

УДК 681.317

ОМАРОВ М.А., д.т.н., профессор (ХНУРЭ),  
ЦЕХМИСТРО Р.И., к.ф.-м.н., доцент (УкрГАЗТ),  
ЗАЙЧЕНКО О.Б., ассистент (ХНУРЭ)

## Синтез структурных схем современных многозондовых мультиметров СВЧ

*В статье в соответствии с классификацией СВЧ блоков микроволновых мультиметров рассматривается два варианта повышения точности за счет уменьшения случайных погрешностей. При проектировании мультиметра учитывается степень рассогласования тракта. Если тракт слабо рассогласован, используется протяженный датчик, соответственно фильтрация случайных помех осуществляется фильтром Калмана-Бьюси. Если тракт сильно рассогласован, то СВЧ блок состоит из нескольких дискретных датчиков, размещаемых на определенном расстоянии друг относительно друга. Для такой конструкции рекомендуется применять фильтр Калмана. В первом случае практически реализуется гибридная схема фильтра Калмана-Бьюси, во втором, для фильтра Калмана – цифровая.*

**Ключевые слова:** многозондовый мультиметр СВЧ, точечный и протяженный датчик, случайная погрешность, фильтр Калмана, рассогласование тракта, структурная схема.

### 1. Введение

Развитие связи, военной и космической техники, решение многих прикладных задач биологии опираются на точные измерения электромагнитных величин. Как известно, качество функционирования систем, работающих на СВЧ, во многом зависит от точности их прецизионной настройки, которая невозможна без наличия соответствующей высокоточной измерительной аппаратуры, поэтому дальнейший прогресс в СВЧ технике неразрывно связан с созданием новых прецизионных автоматических измерительных систем. В настоящее время точность существующих ваттметров, анализаторов цепей СВЧ диапазона, мультиметров во многом достигается за счет использования прецизионных дорогостоящих аппаратуры и СВЧ компонент, которые за последнее время практически достигли совершенства. Поэтому, следуя общей тенденции развития современной измерительной техники, следующий шаг на пути повышения точности СВЧ измерений можно сделать только за счет разработки принципиально новых методов измерения, основанных на обработке измерительной информации на компьютере.

Поэтому проблема создания серийно выпускаемых высокоточных мультиметров СВЧ диапазона весьма актуальна. Кроме того, требования современного рынка диктуют необходимость максимально возможного снижения стоимости данных систем, что особенно важно для отечественной измерительной науки и техники.

Мультиметры СВЧ предназначены для одновременного определения модуля и фазы комплексного коэффициента отражения нагрузки, падающей, отраженной и проходящей мощности. Многозондовые мультиметры СВЧ основаны на многозондовом методе, который известен достаточно давно, но не исчерпал своих возможностей. Мультиметр состоит из СВЧ блока, то есть секции волновода с датчиками и блока обработки. Наличие нескольких датчиков позволяет восстановить картину поля в тракте. Для целей повышения точности одинаковы важны обе эти составляющие и датчики и способ обработки. Способ обработки в свою очередь реализуется устройством. Устройство в дальнейшем будет представлено структурной схемой.

### 2. Состояние и перспективы создания многозондовых мультиметров с протяженными и точечными датчиками

При проектировании мультиметра учитывается степень рассогласования тракта. Тракт может иметь коэффициент стоячей волны (КСВ) порядка 1, тогда такой тракт считают слабо рассогласованным. Если тракт слабо рассогласован используется протяженный датчик, типа поглощающая стенка. Если же тракт сильно рассогласован, то используются квазиточечные датчики, действие которых основано также на принципе поглощающей стенки, размещаемые эквидистантно или неэквидистантно (рис. 1).

На рис. 2 представлена батарея пленочных термопар с датчиками в двух проекциях.

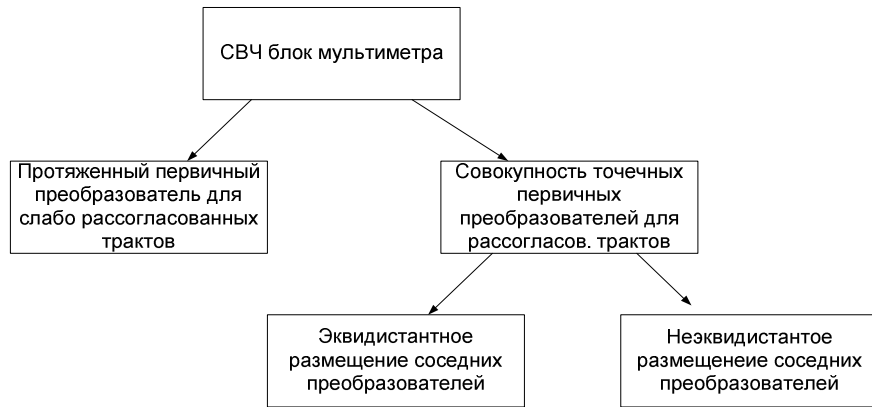


Рис. 1. Классификация первичных преобразователей многозондового мультиметра в зависимости от степени рассогласования тракта

На базе поглощающей стенки с чувствительным элементом в виде пленочных термопар разработано несколько конструкций средств измерения и контроля СВЧ трактов и мощности, одним из таких средств [1] является устройство для измерения проходящей мощности СВЧ, которое содержит отрезок волновода 1 с поглощающим участком 2 шириной  $d$  в стенке волновода 1, термопреобразователем 4, расположенным вдоль середины поглощающего участка 2 стенки 3, соединенным с индикатором. Ось поглощающего участка 2 сдвинута от центра волновода 1 на расстояние  $(0,2-0,3\lambda)$   $a$ , где  $a$  - размер широкой стенки 3 волновода 1. Общая длина термопреобразователя 4 равна или кратна длине волны в волноводе 1. Поглощающий участок 2 может быть выполнен из материала с более низкой

проводимостью, чем материал волновода 1 (медь или латунь). В качестве индикатора 5 может быть стрелочный или цифровой вольтметр постоянного тока. Устройство работает следующим образом. При подаче энергии от генератора к нагрузке все стенки волновода нагреваются, при этом тонкая стенка поглощающего участка 2 нагревается сильнее, чем другие участки волновода. Это обусловлено более низкой отдачей тепла тонкой стенки за счет теплопроводности на менее холодные участки волновода. Вдоль середины поглощающего участка 2 стенки 3 установлен термопреобразователь 4, который интегрирует температуру вдоль середины поглощающей участка 2, длина которого кратна половине длины волны в волноводе. Сигнал термопреобразователя 4 подается на индикатор 5.

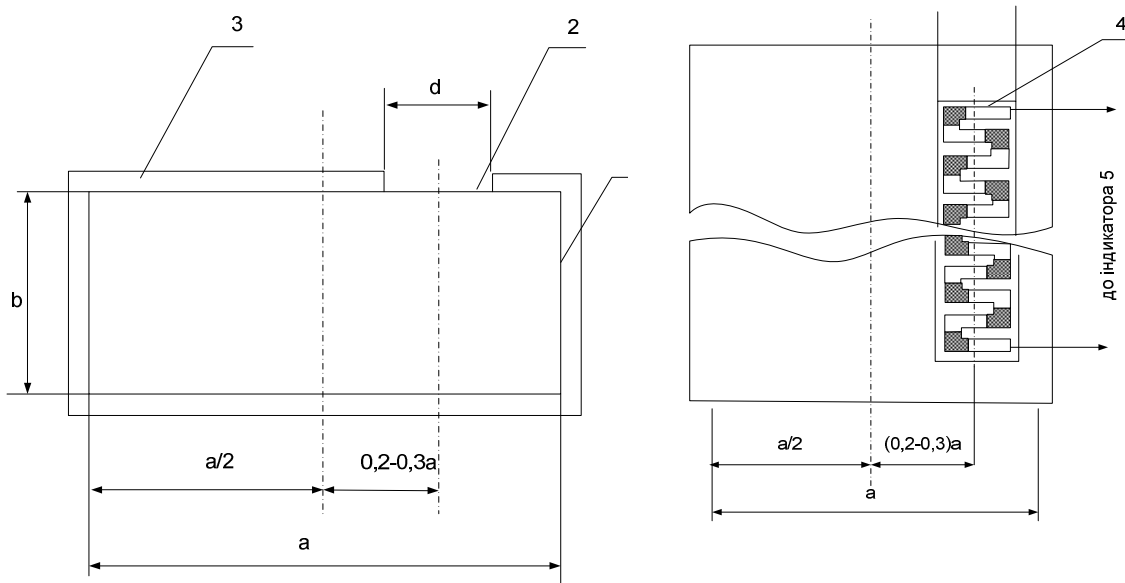


Рис. 2. Батарея пленочных термопар: 1 – слюдяная подложка, 2 – контактная перемычка, 3 – пленка трубы, 4 – пленка висмута, 5 – слой платины

При расчете многоэлементных преобразователей проходящей мощности в волноведущем тракте решается задача выбора амплитудно-фазового распределения, при котором некоторый параметр достигает минимального значения при работе в заданном диапазоне частот при заданных размерах устройства. Применительно к преобразователям проходящей мощности это означает, что чувствительность каждого элемента и расстояния между ними вдоль тракта должны обеспечивать минимальную погрешность измерения в заданном диапазоне частот и при заданной длине преобразователя (или обеспечивать минимальную длину при заданном допуске на погрешность). Например, расстояния между чувствительными элементами одинаковы, а синтезируется амплитудное распределение, т.е. соотношения между чувствительностями элементов (эквилидистантные преобразователи). Или наоборот, чувствительности одинаковы, а синтезируется фазовое распределение, т.е. расстояния между элементами (неэквилидистантный преобразователи).

Если преобразователь рассчитан на работу в полосе частот, то зонды располагают в виде

неэквилидистантной решетки следующим образом. Пару зондов размещают на расстоянии  $\lambda_{в1}/4$ , затем другую пару зондов, расстояние между которыми тоже составляет  $\lambda_{в1}/4$ , размещают на расстоянии  $\lambda_{в2}/4$  относительно первой пары. Такой четырехзондовый преобразователь не имеет зависимости отсчетов от фазы коэффициента отражения на двух частотах, которые соответствуют длинам волн  $\lambda_{в1}$  и  $\lambda_{в2}$ . Восьмизондовый преобразователь, в котором используются две четырехзондовые, сдвинутые относительно друг друга на  $\lambda_{в3}/4$  решетки, согласован на трех частотах, которые соответствуют  $\lambda_{в1}$ , и  $\lambda_{в2}$  и  $\lambda_{в3}$ . Число зондов можно удваивать до тех пор пока геометрические размеры зондов позволяют разместить их на заданном расстоянии. Практическое распространение получили преобразователи с количеством зондов от 4 до 32. Многозондовый преобразователь с числом зондов  $2^n$  согласован на  $n$  частотах диапазона. При этом частоты выбираются так, чтобы обеспечить минимальное рассогласование во всем рабочем диапазоне. Находят применение также неэквилидистантное размещение зондов, представленное на рис. 3.

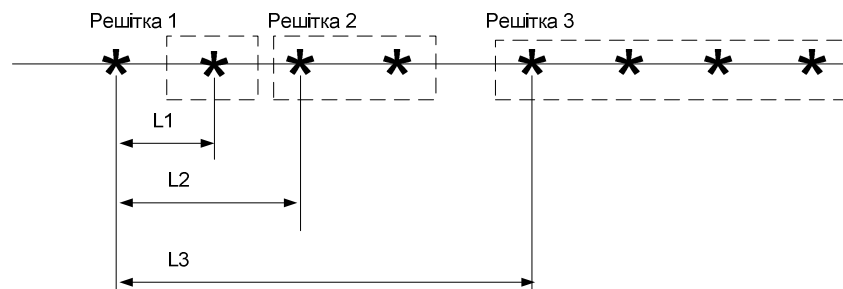


Рис. 3. Неэквилидистантное размещение датчиков

Подобное размещение состоит в том, что на основе корней полинома Чебышева рассчитываются расстояния между решетками. Чем больший частотный диапазон необходимо перекрыть преобразователем, тем выше должна быть степень полинома Чебышева, и тем к большему количеству датчиков это приводит, причем количество датчиков с увеличением степени полинома на единицу растет пропорционально степени двойки и составляет соответственно четыре, восемь, шестнадцать и более. В волноводах частотный диапазон составляет около октавы, потому количество датчиков для неэквилидистантных волноводных преобразователей равно двум, для коаксиальных трактов, чей частотный диапазон составляет несколько октав количество датчиков, соответственно, будет больше [2].

$$L_k = \frac{\lambda_{cp}}{4 \left( 1 + x_k \frac{q-1}{q+1} \right)}, \quad q = \frac{\lambda_{max}}{\lambda_{min}}$$

где  $k=1, 2, 3$  – номер решетки,  $x$  – корень полинома Чебышева.

На рис. 4 [3] приведена конструкция волноводного СВЧ блока мультиметра с неэквилидистантным размещением датчиков.

Такая конструкция с точки зрения диапазона частот является оптимальной, но размещение датчиков в полости тракта снижает электрическую прочность волновода, а, значит, для высокого уровня мощности не пригодна.

**Целью работы** является выработка рекомендаций для проектирования многозондового микроволнового мультиметра, основанная на степени рассогласования тракта и уровне сигнала.

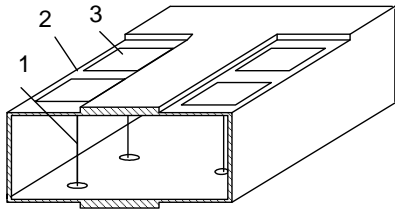


Рис. 4. Многоэлементный неэквилидистантный болометрический преобразователь мощности:

1 – болометр, 2– волновод, 3 – контактная площадка

Высокий уровень сигнала налагает ограничение на тип используемых датчиков. Для таких уровней сигналов не подходят конструкции датчиков, которые могут вызвать пробой тракта. Для высокого уровня мощности датчики устанавливаются на одном уровне с внутренней поверхностью тракта [1], так чтобы в минимальной степени нарушать регулярность тракта и не провоцировать его пробой. Они имеют форму диска. За счет подбора материала датчик греется, в то время как остальной тракт остается холодным. По величине нагрева датчика или диссипативным потерям судят о величине мощности в тракте. В то же время при незначительных уровнях сигналов, определяемых назначением прибора вполне применимы датчики (рис. 3). Соседние датчики при неэквилидистантном размещении из расчетов при аппроксимации полиномом Чебышева могут оказаться расположенными достаточно близко друг к другу (в зависимости от требуемого диапазона частот), значит, датчик не может иметь существенной протяженности вдоль направления распространения волны в тракте, иначе он совместится с соседним. Принцип действия основан на нагреве датчика СВЧ полем. Чтобы обеспечить достаточную площадь чувствительной поверхности, датчик вдвинут в волновод, следовательно, актуален расчет переотражений между неэквилидистантными датчиками. Для данного случая собственный коэффициент отражения предположительно больше, чем у датчика в форме. При этом для сравнимости результатов основная методика расчета сохраняется.

### 3. Постановка задачи

Особенность многозондового микроволнового мультиметра состоит в том, что в отличие от большинства радиоизмерительных устройств, в нем осуществляется не временная дискретизация, а пространственная. Так как датчики располагаются вдоль направления переноса энергии по волноводу.

Это свойство широко используется от [4] до [5], тогда, когда надо применять дискретное преобразование Фурье (ДПФ).

Для многозондовых и двенадцатиполосных устройств традиционно используется метод

наименьших квадратов (МНК) при количестве уравнений больше количества неизвестных [6], [7]. В статье используется разновидность метода наименьших квадратов с использованием априорной информации, то есть фильтр Калмана, а также вводится фильтр Калмана-Бюсси для непрерывных сигналов, то есть для протяженной поглощающей стенки.

### 4. Реализация поставленной задачи

Рекурсивные процедуры оценки случайных величин согласуются с процедурами оценки случайных процессов. Иными словами, если есть процедура оценки случайных процессов, то она же может использоваться и для случайных величин, хотя при этом обратное не выполняется.

Для рекурсивной оценки параметров таких случайных объектов, как случайные величины, разработаны процедуры стохастической аппроксимации: Роббинса-Монро и др.

Рекурсивная процедура Роббинса-Монро на  $k + 1$  шаге представляется в виде

$$\hat{x}(k + 1) = \hat{x}(k) + K(k) \left[ y(k) - H(k) \hat{x}(k) \right], \quad (1)$$

где  $y(k) = H(k)x(k) + \xi(k)$  - уравнение наблюдения, формирующее наблюдаемую статистику,  $K(k)$  - коэффициент, обеспечивающий сходимость процедуры (1).

Если величина  $x(t)$  является аналоговой, то соответствующее уравнение оценки примет вид

$$\frac{d \hat{x}(t)}{dt} = K(t) \left[ y(t) - H(t) \hat{x}(t) \right], \quad (2)$$

где  $K(t)$  удовлетворяет условиям:

$$\int_0^{\infty} K(t) dt \rightarrow \infty, \quad \int_0^{\infty} K^2(t) dt < \infty.$$

Достоинством рассмотренных рекурсивных методов оценивания, является то, что на практике они оказываются более эффективными, поскольку дают оценку в реальном масштабе времени, а не требуют потерь времени на накопление и обработку статистики. Таким образом, процедуру рекурсивной оценки можно прервать на любом этапе ее получения.

Таблиця 1

**Применение алгоритмов фильтрации  
с учетом вида СВЧ блока**

СВЧ-блок	Дискретные датчики	Один протяженный датчик
фильтр	Калмана	Калмана-Бьюсси
реализация	цифровая	гибридная (аналого-цифровая)

В качестве примера рассмотрим известный, но не применяемый в метрологии фильтр Калмана, который согласуется с традиционной математической моделью многозондового мультиметра СВЧ (см. рис. 5)

$$\hat{x}(k+1) = \hat{x}(k) + (M^{-1} + H^T R^{-1} H)^{-1} H^T R^{-1} (y(k) - H \hat{x}(k)). \quad (3)$$

Начальная аппроксимация

$$\hat{x}(k) = \begin{bmatrix} \frac{-P_1 + 2P_2 \cos \theta - P_3}{2(\cos \theta - 1)} \\ \frac{P_1 - 2P_2 + P_3}{2(\cos \theta - 1)} \\ \frac{P_1 - P_3}{2 \sin \theta} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$y(k) = \begin{bmatrix} P_1 \\ \dots \\ P_n \end{bmatrix}.$$

Для непрерывного случая аналогично.

где  $P_n$  - сигнал датчика,  $\theta$  - фазовое расстояние между датчиками, пропорциональное геометрическому расстоянию.

$$H(k) = \begin{bmatrix} 1 & \cos 3\theta & \sin 3\theta \\ 1 & \cos 2\theta & \sin 2\theta \\ 1 & \cos \theta & \sin \theta \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$K(k) = (M^{-1} + H^T R^{-1} H)^{-1} H^T R^{-1},$$

$$R = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3^2 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

где  $\sigma$  - СКО датчика.

$$M = \begin{bmatrix} \frac{\sigma_1^2 + 4\sigma_2^2 \cos^2 \theta + \sigma_3^2}{(2(\cos \theta - 1))^2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\sigma_1^2 + 4\sigma_2^2 + \sigma_3^2}{(2(\cos \theta - 1))^2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\sigma_1^2 + \sigma_3^2}{(2 \sin \theta)} \end{bmatrix},$$

На основании соотношений (3)-(6) можно предложить структурную реализацию алгоритма анализа погрешности, применяя фильтр Калмана и Калмана-Бьюсси, представленные на рис. 5 и 6 соответственно.

Алгоритм фильтра Калмана можно представить блок-схемой, а от нее можно перейти к конечным автоматам, например, Мили. Автоматы Мили можно реализовать на RS триггерах [11].

### 5. Заключение

В статье впервые изложен комплексный подход к проектированию многозондового микроволнового мультиметра, заключающийся в выборе типа датчиков и СВЧ блока, построении математической модели и выборе алгоритмов обработки сигналов датчиков, построении метрологической модели, где выделены систематическая погрешность переотражения датчиков, а также случайная погрешность компенсируется применением фильтра Калман для дискретного случая и фильтра Калмана-Бьюсси – для непрерывного.

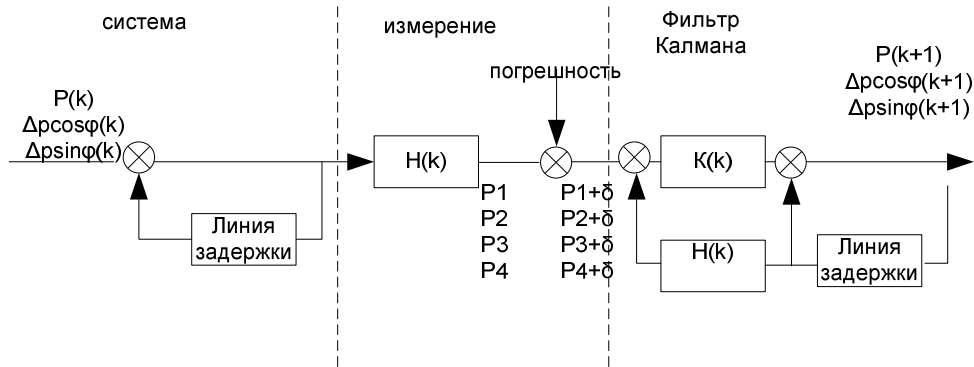


Рис. 5. Структурная схема фильтра Калмана после второй вертикальной штриховой линии (слева - модель ситемы, посередине - модель измерения)

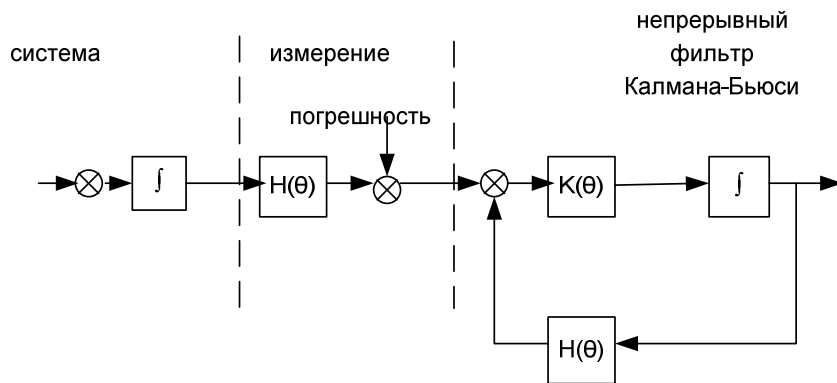


Рис. 6. Структурная схема фильтра Калмана-Бьюси после второй вертикальной штриховой линии (слева - модель системы, посередине - модель измерения)

### Литература

1. Волков В.М. Проектирование средств измерения проходящей мощности: Учеб.пособие.-Харьков: ХТУРЭ, 2000.-160 с.
2. Механиков А. И. Микроволновый мультиметр и алгоритмы его работы [Текст] / А. И. Механиков, В. А. Перепелкин // Измерительная техника. – 1994. – №3. – С.52 – 56.
3. Зайцев, А. Н. Измерения на сверхвысоких частотах и их метрологическое обеспечение [Текст] / А.Н. Зайцев, П. А. Иващенко, А. В. Мыльников. – М.: Из-во стандартов, 1989. – 240 с.
4. Forrer M.P., Tomiyasu K. Determination of higher orders propagating modes in wave-guide systems. // Journal of applied physics. - 1958. - V. 29. - №7.
5. Гимпелевич Ю.Б. Измерение и контроль параметров микроволновых трактов: [монография] / Ю.Б. Гимпелевич; Севастопольский национальный технический университет. - Севастополь: изд-во «Вебер», 2009. -293 с.
6. Engen G.F. Microwave Circuit Theory and foundation of Microwave metrology. Peter Peregrinus Ltd., 1992. – 256 p.
7. Кудряшов Ю.Ю., Моржаков А.А., Ширшин С.И. Оптимизация параметров многозондовой измерительной линии // Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ. – 1988. – Вып. 10 (414) . – С. 30 – 34.
8. Силаев М. А. Приложение матриц и графов к анализу СВЧ устройств [Текст] / М.А. Силаев, С.Ф. Брянцев. – М.: Сов. радио, 1970
9. Gelb A. Applied Optimal Estimation. – MIT Press, 2001. – 192 p.
10. Сеницын, И. Н. Фильтры Калмана и Пугачева: Учеб.пособие. – М.: университетская книга, Логос, 2006. – 640 с,
11. Лихтциндер Б., Кузнецов В. Микропроцессоры и вычислительные устройства в радиотехнике. – М.: Радио и связь, 1989. – 250 с.
12. Чибизов Г.Н. Структурный синтез гибридных фильтров Калмана-Бьюси[Текст] : дис. канд. техн. наук / Чибизов Д.Г. – Таганрог, 2009.

**Омаров М.А., Цехмістро Р.І., Зайченко О.Б. Синтез структурних схем сучасних багатозондових мультиметрів НВЧ.** У статті, відповідно до класифікації НВЧ блоків мікрохвильових мультиметров, розглядається два варіанти підвищення точності за рахунок зменшення випадкових похибок. При проектуванні мультиметра враховується ступінь узгодженості тракту. Якщо тракт слабо узгоджений використовується протяжний датчик, відповідно фільтрація випадкових похибок здійснюється фільтром Калмана - Бьюсі. Якщо тракт сильно узгоджений, то НВЧ блок складається з декількох дискретних датчиків, що розміщуються на певній відстані один від одного. Для такої конструкції рекомендується застосовувати фільтр Калмана. У першому випадку практично реалізується гібридна схема фільтра Калмана - Бьюсі, у другому, для фільтра Калмана - цифрова.

**Ключові слова:** багатозондовий мультиметр НВЧ, точковий та протяжний датчик, випадкова похибка, фільтр Калмана, розузгодженість тракту, структурна схема.

**Omarov M.A., Tsekhmistro R.I., Zaichenko O.B. Synthesis of block diagrams of modern multiple probe microwave multimeters.** Two variants to improve the accuracy at the expense of reducing random errors have been considered in the article in accordance with the classification of microwave multimeter blocks. While designing multimeter, the level of channel mismatch has been taken into account. If the channel is slightly mismatched, extended sensor is preferable, and random noise filtering is performed by Kalman-Bucy filter respectively. If the channel is strongly mismatched, the microwave unit is composed of several discrete sensors placed at a certain distance from each other. It is recommended to apply the Kalman filter for this construction. A hybrid scheme of the Kalman-Bucy filter is practically realized in the first case, and a digital realization is recommended for the Kalman filter in the second case.

**Key words:** multiple probe microwave multimeter, point and extended sensor, random error, Kalman filter, channel mismatch, block diagram.

---

Рецензент доцент, д.т.н., професор кафедри ТАПР Синотин А.М. (ХНУРЭ)

*Поступила 11.03.2014г.*