

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СОБСТВЕННЫХ РЕЗОНАНСОВ ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТОВ И ТОПОЛОГИИ ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ НА РАДИОУСТРОЙСТВА

Е. А. Чистяков, А. В. Морева, Л. П. Матузин

**В** настоящее время для проектирования различных радиоэлектронных систем используются специализированные программные продукты, которые помогают в процессе разработки. В работе представлен пример разработки радиоустройства в среде проектирования NI AWR Design Environment. В работе отмечено, что при создании радиоустройств нужно учитывать не только влияние собственных резонансов электронных компонентов, но и влияние топологии печатной платы на его характеристики.

**Ключевые слова:** NI AWR Design Environment, электромагнитное моделирование, резонансные частоты, S-параметры, коэффициент стоячей волны по напряжению, топология печатной платы.

## Введение

На данном этапе развития инженерной отрасли большая часть разработок проводится в специализированных программных продуктах, которые сильно упрощают процесс создания новых радиоустройств и радиоэлектронных систем, описанных в [1, 2]. Но моделируемые процессы, рассматриваемые в данных программах, могут отличаться от процессов, которые рассматриваются уже на конкретном физическом образце. Вследствие того, что электронные компоненты, такие как конденсаторы, катушки индуктивности, транзисторы и др. не являются идеальными из-за невозможности физической реализации таких продуктов, то приходится учитывать дополнительно их влияние на характеристики устройств. Также стоит отметить, что все электронные компоненты распаиваются на печатных платах, и у производителей могут быть платы с различной толщиной, диэлектрической проницаемостью, тангенсом угла потерь, и все эти параметры влияют на характеристики создаваемого устройства.

## Постановка задачи

Будем полагать, что нужно создать полосовой фильтр 7-го порядка на сосредоточенных элементах с полосой пропускания от 350 до 450 МГц и с ослаблением в полосе пропускания 0 дБ, также необходимо сделать, чтобы коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН) был ниже 1,5. В первую очередь рассмотрим создание фильтра прототипа, у которого нет потерь. Далее изучим влияние собственных резонансов электронных компонентов на характеристики фильтра. В-третьих, изучим влияние различных топологий печатных плат на фильтр. И в конце рассчитаем фильтр с учетом выбранной топологии печатной платы.

## 1. Создание фильтра прототипа

Для большей наглядности влияния как самих электрических компонентов, так и топологии печатной платы в программном пакете NI AWR Design Environment создадим простой полосовой фильтр с полосой пропускания 350 – 450 МГц и со значением передачи в полосе пропускания 0,0 дБ. К концам фильтра подключим порты с сопротивлением ( $Z$ ) 50 Ом для измерения основных характеристик устройства. Основные параметры, которые рассматриваются у данного фильтра, будут: S-параметры, а именно  $S_{21}$  – передаточная характеристика в прямом направлении,  $S_{11}$  и  $S_{22}$  – коэффициенты отражения от входного и выходного портов; КСВН, который показывает насколько сильное отражение волны происходит от порта устройства, в идеальном случае КСВН = 1, что означает отсутствие отражения. Стоит отметить, что КСВН связан с коэффициентом отражения следующим соотношением [3]:

$$\text{КСВН} = \frac{1 + |S_{mm}|}{1 - |S_{mm}|} \quad (1)$$

На рис. 1 показана схема полосового фильтра, номиналы электронных компонентов которого подобраны в соответствии с реально существующими, на рис. 2 показаны  $S_{11}$ ,  $S_{21}$  и  $S_{22}$ , на рис. 3 показаны КСВН входного и выходных портов.

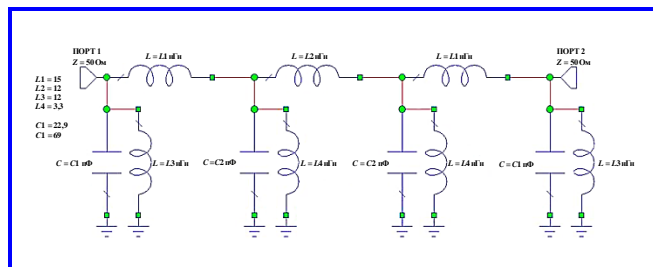


Рис. 1. Электрическая схема полосового фильтра

Из рис. 2 видно, что в полосе от 350 до 450 МГц выполняется требование, что полоса пропускания фильтра находится на уровне 0 дБ. Также можно заметить, что с ростом значения параметра  $S_{21}$  значения параметров  $S_{11}$  и  $S_{22}$  начинают уменьшаться. Приняв во внимания формулу (1) можно понять, что чем ниже значения параметров  $S_{11}$  и  $S_{22}$ , тем ближе значения КСВН у входного и выходного портов фильтра.

Таким образом, был рассмотрен фильтр с идеальными электронными компонентами.

## 2. Исследование влияния собственных резонансов электронных компонентов на характеристики фильтра

Используя резонансные частоты, которые в основном указываются в документации на продукцию, можно рассчитать резонансные индуктивности и резонансные емкости электронных компонентов и учесть их при проектировании радиоустройств, так на рис. 4 показана электрическая схема с подключенными резонансными катушками индуктивности и резонансными конденсаторами к идеальному фильтру, а на рис. 5 показаны изменившиеся  $S$ -параметры по сравнению с  $S$ -параметрами идеального фильтра.

Из рис. 5 видно, что  $S_{21}$  сместился влево относительно изначального значения и стал уже в полосе пропускания.  $S_{11}$  и  $S_{22}$  также сместились влево и увеличили свои значения.

Проведем перерасчет номиналов электрических компонентов, чтобы снова выполнялись требования к полосовому фильтру. После перепроектирования фильтра номиналы радиокомпонентов стали следующими:  $L1 = 22,0$  нГн,  $L2 = 27,0$  нГн,  $L3 = 7,5$  нГн,  $L4 = 8,2$  нГн,  $C1 = 24,6$  пФ,  $C2 = 27,4$  пФ. Таким образом, номиналы электрических компонентов стали совершенно другими. На рис. 6 показаны  $S$ -параметры фильтра с учетом влияния собственных резонансов электронных компонентов, а на рис. 7 показаны КСВН данного фильтра.

Как видно из рис. 6 и 7  $S$ -параметры и КСВН стали снова в заданной полосе.

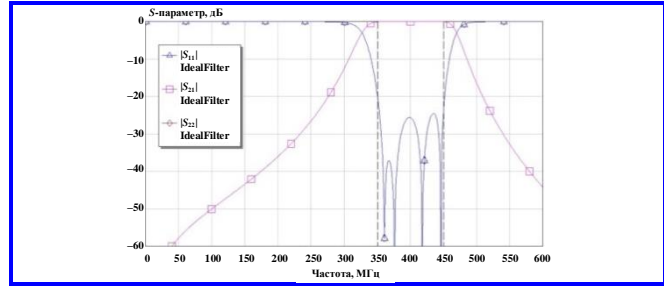


Рис. 2.  $S$ -параметры идеального фильтра (IdealFilter)

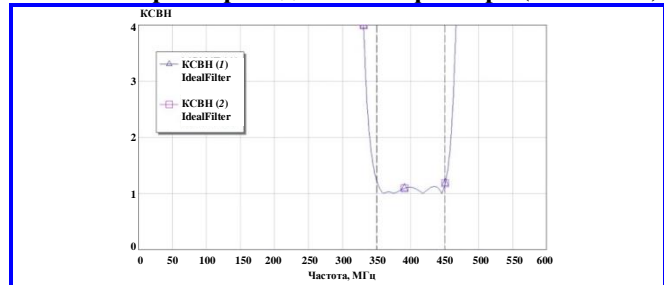


Рис. 3. КСВН идеального фильтра (IdealFilter) входного (1) и выходных портов (2)

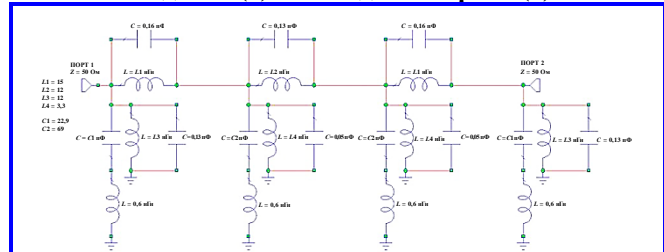


Рис. 4. Электрическая схема с подключенными резонансными катушками индуктивности и резонансными конденсаторами к идеальному фильтру

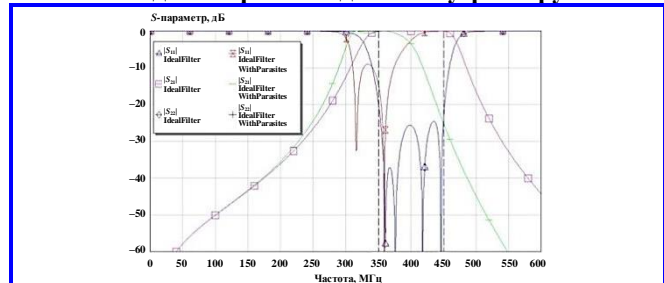


Рис. 5.  $S$ -параметры идеального фильтра с подключенными резонансными катушками индуктивности и резонансными конденсаторами (IdealFilterWithParasites) по сравнению с  $S$ -параметрами идеального фильтра (IdealFilter)

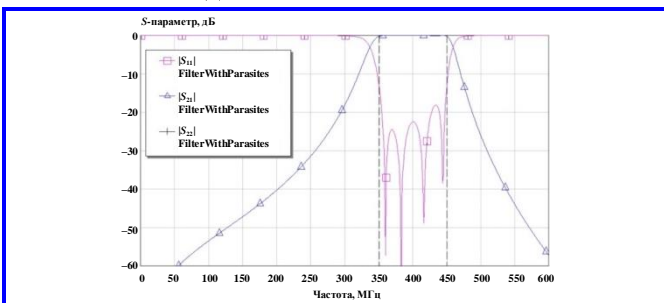


Рис. 6.  $S$ -параметры фильтра с учетом резонансных индуктивностей и резонансных ёмкостей (FilterWithParasites)

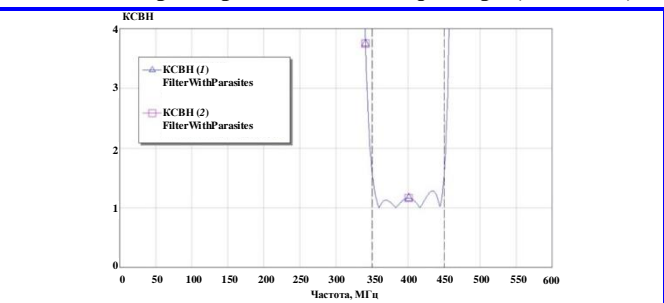


Рис. 7. КСВН входного (1) и выходного (2) портов фильтра с учетом резонансных индуктивностей и резонансных ёмкостей (FilterWithParasites)

### 3. Сравнение влияния топологий печатных плат на характеристики фильтра

Перейдем к изучению влияния топологий печатных плат на характеристики фильтра [4]. Создадим две печатные платы с различными диэлектрическими проницаемостями и различными тангенсами угла потерь [5]. У первой платы (зеленый цвет) диэлектрическая проницаемость – 4,5 Ф/м, а тангенс угла потерь – 0,003, а у второй платы (синий цвет) диэлектрическая проницаемость – 9,8 Ф/м, а тангенс угла потерь – 0,002. Данные платы показаны на рис. 8 [6, 7].

Из рис. 9 видно, что  $S$ -параметры полосового фильтра снова сдвинулись относительно  $S$ -параметров, где учитываются только частоты собственных резонансов. При этом  $S$ -параметры, показанные на рис. 9, относительно совпадают друг с другом [8].

### 4. Допроектирование фильтра с учетом влияния топологии печатной платы

Для дальнейшего исследования выберем печатную плату с диэлектрической проницаемостью – 4,5 Ф/м и тангенсом угла потерь – 0,003.

Еще раз пересчитаем параметры фильтра, чтобы вернуть его характеристики к требуемым. На рис. 10 показана схема с учетом топологии печатной платы, на рис. 11 показаны  $S$ -параметры, а на рис. 12 – КСВН. Из рис. 11 и 12 видно, что все необходимые требования к полосовому фильтру выполняются.

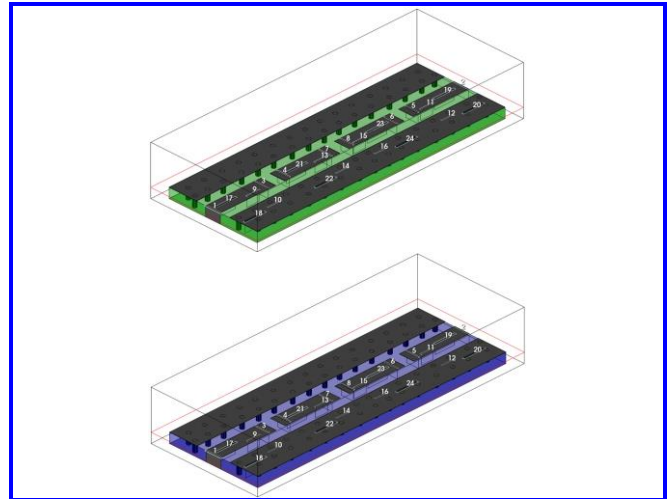


Рис. 8. Топологии печатных плат

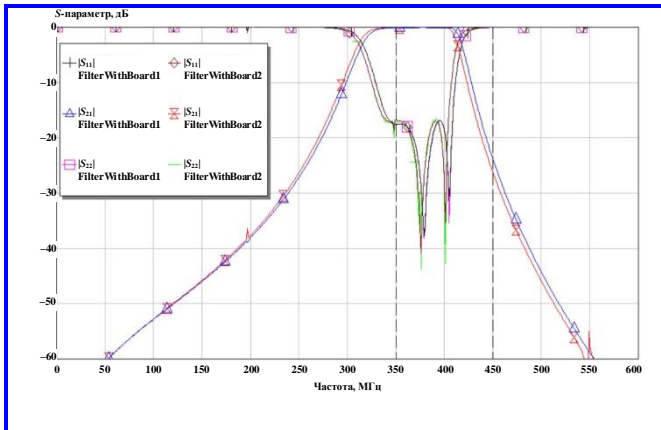


Рис. 9.  $S$ -параметры фильтров с учетом топологий печатных плат (FilterWithBoard)

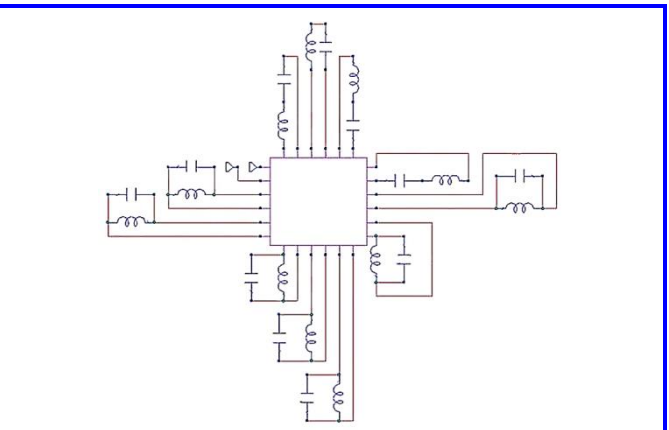


Рис. 10. Схема фильтра с учетом топологии печатной платы

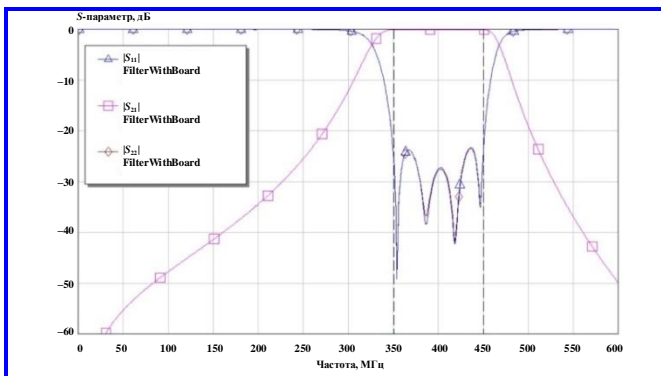


Рис. 11.  $S$ -параметры фильтра с учетом топологии печатной платы (FilterWithBoard)

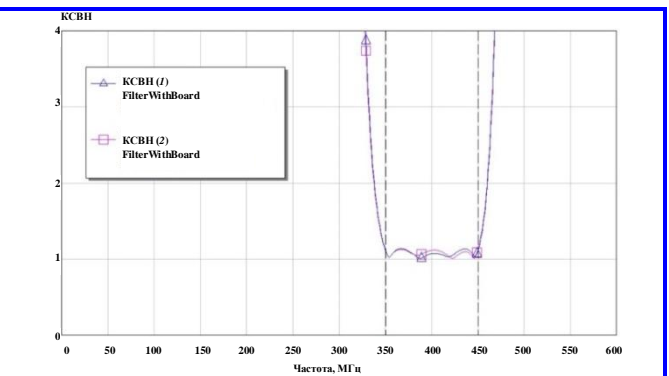


Рис. 12. КСВН входного (1) и выходного (2) портов фильтра с учетом топологии печатной платы (FilterWithBoard)

### Заключение

Таким образом, проведя исследование полосового фильтра, учитывая собственные резонансы электронных компонентов, параметры фильтра существенно изменялись у идеального, вследствие этого был произведен перерасчет номиналов компонентов. Также важно отметить, что топологии печатных плат влияют на характеристики фильтра, однако между собой различаются не сильно. Была выбрана одна из топологий плат, с учетом которой было произведено перемоделирование фильтра для получения требуемых показателей работы.

### Литература

1. Бойков К. А. Радиосенсорная диагностика целостности сигналов внутрисхемной и периферийной архитектуры микропроцессорных устройств / К. А. Бойков, М. С. Костин, Г. В. Куликов // Russian Technological Journal. – 2021. – Vol. 9 (4). – P. 20–27. – DOI : 10.32362/2500-316X-2021-9-4-20-27.
2. Kostin M. S. Technical Methods and Facilities of Printed-Film Topology Reengineering of Radio-Electronic Products / M. S. Kostin, D. S. Vorunichev, V. M. Vikulov // Journal of Communications Technology and Electronics. –

2019. – Vol. 64. – № 3. – P. 193–197. – DOI : 10.1134/S1064226919020098.

3. Костин М. С. Устройства и модули сверх высоких частот : учебник / М. С. Костин, А. Д. Ярлыков. – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2022. – 400 с.
4. Фетисов В. С. Самоучитель по автоматизированной разработке печатных плат : учебное пособие / В. С. Фетисов. – Уфа : ФОТОН, 2012. – 88 с.
5. Automated design of printed circuit boards made by electronic computer -aided design (cad) with the next using in cnc-machine / K. Kolesnyk, A. Łukaszewicz, V. Dutka [et. al.]. – 2022 – Vol. 4. – P. 9–16. – DOI : 10.23939/cds.
6. Mitzner K. Complete PCB design using OrCAD Capture and PCB editor / K. Mitzner. – Amsterdam ; Boston ; Heidelberg ; London ; New York ; Oxford Paris ; San Diego ; San Francisco ; Singapore ; Sydney ; Tokyo : Elsevier Inc, 2009. – 488 с.
7. Конструирование печатных плат в САПР PCB Artist: методические указания к выполнению лабораторных работ по дисциплине «Автоматизированное проектирование и дизайн приборов и систем» / сост.: С. В. Воробьев, С. К. Степанов. – Санкт-Петербург : Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015. – 32 с.
8. Иванова Н. Ю. Проектирование печатных плат в САПР P-CAD-2002. Методическое пособие / Н. Ю. Иванова, Е. Б. Романова. – Санкт-Петербург : СПбГУ ИТМО, 2007. – 118 с.

Поступила в редакцию 20.02.2023

*Егор Алексеевич Чистяков, ассистент кафедры РЭСК, e-mail: chistyakov@mirea.ru.  
Анастасия Владимировна Морева, студентка 4-го курса, e-mail: moreva.a.v@edu.mirea.ru.  
Лев Павлович Матузин, студент 4-го курса, e-mail: matuzin.l.p@edu.mirea.ru.  
Т.: +7 (499) 600-80-80 (доб. 20524).  
(МИРЭА – Российский технологический университет).*

## INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF SELF-RESONANCES OF ELECTRONIC COMPONENTS AND THE TOPOLOGY OF THE PRINTED CIRCUIT BOARD ON RADIO DEVICES

**E. A. Chistyakov, A. V. Moreva, L. P. Matuzin**

*Currently, for the design of various electronic systems, specialized software products are used that help in the development process. The paper presents an example of developing a radio device in the NI AWR Design Environment. The paper notes that when creating radio devices, it is necessary to take into account not only the influence of the intrinsic resonances of electronic components, but also the influence of the topology of the printed circuit board on its characteristics.*

**Keywords:** NI AWR Design Environment, electromagnetic simulation, resonant frequencies, s-parameters, voltage standing wave ratio, PCB layout.

### References

1. Boikov K. A. Radiosensory diagnostics of signal integrity in-circuit and peripheral architecture of microprocessor devices / K. A. Boikov, M. S. Kostin, G. V. Kulikov // Russian Technological Journal. – 2021. – Vol. 9(4). – P. 20–27. – DOI : 10.32362/2500-316X-2021-9-4-20-27.
2. Kostin M. S. Technical Methods and Facilities of Printed-Film Topology Reengineering of Radio-Electronic Products / M. S. Kostin, D. S. Vorunichev, V. M. Vikulov // Journal of Communications Technology and Electronics. – 2019. – Vol. 64. – № 3. – P. 193–197. – DOI : 10.1134/S1064226919020098.

3. Kostin M. S. Ultra high frequency devices and modules: Textbook / M. S. Kostin, A. D. Yarlykov. – Moscow ; Vologda : Infra-engineering, 2022. – 400 p.
4. Fetisov V. S. Tutorial on automated development of printed circuit boards: Textbook / V. S. Fetisov. – Ufa : FOTON, 2012. – 88 p.
5. Automated design of printed circuit boards made by electronic computer -aided design (cad) with the next using in cnc-machine / K. Kolesnyk, A. Łukaszewicz, V. Dutka [et. al.]. – 2022 – Vol. 4. – P. 9–16. – DOI : 10.23939/cds.
6. Mitzner K. Complete PCB design using OrCAD Capture and PCB editor / K. Mitzner. – Amsterdam ; Boston ; Heidelberg ; London ; New York ; Oxford Paris ; San Diego ; San Francisco ; Singapore ; Sydney ; Tokyo : Elsevier Inc, 2009. – 488 c.
7. Designing printed circuit board in CAD PCB Artist: guidelines on the discipline «Computer-aided design and design of devises and systems» / compilers: Vorobyev S. V., Stepanov S. K. – St. Petersburg : ETU LETI, 2015. – 32 c.
8. Ivanova N. Y. Design of printed circuit boards in CAD P-CAD-2002. Toolkit / N. Y. Ivanova, E. B. Romanova. – St. Petersburg : St. Petersburg State University ITMO, 2007. – 118 p.

*Egor Alekseevich Chistyakov, assistant of Department of RSC, e-mail: chistyakov@mirea.ru.*

*Anastasiya Vladimirovna Moreva, 4th year student, e-mail: moreva.a.v@edu.mirea.ru.*

*Lev Pavlovich Matuzin, 4th year student, e-mail: matuzin.l.p@edu.mirea.ru.*

*Tel.: +7 (499) 600-80-80 (ext. 20524).*

*(MIREA – Russian Technological University).*