

ЧАСТОТНО-СЕЛЕКТИВНЫЕ СВЧ-МОДУЛИ НА ОСНОВЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ВЕЕРНОГО ТИПА

А.Багдасарян, д.т.н.¹, Т.Синицына, к.т.н.², П.Иванов, к.т.н.³, В.Швец³

Решение таких масштабных задач, как внедрение цифрового телевизионного вещания, навигации, управления и связи в гражданских и оборонных сферах, невозможно без одновременного развития электронной компонентной базы. К ней, в частности, относятся, частотно-селективные компоненты с оптимальным соотношением вносимого затухания, избирательности и прямоугольности АЧХ. Эти характеристики определяют важнейшие параметры радиоэлектронной аппаратуры – помехозащищенность приемопередающих узлов, дальность действия и точность работы систем управления и связи, четкость "картинки" телевизионного изображения и отсутствие искажений передачи звукового сопровождения, правильность определения координаты систем навигации и т.д.

Для реализации широких полос пропускания и высокой прямоугольности характеристики в технике ПАВ используются преобразователи с наклонной геометрией электродов – так называемые веерные [1]. В преобразователях такого типа по мере удаления от центрального электрода, расположенного по нормали к оси звукопровода, угол наклона электродов возрастает от 0 до α . Особенность преобразователя – он состоит из парциальных каналов, соединенных параллельно и отличающихся центральными частотами. Общая характеристика устройства получается суммированием характеристик отдельных каналов. В результате такого суммирования уменьшается вносимое затухание по сравнению с другими типами широкополосных устройств (например, устройств трансверсального типа). Дополнительными преимуществами таких преобразователей является возможность реализации высокой прямоугольности АЧХ в переходной зоне ($k_{np}=1,1\dots 1,6$, поскольку импульсный отклик

веерного преобразователя имеет вид $\sin(x)/x$, что определяет форму характеристики, близкую к прямоугольной) и малой неравномерности АЧХ в полосе пропускания, что обеспечивается наклоном большинства электродов и эффективным рассеиванием отраженных волн. Недостаток веерных преобразователей – наличие ограничения угла наклона электродов более 5° , что обусловлено большой расходимостью акустического потока. Это, в свою очередь, не позволяет реализовывать устройства с высокой избирательностью.

Как правило, для уменьшения дифракционных искажений и улучшения избирательности апертура веерных преобразователей и число электродов в них значительно превышают аналогичные параметры для традиционных трансверсальных фильтров. Это приводит к рассогласованию импеданса преобразователей с внешними электрическими цепями. Одним из способов увеличения импеданса устройства для улучшения условий согласования является разделение преобразователей на несколько (как правило, две или три) секций, включенных последовательно. Вместе с тем при топологическом делении преобразователей изменяются не только электрические напряжения на электродах ВШП, но и распределение источников ПАВ, и в первую очередь на

¹ ИРЭ им.В.А.Котельникова РАН <http://www.cplire.ru/>.

² ООО "БУТИС" <http://www.butis.ru/>.

³ Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ".

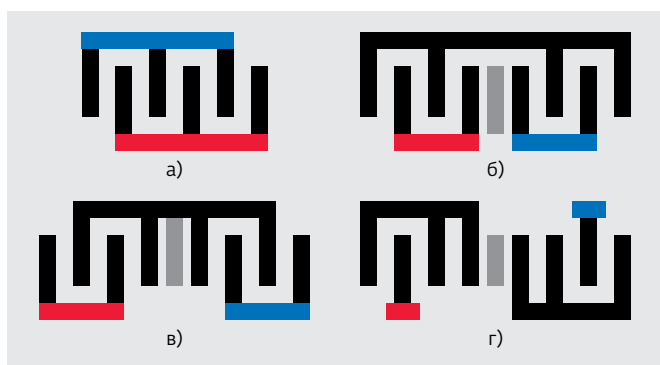


Рис.1. Топологии встречно-штыревого преобразователя: а) простой; б), в) двухсекционный; г) трехсекционный (красным цветом обозначена сигнальная шина, синим – земляная)

границах секций. Это может привести к существенному искажению характеристик устройства по сравнению с исходными расчетными параметрами.

Ниже рассмотрена модель для расчета характеристик веерных секционированных преобразователей и устройств на их основе.

СТРУКТУРЫ СЕКЦИОНИРОВАННЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Деление преобразователей на секции возможно как по апертуре, так и по длине. В случае веерных ВШП первый вариант является практически нереализуемым из-за значительного влияния дифракционных эффектов и, как следствие, искажений рабочих характеристик устройства. Поэтому в практических разработках, как правило, применяют деление по длине преобразователя на последовательно включенные секции (рис.1).

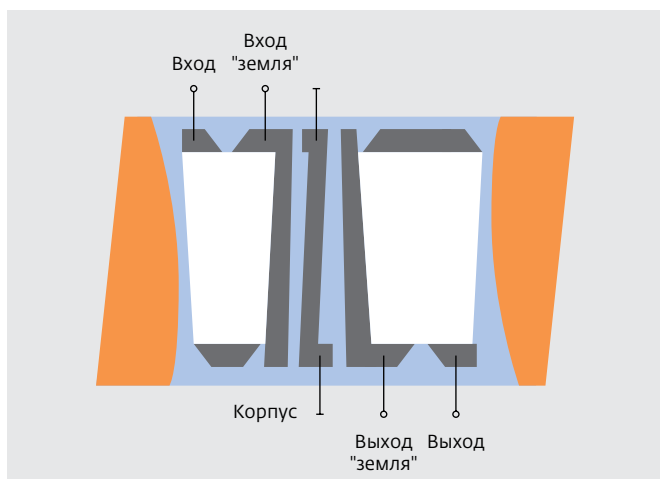


Рис.3. Конструкция ЧСМ-1 на основе секционированных веерных преобразователей (топология 1)

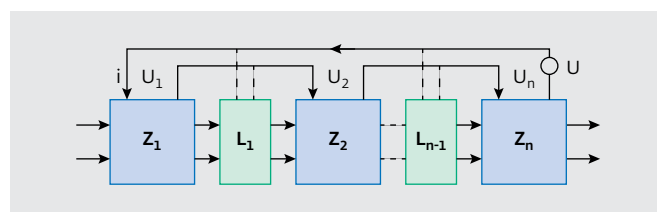


Рис.2. Структурная схема секционированного ВШП

Как видно из рисунка, на границе секций (серая область) происходит изменение исходного распределения источников ПАВ: напряженность электрического поля (вес источника ПАВ) на границе секций примерно в два раза больше по сравнению со средним значением в пределах секции (рис.1б); наблюдается обнуление веса источника (рис.1в); добавляется дополнительный весовой коэффициент (рис.1г). Так как весовая функция источников в ВШП определяет его частотные характеристики, то секционирование вносит искажения в рабочие параметры устройства, которые необходимо учитывать при его разработке.

МОДЕЛЬ СЕКЦИОНИРОВАННОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Для расчета рабочих характеристик преобразователя в данном случае применена модель эквивалентных электрических схем. Каждая пара электродов при таком расчете заменяется элементарной ячейкой, свойства которой описываются матрицей размерностью 3x3 с двумя акустическими входами и одним электрическим. Соответственно весь преобразователь представляет собой цепочку шестиполусников, включенных последовательно по акустическим входам

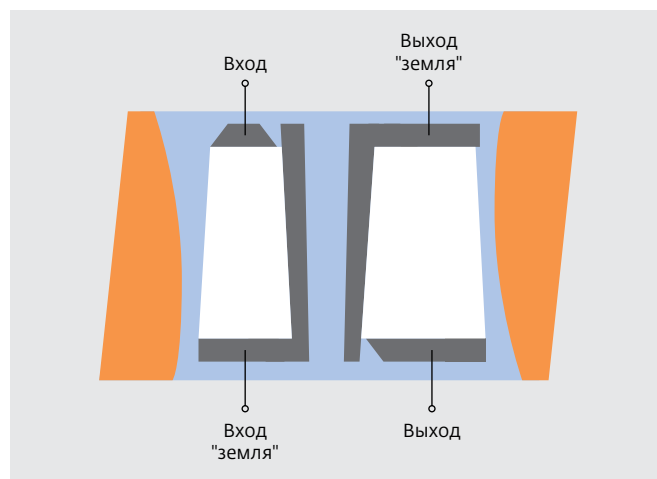


Рис.4. Конструкция ЧСМ-1 на основе простых веерных преобразователей (топология 2)

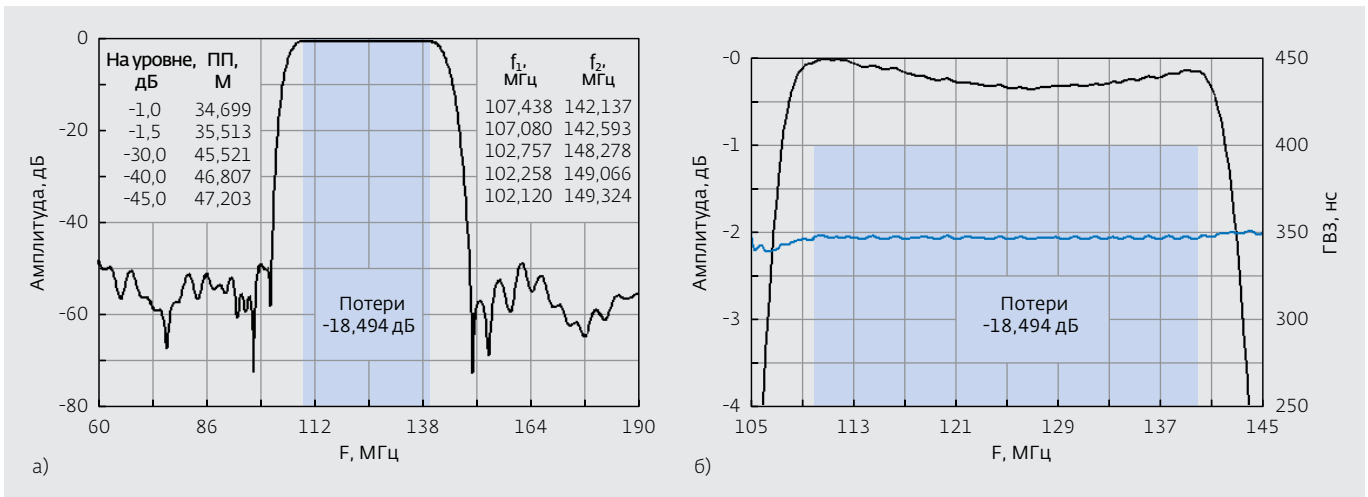


Рис.5. Расчетные характеристики ЧСМ-1 на основании топологии 1: а) в диапазоне частот 60–190 МГц; б) в диапазоне 105–145 МГц. Обозначения: ПП – полоса пропускания; f_2-f_1 – полоса пропускания. Черный цвет – АЧХ, синий – ГВЗ (групповое время запаздывания)

и параллельно – по электрическим. Импеданс преобразователя может быть представлен в виде:

$$Z_o(\omega) = X_R(\omega) + jX_C(\omega) + jB(\omega),$$

где X_R – активная, X_C – емкостная, B – реактивная динамические компоненты импеданса. В случае веерного преобразователя можно считать, что на каждой частоте излучение ПАВ происходит преимущественно в одном канале с апертурой, равной

$$A_n \sim (f_1 \cdot f_n / f_n \cdot N(f_n + \delta f)) A,$$

где A – апертура всего фильтра; N – число каналов; $\delta f = f_{max} - f_{min}$, f_{max} и f_{min} – частоты каналов с максимальной и минимальной частотами, соответственно; f_n – частота n -го канала. В секционированном ВШП каждая секция обладает своим импедансом Z_n , соответственно к n -й секции прикладывается локальное напряжение $U_n = U \cdot Z_n / Z$, где $Z = \sum Z_n$ – суммарный импеданс последовательности секций. В общем случае структурная схема ВШП, разделенного на секции, может быть представлена в виде последовательно включенных шестиполюсников и связующих элементов (рис.2).

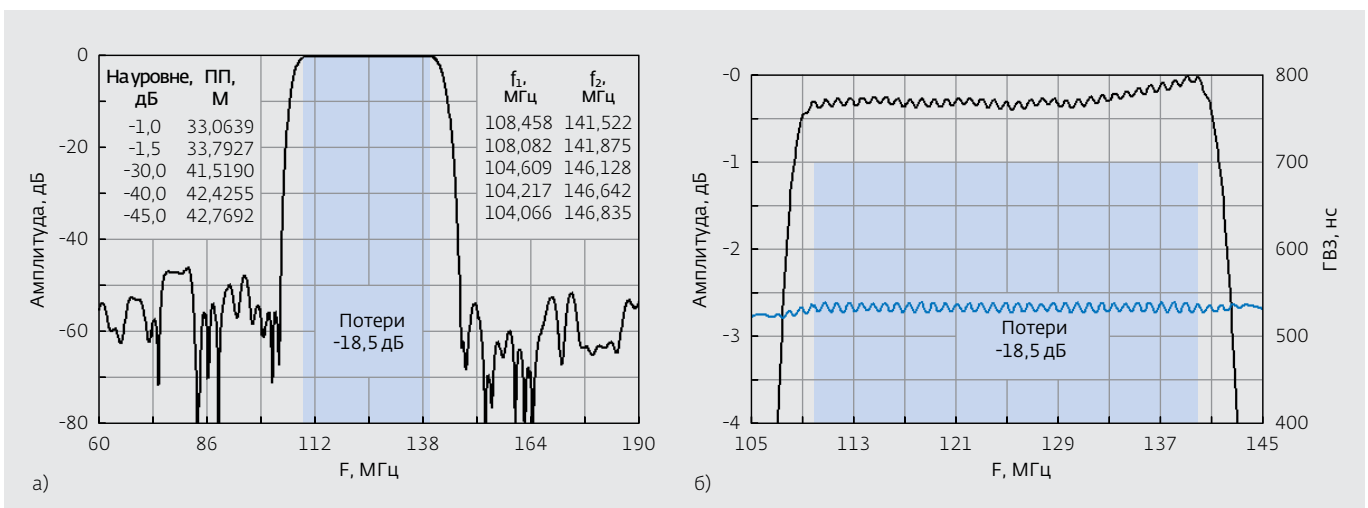


Рис.6. Расчетные характеристики ЧСМ-1 на основании топологии 2: а) в диапазоне частот 60–190 МГц; б) в диапазоне 105–145 МГц. Обозначения: ПП – полоса пропускания; f_2-f_1 – полоса пропускания. Черный цвет – АЧХ, синий – ГВЗ (групповое время запаздывания)

Здесь связующие элементы L_i описывают весовое распределение на границе секций, зависящее от топологической структуры преобразователя. Такое представление позволяет использовать существующие алгоритмы для моделирования веерных фильтров.

Следует отметить, что в общем случае деление ВШП на секции приводит к различию напряжений на секциях, что влияет на характеристики устройства в виде линейно-кусочного взвешивания, что может использоваться как дополнительный инструмент для синтеза характеристик веерного преобразователя.

Для вычисления импеданса секции требуется определить распределение зарядов на электродах, которое зависит от структуры весовых коэффициентов внутри секции и разности потенциалов между секциями. Для вычисления зарядов применена электростатическая модель.

Алгоритм расчета частотно-селективного модуля на основе секционированных веерных преобразователей включает в себя следующие процедуры:

- топологическое деление ВШП на секции и определение граничных весов;
- вычисление импедансов отдельных секций и расчет напряжений на секциях;
- расчет матрицы проводимости ВШП;
- расчет матрицы проводимости ЧСМ с учетом свободных зон звукопровода (неметаллизированных).

Расчетные характеристики модуля сравниваются с заданными требованиями, и определяется комплексная ошибка E_r . Затем процедура повторяется для другого варианта деления ВШП на секции. В качестве рабочей структуры выбирается вариант, соответствующий минимальной E_r .

ЧАСТОТНО-СЕЛЕКТИВНЫЕ СВЧ-МОДУЛИ ЧСМ-1 И ЧСМ-2

Модель, рассмотренная выше, полностью использовалась в высокопрямоугольном частотно-селективном СВЧ-модуле ЧСМ-1 с номинальной частотой 125 МГц и частично – в широкополосном ЧСМ-2 с номинальной частотой 140 МГц.

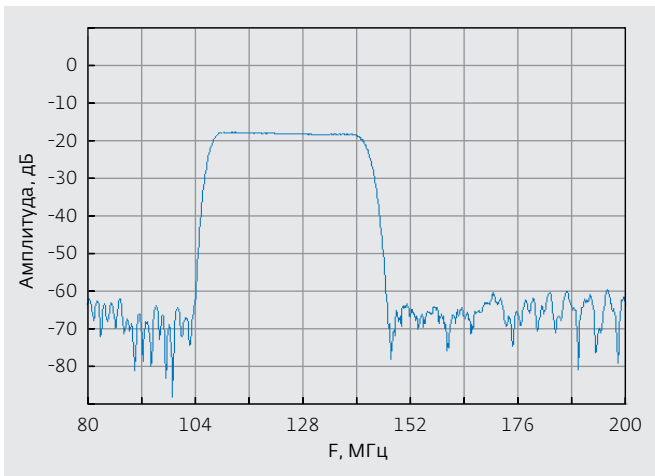


Рис.7. Характеристики частотно-селективного СВЧ-модуля ЧСМ-1 (номинальная частота 125 МГц) с полосой пропускания 27%, изготовленные на базе топологии 1, в диапазоне частот 80–200 МГц

Модуль ЧСМ-1. Были разработаны два варианта конструктивного исполнения ЧСМ-1. В первом варианте использовались двухсекционные веерные преобразователи (рис.3), во втором – простые (рис.4). Расчетные характеристики модуля ЧСМ-1, выполненного на основе топологии 1, приведены на рис.5, 6.

В качестве материала звукопровода в обоих вариантах использовался $YXl/128^\circ$ -срез ниобата лития. Расчеты выполнены для толщины пленки алюминия 0,43 и 0,3 мкм (1 и 2 варианты). Оптимальные характеристики модуля ЧСМ-1 получены на топологии 1: входной ВШП содержал 28 пар электродов, выходной – 39 пар. При апертуре веерных ВШП, равной 100 длинам волн, обеспечивалось согласование по входу и выходу 50 Ом в полосе пропускания. При этом теоретическое значение уровня вносимого затухания составляло

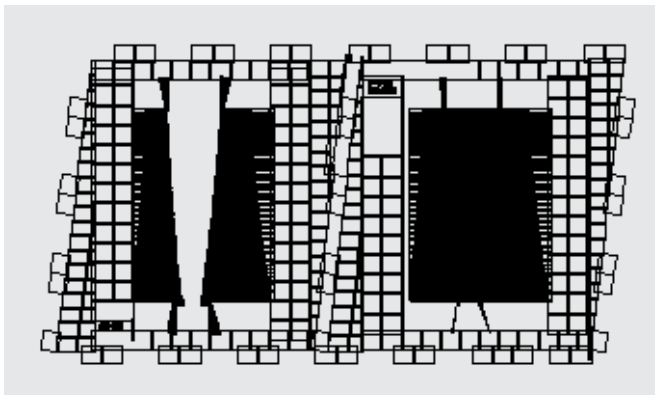


Рис.9. Топологии частотно-селективного СВЧ-модуля ЧСМ-2 в формате для фотонаборной установки ЭМ-559

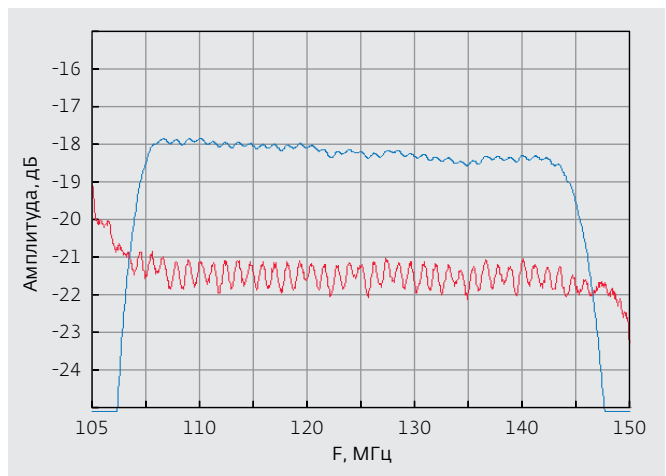


Рис.8. Характеристики ЧСМ-1 (номинальная частота 125 МГц) в полосе пропускания 105–145 МГц

18,5 дБ. Характеристики модуля ЧСМ-1 приведены на рис.7, 8.

Модуль ЧСМ-2. В настоящее время известна только одна публикация, посвященная разработке сверхширокополосных устройств частотной селекции, выполненных по ПАВ-технологии [2]. К.Хартманом и М.Хагики разработаны два фильтра на номинальную частоту 140 МГц с полосой пропускания 55 и 63%.

Нами была поставлена задача реализации частотно-селективного модуля с полосой пропускания 75%. Анализ опубликованных данных и предварительные расчеты показали принципиальную возможность решения этой задачи.

В качестве материала звукопровода выбран $YXl/41^\circ$ -срез ниобата лития, обладающий максимальным из существующих пьезоматериалов коэффициентом электромеханической связи. Для обеспечения вносимого затухания не более 18 дБ оба веерных преобразователя выполнялись однонаправленными с неоднородно-расщепленными электродами. Расчеты проведены на номинальную частоту 140 МГц для толщины пленки алюминия 0,3 мкм и коэффициента металлизации в электродных структурах 0,5.

Топологии сверхширокополосного частотно-селективного СВЧ-модуля ЧСМ-2 в формате для фотонаборной установки ЭМ-559 показаны на рис.9, а на рис.10 – его расчетные характеристики в широком диапазоне частот и в полосе пропускания.

Экспериментальные характеристики частотно-селективного СВЧ-модуля ЧСМ-2 с номинальной частотой 140 МГц и полосой пропускания 75%, изготовленного на базе топологии (см. рис.9),

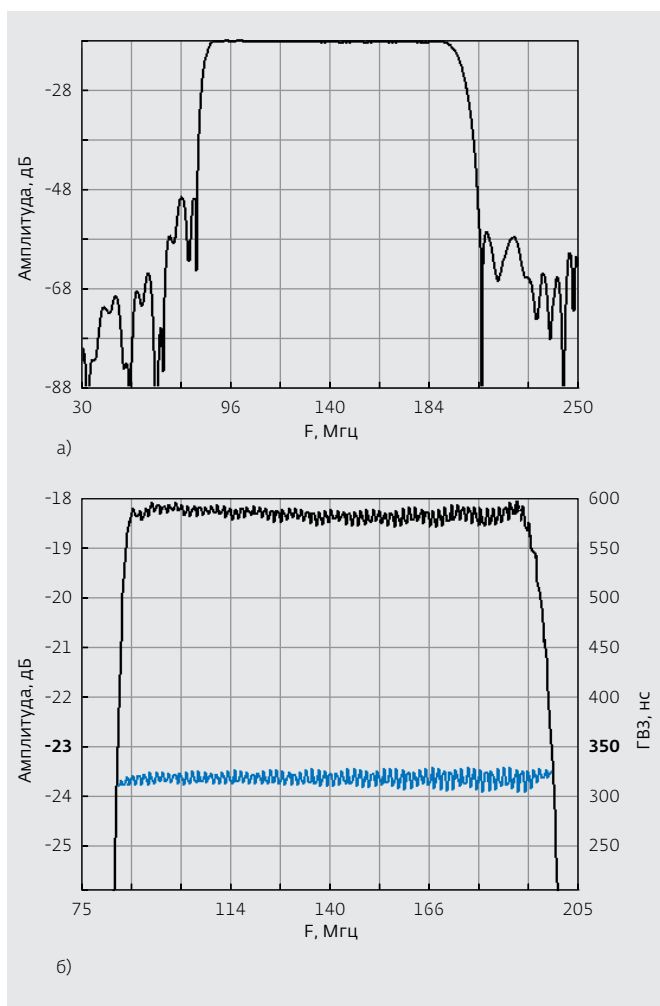


Рис.10. Расчетные характеристики сверхширокополосного частотно-селективного СВЧ-модуля ЧСМ-2 с центральной частотой 140 МГц: а) в широком диапазоне частот; б) в полосе пропускания

и сравнение их с расчетными характеристиками, как в широком диапазоне частот, так и в полосе пропускания представлены на рис.11.

Таким образом, получены следующие параметры широкополосных частотно-селективных СВЧ-модулей ЧСМ-1 и ЧСМ-2, разработанных на основе секционированных веерных преобразователей:

- номинальная частота – 125 МГц для ЧСМ-1 и 140 МГц для ЧСМ-2;
- ширина полосы пропускания по уровню -1 дБ – 34 МГц (27%) для ЧСМ-1 и 75% для ЧСМ-2;
- минимальное вносимое затухание – 18 дБ.

Модули ЧСМ-1 и ЧСМ-2 имеют неравномерность амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) в полосе пропускания 0,5 дБ и гарантированное затухание в полосах заграждения более 40 дБ.

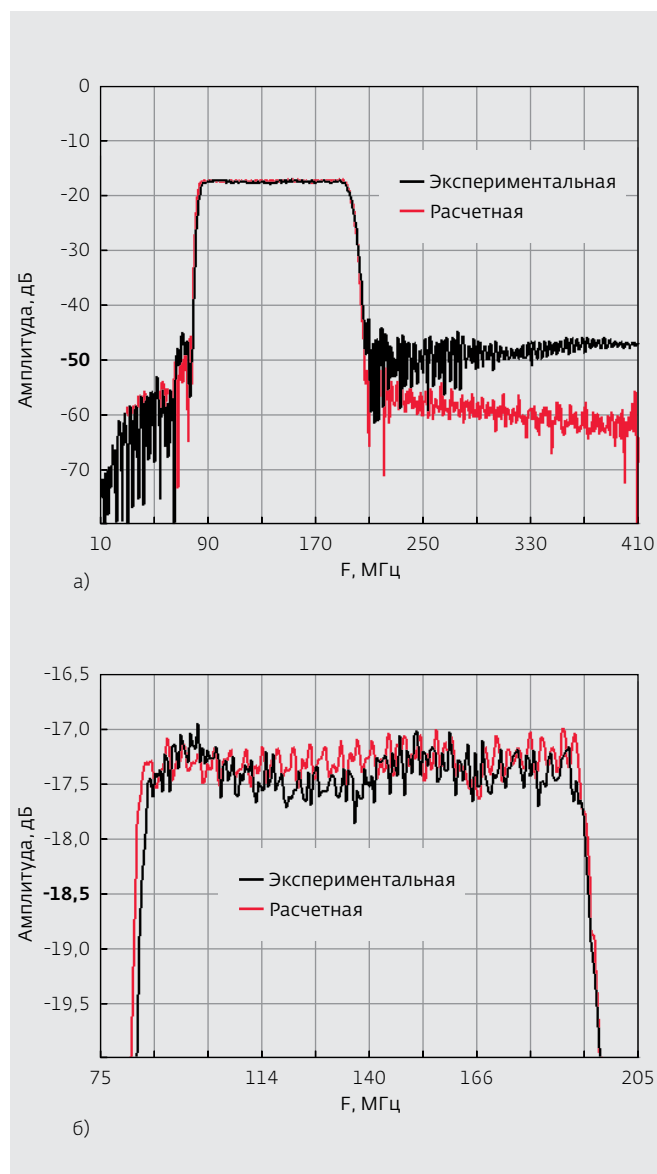


Рис.11. Расчетная и экспериментальная характеристики частотно-селективного СВЧ-модуля ЧСМ-2 (номинальная частота 140 МГц, полоса пропускания 75%): а) в широком диапазоне частот; б) в полосе пропускания

ЛИТЕРАТУРА

1. **Иванов П.Г., Макаров В.М., Жупанов А.А.** Веерные фильтры на ПАВ с секционированными преобразователями. Сборник трудов Международной научно-технической конференции "Информационные технологии в науке, технике и образовании". – Тунис, 2007, с.23–27.
2. **Hakiki M.El., Hartmann K.** Very large bandwidth IF SAW Filters using leaky waves on LiNbO3 and LiTaO3. – IEEE International Ultrasonic Symp. Proc., 2011, p.819–822.