

Р. И. ЦЕХМИСТРО, канд. физ.-мат. наук, Р. С. РАТИНОВ

## АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ АНАЛИЗА МОДОВО-ЧАСТОТНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛЯ ПРЯМОУГОЛЬНОГО ВОЛНОВОДНОГО ТРАКТА

### Введение

Для решения разнообразных задач измерения, анализа и контроля трактовых параметров многомодовых волноводных устройств, например суммарной многомодовой мощности, мощностей отдельных мод и их частотного распределения, встающих на различных этапах разработки, испытаний и эксплуатации радиоэлектронных систем СВЧ, необходимо иметь соответствующие измерительные системы (ИС). Они способны быстро, с высокой точностью и в удобной форме выдавать требуемые характеристики по результатам трактового анализа поля. В настоящее время подобная техника в наборе отечественных автоматизированных измерительных устройств СВЧ отсутствует. Импортные цифровые анализаторы с компьютерными интерфейсами и соответствующим программным обеспечением достаточно дорогостоящие.

Большой практический интерес представляет разработка и создание ИС для пространственно-частотного анализа поля прямоугольного многомодового волноводного тракта в диапазоне до пятой гармоники основного сигнала.

В данной работе предлагаются некоторые структурные варианты создания подобных ИС в виде автоматизированного измерительно-вычислительного комплекса (АИВК), предполагающего контроль всего измерительного цикла и компьютерную регистрацию результатов исследований.

Известные системы трактового анализа многомодовых полей реализуются, как правило, на основе аппаратных методов измерений, объединяющих две обширные группы. К первой из них относятся методы селективного отбора отдельных модовых составляющих из многомодового поля тракта, а ко второй зондовые методы [1-6].

### Методы анализа селективного отбора

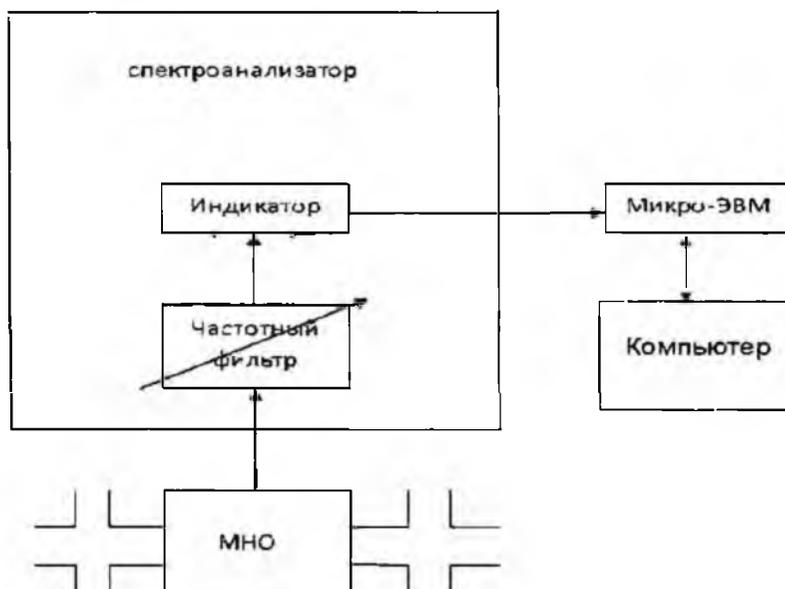


Рис. 1

Чаще всего такие ИС строятся по схеме рис. 1. В разрыв исследуемого волноводного тракта помещается модоселективный направленный ответвитель (МНО) требуемого типа волны или направленный ответвитель многомодовой мощности (НОММ), выходной сигнал которого подается на вход измерительного приемника или анализатора спектра. Если в со-

став ИС ввести простейший компьютер, в память которого будут вводиться калибровочные характеристики применяемых МНО и НОММ, и организовать автоматический режим сбора и обработки информации, то подобную ИС можно назвать АИВК.

Преимущества ИС этой группы заключается в простоте обработки первичной информации, так как выходной сигнал первичных трактов ответвления непосредственно пропорционален или определенной модовой составляющей многомодового поля, или уровню суммарной многомодовой мощности. В составе простейшего АИВК подобного типа достаточно иметь требуемый набор МНО, частотный фильтр (полосовой либо ФНЧ), перестраиваемый в заданной полосе частот, преобразователь-индикатор СВЧ мощности и микроЭВМ (см. рис. 1).

Однако сами устройства МНО и НОММ – технически сложные и дорогостоящие волноводные узлы, работающие, как правило, в узком частотном диапазоне. Кроме того, уже при их проектировании заложена высокая погрешность. Если же к этим недостаткам добавить еще и высокую длительность времени получения первичной информации и всего измерительного цикла, связанную с необходимостью перекоммутации устройств ответвления мощности, и вытекающие отсюда дополнительные источники искажения результата, то очевидно, что подобные ИС могут применяться как оценочные приборы. При анализе полей с небольшим количеством модовых составляющих (до 10) данные измерительные системы теряют какую-либо эффективность.

Исходя из сказанного можно сделать вывод, что подобные системы могут применяться скорее как контролирующие устройства, но отнюдь не как измерительные.

Другую обширную группу методов модового анализа поля волноводного тракта составляют зондовые методы [2, 7-11]. ИС на их основе выгодно отличаются от рассмотренных выше при необходимости модового анализа с числом мод до десяти и выше. Измерительная зондовая секция довольно просто калибруется с учетом взаимодействия датчиков и искажения картины распределения поля ИС [12], что позволяет практически полностью устранить системную погрешность, статистическая же составляющая погрешности может быть существенно снижена за счет усреднения достаточно большого набора массивов первичных данных. Кроме того, при параллельной и квазипараллельной обработке значительно снижается время снятия и обработки массивов результатов.

На рис. 2 приведен вариант структуры АИВК для определения указанных выше параметров поля по результатам математической обработки первичных данных скалярных величин, пропорциональных амплитудам суммарных напряженностей электрического поля в точках зондирования.

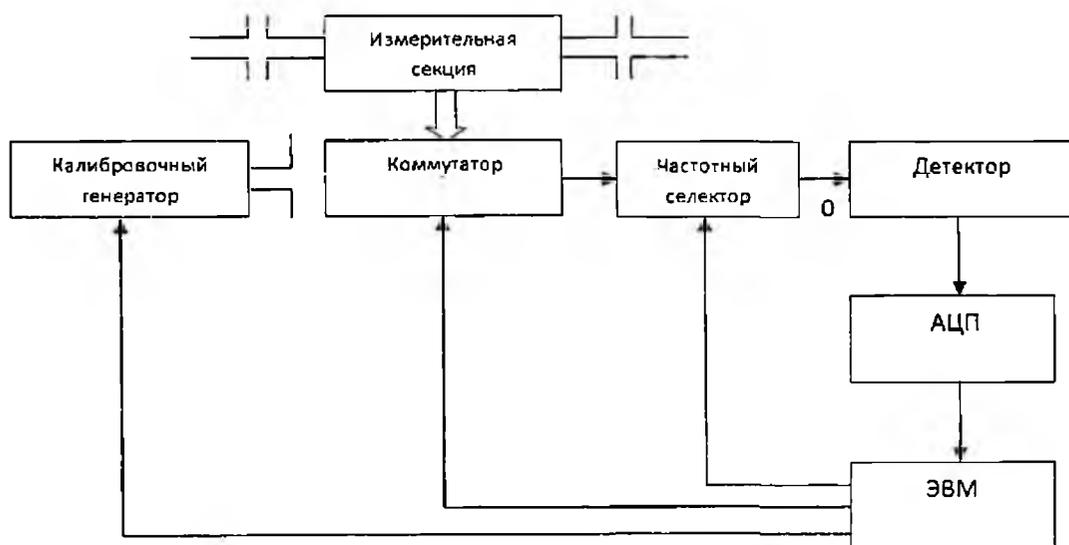


Рис. 2

На рис. 2 приведена структурная схема АИВК с квазипараллельной обработкой первичных данных. В процессе измерений датчики измерительной секции поочередно коммутируются управляемым СВЧ коммутатором в один общий измерительный канал, образованный частотным селектором, детектором, АЦП и ЭВМ. По мере опроса протестированные сигналы заносятся в память ЭВМ, затем извлекаются и как соответствующие коэффициенты используются при решении системы линейных уравнений [7, 8, 10, 11].

### Построение схем анализа волноводного тракта зондовым методом и способы их модернизации

На рис. 3 и приведена структурная схемы АИВК параллельной ( $N$  – канальной,  $N$  – количество датчиков измерительной секции) обработкой. Такие схемы работают в режиме "реального времени" и имеют максимальные быстродействие и точность.

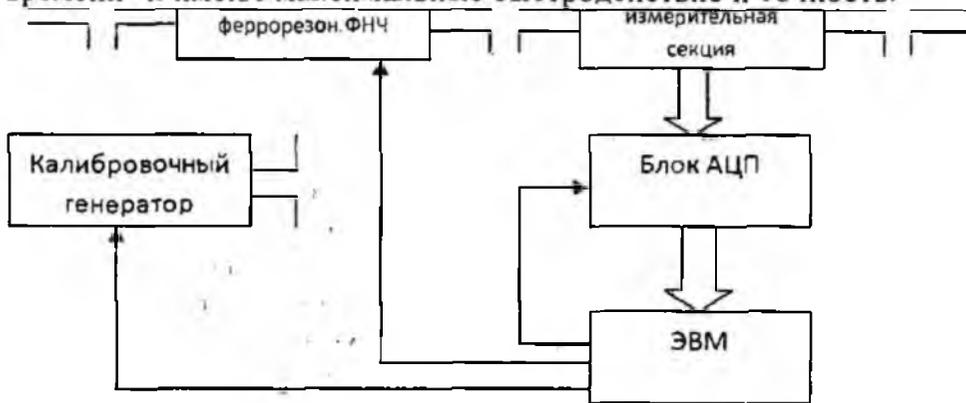


Рис. 3

Однако  $N$  – канальная обработка требует относительно достаточно сложной конструкции. Естественно, что при создании подобных конструкций нужно стремиться к максимальному упрощению измерительных каналов. С этой точки зрения определенный интерес представляет конструкция, изображенная на рис. 4, в которой частотная селекция анализируемого поля производится перестраиваемым ФНЧ, помещенным на входе детекторной измерительной секции.

Сам ФНЧ, основные требования к которому – минимальное искажение поля волноводного тракта и перестройка по частоте в заданном диапазоне, представляет собой отрезок прямоугольного волновода идентичного с анализируемым трактом сечения с помещенной на одной из его широких стенок ферромагнитной пластиной. Частота среза ФНЧ определяется напряженностью поля внешнего постоянного магнита. Измерительный канал такого АИВК содержит  $N$  детекторов, образующих детекторную измерительную секцию и блок АЦП.

В приведенных выше вариантах АИВК "скалярной" обработки для разделения  $k$ -типов колебаний в составе измерительной секции необходимо иметь минимум 2  $k$ -датчиков. Поскольку в диапазоне до пятой гармоники в прямоугольном волноводе может распространяться до  $2^5 = 64$  различных типов волн, то минимальное число датчиков – 128. Измерительная секция с таким количеством датчиков имеет и соответствующие габаритные размеры, поэтому чаще всего она представляет собой расширенный или сверхразмерный отрезок волноводного тракта, вдоль и поперек которого располагаются датчики. Однако, если реализовать обработку первичных данных, позволяющую снимать с датчиков и амплитуду и фазу, то можно существенно снизить количество необходимых датчиков и собрать измерительную секцию на волноводе сечения анализируемого тракта, что дает выигрыш в уменьшении искажений поля за счет резонансных явлений, наблюдающихся на переходах, согласующих расширенную волноводную секцию с исследуемым волноводным трактом.

На рис. 4 приведен вариант структурной схемы АИВК обработки (сведений об амплитудах и фазах), который может разделять модовые составляющие в диапазоне до пятой гармоники основного сигнала на двух измерительных секциях из восьми датчиков каждая (или одной с шестнадцатью датчиками).

Датчики располагаются вдоль измерительной секции так, что ни одна из пар сигналов, образованных при коммутации каждого  $i$ -го датчика измерительной секции 1 и  $J$ -го измерительной секции 2, не повторяется, перебор же всех возможных вариантов сигнальных пар составляет  $8 \times 8 = 64$ .

К сожалению, производство ряда необходимых СВЧ устройств с требуемыми параметрами, таких как смесители, коммутаторы, детекторы, еще не освоено. что сдерживает практическую реализацию подобных ИС, хотя сведения о наличии некоторых аналогов за рубежом имеются, т.е. решение задачи вполне реально.

Изменяя программное обеспечение, можно усложнить задачу и вычислять внешние параметры электромагнитной обстановки СВЧ систем, многомодовых в рабочем режиме, или на частотах побочных излучений (многомодовость, характеризующую электромагнитную обстановку, существенно определяющую ЭМС РЭС на этих частотах).

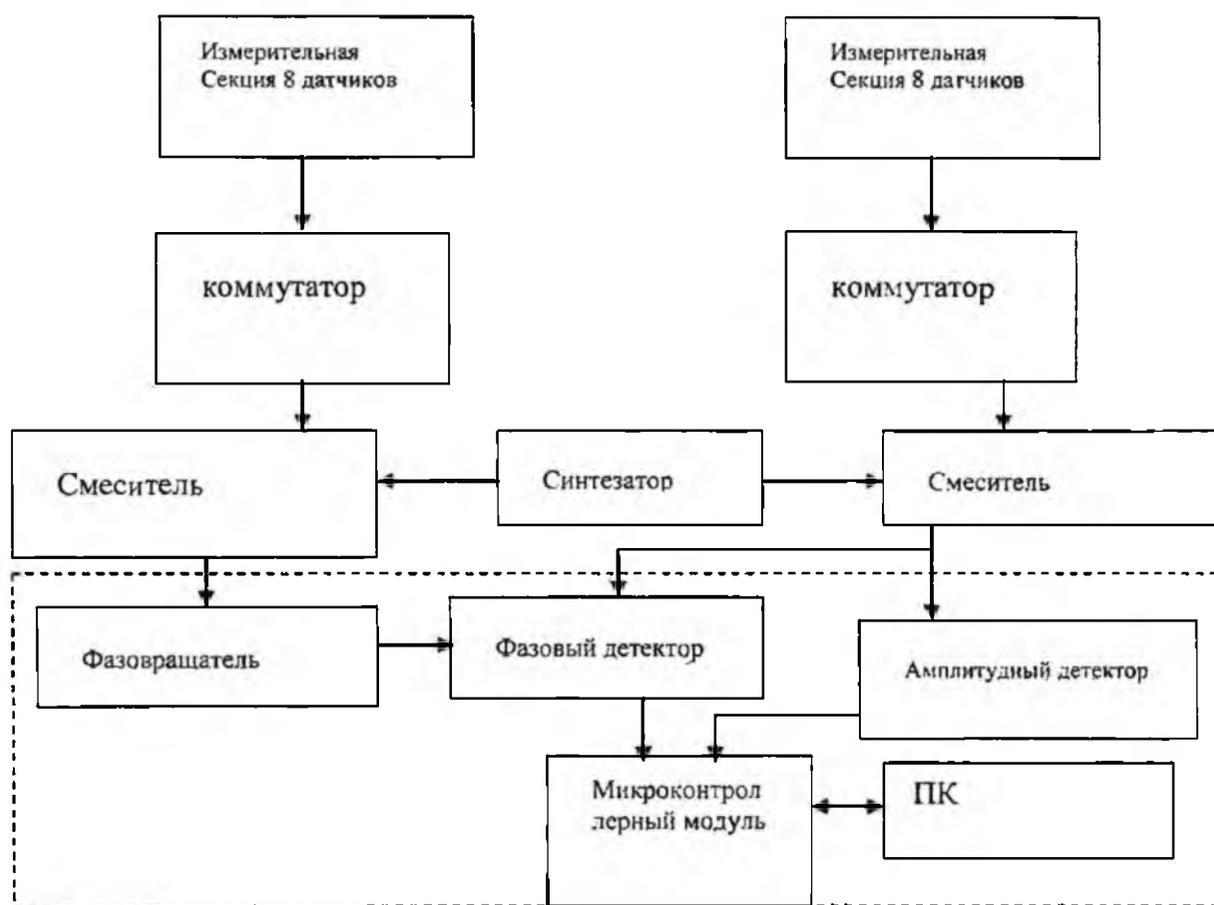


Рис. 4

Современная микропроцессорная техника и специализированное программное обеспечение (например, программа "Терминал") позволяет существенно усовершенствовать измерительную систему, представленную на рис. 3. Использование периферийных интерфейсных контроллеров семейства, таких как PIC16,18, AVR-Mega со встроенными 8-10-разрядными модулями АЦП и универсальными синхронно-асинхронными приемопередатчиками USART (для интерфейса RS-232) и SPI интерфейсом, дает возможность исследователю с помощью ПК управлять измерительным процессом. Интерфейс RS-232 позволяет производить обмен

данных между ПК и микроконтроллером со скоростью до 10 кБайт/с на расстояние порядка 15 м. Применение специальных кабелей уменьшенной емкости (уже специально разработанных) позволяет увеличить длину линии передачи до 100 м. Для удобства контролирования процесса измерений амплитуды и фазы сигналов от датчиков микроконтроллерный модуль целесообразно оборудовать матричной клавиатурой, которая подключается к портам микроконтроллера, например PIC16F874 имеет достаточное количество портов ввода-вывода цифровых сигналов. Данный микроконтроллер имеет EEPROM (электрически стираемую память данных), два 8-разрядных таймера и один 16-разрядный таймер и память данных 8 байт x 256, в которой могут накапливаться предварительные данные опроса датчиков, содержащие сведения об амплитудах и фазах конкретной моды. Это преимущество несложно реализовать в программе управления микроконтроллера, поскольку используемые в настоящее время компиляторы легко реализуют математические операции (умножения, деления), что в свою очередь позволяет получить сведения о среднем значении, дисперсии амплитуды и фазы на основании данных полученных от датчиков. Данная информация затем может передаваться в ПК в любое время цикла измерений.

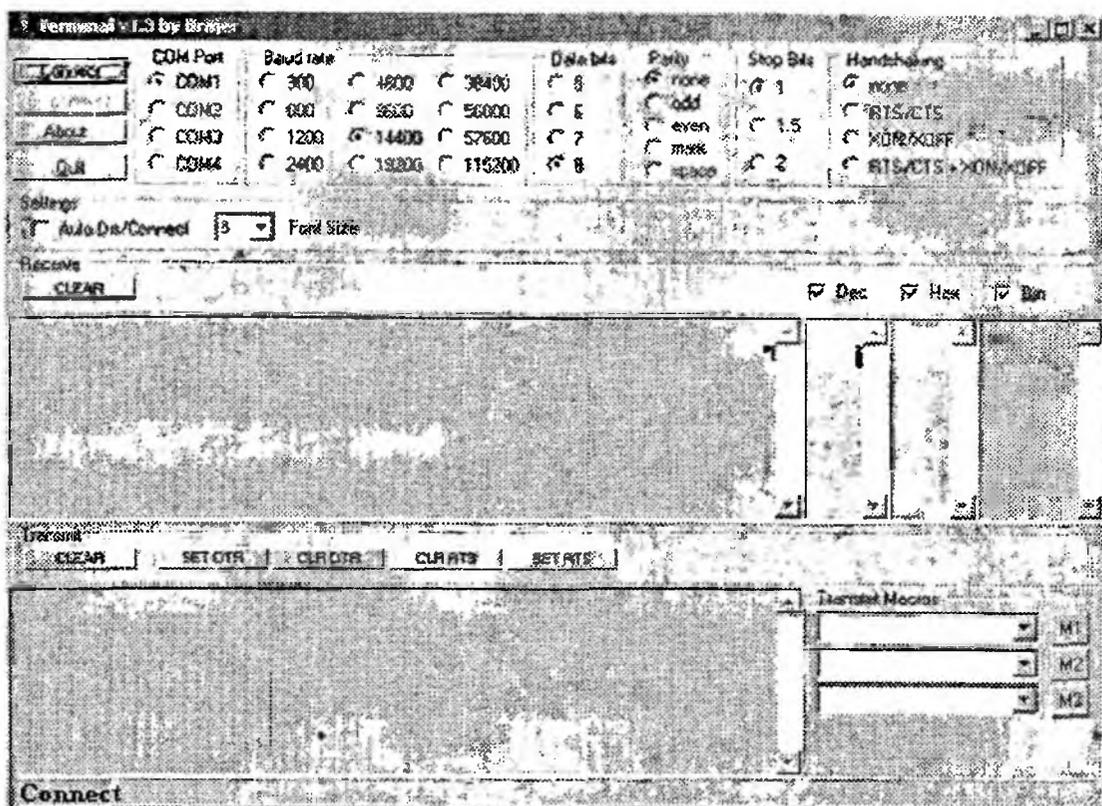


Рис. 5

Достаточное количество портов позволяет подключить к микроконтроллеру 16-кнопочную матричную клавиатуру, которая позволит опрашивать каждый датчик из измерительной секции в режиме измерения амплитуды или фазы каждого типа колебаний. Результат измерений показаний датчиков с помощью интерфейса RS-232 (COM-интерфейса) могут передаваться в компьютер с операционной системой "Windows 98,2000,XP" и отображаться в виде массива данных в окнах программы, пример которой представлен на рис. 5. Существующие в настоящее время программы обслуживающие позволяют принимать и сохранять в памяти компьютера массивы данных из EEPROM памяти микроконтроллеров и отображать их на экране мониторов в графическом виде. Для этого нет необходимости создавать собственное компьютерное программное обеспечение для данных измерительных комплексов, т.е. достаточно использовать известные программы автоматизации математической и статистической обработки экспериментальных исследований (Excel, Mathcad, MATLAB и др.). Этот факт позволяет ограничиваться лишь затратами на создание микропроцессорного модуля и

отладку программного обеспечения для его функционирования. Аппаратная часть данного микропроцессорного модуля будет состоять из самого микроконтроллера, матричной клавиатуры и жидкокристаллического индикатора, что само по себе является стандартным отладочным набором, который не является дорогостоящим звеном данного комплекса. Программное обеспечение и аппаратные средства для отладки разрабатываемого алгоритма не требуют серьезных материальных затрат. Современные микроконтроллеры дают возможность обрабатывать сигналы со скоростью порядка 1 млн. операций в секунду, что позволяет принимать аналоговые сигналы от смесителя с промежуточной частотой порядка ( $f_{\text{смеситель}} = f_{\text{датчик}} \cdot f_{\text{синтезатор}}$ ) 1 МГц. Данное обстоятельство позволяет упростить процесс преобразования частоты, т.е. снизить количество (кратность) этапов преобразования, что дает возможность повысить быстродействие работы смесителя.

## Выводы

Представленный способ модернизации позволяет автоматизировать измерительный процесс опроса датчиков типов волн зондовым методом, анализирующий величины амплитуд и фаз типов волн, дает возможность контролировать и диагностировать как конкретный датчик, так и весь комплекс для анализа модово-частотного распределения поля. Это стало возможным благодаря современным микроконтроллерам и компьютерным средствам отладки их программного обеспечения. Встроенные системы команд и достаточный объем памяти программ и данных способны осуществлять первичную математическую и статистическую обработку полученных сведений об амплитудах и фазах модовых составляющих электромагнитного поля и передавать их в компьютер.

Предложенная схема взаимодействия современного компьютера и микропроцессорного модуля с приборами микроволновой техники позволяет в 5-10 раз уменьшить время обработки экспериментальной информации, разработать и реализовать более эффективный алгоритм сбора информации с каждого датчика. Современная микропроцессорная техника дает возможность улучшить алгоритм контроля и диагностики измерительной системы и максимально защитить исследователя от возможного воздействия СВЧ излучения из расширенного волноводного тракта, в котором находятся датчики.

**Список литературы:** 1. Гейвандов Л.Н., Молчанов А.Л., Тиновските Р.И. и др. Синтез широкополосных волноводных модоселективных направленных ответвителей со слабой связью // Вопросы радиоэлектроники. Сер. радиоизмерительная техника. 1971. Вып.5. С.25-31. 2. Малышенко Л.Е., Жилков В.С. Методы измерения мощности СВЧ в многомодовых волноводах (обзор) // Радиоэлектроника. 1974. №8. С.134-138. 3. Михайлов А.С. Измерение параметров ЭМС РЭС. М.: Связь, 1980, 237с. 4. Фел С.С., Фихманас Р.Ф., Герман В.А. Способ измерения амплитудно-фазового состава многомодового сигнала в волноводе // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Радиоизмерительная техника. 1974. Вып.4. С.185-190. 5. Фел С.С. Изменение мощности высших гармоник методом частичного отбора // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Радиоизмерительная техника. 1964. Вып.6. С.251-255. 6. Гейвандов Л.Н. Прогнозирование электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств на частотах побочных излучений по результатам трактовых измерений. Ч.1. М.: Минрадиопром СССР, 1987. Ч.П. 202 с. М.: Минрадиопром СССР. 1988. 198 с. 7. Farrer M., Tomiyasu K. Determination of higher order propagating modes // J.Appl.Phys. 1958, 29, N7, P. 23-27. 8. Levinson D.S., Rubinstein I. A technique for measuring individual modes Propagating in Overmode Waveguide // IEEE Trans. on MTT. 1966, MTT-14, N7, P.125- 130. 9. Dave H.V. Analysis of Waveguide Modes by Standing - Wave Pattern Measurements // IRE Trans. on MTT. 1962, MTT-10, N4, P.135. 10. Лыскин С.М., Кац, С.И. Метод поперечного зондирования поля для измерения типов колебаний многомодового волновода // Электронная техника. Сер. Контрольно-измерит. аппаратура. 1971. Вып.3. С.159-163. 11. Безручко В.П., Шулика С.Д. Исследование спектра волн в многомодовом волноводе методом продольного зондирования // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Радиоизмерительная техника. 1973. Вып.4. С.175-180.

Харьковский национальный  
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 11.04.2009