

УДК 621.372.54

Селективные свойства полиномиальных фильтров*

В.П. РАЗИНКИН¹, А.Г. ВИХОРЕВ², К.Я. АУБАКИРОВ³, А.Д. МЕХТИЕВ⁴

¹ 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, д. т. н., профессор, e-mail: razinkin_vp@mail.ru

² 630087, РФ, г. Новосибирск, ул. Новогодняя, 28/1, ООО «НПП Триада-ТВ», ведущий специалист, e-mail: vh@sib.mail.ru

³ 630078, РФ, г. Новосибирск, ул. Пархоменко, 9, Сибирская государственная геодезическая академия, к. т. н., e-mail: auvera@mail.ru

⁴ 10027, Республика Казахстан, г. Караганда, бульвар Мира, 56, Карагандинский государственный технический университет, к. т. н., e-mail: barton.kz@mail.ru

В данной работе приводится описание методики оценки селективных свойств баттервортовских, чебышевских и эллиптических фильтров на основе предложенного интегрального критерия в виде средней крутизны ската амплитудно-частотной характеристики (АЧХ). Разработанная методика расчета средней крутизны ската АЧХ полиномиальных фильтров предназначена для использования в компьютерных системах автоматизированного проектирования высокочастотных фильтров для радиотехнических систем и устройств различного назначения, выполненных в сосредоточенном и распределенном элементном базисе. Средняя крутизна ската АЧХ представляет собой функционал, который определяется с помощью аналитических выражений или процедур численного дифференцирования и интегрирования. Для математического описания АЧХ фильтров произвольного порядка использованы полиномы Баттерворта и Чебышева, что дает возможность на первоначальном этапе определения требуемого порядка фильтра отказаться от нахождения номинальных значений параметров реактивных элементов. В работе приведены расчетные соотношения, позволяющие провести конкретное количественное сравнение селективных свойств баттервортовских, чебышевских и эллиптических полосовых фильтров вблизи полосы пропускания. Установлено, что в полосе частот заграждения текущее значение крутизны ската АЧХ асимптотически стремится к постоянной величине. Это позволило оценить потенциальные возможности по селективности различных видов полиномиальных фильтров. Актуальность сформулированного интегрального критерия для оценки селективных свойств и методики его расчета обусловлена необходимостью использования в компьютерных интерактивных системах синтеза высокочастотных фильтров аналитических и численных методов вместо графических и табличных методов, применявшихся ранее.

Ключевые слова: полиномиальный фильтр, эллиптический фильтр, фильтр-прототип, селективность, амплитудно-частотная характеристика, крутизна ската амплитудно-частотной характеристики, численное интегрирование, полоса пропускания, полоса заграждения, коэффициент передачи

ВВЕДЕНИЕ

Частотно-избирательные устройства, в состав которых входят фильтры различного типа, являются одним из основных видов функциональных элементов радиотехники, систем связи и телевидения. Следует отметить, что для приемо-передающих систем с цифровыми методами модуляции, обладающих высокой спектральной эффективностью и помехоустойчивостью, необходимы высокоселективные фильтры нового поколения. Повышенная селективность

* Статья получена 10 апреля 2014 г.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках базовой части государственного задания, тема проекта: Теория построения и практическая реализация широкополосных микроволновых устройств, предназначенных для использования в измерительном оборудовании цифровых систем телевидения, связи и телекоммуникаций, включая вычислительные системы.

фильтров требуется также для выполнения требований электромагнитной совместимости при одновременной работе большого количества радиопередающих устройств для подавления на заданном уровне внеполосных спектральных составляющих. В настоящее время при синтезе полиномиальных фильтров нижних, верхних частот (ФНЧ, ФВЧ) или полосовых фильтров (ПФ) необходимо выбрать структуру и определить порядок фильтра, который обеспечит заданную селективность. В большинстве известных методик синтеза фильтров [1–3] для этого используются графические или табличные методы, которые неудобны и практически неприемлемы при работе в современных компьютерных системах автоматизированного проектирования (САПР). В связи с этим актуальной задачей является формулировка критерия и разработка аналитической методики оценки селективных свойств полиномиальных фильтров, выполненных в сосредоточенном и распределенном элементном базисе. Это позволит осуществить полностью автоматизированный компьютерный синтез фильтров с требуемыми селективными свойствами.

1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Для разработки методики оценки селективных свойств различного типа полиномиальных фильтров, выполненных в сосредоточенном элементном базисе, воспользуемся описанием частотных зависимостей их коэффициента передачи по мощности на основе полиномов Баттерворта, Чебышева и дроби Золотарева. Это дает возможность в аналитическом виде провести сравнение селективных свойств указанного типа фильтров любого порядка без нахождения номинальных значений реактивных элементов фильтра и проведения схемотехнического моделирования в частотной области [3–5]. Отметим, что при согласованных нагрузках на входе и выходе фильтра, коэффициент передачи по мощности и по напряжению, выраженные в дБ, численно равны друг другу. В общем случае коэффициент передачи по мощности для полиномиальных фильтров описывается соотношением

$$K(\Omega) = 10 \cdot \lg \frac{1}{1 + \varepsilon^2 \cdot \varphi^2(\Omega)}, \quad (1)$$

где ε – уровень пульсации коэффициента передачи в полосе пропускания; $\varphi(\Omega)$ – дробно-рациональная функция фильтрации с вещественными коэффициентами, в качестве которой могут использоваться указанные выше виды полиномов.

Исходя из сказанного, запишем соотношения для коэффициента передачи по мощности (дБ) соответственно нормированного низкочастотного баттервортовского и чебышевского фильтра-прототипа:

$$K'_p(\Omega) = 10 \cdot \lg \frac{1}{1 + \varepsilon^2 \cdot \Omega^{2n}} \quad (\text{фильтр Баттерворта}), \quad (2)$$

$$K''_p(\Omega) = 10 \cdot \lg \frac{1}{1 + \varepsilon^2 \cdot T_n^2(\Omega)} \quad (\text{фильтр Чебышева}), \quad (3)$$

где $T_n(\Omega)$ – полином Чебышева первого рода n -го порядка; $\Omega = \frac{\omega}{\omega_c}$ – нормированная частота; ω_c – частота среза фильтра нижних частот.

Графики зависимостей (2) и (3), представляющие собой амплитудно-частотные характеристики (АЧХ), для различных порядков баттервортовских и чебышевских нормированных низкочастотных фильтров-прототипов приведены на рис. 1. На рис. 2 показаны графики разности АЧХ в дБ баттервортовских и чебышевских фильтров-прототипов одинакового порядка. Из анализа графиков рис. 1 и 2 следует, что, например, для фильтров 5 порядка ($n = 5$) при одинаковой электрической схеме фильтра чебышевский метод синтеза параметров элементов

в области нормированных частот $\Omega > 2$ позволяет получить выигрыш по селективным свойствам или фильтрации более 20 дБ.

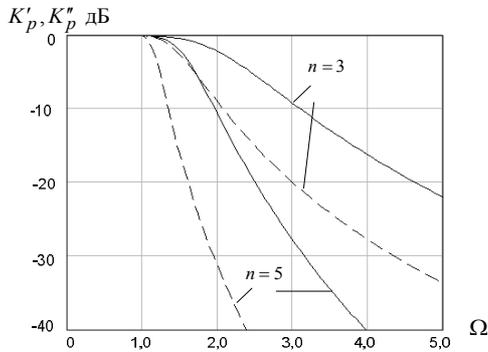


Рис. 1. АЧХ чебышевского и баттервортовского низкочастотных фильтров-прототипов (пунктирная и сплошная линии соответственно)

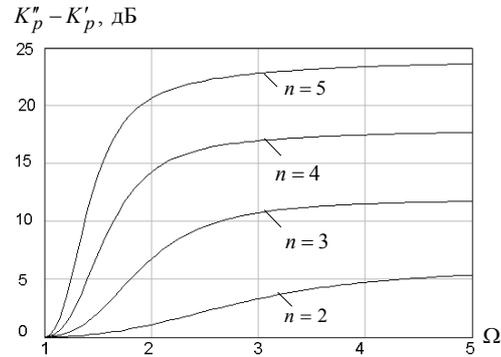


Рис. 2. Разность АЧХ чебышевских и баттервортовских фильтров-прототипов различного порядка

Отметим также, что разность коэффициентов передачи по мощности чебышевского и баттервортовского фильтров одного и того же порядка и имеющих монотонную форму АЧХ в полосе заграждения с увеличением частоты Ω асимптотически стремится к постоянной величине. Это свойство позволяет определить максимальный выигрыш по селективности чебышевских фильтров по сравнению с баттервортовским фильтром.

Поскольку расчет фильтров с помощью графиков является наглядным, но неудобным, для определения селективных свойств целесообразно использовать крутизну ската АЧХ. Так как крутизна скатов АЧХ рассчитывается за полосой пропускания ($\Omega > 1$), то в соотношении (3) подставим полином Чебышева, выраженный через гиперболические функции

$$T_n(\Omega) = ch(n \cdot arcch(\Omega)). \tag{4}$$

Проведя дифференцирование выражений (2) и (3) по переменной Ω , получим выражения для крутизны ската АЧХ баттервортовского и чебышевского низкочастотного фильтра-прототипа:

$$S_b(\Omega) = \frac{10}{\ln(10)} \cdot \frac{\varepsilon^2 \cdot 2n \cdot \Omega^{2n-1}}{1 + \varepsilon^2 \Omega^{2n}}, \tag{5}$$

$$S_c(\Omega) = \frac{10}{\ln(10)} \cdot \frac{2\varepsilon^2 T_n(\Omega)}{1 + \varepsilon^2 T_n^2(\Omega)} \cdot sh(n \cdot arcch(\Omega)) \cdot \frac{n}{\sqrt{\Omega^2 - 1}}, \tag{6}$$

где $S_b(\Omega) = \frac{dK'_p(\Omega)}{d\Omega}$ – крутизна АЧХ баттервортовского фильтра-прототипа;

$S_c(\Omega) = \frac{dK''_p(\Omega)}{d\Omega}$ – крутизна АЧХ чебышевского фильтра-прототипа.

Результаты расчета частотной зависимости крутизны ската АЧХ по соотношениям (5) и (6) приведены на рис. 3. Как видно из рассмотрения рис. 3, в области частот $\Omega > 1$ крутизна ската АЧХ рассматриваемого типа фильтров с монотонной формой АЧХ в полосе заграждения имеет один экстремум в виде максимума. При бесконечно больших значениях частоты $\Omega \rightarrow \infty$ из соотношений (5) и (6) следует, что $\lim_{\Omega \rightarrow \infty} (S_b(\Omega)) = 0$ и $\lim_{\Omega \rightarrow \infty} (S_c(\Omega)) = 0$. Поэтому в качестве интегрального критерия для оценки селективных свойств полиномиальных фильтров раз-

личного порядка введем среднее значение крутизны ската АЧХ в диапазоне частот ее существенного изменения

$$S_{0b(c)} = \frac{1}{\Omega_s(n) - 1} \int_1^{\Omega_s(n)} |S_{b(c)}(\Omega)| d\Omega, \quad (7)$$

где $\Omega_s(n)$ – константа, которая задает полосу частот для определения среднего значения крутизны ската АЧХ.

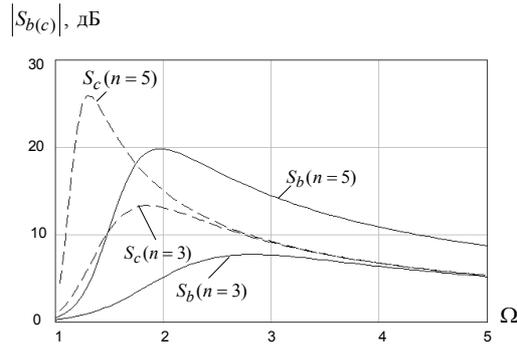


Рис. 3. Частотная зависимость крутизны ската АЧХ для баттервортовских (сплошная линия) и чебышевских (пунктирная линия) низкочастотных фильтров-прототипов

Рассмотрение графиков рис. 3 показывает, что выбор конкретного значения константы $\Omega_s(n)$ в соотношении (7) целесообразно сделать из следующего условия: $\Omega_s(n) \approx (2 \div 3) \cdot \Omega_0(n)$, где $\Omega_0(n)$ – частота, на которой $|S_{b(c)}(\Omega)|$ достигает максимального значения. В этом случае средняя крутизна ската АЧХ определяется в области частот полосы заграждения, где происходит ее существенное изменение.

Анализ соотношения (7) показывает, что средняя крутизна ската АЧХ $S_{0b(c)}$ с математической точки зрения представляет собой функционал и может быть использована в качестве интегрального критерия оценки селективных свойств фильтра-прототипа для выбранного порядка n . Отметим, что для конкретного нахождения крутизны $S_{0b(c)}$ в виде определенного интеграла можно воспользоваться методами численного интегрирования, а текущее значение крутизны $|S_{b(c)}(\Omega)|$ определять с помощью численного дифференцирования. Это связано с тем, что соотношения (5) и (6) являются достаточно сложными и содержат функции различного вида. Такой подход позволяет существенно упростить программное обеспечение при проведении синтеза фильтров. Поэтому в данной работе были применены численные методы дифференцирования и интегрирования, которые широко представлены в современных математических программах и обеспечивают высокую точность расчетов.

Для нормированного низкочастотного фильтра-прототипа средняя крутизна ската АЧХ $S_{0b(c)}$ имеет размерность [дБ]. Если для ФНЧ задано конкретное значение частоты среза f_c , то средняя крутизна ската АЧХ такого фильтра равна $S_{\text{ФНЧ}} = \frac{S_0}{2\pi f_c} \left[\frac{\text{дБ}}{\text{Гц}} \right]$.

На основе компьютерных расчетов по соотношению (7) была составлена табл. 1 для значений средней крутизны ската АЧХ баттервортовских S_{0b} и чебышевских S_{0c} фильтров различного порядка.

Таблица 1

Значения средней крутизны ската АЧХ баттервортовских, чебышевских и эллиптических низкочастотных фильтров-прототипов различного порядка n

n	2	3	4	5	6	7	8	9
S_{0b} , дБ	2,3	5,5	9,4	13,8	18,5	23,0	27,0	29,9
S_{0c} , дБ	3,2	8,4	15,7	25,2	37,1	51,0	68,8	89,7

Сравнительный анализ численных значений средней крутизны ската АЧХ полиномиальных фильтров Баттерворта и Чебышева показывает, что с ростом порядка фильтра существенное преимущество по фильтрующим свойствам имеют чебышевские фильтры. Например, чебышевские фильтры, имея точно такую же схемотехническую реализацию, как и баттервортовские фильтры, обеспечивают увеличение средней крутизны ската АЧХ на 18,6 дБ при $n = 6$. На основе данных табл. 1 была составлена табл. 2, показывающая выигрыш по средней крутизне АЧХ (дБ) чебышевских фильтров различного порядка n по отношению к баттервортовским фильтрам того же порядка.

Таблица 2

Выигрыш по средней крутизне ската АЧХ чебышевских и фильтров-прототипов различного порядка (n) по отношению к баттервортовскому фильтру-прототипу

n	2	3	4	5	6	7	8	9
$S_{0c} - S_{0b}$, дБ	0,9	2,9	6,3	11,4	18,6	28,4	41,8	59,8

Для полосно-пропускающего фильтра средняя крутизна ската АЧХ определяется коэффициентом преобразования полосы частот [2]

$$S_{\text{ППФ}} = 2S_{\text{ФНЧ}} / Q, \quad (8)$$

где $S_{\text{ФНЧ}}$ – выражение крутизны ската АЧХ для ФНЧ с полосой пропускания Δf ; Q – коэффициент преобразования полосы частот, который равен $Q = \frac{f_0}{\Delta f}$.

Соотношение для коэффициента преобразования полосы частот получено на основе использования частотного преобразования для ППФ и связи между центральной частотой f_0 и полосой пропускания фильтра Δf :

$$f_0 = Q \cdot \Delta f, \quad \Omega = \frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f} \approx 2 \cdot \frac{f - f_0}{f_0}. \quad (9)$$

Кроме того, в соотношении (8) учтено, что для ППФ

$$\left. \frac{d\Omega}{df} \right|_{f=f_0+\Delta f} = \frac{1}{f_0} + \frac{f_0}{f^2} \Big|_{f=f_0+\Delta f} = \frac{1}{f_0} + \frac{f_0}{(f_0 + \Delta f)^2} \approx \frac{2}{f_0}.$$

Из выражения (9) следует, что при $Q > 2$ в ППФ по сравнению с ФНЧ, имеющему такую же полосу пропускания, начинает уменьшаться средняя крутизна ската АЧХ. С физической точки зрения это можно интерпретировать следующим образом. При фиксированной частоте среза ФНЧ f_c , равной полосе пропускания ППФ $\Delta f = f_c$ с ростом коэффициента преобразования полосы частот Q , которая пропорциональна f_0 , крутизна ската АЧХ уменьшается. Поэтому в дециметровом и сантиметровом диапазоне длин волн для обеспечения заданной величины крутизны ската АЧХ требуется увеличивать порядок ППФ.

Для эллиптических фильтров в качестве функции фильтрации $\varphi(\Omega)$ берется дробь Чебышева, которая определяется соотношением [2, 3]

$$R_n(\Omega) = a_1 \Omega^s \prod_v \frac{\Omega_{nv}^2 - \Omega^2}{\Omega_{pv}^2 - \Omega^2}, \quad (10)$$

где $a_1 = \prod_v (\Omega_{pv}^2 - 1) / (\Omega_{nv}^2 - 1)$; $v = 1, 2, \dots, (m-s)/2$; $s = 0$ – для четных значений n ; $s = 1$ – для нечетных значений n ; $\Omega_s = \sqrt{\Omega_{pv} \Omega_{nv}}$ – нормированная граничная частота по заданному уровню затухания в полосе заграждения.

Текущее значение крутизны ската АЧХ для эллиптического фильтра с учетом соотношений (1) и (10) равно

$$S_e(\Omega) = \frac{d(10 \log K_p(\Omega))}{d\Omega} = \frac{10}{\ln(10)} \cdot \frac{2\varepsilon^2 R_n(\Omega)}{1 + \varepsilon^2 R_n^2(\Omega)} \cdot \frac{d}{d\Omega} [R_n(\Omega)]. \quad (11)$$

Далее записываем уравнение для нахождения нормированной граничной частоты

$$10 \log \frac{1}{1 + \varepsilon^2 R_n^2(\Omega_s)} = A_s, \quad (12)$$

где A_s (дБ) – заданный уровень затухания в полосе заграждения.

При численном решении уравнения (11) с учетом монотонности функции $K(\Omega)$ вблизи полосы пропускания в качестве начального приближения целесообразно выбрать $\Omega_{s0}(n) = 1$. После этого находится ближайшее к начальному приближению значение $\Omega_s(n)$. С учетом сказанного, выражение для средней крутизны ската АЧХ эллиптического фильтра имеет вид

$$S_{0e} = \frac{1}{\Omega_s(n) - 1} \int_1^{\Omega_s(n)} \left| \frac{10}{\ln(10)} \cdot \frac{2\varepsilon^2 R_n(\Omega)}{1 + \varepsilon^2 R_n^2(\Omega)} \cdot \frac{d}{d\Omega} [R_n(\Omega)] \right| d\Omega. \quad (13)$$

Расчеты по соотношению (12) с помощью процедур численного дифференцирования и интегрирования в компьютерных математических программах для эллиптических фильтров второго – девятого порядков показали, что происходит увеличение средней крутизны ската АЧХ на 20...30 дБ по отношению к чебышевским фильтрам такого же порядка.

Следует отметить, что предложенный подход для определения крутизны скатов АЧХ в полной мере применим для полиномиальных фильтров, выполненных как в сосредоточенном элементном базисе, так и для фильтров, выполненных в распределенном элементном базисе. Это объясняется использованием обобщенного соотношения (1), которое инвариантно к любому типу элементного базиса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе в аналитическом виде определена текущая крутизна ската АЧХ для баттервортовских, чебышевских и эллиптических фильтров произвольного порядка, что исключает необходимость применения табличных либо графических видов расчета при синтезе фильтров. Сформулирован интегральный критерий оценки селективных свойств различного типа фильтров в виде средней крутизны ската АЧХ, основанный на определении частотного диапазона существенного изменения текущей крутизны ската АЧХ. Предложенный подход не требует определения номинальных значений реактивных элементов фильтра на этапе оценки селективных свойств, что позволяет с его помощью осуществлять автоматизированный компьютерный синтез полиномиальных фильтров с заданным уровнем селективности. Сравнительный анализ численных значений средней крутизны ската АЧХ для различного типа фильтров показал перспективность использования в современных радиотехнических системах, включая сис-

темы цифрового телевидения и связи, эллиптических сосредоточенных и распределенных фильтров, имеющих преимущество по селективности 20...30 дБ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ханзел Г.Е. Справочник по расчету фильтров [США, 1969] / пер. с англ. В.А. Старостина; под ред. А.Е. Знаменского. – М.: Сов. радио, 1974. – 288 с.
2. Алексеев Л.В., Знаменский А.Е., Лоткова Е.Д. Электрические фильтры метрового и дециметрового диапазонов. – М.: Связь, 1976. – 286 с.
3. Разинкин В.П., Хрусталева В.А., Матвеев С.Ю. Широкополосные управляемые СВЧ устройства высокого уровня мощности: монография. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2008. – 316 с. – (Серия «Монография НГТУ»).
4. Абросимов А.А., Разинкин В.П. Эллиптические фильтры на сосредоточенных элементах // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2012. – № 2, ч. 2. – С. 29–31.
5. Пат. 2414024 Российская Федерация, МПК⁸ Н 01 Р 1/00. Узкополосный фильтр / В.П. Разинкин, В.Н. Удалов, Д.С. Матвеев; патентообладатель ГОУ ВПО «Новосиб. гос. техн. ун-т». – № 2009115096/07; заявл. 20.04.2009; опубл. 10.03.2011, Бюл. № 7. – 9 с.
6. Разинкин В.П., Абросимов А.А. Основы цифровой аудио- и видеотехники. Ч. 2: учеб. пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – 84 с.
7. Разинкин В.П., Абросимов А.А. Полосовые фильтры с эллиптическими характеристиками // Научный вестник НГТУ. – 2012. – № 1 (46). – С. 149–156.
8. Разинкин В.П., Абросимов А.А., Мехтиев А.Д. Анализ переходных процессов в нестационарных частотно-избирательных цепях // Научный вестник НГТУ. – 2012. – № 2 (47). – С. 115–120.
9. Разинкин В.П., Хрусталева В.А., Матвеев С.Ю. Широкополосные управляемые СВЧ устройства высокого уровня мощности. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2008. – 310 с. – (серия «Монография НГТУ»).
10. Пат. 2185693 Российская Федерация, МПК⁸ Н 01 Р 1/20, Н 01 Р 7/00. Узкополосный СВЧ фильтр / С.Ю. Матвеев, В.П. Разинкин; патентообладатель Новосибир. гос. техн. ун-т. – № 2000111942/09; заявл. 11.05.2000; опубл. 20.07.2002, Бюл. № 20.
11. Razinkin V.P., Abrosimov A.A. Phase-Shift Keying Device // International Siberian Workshops on Electron Devices and Materials EDM 2011: Proc. of the 10th Annu. Intern. conf., Erlagol, Altai, Russia, 2011. – Novosibirsk: NSTU Publ., 2011. – P. 186–188.

Разинкин Владимир Павлович, доктор технических наук, профессор Новосибирского государственного технического университета. Основные направления научных исследований – исследование и разработка микроволновых устройств. Имеет более 150 научных работ, в том числе 2 монографии, 4 учебных пособия, 24 а. с. и патентов. E-mail: razinkin_vp@mail.ru.

Вихорев Алексей Гергеевич, ведущий специалист ООО «НПП Триада-ТВ»/ Основное направление научных исследований – системы автоматизированного проектирования фильтров СВЧ диапазона. Имеет 10 публикаций. E-mail: vh@sibmail.ru

Аубакиров Константин Якубович, кандидат технических наук, доцент Сибирской государственной геодезической академии. Основное направление научных исследований – проектирование мощных устройств СВЧ. Имеет 36 научных работ. E-mail: auvera@mail.ru

Мехтиев Али Джаваниширович, кандидат технических наук, зав. кафедрой технологии и системы связи Карагандинского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – исследование и разработка микроволновых устройств для систем связи. Имеет более 60 публикаций, в том числе 5 монографий. E-mail: barton.kz@mail.ru.

Selective properties of polynomial filters^{*}

V.P. RAZINKIN¹, A.G. VIKHOREV², K.J. AUBAKIROV³, A.D. MEKTIEV⁴

¹ 630073, the Russian Federation, Novosibirsk, prospect Karla Marksa 20, Novosibirsk state technical University, doctor of technical Sciences, Professor, e-mail: razinkin_vp@mail.ru

² 630087, the Russian Federation, Novosibirsk, Novogodniaya street, 28/1, LLC "NPP Triada-TV", leading specialist, e-mail: vh@sibmail.ru

³ 630078, the Russian Federation, Novosibirsk, Parkhomenko street, 9, Siberian state geodetic Academy, candidate of technical Sciences, e-mail: auvera@mail.ru

⁴ 410027, Republic of Kazakhstan, Karaganda, Boulevard Mira, 56, Karaganda state technical University, candidate of technical Sciences, e-mail: barton.kz@mail.ru

In this paper describes the methods for the assessment of selective properties Butterworth, Chebyshev and elliptic filters based on the proposed integral criterion as an average steepness of the slope of the amplitude-frequency characteristics. Developed the method of calculation of an average steepness of the slope amplitude-frequency characteristic

^{*} Received 10 April 2014.

This work was financially supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation within basic tasks of the state, the project theme is the constructing theory and practical implementation of broadband microwave devices intended for use in the measuring equipment of digital television and telecommunications, including computer systems.

polynomial filters intended for use in computer systems of the automated designing of high-frequency filters for radio-technical systems and devices of various purpose, is made in a concentrated and distributed component basis. Average steepness of the slope of the frequency response is a functional that is defined using analytical expressions or procedures of numerical differentiation and integration. For the mathematical description of the frequency response filters of arbitrary order used polynomials Butterworth and Chebyshev that allows for the initial definition of the desired order of the filter to abandon finding the nominal values of the parameters reactive elements. In this work calculated ratios given allowing to carry out specific quantitative comparison of selective properties Butterworth, Chebyshev elliptical band-pass filters near bandwidth. It is established that in the frequency band current value of a steepness of the slope amplitude-frequency characteristic asymptotically tends to a constant value. This allowed us to assess the potential selectivity of various types of polynomial filters. The relevance formulated integral criterion for assessing the selective properties and methods of its calculation due to the need to use a computer interactive systems, synthesis of high-frequency filters analytical and numerical methods instead of graphical and tabular methods used previously.

Keywords: polynomial filter, cross filter, filter prototype, selectivity, amplitude-frequency characteristic, the steepness of the slope of the amplitude-frequency characteristics, numerical integration, bandwidth, bandwidth boom, transfer coefficient

REFERENCES

1. Hansell G.E. Filter design and evaluation. New York, Van Nostrand Reinhold Company, 1969. (Russ. ed.: Khanzel G.E. Spravochnik po raschetu fil'trov. Moscow, Sovetskoye Radio, 1974. 288 p.)
2. Alekseev L.V., Znamenskii A.E., Lotkova E.D. *Elektricheskie fil'try metrovogo i detsimetrovogo diapazonov* [Electric filters VHF and UHF]. Moscow, Svyaz Publ., 1976. 286 p.
3. Razinkin V.P., Khrustalev V.A., Matveev S.Yu. *Shirokopolosnye upravlyaemye SVCh ustroystva vysokogo urovnya moshchnosti. Monografiya* [Controlled Broadband high power level Microwave devices. Monograph]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2008. 316 p.
4. Abrosimov A.A., Razinkin V.P. Ellipticheskie fil'try na sosredotochennykh elementakh [Lumped-element elliptic filters]. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki – Proceedings of TUSUR*, 2012, no. 2, pt. 2, pp. 29-31.
5. Razinkin V.P., Udalov V.N., Matveev D.S. *Uzkopolosnyi fil'tr* [Narrow-Band Filter]. Patent RF, no. 2414024, 2011.
6. Razinkin V.P., Abrosimov A.A. *Osnovy tsifrovoi audio- i videotekhniki. Ch. 2* [A fundamentals of digital audio and video equipment. Pt. 2]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2011. 84 p.
7. Razinkin V.P., Abrosimov A.A. Polosovye fil'try s ellipticheskimi kharakteristikami [Elliptic Bandpass Filters]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science Bulletin of Novosibirsk State Technical University*, 2012, no. 1 (46), pp. 149-156.
8. Razinkin V.P., Abrosimov A.A., Mekhtiev A.D. Analiz perekhodnykh protsessov v nestatsionarnykh chastotno-izbiratel'nykh tsepyakh [Analysis of transient processes in non-stationary frequency-selective circuits]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science Bulletin of Novosibirsk State Technical University*, 2012, № 2 (47), pp. 115-120.
9. Razinkin V.P., Khrustalev V.A., Matveev S.Yu. *Shirokopolosnye upravlyaemye SVCh ustroystva vysokogo urovnya moshchnosti* [Controlled broadband microwave high power devices]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2008. 310 p. Monograph series of NSTU Publ.
10. Razinkin V.P., Matveev S.Yu. *Uzkopolosnyi SVCh fil'tr* [Narrow-Band Shf-Filter]. Patent RF, no. 2185693, 2002.
11. Razinkin V.P., Abrosimov A.A. Phase-Shift Keying Device based on tunable filter. International Siberian Workshops on Electron Devices and Materials EDM 2011. Proceedings of the 10th Annual International Conference, Erlagol, Altai, Russia, 2011. Novosibirsk, NSTU Publ., 2011, pp. 186-188.