

---

**ЭЛЕКТРОДИНАМИКА  
И РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН**

---

УДК 621.372

**СЕЛЕКТИВНЫЕ СВОЙСТВА ЛЕСТНИЧНЫХ МИКРОПОЛОСКОВЫХ  
ФИЛЬТРОВ НА НЕРЕГУЛЯРНЫХ РЕЗОНАТОРАХ****© 2000 г. Б. А. Беляев, А. А. Лексиков, М. И. Никитина,  
В. В. Тюрнев, Н. В. Алексеева**

Поступила в редакцию 10.01.2000 г.

В квазистатическом приближении исследованы селективные свойства микрополосковых фильтров лестничного типа на резонаторах со ступенчатым изменением ширины полоскового проводника, имеющего форму гантели. Рассмотрены конструкции с числом звеньев от трех до шести, в которых области связи смежных резонаторов определяются длиной их внешних низкоомных участков. Получены зависимости крутизны склонов амплитудно-частотных характеристик от длины области связи резонаторов и от других конструктивных параметров фильтров при фиксированной относительной ширине полосы пропускания. Показано, что симметричную форму характеристики можно получить лишь при подключении фильтра к линиям передачи по большой диагонали. Наблюдается хорошее согласие расчета с экспериментом как для открытых, так и для экранированных конструкций.

**ВВЕДЕНИЕ**

Известно, что используемые в сверхвысокочастотной технике конструкции микрополосковых фильтров (МПФ), как правило, имеют асимметричную амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) относительно оси, проведенной через центр полосы пропускания. Например, у традиционных фильтров на регулярных резонаторах с четвертьволновыми связями больше крутизна низкочастотного склона АЧХ, а у решетчатых МПФ – высокочастотного склона. Поэтому в случае, когда требуется фильтр с симметричной формой характеристики, разработчикам приходится использовать избыточное число звеньев в нем, чтобы обеспечить необходимое затухание сигнала на пологом склоне АЧХ. В результате, очевидно, не только возрастают прямые потери мощности в полосе пропускания и увеличиваются габариты устройства, но и усложняется процесс его проектирования, а также настройки после изготовления.

Асимметрия амплитудно-частотной характеристики каждой конкретной конструкции МПФ является следствием частотной зависимости коэффициентов связи ее резонаторов [1]. Расположение максимума коэффициента связи справа или слева от полосы пропускания фильтра приводит к уменьшению крутизны соответствующего склона АЧХ. Симметричную характеристику имеют конструкции, в которых максимум коэффициента связи совпадает с центром полосы пропускания. Как известно, на асимметрию АЧХ сильное влияние могут оказывать и полюса затухания в случае, когда они располагаются близко к полосе пропускания фильтра.

Поведение частотно-зависимых коэффициентов связи от длины области взаимодействия регулярных полуволновых резонаторов, а также поведение коэффициентов крутизны склонов АЧХ многозвенных микрополосковых фильтров лестничного типа впервые было исследовано в [1, 2]. Показано, что рассмотренная конструкция фильтра позволяет в широких пределах управлять крутизной склонов АЧХ регулированием длины области связи резонаторов. Полученные зависимости имеют ярко выраженные экстремумы. При этом увеличение крутизны одного склона характеристики всегда сопровождается уменьшением крутизны другого. Исследования позволили определить три характерные длины области связи резонаторов, обеспечивающие либо симметричную форму АЧХ, т.е. одинаковую крутизну обоих ее склонов, либо предельную асимметрию АЧХ, т.е. максимальную крутизну низкочастотного или высокочастотного склонов. Следовательно, при проектировании фильтров на регулярных резонаторах очень важно определить оптимальную длину области связи их полосковых проводников, так как только в этом случае требуемую амплитудно-частотную характеристику можно сформировать на минимальном количестве звеньев.

В настоящей работе исследуются селективные свойства многозвенных фильтров лестничной конструкции на микрополосковых резонаторах (МПР) со ступенчатым изменением ширины полоскового проводника, имеющего форму гантели. Такие нерегулярные резонаторы, как известно, имеют более высокую собственную добротность по сравнению с регулярными МПР, миниатюрнее их, и, кроме того, частота второго (паразитного) резо-

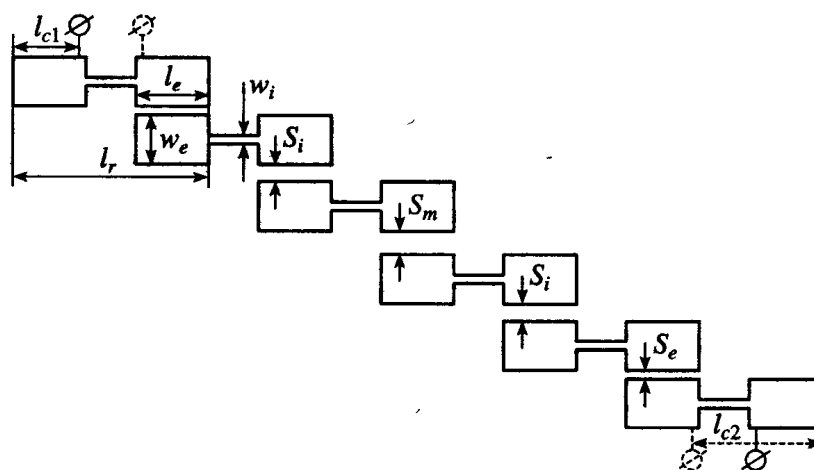


Рис. 1. Топология проводников шестизвенного микрополоскового фильтра на нерегулярных резонаторах.

нанса в них удалена от первого (рабочего) значительно больше чем на октаву [3]. В результате использование нерегулярных резонаторов в фильтрах приводит не только к уменьшению габаритов устройств, но и к улучшению их характеристик. В свою очередь, изучение поведения селективных свойств фильтра от параметров конструкции очень важно, так как при проектировании устройств эти знания позволяют получить максимальный положительный эффект в каждом конкретном случае. Некоторые исследования свойств лестничной конструкции фильтра на нерегулярных резонаторах уже проводились [4]. Однако остается открытым вопрос о влиянии на избирательность фильтров длины области связи смежных резонаторов, материала подложки, относительной ширины полосы пропускания, а также экранирования устройств.

## 1. МОДЕЛЬ И МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследуемые лестничные конструкции МПФ на резонаторах со ступенчатым изменением ширины полоскового проводника в форме гантели (рис. 1) содержали от трех до шести звеньев. При этом длина областей связи смежных резонаторов в конструкции совпадала с длиной широких наружных участков полосковых проводников  $l_e$ . Подводящие линии передачи с волновым сопротивлением 50 Ом кондуктивно подключались к крайним МПР либо по большой (точки  $l_{c1}$ ), либо по малой ( $l_{c2}$ ) диагонали. Полосковый проводник резонаторов длиной  $l_r$  имел ширину наружных участков  $w_e$ , а внутренних  $w_i$ . Благодаря симметрии конструкции, зазоры  $S_e$  между проводниками наружных пар резонаторов одинаковы, как и зазоры  $S_i$  между проводниками следующих за ними внутренних пар резонаторов ( $S_m$  – величина зазора между центральными резонаторами).

Теоретические исследования селективных свойств МПФ проводились с помощью автомати-

зированной системы проектирования микрополосковых фильтров FILTEX [5], в которой параметрический синтез выбранного устройства осуществляется по заданной полосе пропускания и заданному максимальному уровню обратных потерь в полосе пропускания методом, описанным в [6]. В этом методе корректируется лишь группа *подстроечных* конструктивных параметров, число которых на единицу больше числа резонаторов в устройстве [7]. В рассматриваемых фильтрах к *подстроечным* параметрам относятся длина полоскового проводника, зазоры между резонаторами, точки кондуктивного подключения подводящих линий и поправки к длинам узких регулярных участков средних резонаторов. Остальные конструктивные параметры, которые будем называть основными, варьировались нами в процессе исследования с целью изучения их влияния на селективные свойства МПФ. К этим параметрам в первую очередь относятся следующие: число резонаторов в устройстве  $N$ ; относительная диэлектрическая проницаемость подложки  $\epsilon_r$ , и ее толщина  $h_d$ ; ширина полоскового проводника на внешнем  $w_e$  и внутреннем  $w_i$  участках резонаторов; относительная длина высокоомных внутренних участков полосковых проводников  $x_q = (l_r - 2l_e)/l_r$ , а также отсутствие или наличие верхнего экрана-крышки, расположенного на высоте  $h_s$  от поверхности подложки.

Для расчета частотных характеристик микрополосковых фильтров в системе FILTEX используются одномерные модели устройств, представляющие собой каскадное соединение отрезков одиночных и связанных микрополосковых линий. В рассматриваемой конструкции фильтра, состоящей из  $N$  резонаторов, отрезки образуются разбиением рисунка проводников на регулярные участки, количество которых ограничивается величиной  $2N + 3$ . Концевые емкости в моделях учитываются не только на краях полосковых проводников, но и на стыках соединения отрезков

линий различной ширины. Параметры основных типов волн для одиночных и связанных линий рассчитываются в квазистатическом приближении. При этом частотная дисперсия параметров учитывается в рамках приближенной аналитической модели [8]. Для учета потерь СВЧ-мощности, вносимых устройствами, в системе FILTEX используется либо измеренная, либо рассчитанная собственная добротность конкретных микрополосковых резонаторов. Заметим, что для конструкций фильтров на регулярных МПР используемый метод расчета обеспечивает относительную точность совпадения характеристик синтезированных МПФ с экспериментом не хуже 0.5% по центральной частоте полосы пропускания и не хуже 5% по ширине полосы.

Для количественной оценки избирательности фильтров нами использовались коэффициенты крутизны низкочастотного  $K_l$  и высокочастотного  $K_h$  склонов АЧХ [2]:

$$K_l = \frac{\Delta f_3/2}{\Delta f_l - \Delta f_3/2}, \quad K_h = \frac{\Delta f_3/2}{\Delta f_h - \Delta f_3/2}, \quad (1)$$

где  $\Delta f_3$  – ширина полосы пропускания, измеренная по уровню –3 дБ от уровня минимальных потерь,  $\Delta f_l$  и  $\Delta f_h$  – ширины полос частот, измеренные от центра полосы пропускания  $f_0$  соответственно до низкочастотного и высокочастотного склонов АЧХ на уровне –30 дБ. Коэффициенты крутизны удобны тем, что они позволяют судить об асимметрии характеристики фильтра относительно оси, проведенной через центр полосы пропускания. Кроме того, при фиксированных основных конструктивных параметрах фильтров  $K_l$  и  $K_h$  почти не зависят от ширины полосы пропускания

устройства, т.е. являются информативными характеристиками селективных свойств любой конкретной конструкции.

В системе проектирования микрополосковых фильтров FILTEX предусмотрена возможность автоматизированного изучения селективных свойств устройств при варьировании их основных конструктивных параметров. Для этого исследователю необходимо лишь выбрать интересующий его один или два основных параметра, задать шаг и диапазон их изменения. На каждом шаге работы программы фильтр автоматически настраивается на заданную полосу пропускания коррекцией подстроечных параметров. После каждого шага данные о коэффициентах крутизны склонов получившейся АЧХ фильтра, а также о всех его конструктивных параметрах заносятся в отдельный файл-таблицу, по которому в дальнейшем можно строить соответствующие одно- или двумерные зависимости. Таким образом, содержащиеся в файле-таблице сведения позволяют анализировать не только изменение селективных свойств исследуемого фильтра, но и поведение его подстроечных параметров при варьировании основных параметров конструкции.

## 2. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Квазистатический расчет амплитудно-частотных характеристик микрополосковых фильтров, используемый в системе FILTEX, показал хорошее согласие с экспериментом на всех специально изготовленных для проверки образцах. Совпадение АЧХ наблюдалось даже у фильтров, резонаторы которых имели сравнительно большие скачки ширины полосковых проводников. В подтверждение сказанному выше на рис. 2 представлены данные расчета и результаты измерений амплитудно-частотной характеристики фильтра, состоящего из пяти резонаторов. Фильтр был изготовлен методом гравировки [9] на подложке толщиной  $h_d = 2$  мм из высокочастотной керамики ТБНС, имеющей диэлектрическую проницаемость  $\epsilon_r = 82$ . Полосковые проводники нерегулярных резонаторов длиной  $l_r = 12.27$  мм имели ширину наружных участков  $w_e = 4.35$  мм, а внутренних  $w_i = 0.52$  мм (см. рис. 1), при этом длина наружных участков проводников  $l_e = 4.34$  мм. Такая конфигурация полоскового проводника обеспечивает в дециметровом диапазоне длин волн собственную добротность резонаторов  $Q_0 \approx 400$ . Зазоры между внешними парами резонаторов составляли величину  $S_e = 0.84$  мм, а между внутренними  $S_i = 1.10$  мм. Фильтр подключался к тракту по большой диагонали посредством коаксиально-полосковых переходов. Точки кондуктивного соединения переходов с проводниками крайних резонаторов находились на расстоянии  $l_{c1} = 4.1$  мм

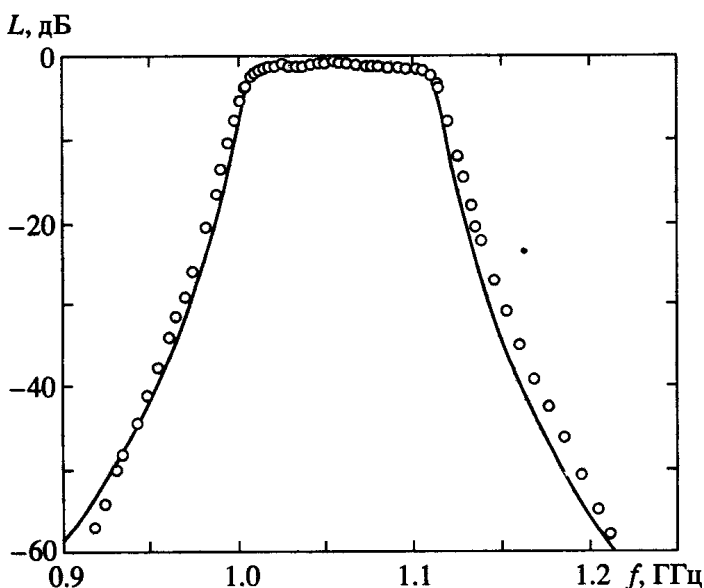


Рис. 2. АЧХ пятирезонаторного фильтра на нерегулярных МПР. Сплошная линия – квазистатический расчет, точки – эксперимент.

от концов. Достаточно хорошее согласие расчета с экспериментом позволяет теоретически провести систематические исследования лестничных фильтров на нерегулярных резонаторах.

Главной особенностью исследуемых конструкций фильтров является тот факт, что в них длина области связи нерегулярных микрополосковых резонаторов всегда меньше половины длины полоскового проводника. Как известно, в таких лестничных фильтрах на регулярных резонаторах коэффициенты индуктивного и емкостного взаимодействия на частотах первой полосы пропускания действуют синфазно и поэтому складываются [10]. С уменьшением длины области связи резонаторов наблюдается резкое уменьшение индуктивного взаимодействия между ними, обусловленное тем, что пучности высокочастотных токов располагаются в центральной части проводников МПР, т.е. вне области связи. Емкостное же взаимодействие при этом сначала растет, достигая своего максимума на длине области связи, близкой к  $l/3$ , и лишь затем монотонно падает, что обусловлено расположением пучностей высокочастотного напряжения вблизи концов полосковых проводников.

Все отмеченные закономерности в принципе должны сохраниться и в исследуемых лестничных фильтрах на нерегулярных резонаторах. Однако, как известно, на первой резонансной частоте суммарная электрическая длина трех регулярных участков полуволнового резонатора типа гантели существенно меньше  $\pi$  [11]. Поэтому зависимость амплитуды высокочастотного напряжения от координаты на наружных низкоомных участках МПР ослабевает по сравнению с регулярным резонатором, а зависимость амплитуды высокочастотного тока усиливается [3]. В результате наличие скачков ширины полосковых проводников МПР приводит к более резкому изменению индуктивного взаимодействия резонаторов при уменьшении длины их области связи, но ослабляет зависимость емкостного взаимодействия, что отражается на поведении коэффициентов крутизны склонов АЧХ.

На рис. 3 показаны зависимости коэффициентов крутизны высокочастотного ( $h$ ) и низкочастотного ( $l$ ) склонов амплитудно-частотной характеристики шестизвенного фильтра на резонаторах типа гантели от относительной длины средних высокоомных участков полосковых проводников. Зависимости построены при подключении фильтра к линиям передачи по большой (1) и малой (2) диагоналям. Ширина внешних участков полосковых проводников МПР в расчетной модели  $w_e = 2$  мм, а ширина внутренних участков  $w_i = 0.2$  мм. Для сравнения на этом рисунке показаны соответствующие кривые аналогичного лестничного фильтра на регулярных резонаторах

( $w_e = w_i = 2$  мм). Анализировали фильтры на подложке с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_r = 80$  толщиной  $h_d = 1$  мм при фиксированных центральной частоте  $f_0 = 1$  ГГц и ширине полосы пропускания  $\Delta f_3 = 0.1$  ГГц. Максимумы обратных потерь в полосе пропускания фильтров находились на уровне  $L_R = -14$  дБ. Видно, что в случае подключения фильтров по малой диагонали крутизна склонов слабо зависит от  $x_q$ , т.е. от длины области связи резонаторов. Значения крутизны низкочастотных склонов АЧХ обоих фильтров, так же как и высокочастотных, близки, однако  $K_l$  значительно выше  $K_h$ . Форма АЧХ фильтра на регулярных резонаторах остается асимметричной и в случае подключения его к линиям передачи по большой диагонали, хотя различие  $K_l$  и  $K_h$  при этом заметно меньше. В этом случае асимметрия амплитудно-частотной характеристики фильтра на нерегулярных резонаторах сильно зависит от длины области связи МПР. Интересно, что с ростом  $x_q$ , т.е. с уменьшением длины области связи резонаторов, наблюдается сначала выравнивание, а затем и "инверсия" крутизны склонов АЧХ.

Аналогичные зависимости  $K_l(x_q)$  и  $K_h(x_q)$  для фильтров на нерегулярных резонаторах с числом звеньев от трех до шести, подключенных либо по малой, либо по большой диагонали, представлены на рис. 4а и 4б. Относительная ширина полосы пропускания фильтров прежняя –  $\Delta f_3/f_0 = 10\%$ , сохранены также и все конструктивные параметры в расчетной модели, за исключением ширины среднего участка полоскового проводника МПР:  $w_i = 0.5$  мм. Видно, что крутизна низкочастотного склона АЧХ при подключении фильтра к линиям передачи по малой диагонали существенно выше

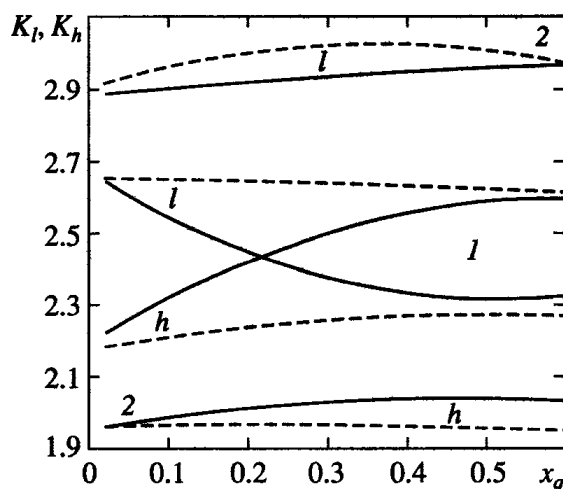


Рис. 3. Зависимости от  $x_q$  коэффициентов крутизны низкочастотного ( $l$ ) и высокочастотного ( $h$ ) склонов АЧХ шестизвенного фильтра, подключенного по большой (кривая 1) и по малой (2) диагонали. Сплошные линии – МПФ на нерегулярных резонаторах, штриховые линии – на регулярных.

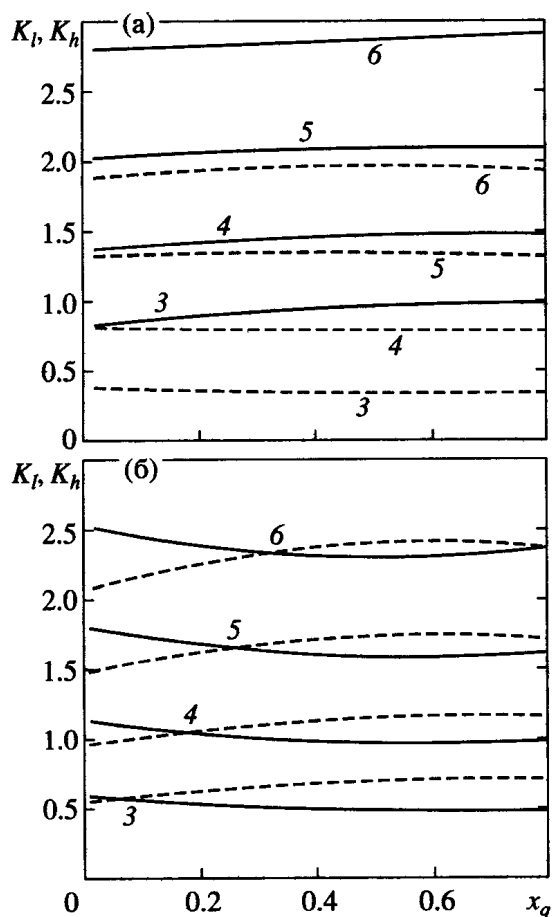


Рис. 4. Зависимости коэффициентов крутизны низкочастотных (сплошные линии) и высокочастотных (штриховые) склонов АЧХ от  $x_q$  для различного числа резонаторов в фильтре, подключенном по малой (а) и большой (б) диагонали.

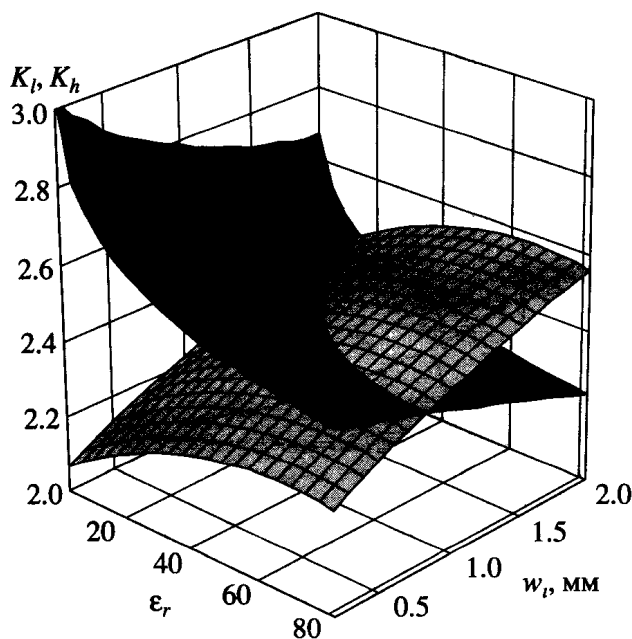


Рис. 5. Зависимости коэффициентов крутизны АЧХ от диэлектрической проницаемости подложки и от ширины среднего участка полосковых проводников шестизвенного МПФ, подключенного по большой диагонали. Темная поверхность –  $K_h$ , светлая –  $K_l$ .

независимо от числа звеньев в нем, и она незначительно увеличивается при уменьшении длины области связи резонаторов. Крутизна же высокочастотного склона при этом остается почти неизменной. Наблюдаемая асимметрия формы АЧХ столь велика, что  $K_l$  любого фильтра превосходит даже  $K_h$  фильтра, у которого на одно звено больше. Отмеченные закономерности справедливы для любой величины скачка ширины полоскового проводника, диэлектрической проницаемости подложки и других конструктивных параметров. Кроме того, асимметрия формы АЧХ монотонно увеличивается при уменьшении диэлектрической проницаемости подложки, приближении экрана к проводникам микрополосковой структуры, а также при увеличении относительной ширины полосы пропускания фильтра.

В случае подключения исследуемых фильтров к линиям передачи по большой диагонали (см. рис. 4б) крутизна низкочастотного склона монотонно уменьшается с ростом  $x_q$ , а высокочастотного растет. Благодаря этому при определенной длине области связи резонаторов, которой соответствует точка пересечения зависимостей коэффициентов крутизны, реализуется симметричная форма АЧХ. Увеличение числа звеньев в фильтре приводит к монотонному смещению точки пересечения  $K_l$  и  $K_h$  в область больших значений  $x_q$ . Важно отметить, что положение этой точки сравнительно сильно зависит от всех основных конструктивных параметров, но слабо зависит от относительной ширины полосы пропускания фильтра. В частности, наблюдаемое смещение точки равенства крутизны склонов от 0.21 до 0.36 в шестирезонаторном фильтре (см. рис. 3 и рис. 4б) обусловлено лишь увеличением  $w_1$  от 0.2 до 0.5 мм. Очевидно, что возможность простого и эффективного управления крутизной склонов АЧХ в исследуемой конструкции фильтра имеет большое практическое значение.

На рис. 5 для фильтра, состоящего из шести резонаторов и подключенного к линиям передачи по большой диагонали, показаны зависимости крутизны склонов АЧХ от диэлектрической проницаемости подложки, изменяющейся в пределах  $\epsilon_r = 2 \dots 82$ , и от ширины среднего высокоомного участка полоскового проводника МПР, изменяющейся в пределах  $w_1 = 0.2 \dots 2$  мм. Зависимости были рассчитаны при относительной длине высокоомного участка проводника  $x_q = 0.4$ , так как с практической точки зрения наиболее оптимальный интервал значений  $x_q = 0.3 \dots 0.5$ . Именно в этом интервале, как известно [3], имеет место не только максимальное различие резонансных частот первой (рабочей) и второй (паразитной) мод колебаний, но и предельное уменьшение длины полоскового проводника, а также максимальное возрастание собственной добротности первого резонанса. Из рисунка видно, что с увеличением

$\epsilon_r$  и  $w_i$  крутизна низкочастотного склона растет, а высокочастотного уменьшается. При этом каждому значению диэлектрической проницаемости подложки соответствует определенная величина ширины внутреннего участка полоскового проводника, при которой имеет место равенство  $K_i$  и  $K_h$ .

Заметим, что с ростом  $\epsilon_r$  сильное изменение коэффициентов крутизны склонов АЧХ на начальном участке заканчивается насыщением для любых скачков ширины полоскового проводника, в то время как эти коэффициенты имеют почти линейную зависимость во всем диапазоне изменения  $w_i$ . Такое поведение коэффициентов крутизны обусловлено перемещением максимума полного коэффициента связи в ту или иную сторону относительно полосы пропускания. Как известно, положение этого максимума зависит от соотношения емкостного и индуктивного взаимодействий резонаторов [12]. С увеличением диэлектрической проницаемости подложки емкостное взаимодействие быстро уменьшается, а индуктивное остается неизменным [10]. С увеличением же скачка ширины полоскового проводника за счет сужения его среднего участка, напротив, — монотонно уменьшается индуктивное взаимодействие, а емкостное слабо растет. И в том и в другом случае наблюдается уменьшение величины зазоров между проводниками резонаторов рассматриваемого фильтра, так как в нашем исследовании зафиксирована ширина относительной полосы пропускания, а значит, и величина полного коэффициента связи в полосе пропускания.

В свою очередь, уменьшение зазоров также оказывает влияние на соотношение связей резонаторов, благодаря более сильной зависимости от зазора емкостного взаимодействия. Поэтому в исследуемой конструкции при сравнительно малой диэлектрической проницаемости подложки ( $\epsilon_r < 10$ ), когда емкостная связь в полосе пропускания фильтра превалирует над индуктивной для любых скачков ширины полоскового проводника, не удастся получить равенства коэффициентов крутизны, а значит, и симметричной формы АЧХ (см. рис. 5). Однако если уменьшать толщину подложки при неизменных остальных конструктивных параметрах фильтра или увеличивать ширину наружных участков резонаторов, то равенство коэффициентов крутизны наблюдается и в области  $\epsilon_r < 10$ .

Что касается радикального различия АЧХ фильтра, подключенного либо по большой, либо по малой диагонали, то оно связано со спецификой распределения высокочастотных напряжений и токов (электрических и магнитных полей) по длине полосковых проводников резонаторов. Действительно, распределение тока и напряжения по длине внутренних резонаторов симметрично от-

носительно центра проводника независимо от частоты падающего сигнала. При этом на концах проводников всегда располагаются пучности напряжений и узлы токов. На внешних резонаторах такая же симметрия высокочастотных полей имеет место только вблизи частоты полуволнового резонанса, т.е. в полосе пропускания фильтра. Однако с понижением частоты подводимые линии передачи изменяют структуру поля в МПР так, что пучность тока смещается из центра резонатора в область соединения линии с проводником, а с повышением частоты — наоборот [2].

При подключении фильтра по малой диагонали точки соединения полосковых проводников с линиями передачи, как правило, попадают в область связи резонаторов. При этом на частотах ниже полосы пропускания участки связи проводников внешних резонаторов содержат пучности высокочастотных токов, а внутренних — пучности напряжений. В результате в этой области частот резко ослабляется взаимодействие резонаторов, которое и приводит к значительному увеличению крутизны низкочастотного склона по сравнению с высокочастотным. В случае подключения фильтров по большой диагонали, точки соединения линий передачи находятся на противоположных концах полосковых проводников и поэтому почти не возмущают структуру высокочастотных полей в области связи МПР. В результате крутизна высокочастотного и низкочастотного склонов АЧХ такого фильтра различается значительно меньше. Этим объясняется и тот факт, что коэффициенты крутизны фильтра, подключенного по малой диагонали, слабее зависят от основных конструктивных параметров устройства, по сравнению с фильтром, подключенным по большой диагонали.

Как уже отмечалось, представленные выше результаты исследований относятся к фильтрам с относительной шириной полосы пропускания 10%, однако весь комплекс аналогичных исследований был проведен нами и на фильтрах с полосой пропускания  $\Delta f_3/f_0$ , равной 5 и 20%. При этом все исследованные закономерности качественно совпадают, а величина крутизны склонов АЧХ в случае симметричной формы характеристики фильтра практически не зависит от его полосы пропускания. Следует отметить, что с ростом относительной полосы пропускания величина зазоров между проводниками в области связи резонаторов уменьшается, в результате вклад емкостного взаимодействия растет по сравнению с индуктивным. При этом незначительно увеличивается крутизна низкочастотного и уменьшается крутизна высокочастотного склонов АЧХ фильтров, подключенных по малой диагонали. Это особенно проявляется в случае малых диэлектрических проницаемостей подложки. С уменьшением полосы пропускания фильтров, напротив, разли-



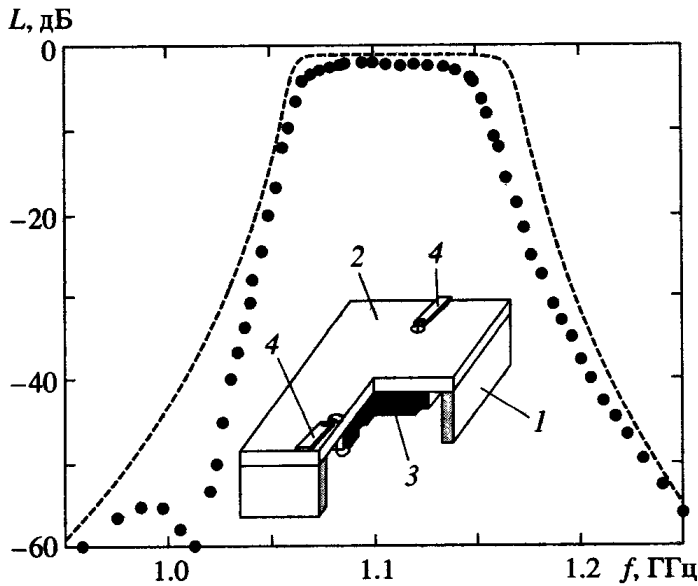


Рис. 6. АЧХ пятизвенного экранированного фильтра на нерегулярных МПП. Штриховая линия – квазистатический расчет, точки – эксперимент. На вставке – фильтр в экране: 1 – корпус экрана, 2 – поликоровая крышка с входной и выходной линиями передачи (4), 3 – МПП.

чие коэффициентов крутизны правого и левого склонов уменьшается.

Относительная длина среднего (высокоомного) участка  $x_q$ , при которой наблюдается равенство  $K_l$  и  $K_h$  для фильтров, подключенных по большой диагонали к линиям передачи, увеличивается с ростом полосы пропускания, хотя сами значения коэффициентов крутизны в этой точке, как уже отмечалось, остаются прежними. Заметим, что при этом увеличивается и различие крутизны склонов АЧХ при удалении от этой точки в ту или иную сторону.

Как известно, в реальных системах микрополосковые фильтры приходится экранировать, чтобы исключить возможное ухудшение их характеристик из-за паразитных связей с соседними элементами СВЧ-схемы. Ясно, что проблема миниатюризации требует предельного уменьшения габаритов корпуса экрана, поэтому мы исследовали влияние высоты верхнего экрана-крышки на амплитудно-частотные характеристики рассматриваемых фильтров. Выяснилось, что если относительная длина среднего участка нерегулярного полоскового проводника  $x_q > 0.3$ , крутизна склонов АЧХ слабо изменяется при приближении экрана к микрополосковой структуре вплоть до высоты, равной двум толщинам подложки. Однако с уменьшением  $x_q$  или с уменьшением скачка ширины полосковых проводников МПП эта зависимость усиливается. При этом крутизна низкочастотного склона растет, а высокочастотного падает только в случае подключения фильтра к линиям передачи по малой диагонали, в случае же

подключения фильтра по большой диагонали – наоборот.

Принимая во внимание тот факт, что точность квазистатического расчета микрополосковых структур с приближением экрана к их проводникам падает (в частности, наблюдается сильное различие ширины полосы пропускания фильтров [13]), нами был проведен сравнительный эксперимент на нескольких образцах исследуемых конструкций. Однако, как показали измерения, благодаря использованию нерегулярных микрополосковых резонаторов в устройствах, наблюдаемое расхождение теории и эксперимента существенно меньше, чем у аналогичных фильтров на регулярных резонаторах. Очевидно, это связано с миниатюрностью нерегулярных резонаторов, благодаря которой обеспечивается более высокая концентрация электромагнитной энергии в “объеме” МПП и, соответственно, требуются меньшие зазоры между проводниками резонаторов в их областях связи.

На рис. 6 представлена амплитудно-частотная характеристика пятизвенного микрополоскового фильтра, рассчитанная при высоте экрана над полосковыми проводниками, равной всего двум толщинам подложки. Фильтр подключен по большой диагонали к линиям, и его относительная ширина полосы пропускания при такой высоте экрана  $\Delta f_3/f_0 = 10\%$ . (Измеренная и рассчитанная характеристики этого фильтра в отсутствие экрана были представлены на рис. 2, а его конструктивные параметры приведены в начале этого раздела.) На рис. 6 показана также измеренная АЧХ исследуемого фильтра (точки), но уже размещенного в специальном экране (см. вставку на рисунке). Корпус экрана (1) изготавливался из латуни в виде прямоугольной рамки, размеры окна которой немного больше габаритов подложки. Сверху рамка запаивалась металлизированной поликоровой подложкой-крышкой (2), на верхней поверхности которой сформированы небольшие отрезки входной и выходной микрополосковых линий (4) с волновым сопротивлением 50 Ом. Металлизированное основание исследуемого образца микрополоскового фильтра (3) припаивали к основанию поликоровой крышки, через небольшие отверстия в крышке вход и выход фильтра соединяли с микрополосковыми линиями короткими проводниками диаметром 0.2 мм, которые соответственно были учтены в расчете. Экранированный таким образом фильтр перед измерением припаивали легкоплавким припоем к металлической пластине нижним основанием рамки. При этом расстояние экрана до проводников микрополосковой структуры определяет высота рамки за вычетом толщины подложки.

Как и следовало ожидать, приближение экрана к полосковым проводникам фильтра приводит

не только к увеличению центральной частоты полосы пропускания за счет уменьшения эффективной диэлектрической проницаемости подложки, но и к монотонному уменьшению  $\Delta f_3/f_0$  за счет более быстрого снижения индуктивного взаимодействия резонаторов по сравнению с ростом их емкостного взаимодействия. Причем в эксперименте уменьшение ширины полосы пропускания заметно сильнее. Тем не менее, из рис. 6 видно, что квазистатическое приближение обеспечивает приемлемую точность расчета ( $\sim 10\%$ ) даже в случае близко расположенного экрана к полосковым проводникам фильтра. Следует отметить, что в случае аналогичного фильтра, выполненного на регулярных резонаторах, приблизительно такое же различие теории и эксперимента по ширине полосы пропускания наблюдается при высоте экрана, равной четырем толщинам подложки.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования микрополосковых фильтров лестничной конструкции на нерегулярных резонаторах позволили не только установить, но и объяснить закономерности поведения крутизны склонов АЧХ от конструктивных параметров. Показано, что только при подключении фильтра по большой диагонали возможно эффективное управление крутизной склонов АЧХ в широких пределах. В частности, это позволяет получить симметричную форму характеристики при любом числе резонаторов в фильтре. Для каждой толщины и диэлектрической проницаемости подложки это легко достигается правильным выбором длины области связи резонаторов и скачка ширины полоскового проводника.

В случае подключения фильтра по малой диагонали, крутизна низкочастотного склона АЧХ всегда значительно превышает крутизну высокочастотного. Кроме того, коэффициенты крутизны слабо зависят от конструктивных параметров устройства при любом числе звеньев в нем. Поэтому в таком фильтре несложно "переместить" вторую (паразитную) полосу пропускания амплитудно-частотной характеристики в заданную область частот, соответственно выбрав конфигурацию полосковых проводников МПР. Селективные свойства фильтра в первой полосе пропускания при этом не изменятся. В принципе такая задача может быть решена и в фильтре, подключенном по большой диагонали, но уже благодаря сильной зависимости коэффициентов крутизны

склонов АЧХ от множества конструктивных параметров.

Таким образом, результаты исследования позволяют получить оптимальную конфигурацию полосковых проводников фильтра, соответствующую заданной АЧХ. Хорошее согласие теории и эксперимента рассмотренных конструкций фильтров несомненно имеет исключительную важность для их проектирования.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беляев Б.А., Тюрнев В.В. // Электрон. техника. Сер. 1. СВЧ-техника. 1992. Вып. 4. С. 23.
2. Беляев Б.А., Никитина М.И., Тюрнев В.В. // Электрон. техника. Сер. 1. СВЧ-техника. 1993. Вып. 5/6. С. 11.
3. Беляев Б.А., Тюрнев В.В., Васильев В.А., Раззин Г.М. Исследование микрополосковых резонаторов и устройств СВЧ на их основе: Препр. № 448Ф. Красноярск: Ин-т физики СО АН СССР. 1987.
4. Шихов Ю.Г., Бабицкий А.Н. // Тр. междунар. научно-техн. конф. "Спутниковые системы связи и навигации". Красноярск, 1997. Т. 1. С. 266.
5. Беляев Б.А., Никитина М.И., Тюрнев В.В. // Электрон. техника. Сер. 1. СВЧ-техника. 1999. Вып. 1. С. 45.
6. Беляев Б.А., Никитина М.И., Тюрнев В.В. // Труды ИИЭР – Российской конференции "Микроволновая электроника больших мощностей: измерения, идентификация, применение". Новосибирск, 1997. С. 104.
7. Беляев Б.А., Казаков А.В., Никитина М.И., Тюрнев В.В. Физические аспекты оптимальной настройки микрополосковых фильтров: Препр. № 768Ф. Красноярск: Ин-т физики СО РАН, 1996.
8. Kirschning M., Jansen R.H. // Electron. Lett. 1982. V. 1. № 6. P. 272.
9. Беляев Б.А., Казаков А.В., Лексиков А.А., Макиевский И.Я. // ПТЭ. 1998. № 1. С. 167.
10. Тюрнев В.В., Беляев Б.А. // Электрон. техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1990. Вып. 4. С. 25.
11. Makimoto M., Yamashita S. // IEEE Trans. 1980. V. MTT-28. № 12. P. 1413.
12. Беляев Б.А., Тюрнев В.В. Исследование частотных зависимостей коэффициентов связи микрополосковых резонаторов: Препр. № 695Ф. Красноярск: Ин-т физики СО АН СССР, 1991.
13. Belyaev B.A., Leksikov A.A., Sergienko P.N., Shikhov Yu.G. Proc. the Third International symposium "SIBCONVERS'99". Tomsk (Russia). Tomsk, 1999. P. 137.