

## **Приемо-передающие СВЧ модули радиолокационных уровнемеров серии Барс**

*Представлены назначение, структурные схемы, особенности конструкции и параметры серийно выпускаемых приемо-передающих модулей, предназначенных для радиолокационных уровнемеров серии БАРС 300.*

**Ключевые слова:** радиолокационный уровнемер, приемо-передающий модуль СВЧ, стабилизация частоты, конструктивные требования, технические характеристики

Прибор, выполняющий операцию измерения уровня заполнения промышленных резервуаров, называется уровнемером. Радиолокационное измерение уровня основано на измерении радиолокационным методом расстояния по прямой от уровнемера, устанавливаемого, как правило, в верхней части резервуара, до поверхности продукта. Затем производится пересчет этого расстояния в уровень с использованием геометрических параметров резервуара. Предприятием «КОНТАКТ-1» разработана и выпускается серия радиоволновых уровнемеров малой ( $\pm 5$ см) БАРС322МИ.ХХ, средней ( $\pm 2$ мм) БАРС341И.ХХ и высокой ( $\pm 1$ мм) БАРС351И.ХХ точности. В приборах использованы технические решения защищенные патентами РФ [1..3].

Приборы серии БАРС выпускаются в двух конструктивных модификациях: с одной приемо-передающей антенной, и отдельными приемной и передающей антеннами. Каждая из модификаций имеет свою область применения. Так, одноантенные приборы предназначены для измерения уровня жидких продуктов имеющих ровную поверхность раздела сред. Двухантенные приборы в основном используются для работы в сильно запыленной среде и применяются для измерения уровня сыпучих продуктов. За период с 2004... 2015г. предприятием выпущено и успешно работает в самых жестких условиях эксплуатации более 4000 приборов серии БАРС300.

Факторами, требуемыми для обеспечения высокой точности измерения уровня (погрешность порядка  $\pm 1$  мм) являются:

- малая нестабильность частоты излучаемого сигнала – не более  $0,5 \cdot 10^{-6}$ ;
- высокая линейность модуляции – не хуже чем 0,1%;
- отношение сигнал/помеха – не хуже -40дБ;
- линейность фазочастотной характеристики СВЧ тракта – не хуже  $\pm 5^\circ$ .

В состав каждого прибора серии БАРС300 входит приемо-передающий модуль (ППМ), характеристики которого во многом определяют достижимую точность измерения уровня. Назначение ППМ состоит в формировании излучаемого радиочастотного сигнала, приеме отраженного от поверхности контролируемой среды эхо-сигнала, получении на выходе смесителя сигнала разностной частоты (СРЧ), и формировании контрольных сигналов. Модули для каждого конкретного типа прибора строятся по индивидуальной схеме в зависимости от используемого метода обработки [4] и конкретных технических требований.

В приборах серии БАРС300 применена линейная частотная модуляция (ЛЧМ). При этом

используется диапазон частот от 9ГГц до 10,5ГГц, по международной классификации X-диапазон. Все модули построены по гомодинной схеме, т.е. часть излучаемой мощности подается на один из входов фазового детектора, а на второй вход подается принятый эхо-сигнал. Частота СРЧ пропорциональна расстоянию от прибора до поверхности продукта.

Для двухантенного прибора малой точности БАРС322МИ.ХХ, с аналоговым методом формирования ЛЧМ сигнала, был разработан ППМ имеющий функциональную схему, представленную на рис.1. ППМ имеет в своей схеме генератор управляемый напряжением (ГУН), два усилителя, позволившие увеличить развязку генератора от внешнего пространства и повысить чувствительность приемника. Особенностью модуля является схема формирования частотных меток, предназначенных для удержания постоянства диапазона перестройки частоты ГУН при изменении окружающей температуры.

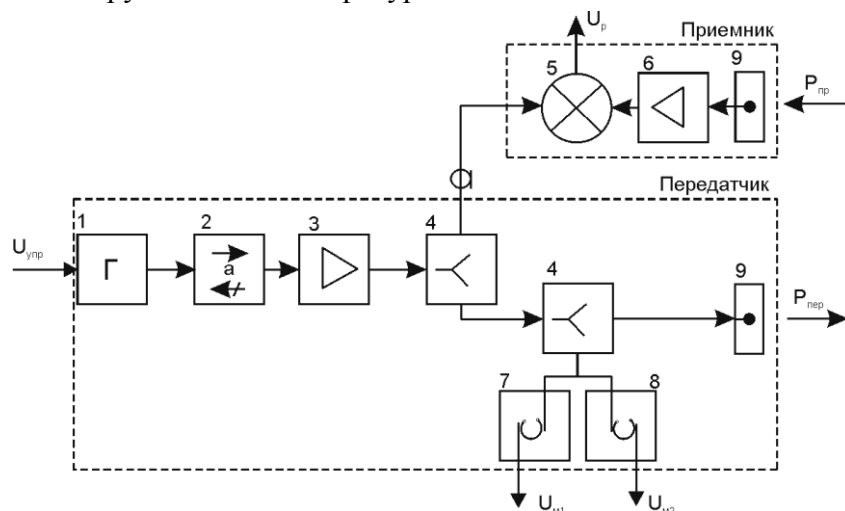


Рисунок 1

Здесь обозначено: 1- ГУН; 2- ферритовый вентиль; 3- буферный усилитель; 4- направленный ответвитель; 5-смеситель; 6-малозумящий усилитель; 7- формирователь частотной метки на нижней частоте диапазона перестройки частоты ГУН; 8- формирователь частотной метки на верхней частоте диапазона перестройки частоты ГУН; 9- волноводно - микрополосковый переход.

Модуль выполнен в гибридно-интегральном исполнении с использованием рНЕМТ - транзисторов и диодов ШОТКИ. В формирователях частотных меток применены высокостабильные диэлектрические резонаторы с температурным коэффициентом частоты  $\tau_f = 0 \dots \pm 2$  ppm/°C и детекторные диоды с низким барьерным напряжением.

Конструктивно ППМ реализован в виде сборки двух корпусов (передатчик и приёмник), объединенных соединительным кабелем для передачи на смеситель опорного сигнала.

Такая конструкция позволяет изменять базовое расстояние между применяемыми антеннами. Изготавливаются два варианта ППМ с малозумящими усилителями в приемнике, обеспечивающими усиление 10 дБ и 20 дБ. Модуль с усилителем 20 дБ применяется в приборах, измеряющих уровень слабо отражающих продуктов, таких как угольная пыль.

В приборах средней точности БАРС341И.ХХ модулирующее напряжение для получения

ЛЧМ сигнала формируется с помощью цифро-аналогового преобразователя. При этом используется управляющая характеристика ГУНа, периодически измеряемая в процессе работы с помощью низкочастотного цифрового синтезатора частот. ППМ для приборов этой серии использует функциональную схему, показанную на рис.2.

ППМ были реализованы на рНЕМТ – транзисторах и SiGe - биполярных транзисторах. Для стабилизации частоты ГОЧ использован высокодобротный диэлектрический резонатор с температурным коэффициентом частоты  $\tau_f = 0 \dots \pm 2$  ppm/°C (на схеме не показан). В смесителе и фазовом детекторе применены диоды SHOTKI с низким барьерным напряжением.

Часть излучаемого сигнала выделяется дополнительным делителем мощности и подаётся на вспомогательный смеситель. На второй вход этого смесителя подаётся сигнал с ГОЧ. ГОЧ настроен на среднюю частоту диапазона перестройки ГУНа. В результате частота  $F_0$  контрольного сигнала изменяется от 5 МГц до 500 МГц. Усилитель промежуточной частоты нормирует величину амплитуды контрольного сигнала с частотой  $F_0$  на уровне 0,5 Вэф. Сигнал  $F_0$  используется в модуле обработки прибора для измерения зависимости частоты ГУНа от управляющего напряжения с применением цифрового синтезатора частоты.

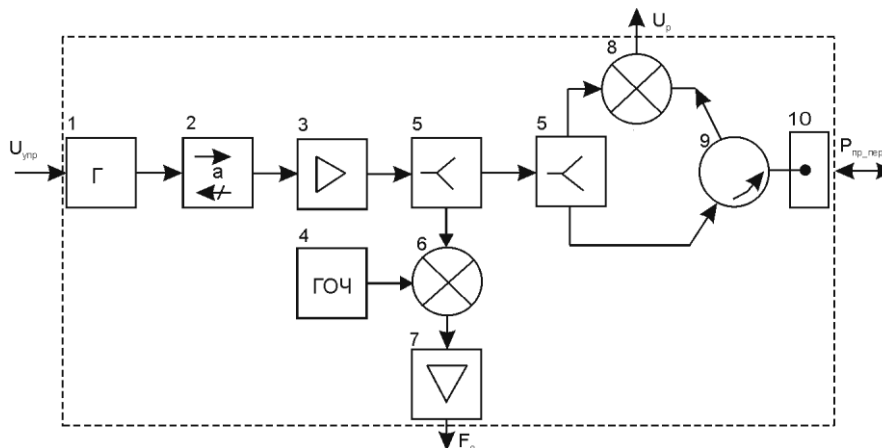


Рисунок 2

Обозначения аналогичны схеме рисунка 1. Добавлено: 4- генератор опорной частоты (ГОЧ), 7-усилитель промежуточной частоты, 8-фазовый детектор, 9 – циркулятор.

Модуль реализован в гибридно-интегральном исполнении на подложке из фторопласта в одном корпусе.

В приборах серии БАРС351И.ХХ для формирования ЛЧМ сигнала используется прямой цифровой синтез с применением синтезатора с целочисленным делителем частоты, либо синтезатора с дробным делителем частоты.

Функциональная схема ППМ одноантенного прибора БАРС351И.ХХ на основе синтезатора с целочисленным делителем частоты показана на рис. 3.

Обозначения аналогичны схеме рисунка 1. Добавлено: 2- фильтр низких частот; 4- синтезатор частот (СЧ); 7- делитель частоты на 8.

Формирование ЛЧМ сигнала осуществляется с применением целочисленного синтезатора частот. Коэффициенты деления частоты у синтезатора постоянные. В качестве опорного сигнала  $F_{оп}$  на синтезатор подается сигнал, сформированный микросхемой прямого цифро-

вого синтеза (ПЦС). Частота опорного сигнала перестраивается по линейному закону в диапазоне 12,8-13,3 МГц. ГУН и буферный усилитель построены на рНЕМТ - транзисторах. Делитель частоты на 8 реализован на двух интегральных микросхемах, делителя частоты на 2 и делителя частоты на 4. Фильтр низких частот построен с использованием операционного усилителя.

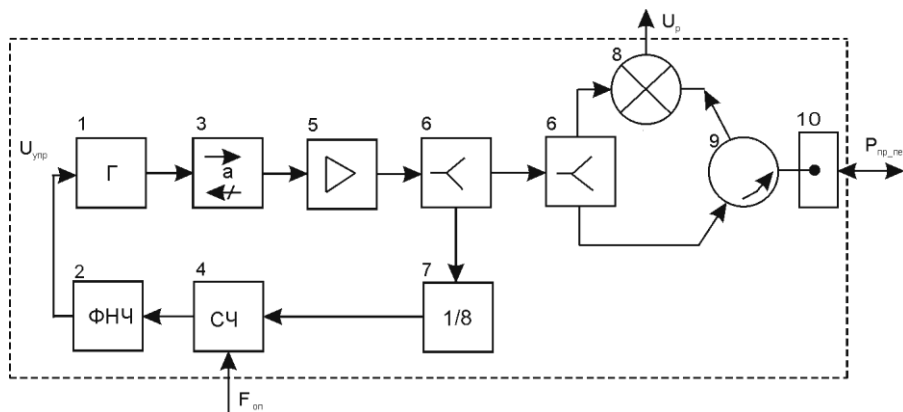


Рисунок 3

Диапазон перестройки частоты  $F_{оп}$ , и закон её перестройки задаются подачей на микросхему ПЦС соответствующих сигналов управления. Микросхема ПЦС установлена на одной из плат модуля обработки, а вырабатываемый ее сигнал передается в ППИМ по коаксиальному кабелю. СЧ сравнивает частоту генерируемую ГУН, делённую на 8 с частотой  $F_{оп}$ , поступающей от микросхемы ПЦС и формирует управляющее напряжение для ГУН, обеспечивающее равенство этих частот с точностью до фазы.

После появления на рынке микросхем генераторов перестраиваемых напряжением в корпусах для поверхностного монтажа (фирма Hitrite), и синтезаторов частоты с дробными делителями были реализованы два варианта модулей предназначенные для модернизации приборов БАРС351И.ХХ.

Функциональная схема ППИМ одноантенного модернизированного прибора БАРС351И.ХХ показана на рис.4.

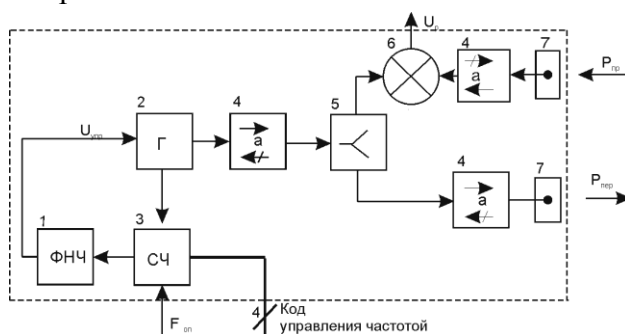


Рисунок 4

Здесь обозначения аналогичны предыдущим схемам.

Технические характеристики ППИМ всех серий соответствуют ряду общих требований:

- |                              |              |
|------------------------------|--------------|
| 1. Диапазон рабочих частот – | Х диапазон.  |
| 2. Поведение МХ ГУН -        | монотонный.  |
| 3. Нелинейность МХ ГУН –     | не более 4%. |

- |   |                  |
|---|------------------|
| 4. Крутизна МХ ГУН –  | 50...100 МГц/В.  |
| 5. Уровень выходной мощности ППМ –  | 2...20 мВт.      |
| 6. Перепад выходной мощности в рабочем диапазоне частот (ПАМ) - не более                                | 3 дБ.            |
| 7. Амплитуда СРЧ при затухании сигнала от выхода до входа модуля (во внешнем пространстве?) равном 40дБ | - не менее 5 мВ. |
| 8. Величина развязки ГУН от внешнего пространства –   | не менее 60дБ.   |
| 9. Величина КСВН входа - выхода модуля –  | не более 1,3.    |

Требования к МХ ГУН связаны с диапазоном управляющего напряжения вырабатываемого модулем обработки или синтезатором и возможностью схемы, компенсирующей нелинейность.

В приборах низкой точности производится аналоговая компенсация нелинейности МХ ГУНа за счет введения предискажений в управляющее напряжение.

Приборы средней точности менее чувствительны к исходной нелинейности МХ за счёт измерения текущей МХ и учёта её при формировании модулирующего напряжения.

Приборы высокой точности используют для получения ЛЧМ схемы на основе синтезатора частот и поэтому повышаются требования к скоростным свойствам ГУНа.

Требования к величине выходной мощности обусловлены чувствительностью приемника модуля, максимальным измеряемым расстоянием, рассеивающей способностью поверхности отражающей среды, поглощением радиосигнала в среде над отражающей поверхностью. Так максимальная величина выходной мощности требуется для приборов серии БАРС322И.ХХ, работающих на сыпучих продуктах.

Нормировка амплитуды СРЧ связана с чувствительностью модуля обработки по входу и глубиной регулирования схемы автоматической регулировки усиления АРУ. Так как динамический диапазон СРЧ для приборов серии БАРС составляет более 60дБ, амплитуда выходного сигнала будет изменяться от 0,1 мВ до 0,5 В.

Величина развязки ГУНа от внешнего пространства связана с необходимостью исключить эффект затягивания частоты генератора при воздействии на его выход просочившейся части эхо-сигнала. При малом расстоянии до поверхности отражающей среды, когда эхо-сигнал максимален по амплитуде, этот эффект приводит к изменению МХ в зависимости от измеряемого расстояния и частоты излучаемого сигнала. Эффект затягивания частоты приводит к нарушению линейного закона преобразования измеряемого расстояния в разностную частоту на выходе фазового детектора.

Указанные требования обеспечиваются характеристиками входящих в ППМ функциональных узлов и конструкцией внутреннего объема корпуса модуля.

Одним из основных функциональных узлов ППМ является генератор, управляемый напряжением (ГУН). Управляемый по частоте СВЧ генератор состоит из перестраиваемого по частоте резонатора и активного элемента с отрицательным входным сопротивлением. Активный элемент может быть реализован как на СВЧ полевом транзисторе (MOSFET, рHEMT), так и на СВЧ биполярном транзисторе произведенном по SiGe технологии. Отрицательное входное сопротивление активного элемента создается за счет включения транзистора с последовательной отрицательной обратной связью. Элементом, обеспечивающим перестройку частоты генерации, является СВЧ настроенный GaAs или Si диод. Использование современных настроенных диодов с квадратичной вольт - фарадной характеристикой позволило получить

диапазон перестройки частоты генерации более 1,2 ГГц при центральной частоте в районе 10 ГГц. ГУН, реализованный на биполярном транзисторе, обладает преимуществами по сравнению с ГУН на полевом транзисторе. Это существенно меньший уровень фазовых шумов (на 20дБ ниже, чем у ГУНа на полевом транзисторе) и более быстрая реакция на изменение управляющего напряжения.

Схема смесителя, используемая вППМ, имеет расширенный динамический диапазон, не обладает чувствительностью к уровню фазовых шумов ГУНа и имеет высокую линейность преобразования временной задержки измерительного сигнала в фазу (частоту) СРЧ.

Расчет узлов модулей проводился с использованием S-параметров активных и пассивных элементов, а также по восстановленным эквивалентным схемам нелинейных элементов.

Последовательные расчет и макетирование отдельных узлов позволили понизить уровни пучностей поля внутри объема корпуса модулей, обеспечить монотонность характеристик управления и повторяемость характеристик изделий в серии.

Конструктивно все модули выполнены по гибридно-интегральной технологии с использованием радиоэлементов в корпусах для поверхностного монтажа. Платы реализованы на материале ФАФ-4Д (Taconic TLX-8) с металлизированными отверстиями. В основном модули выполнены на одной плате с высокой плотностью монтажа. Для ускорения сборки модулей объединены процессы пайки конструктивных элементов корпуса, платы на корпус и радиоэлементов на плату.

#### Библиографический список

1. Патент 2234108 РФ, МКИ G01 S 13/34. Способ измерения расстояния (варианты). / Б.А. Атаянц, В.В. Езерский, И.В. Баранов, В.А. Болонин, В.М. Давыдочкин, В.А. Пронин. № 2002133946/09; Заявл. 18.12.2002; Оpubл. 10.08.2004, Бюл. № 22. – 8 с.:ил.
2. Патент 2234716 РФ, МКИ G01 S 13/34. Способ формирования зондирующего частотно-модулированного сигнала для дальномера с периодической частотной модуляцией. / Б.А. Атаянц, И.В. Баранов, В.А. Болонин, В.М. Давыдочкин, В.В. Езерский, Б.В. Кагаленко, В.А. Пронин. № 2003105992/09; Заявл. 04.03.2003; Оpubл. 20.08.2004, Бюл. № 23. – 8 с.:ил.
3. Патент 2234688 РФ, МКИ G01 S 13/34. Способ измерения электрофизических параметров зондируемого материала и расстояния до него (варианты), устройство для его осуществления и способ калибровки этого устройства / Б.А. Атаянц, В.Д. Давыдочкин, В.В. Езерский, В.А. Пронин. № 2003101694/09; Заявл. 21.01.2003; Оpubл. 20.08.2004, Бюл. № 23. – 8 с.:ил.
4. Атаянц Б.А., Давыдочкин В.М., Езерский В.В., Паршин В.С., Смольский С.М. Прецизионные системы ближней частотной радиолокации промышленного применения. М.: Радиотехника. 2012. 512 с