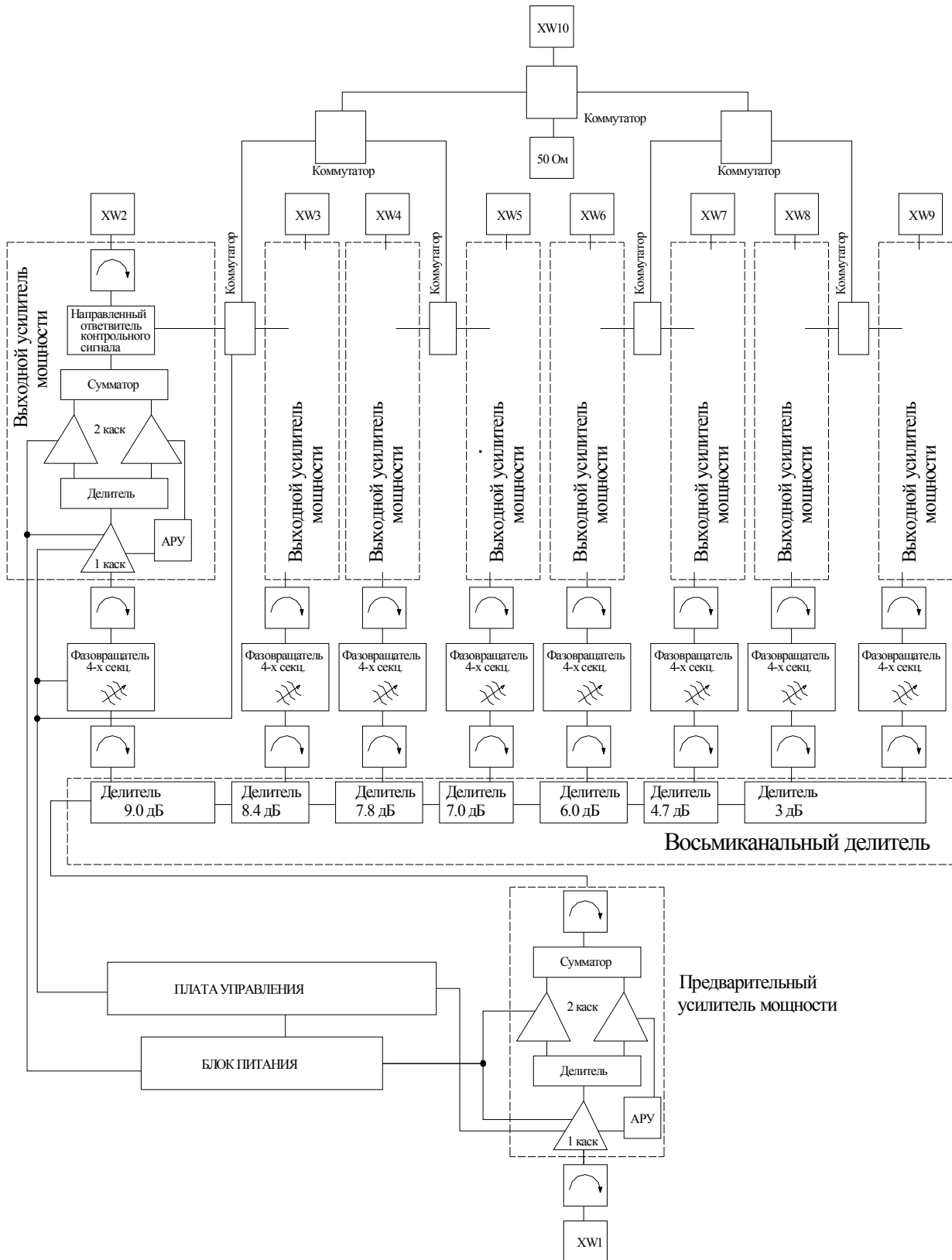


Рис. 1  
Блок-схема восьмиканального передающего модуля

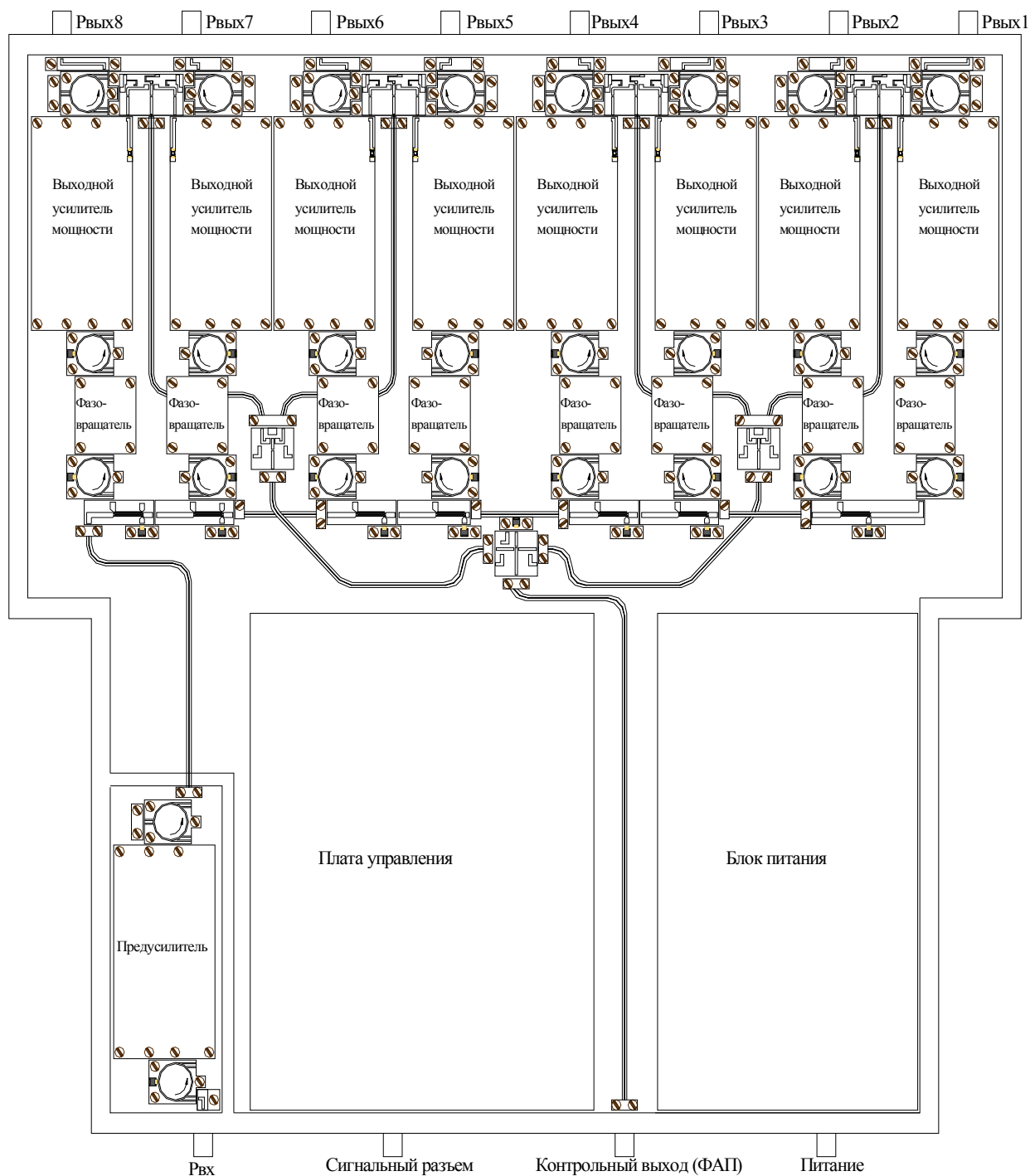


Рис. 2

Эскиз компоновки восьмиканального передающего модуля

Входной СВЧ сигнал мощностью от двух до четырёх ватт (разъём XW1) поступает на предварительный усилитель мощности. Выходная мощность предусилителя составляет 50-60 Вт в полосе частот. С выхода предварительного усилителя сигнал поступает на восьмиканальный делитель мощности. С учётом потерь в делителе и неравномерности деления мощности на восемь каналов на каждом выходе делителя получаем мощность от 4,5 до 7,0 Вт. Затем сигналы каждого из восьми каналов поступают на фазовращатели, на входе и выходе которых расположены ферритовые вентили. Потери в фазовращателях

и вентилях составляют от 3,0 до 3,5 дБ. Таким образом, на вход каждого выходного усилителя мощности поступает мощность 2,0-3,5 Вт. Выходная мощность каждого канала передающего модуля (разъёмы XW2-XW9) составляет 40-60 Вт в полосе частот. На разъёме XW10 с помощью ответвителей в выходных усилителях мощности и цепочки коммутаторов формируется контрольный СВЧ сигнал мощностью от 0,3 до 0,7 Вт. Контрольный сигнал необходим для фазировки и контроля работоспособности каналов передающего модуля.

## 2. Конструкция усилителя мощности

Важнейшим элементом передающего модуля является усилитель мощности. Усилитель состоит из двух каскадов, реализованных на мощных СВЧ биполярных транзисторах [3]. Эскиз топологии усилителя мощности представлен на рисунке 3.

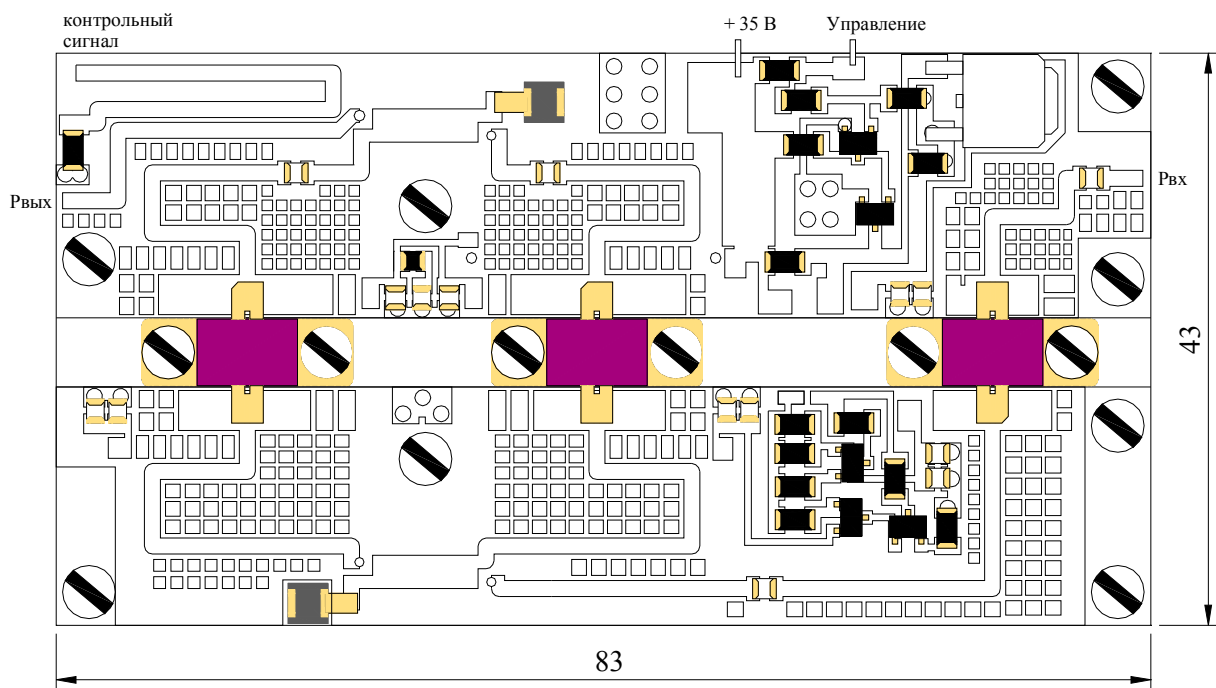


Рис. 3

Эскиз топологии усилителя мощности

Транзистор первого каскада обеспечивает получение 12-15 Вт при входной мощности 2 Вт в полосе частот 2,7-2,9 ГГц. Выходной каскад состоит из двух параллельно работающих транзисторов. Делитель и сумматор реализованы на мостах с лицевой связью. Выходная мощность усилителя составляет 50 Вт в полосе частот и достаточна для достижения необходимого уровня 40 Вт с учётом потерь в выходном тракте. Напряжение питания мощных СВЧ транзисторов составляет 35-36 В. В выходной цепи усилителя реализован направленный ответвитель для формирования контрольного сигнала.

В каждом усилителе мощности реализована оригинальная схема АРУ. Принцип её действия – регулировка угла отсечки первого каскада с целью стабилизации тока транзисторов выходного каскада. Реализуется этот принцип следующим образом: схема контролирует эмиттерный ток одного из транзисторов выходного каскада и при его увеличении повышает сопротивление в цепи эмиттер-база транзистора входного каскада, уменьшая тем самым его выходную мощность. В таком случае исключаются перегрузки всех СВЧ транзисторов и стабилизируется уровень выходного сигнала. В результате

удалось получить динамический диапазон по входному сигналу до 6 дБ, при этом выходная мощность изменяется на единицы процентов. При проектировании схемы АРУ необходимым условием было сохранение уровня амплитудной и фазовой нестабильности выходного сигнала.

Усилитель мощности располагается на индивидуальном металлическом основании, к которому припаиваются согласующие платы входного и выходного каскадов и прижимаются мощные СВЧ транзисторы. Такая конструкция позволяет производить предварительную настройку параметров усилителя мощности, не устанавливая усилитель в модуль передатчика. Такое конструктивное решение значительно упрощает процесс настройки модуля и повышает равномерность энергетических параметров между каналами передатчика.

Ещё одной важной конструктивной особенностью данного модуля является то, что предварительный усилитель мощности является “копией” выходного усилителя за исключением отсутствия в его составе направленного ответвителя контрольного сигнала. Такое решение также упрощает процесс настройки модуля.

### 3. Основные узлы передающего модуля

Восьмиканальный делитель представляет собой цепочку из семи направленных ответвителей с закономерно меняющимся коэффициентом переходного ослабления и обеспечивает равномерное деление мощности предварительного усилителя. Направленные ответвители реализованы на поликорковых платах толщиной 2 мм.

Каждый из направленных ответвителей был индивидуально обмерен с использованием специально изготовленного контактодержателя и панорамного измерителя КСВН и ослаблений типа Р2-50. Параметры всех направленных ответвителей оказались относительно постоянными в полосе 2,6-3,0 ГГц. Направленность и развязки между каналами всюду оказались более 20 дБ, значения КСВН не выходили за 1,4. Результаты измерения деления мощностей (дБ) приведены в таблице.

Таблица

Результаты измерений деления мощности

Канал $f$ , ГГц	2.6	2.7	2.8	2.9	3.0
P <sub>1</sub>	-9,5	-10	-9,9	-8,5	-8
P <sub>2</sub>	-9,8	-10	-9,8	-9,3	-9,3
P <sub>3</sub>	-9,7	-9,7	-9,7	-9,9	-10
P <sub>4</sub>	-9,2	-9,1	-9,1	-9,2	-9,3
P <sub>5</sub>	-9,4	-9,3	-9,3	-9,5	-9,9
P <sub>6</sub>	-9,2	-8,8	-9,0	-9,4	-9,8
P <sub>7</sub>	-9,4	-9,1	-9,1	-9,9	-10,5
P <sub>8</sub>	-9,4	-9,3	-9,5	-10	-10,6

В качестве фазовращателя используется микрополосковый рin-диодный четырёхразрядный фазовращатель с секциями 22, 45, 90 и 180 градусов. При моделировании схемы учитывалась ёмкость обратносмещённого рin-диода. Результаты моделирования показали, что она может быть скомпенсирована за счёт топологии секций фазовращателя. Кроме того, компьютерное моделирование схемы показало, что секцию 180 град выгодней заменить на две последовательно включённые секции 90 град, так как такой вариант снижает КСВН и повышает точность установки фазы фазовращателя. В качестве блокировочных и разделительных конденсаторов используются специально разработанные МОП конденсаторы ёмкостью 20 пФ, имеющие габариты

---

0,5x0,5x0,2 (ДхШхВ) мм. Такой конденсатор в отличие от традиционных К10-17в или К10-69 не требует расширения полосков для формирования контактных площадок, что благоприятно сказывается на КСВН схемы. Габариты МОП конденсатора позволяют устанавливать его на полоски шириной от 0,5 мм. Конденсаторы и рin-диоды приклеиваются к плате токопроводящим клеем. Сборка осуществляется ультразвуковой сваркой.

Основные параметры фазовращателя:

- максимальное потребление по цепи управления менее 250 мА;
- точность установки фазы  $\pm 10$  град;
- значение КСВН не более 1,5;
- активные потери не более 3 дБ;
- время переключения не более 4 мкс.

Получение сигнала контрольного канала осуществляется с помощью ответвителей в выходных усилителях мощности и цепочки коммутаторов. Сигналы с двух соседних выходных усилителей мощности коммутируются между собой. Затем коммутируются сигналы двух соседних пар. При коммутации сигналов от двух четвёрок предусмотрена возможность подключать общий выход контрольного сигнала к сопротивлению 50 Ом. Такая «симметричность» конструкции переключателей обеспечивает выполнение требований по разбросу амплитуд (не более  $\pm 0,5$  дБ) и фаз (не более  $\pm 22$  град) контрольных сигналов.

В состав передатчика входит встроенный источник питания. Использование внутреннего источника позволяет упростить разводку энергопитания, повысить надёжность работы передатчика и обеспечить стабильность выходного сигнала.

Основные параметры источника питания:

- входное напряжение трёхфазное переменное 380 В с частотой 50 Гц;
- потребление по сети 380 В не более 300 Вт;
- коэффициент полезного действия не менее 90%;
- выходное напряжение 35 В, ток нагрузки 5 А;
- вспомогательные каналы напряжения: +12 В (потребление не более 0,5 А); +5 В (потребление не более 1,5 А); -5 В (потребление не более 1,5 А).

Основой силового канала являются два полумостовых инвертора, включённых последовательно по цепи питания. Инверторы нагружены через трансформаторы на выходные выпрямители, подключённые параллельно нагрузке. Построенный по такой схеме преобразователь позволяет вдвое снизить напряжение на ключевых транзисторах. Широко распространённые в настоящее время транзисторы с напряжением  $U_{си} = 500$  В при этом используются с коэффициентом нагрузки по напряжению 0,5 и обеспечивают очень высокую надёжность работы преобразователя.

Особенностью источника является то, что он работает на импульсную нагрузку с импульсным током 50 А длительностью 300 мкс и скважностью 10. Для сглаживания импульсных нагрузок на источник используется накопительная ёмкость. Значение ёмкости для разрабатываемого усилителя равно 0,03 Ф.

### **Заключение**

Нашим предприятием был разработан восьмиканальный передающий модуль S-диапазона для построения передатчика трёхкоординатной РЛС. Одной из основных задач при разработке данного модуля стало обеспечение стабильного уровня выходной мощности всех выходных передающих каналов в полосе частот во всех фазовых соотношениях, притом что разброс входных сигналов достигает 4 дБ. Для её решения была спроектирована оригинальная схема АРУ. В результате удалось получить

---

динамический диапазон по входному сигналу до 6 дБ, при этом выходная мощность передающих каналов изменяется на единицы процентов.

Отдельный комплекс задач, который решался при проектировании данного модуля, – это технологичность и производительность при производстве, поскольку модули АФАР – это массовая продукция.

С этой целью модуль спроектирован в виде законченных узлов в его составе: девять усилителей мощности, восемь фазовращателей, семь переключателей, блок питания, плата управления.

Все эти элементы выполнены на своих основаниях, отдельно собираются и настраиваются. После формирования комплекта узлов происходит полная сборка изделия. Как показала практика, настройка полностью собранного модуля на автоматическом стенде занимает около двух часов, что является хорошим показателем.

Этот принцип построения и технология сборки модуля уже внедрены и на других изделиях подобного уровня.

### *Литература*

1. Аронов В. Л., Евстигнеев А. А., Евстигнеев А. С. Транзисторные передающие модули L- и S-диапазонов. // Электроника НТБ, вып. №4, 2005, с. 30-32.
2. Аронов В. Л., Евстигнеев А. С., Евстигнеев А. А., Подадаева А. А., Поляков С. А., Требоганов Н. А. Конструкция 4-х канального приёмо-передающего модуля для бортовой АФАР. // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы, вып. 1, 2007, с. 94-102.
3. Аронов В. Л., Евстигнеев А. А. Синтез широкополосных мощных СВЧ транзисторных каскадов, работающих в нелинейном режиме. // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы, вып. 1-2, 2005, с. 3-12.

---

---

## **ГОТОВИТСЯ К ПУБЛИКАЦИИ**

**в выпуске 2(227) 2011 года**

**статья Енишерловой К. Л., Горячева В. Г.**

**“Влияние  $\gamma$ -облучения на электрические параметры границы раздела кремний-сапфир в КНС-структурах”**

В работе анализировались особенности ёмкостных параметров структур, формируемых на КНС-структурах с субмикронными эпитаксиальными слоями при изготовлении МДП-транзисторов и ИС на их основе. Исследовалось также воздействие  $\gamma$ -облучения на ёмкостные параметры таких структур. Для проведения измерений на анализируемых КНС-структурах изготавливались специальные тестовые МДП-структуры с поликремниевым затвором и контактом из Al. Показано, что определяющее влияние на особенности C-V-характеристик гетероструктур оказывает строение границы раздела кремний-сапфир и все радиационно-индуцированные изменения ёмкостных параметров тестов связаны с перестройкой поверхностных заряженных центров на этой границе. Найдено, что использование специальной технологии для перекристаллизации слоя кремния КНС-структур с целью уменьшения плотности дислокаций в этом слое может приводить к возникновению на границе раздела кремний-сапфир некоторых паразитных заряженных поверхностных центров, наличие которых, в свою очередь, может приводить к ухудшению радиационной стойкости МДП-транзисторов, формируемых на КНС-структурах.