

## Моделювання та реалізація твердотільних фільтрів з електричним керуванням їх частоти

## Моделирование и реализация твердотельных фильтров с электрической перестройкой их частоты

## Simulation and realization of solid-state electrically tuning filters

### 1. Номер державної реєстрації теми - 0109U002224.

2. Науковий керівник - д.т.н., проф. Ільченко М.Ю, Ільченко М. Е., М.У.Ільченко

### 3. Суть розробки, основні результати.

(укр.)

Твердотільні фільтри з електричною настройкою частоти є ключовими елементами різних багаточастотних систем зв'язку, що мають підвищену заводостійкість і надійність. Вважається, що значна частина перспективних систем зв'язку, в тому числі і стільникової телефонії, буде використовувати в основному ці фільтри. Дана розробка становить собою електрично перестроюванні фільтри з поліпшеними характеристиками для перспективної зв'язної апаратури, вона направлена на розвиток нової елементної бази України в області радіоелектроніки.

Запропоновано новий підхід до побудови електрично перестроюваних смуго-пропускаючих фільтрів, побудованих на використанні П-подібних мікросмужечних резонаторів і декількох варикапів, підключених до кожного з них. Цей підхід дозволив створити дослідні зразки фільтрів, які по своїм характеристикам перевершують світові аналоги.

Вперше отримана формула, що визначає добротність резонаторів, які містять відрізок лінії передачі і конденсатор. Формула включає добротність лінії передачі, добротність конденсатора і чутливість резонансної частоти резонатора до зміни ємності. Вона дозволяє контролювати добротність резонаторів і внесені втрати смуго-пропускаючих фільтрів на їх основі, в процесі перестройки. На основі цієї формули встановлено ефект, що дозволяє зменшити зміну внесених втрат в перестроюваних смуго-пропускаючих фільтрах з постійною відносною шириною смуги пропускання.

Отримано рівняння, що визначають резонансні частоти П-подібного петльового резонатора з ємністю і встановлено основні його особливості. Такий резонатор основним елементом нових фільтрів. Показано, що його резонансні частоти, в залежності від їх парності, визначаються одним з двох рівнянь резонансу.

Вирішена задача збільшення діапазону перестройки мікросмужечних резонаторів, перестроюваних конденсаторами з обмеженою зміною ємності в області збільшених електричних довжин, що дозволяє використовувати їх в верхній частині сантиметрового діапазону (X-band, Ku-band). Це досягається за рахунок використання східчасто-нерегулярних резонаторів. При їх використанні смуга перестройки розширюється в 1,5 і більш разів порівняно з регулярними резонаторами. Якщо конденсатор має перекриття по ємності  $C_{\max}/C_{\min} = 2,2$ , то на частотах 10 ГГц у східчастих резонаторів досяжна смуга перестройки близько 28%, а на частотах 20 ГГц – близько 22%. Електрично-перестроюванні фільтри з цими резонаторами характеризуються такими ж смугами перестройки.

Експериментально досліджено особливості нових фільтрів з П- подібними резонаторами. Встановлено, що лівий схил АЧХ цих фільтрів крутіше правого, а їх відносна ширина смуги пропускання зменшується по мірі збільшення частоти. Запропоновано методику інженерного розрахунку таких фільтрів.

(рос.)

Твердотельные фильтры с электрической настройкой частоты являются ключевыми элементами различных многочастотных систем связи, обладающих повышенной помехоустойчивостью и надежностью. Считается, что значительная часть перспективных систем связи, в том числе и сотовой телефонии, будет использовать в основном эти фильтры. Данная разработка представляет собой электрически перестраиваемые фильтры с улучшенными характеристиками для перспективной связной аппаратуры, она направлена на развитие новой элементной базы Украины в области радиоэлектроники.

Предложен новый подход к построению электрически перестраиваемых полосно-пропускающих фильтров, основанный на использовании П-образных микрополосковых резонаторов и нескольких варикапов, подключенных к каждому из них. Этот подход позволил создать опытные образцы фильтров, которые по своим характеристикам превосходят мировые аналоги.

Впервые получена формула, определяющая добротность резонаторов, содержащих отрезок линии передачи и конденсатор. Формула включает добротность линии передачи, добротность конденсатора и чувствительность резонансной частоты резонатора к изменению емкости. Она позволяет контролировать добротность резонаторов и вносимые потери полосно-пропускающих фильтров, на их основе, в процессе перестройки. На основе этой формулы установлен эффект, позволяющий уменьшить изменение вносимых потерь в перестраиваемых полосно-пропускающих фильтрах с постоянной относительной шириной полосы пропускания.

Получены уравнения, определяющие резонансные частоты П-образного петлевого резонатора с емкостью и установлены основные его особенности. Такой резонатор является основным элементом новых фильтров. Показано, что его резонансные частоты, в зависимости от их четности, определяются одним из двух уравнений резонанса.

Решена задача увеличения диапазона перестройки микрополосковых резонаторов, перестраиваемых конденсаторами с ограниченным изменением емкости в области увеличенных электрических длин, что позволяет использовать их в верхней части сантиметрового диапазона (X-band, Ku-band). Это достигается за счет использования ступенчато-нерегулярных резонаторов. При их использовании полоса перестройки расширяется в 1.5 и более раз по сравнению с регулярными резонаторами. Если конденсатор имеет перекрытие по емкости  $C_{\max}/C_{\min} = 2,2$ , то на частотах 10 ГГц у ступенчатых резонаторов достижима полоса перестройки около 28%, а на частотах 20 ГГц – около 22%. Электрически перестраиваемые фильтры с этими резонаторами характеризуются такими же полосами перестройки.

Экспериментально исследованы особенности новых фильтров с П-образными резонаторами. Установлено, что левый скат АЧХ этих фильтров круче правого, а их относительная ширина полосы пропускания уменьшается по мере увеличения частоты. Предложена методика инженерного расчета таких фильтров.

**(англ.)**

The solid-state electrically tuning filters are main elements of different multifrequency communication systems with high reliability. New approach to designing electrically tuned band-pass filters that is based on use U-shaped microstrip resonators with several varactors connected to each resonator is proposed. This approach allows to creating prototypes which exceeds world level of varactor-tuned filters.

New formula for quality-factor of microwave resonators with transmission line segment and lossy capacitor was established. The formula allows us to decrease a insertion losses variation of tunable filters with varactors.

The question of increasing the tuning range of microstrip resonators with ferroelectric capacitors is considered which allows using them in upper part of the centimeter band (X-band, Ku-band). It is determined that step-irregular resonators with ferroelectric capacitors can provide 28% tuning range in X-band and 22% tuning range in Ku-band.

On the basis of the new approach, experimental tunable filters have been developed whose characteristics surpass those of commercial varactor-based filters: the center-frequency insertion loss ILo is reduced by more than a factor of 1.5; the third-order intermodulation – distortion factor IP3 is increased by 14 dBm, from 10 dBm to 24 dBm; power handling is increased from 1 mW to 25 mW; bandwidth BW(3 dB) is reduced from 4% to 1.6%. For the first time, in filters based on silicon varactors, a dissipation-loss that corresponds to that of filters based on *p-i-n* diodes has been obtained.

#### **4. Наявність охоронних документів на об'єкти права інтелектуальної власності.**

Патент на корисну модель № 53878 від 10 11 2010. Смуговий фільтр, що перестроюється. Захаров О.В., Гльченко М.Е., Карнаух В.Я., Пінчук Л.С.

#### **5. Порівняння зі світовими аналогами.**

На основі нового підходу створено експериментальні зразки перестроюваних напівпровідниковими варикапами фільтрів, які по своїм характеристикам перевершують фільтри, які серійно випускаються: втрати фільтра на центральній частоті зменшено більш ніж в 1,5 раз; показник інтермодуляційних викривлень порядку IP3 збільшений на 14 дБм, з 10 дБм до 24 дБм; робоча потужність збільшена з 1 мВт до 25 мВт; смуга пропускання зменшена в 2,5 раз з 4% до 1,6%.

#### **6. Економічна привабливість для просування на ринок**

Електрично-перестроюванні фільтри, працюючі в діапазоні частот до 1000 МГц, серійно випускаються тільки в США і Великобританії. В інших країнах ці елементи практично недоступні. Це є основним мотивом їх просування на ринок.

#### **7. Потенційні користувачі (галузі, міністерства, підприємства, організації).**

Отримані результати у вигляді макетних зразків та науково обґрунтованих методів побудови фільтрів з електричним керуванням їх частоти мають бути застосовані при проектуванні та виробництві нового покоління засобів для систем широкосмугового радіодоступу типу WiMAX, HSPA, LTE.

Потенціальними замовниками та користувачами результатів можуть бути вітчизняні підприємства: АТ „Радіо телекомунікаційні системи” (м. Київ), АТ „Міррад” (м. Київ), НВО „Муссон” (м. Севастополь), ВАТ „АТ НДІ РВ” (м. Харків), ДБ „Оріон-Навігація” (м. Сміла) та інші, а також зарубіжні загальновідомі фірми, як INTEL, HuaWei, Асоціація GSM та інші.

Міністерство освіти та науки України, вищі навчальні заклади при підготовці фахівців та наукових кадрів телекомунікаційного профілю.

Державний департамент зв'язку та інформації при формуванні засад щодо впровадження в Україні перспективних телекомунікаційних технологій.

#### **8. Стан готовності розробки.**

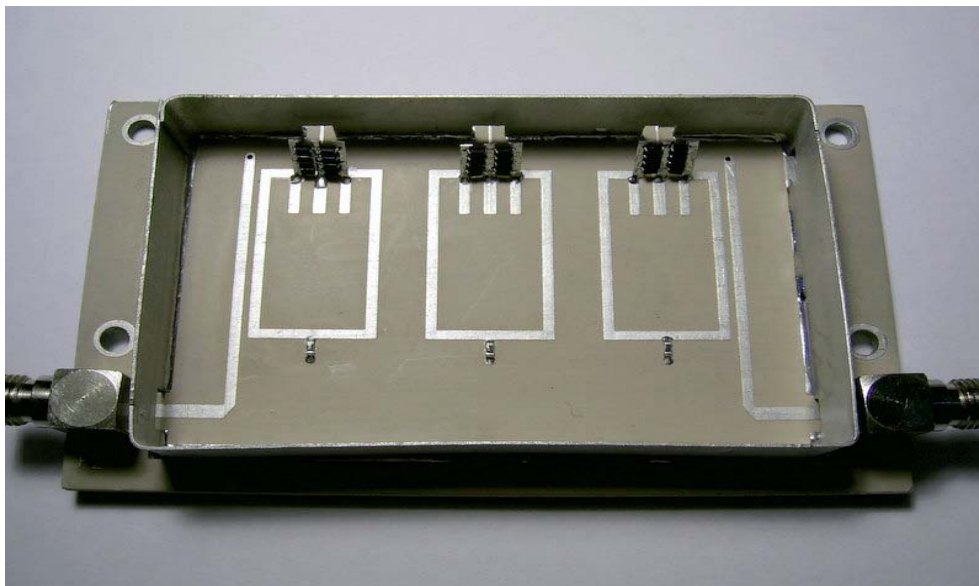
Розроблено і виготовлено макети 2-резонаторних і 3-резонаторних фільтрів з П- подібними резонаторами і напівпровідниковими варикапами. Проведено їх всебічне експериментальне дослідження і показано перевага перед існуючими зразками.

## 9. Існуючі результати впровадження.

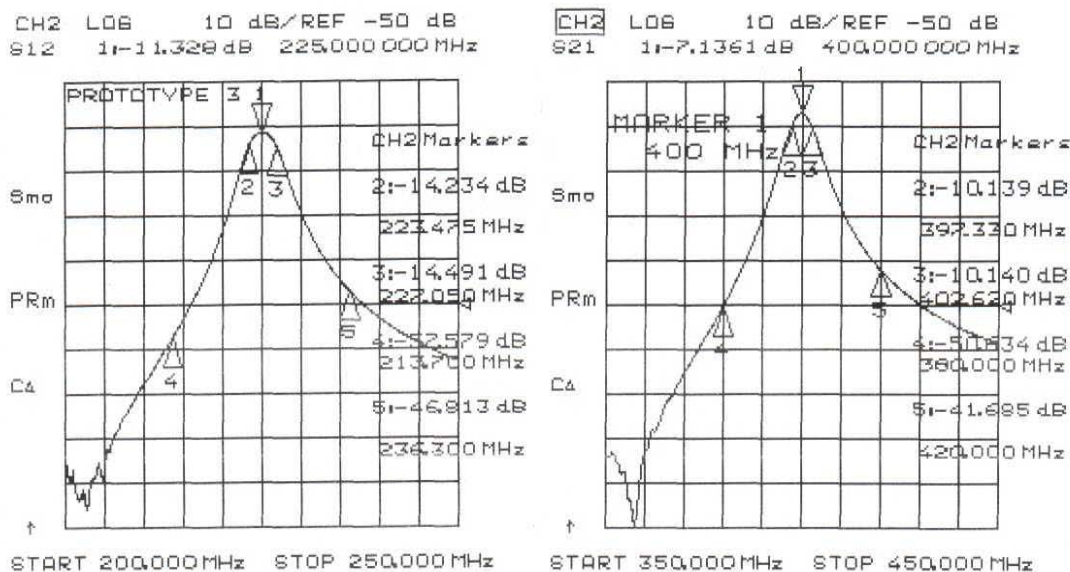
Результати роботи впроваджено у навчальний процес при викладанні дисципліни „Теорія електричних кіл -2” (розділ „Фільтри,»). Впроваджена нова лабораторна робота „Дослідження мікрохвильових фільтрів”.

## 10. Назва організації, телефон, E-mail

НТУУ”КПІ”, Інститут телекомунікацій, НДІ телекомунікацій, 236-62-13.



Макет 3-резонаторного перестроюваного фільтра з напівпровідниковими варикапами.



а)  $F_0=225$  МГц;  $\Delta F(3 \text{ дБ})=1.6\%$ ;  $IL_0=11.3$  дБ

б)  $F_0=400$  МГц;  $\Delta F(3 \text{ дБ})=1.3\%$ ;  $IL_0=7.1$  дБ

Частотні характеристики 3-резонаторного перестроюваного фільтра з П-подібними резонаторами: а – на частоті 225 МГц; б – на частоті 400 МГц.

## 11. Перелік публікацій за матеріалами досліджень за період виконання розробки

1. Захаров А.В., Ильченко М.Е., Карнаух В.Я., Пинчук Л.С. Перестраиваемые микрополосковые резонаторы с сегнетоэлектрическими конденсаторами // Изв. вузов. Радиоэлектроника, 2010, Т.53, № 8, С. 30-35.

2. Захаров А.В., Ильченко М.Е. Новый подход к построению фильтров, перестраиваемых варикапами // Радиотехника и электроника, 2010, Т.55, №12, С. 1523-1532.

3. Захаров А.В., Ильченко М.Е. Прямая и обратная задачи в теории полосно-пропускающих фильтров с диссипативными потерями // Доповіді НАН України, 2011, № 1. Прийнято до друку.
4. Захаров А.В., Ильченко М.Е. Добротность сегнетоэлектрических конденсаторов, используемых в перестраиваемых фильтрах СВЧ // Радиотехника и электроника 2011, Т.56, №2. Прийнято до друку.
5. Захаров А.В., Ильченко М.Е., Карнаух В.Я., Пинчук Л.С. Полосковые полосно-пропускающие фильтры со ступенчатыми резонаторами // Изв. вузов. Радиоэлектроника, 2011, Т.54, №3. Прийнято до друку.
6. Захаров А.В., Ильченко М.Е. Эффекты взаимодействия полосковых резонаторов и новые типы неминимально-фазовых фильтров // Доповіді НАН України, 2011, № 3. Прийнято до друку.
7. Захаров А.В., Ильченко М.Е., Карнаух В.Я., Пинчук Л.С. Добротность микрополосковых резонаторов на подложках с высокой диэлектрической проницаемостью // Материалы 20-й Международной Крымской конференции „СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии” 13-17 сентября 2010 г. Севастополь, Крым, Украина. Стр. 661-662.
8. Казіміренко В.Я., Карнаух В.Я. Обґрунтування вимог до мікрохвильових каналних фільтрів, що використовуються в трактах телекомунікаційних систем. Третя міжнародна науково-технічна конференція „Проблеми телекомунікацій” 21-24 травня 2009 р. Київ. Ст. 157.