



УДК 004.94
ГРНТИ 28.17.23

ВЫБОР ФИЛЬТРОВОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ УСТРОЙСТВА РЕЖЕКЦИИ ПОМЕХИ И АНАЛИЗ РАБОТЫ УСТРОЙСТВА ЗАЩИТЫ

М.М. СТУЧИНСКАЯ

ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)

Предложена методика выбора устройства режекции, как составной части устройства защиты от узкополосных помех на основе парных сравнений. Рассмотрена работа устройства с помощью имитационного моделирования в пакете Simulink программы MATLAB и произведен анализ главных показателей качества. Решена задача многокритериального выбора устройства режекции помех, обеспечивающего приоритетные значения по основным рассматриваемым показателям.

Ключевые слова: помехи, фильтрация сигналов, линейная частотная модуляция, метод анализа иерархий, режекторный фильтр.

SELECTING FILTER CHARACTERISTICS OF THE ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE REJECTION DEVICE AND ANALYSIS OF THE PROTECTION DEVICE WORK

M.M. STUCHINSKAYA

MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)

A method for selecting a rejection device as an integral part of a device for protecting against narrowband interference based on paired comparisons is proposed. The operation of the device using simulation in the Simulink package of the MATLAB program is considered and the main quality indicators are analyzed. The problem of multicriteria choice of an interference rejection device providing priority values for the main indicators under consideration was solved.

Keywords: interference, signal filtering, linear frequency modulation, hierarchy analysis method, rejection filter.

Введение. Повышение помехоустойчивости и эффективности разрабатываемых систем передачи и обработки информации является одной из важнейших проблем современной теории и техники связи, науки и промышленности. В настоящее время исследуются методы и пути создания и реализации устройств защиты от сосредоточенных помех в системах связи.

Актуальность. При передаче информации наибольшие искажения сигнала вызывают помехи различного рода, например, от одновременно работающих радиосредств и аппаратуры, а также преднамеренные воздействия, направленные на снижение качества приема сигналов противника или на вывод устройств из строя. Поэтому в настоящее время вводятся разработки устройств защиты систем связи от помех. Таким образом, защита радиоустройств различного применения от помех, их преднамеренного и непреднамеренного характера является одной из важнейших задач.

В рассматриваемом случае задача фильтрации сигнала с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) заключается в режекции узкополосной помехи для условий на рисунке 1 [1].

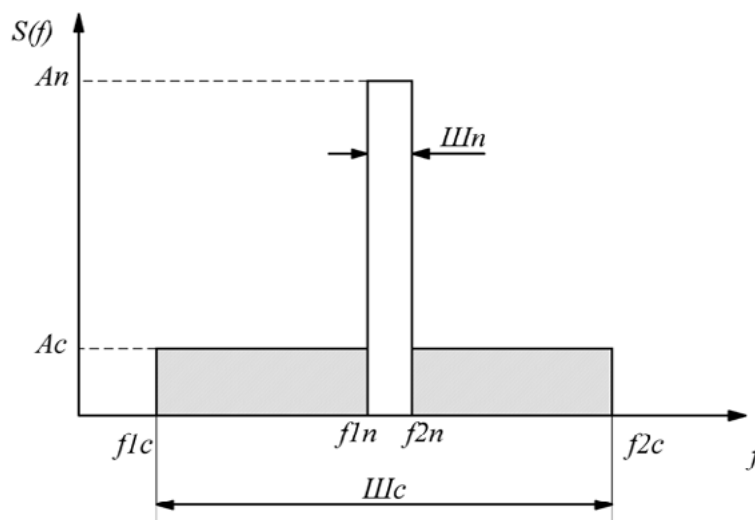


Рисунок 1– Взаимное расположение сигнала и помехи

На рисунке 1 обозначено следующее:

1. ширина полосы сигнала

$$2\Delta F_c = f_{2c} - f_{1c}, \quad (1)$$

где f_{1c} , f_{2c} – соответственно левая и правая граничные частоты спектра сигнала,

2. ширина полосы помехи

$$2\Delta F_n = f_{2n} - f_{1n}, \quad (2)$$

где f_{1n} , f_{2n} – соответственно левая и правая граничные частоты спектра помехи,

3. уровни амплитуд спектральных составляющих сигнала A_c и помехи A_n .

Условные значения параметров в качестве исходных данных для рационального выбора в задаче проектирования указаны в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры сигнала и помехи

Тип сигнала	ЛЧМ
Длительность	1 мкс
f_{1c}	100 МГц
f_{2c}	200 МГц
Тип помехи	синусоидальный сигнал
f_{1n}	150 МГц
f_{2n}	151 МГц

Ширина спектра сигнала равна:

$$2\Delta F_c = f_{2n} - f_{1n} = 100 \text{ МГц}, \quad (3)$$



тогда с учетом длительности база ЛЧМ составит:

$$B = 2\Delta F_c \cdot t_c = 100 \times 10^6 \cdot 1 \times 10^{-6} = 100 \text{ МГц}, \quad (4)$$

что позволяет сделать вывод о рассмотрении широкополосного сигнала.

Ширина спектра помехи :

$$2\Delta F_n = f_{2n} - f_{1n} = 1 \text{ МГц}, \quad (5)$$

тогда, принимая во внимание значения (3) и (5) соотношение ширины спектра сигнала и помехи составит:

$$\frac{2\Delta F_c}{2\Delta F_n} = \frac{100}{1} = 100, \quad (6)$$

что соответствует условию действия узкополосной помехи на фоне сигнала.

Область рационального выбора характеристик режекции фильтровых устройств определена в таблице 2.

Таблица 2 – Область рационального выбора

Тип устройства	цифровое
Требования по энергопотреблению	максимально низкое
Тип импульсно характеристики	бесконечная (БИХ)
Условия режекции	на входе радиотрактов
Группа рационального выбора характеристик фильтровых устройств	а) Баттерворта б) Чебышева в) Чебышева инверсная г) Золотарева-Кауэра

Выбор варианта цифрового устройства обусловлен относительно низким значением верхней частотной границы сигнала и гибкостью настройки цифровых схем в масштабе времени, близкому к реальному.

Максимально жесткие требования к размерам устройства и энергопотреблению обосновывает выбор цифровых схем с бесконечной импульсной характеристикой (БИХ) по отношению к цифровым схемам с конечной импульсной характеристикой (КИХ).

На основании таблицы 2 составлена иерархия принятия решения (рисунок 2).

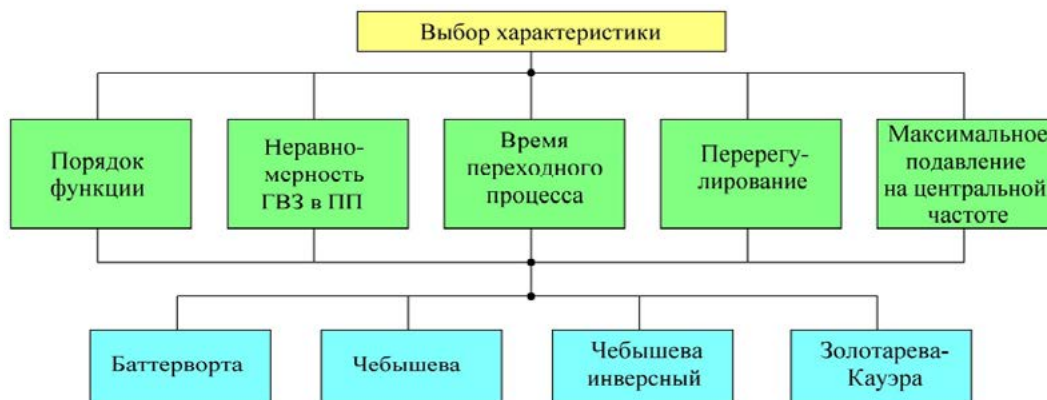


Рисунок 2 – Иерархия принятия решения



Нижняя часть иерархии принятия решения включает альтернативные варианты из таблицы 2. Средняя часть иерархии принятия решения включает группу показателей многокритериального выбора БЗ, рассмотрим их подробнее.

Порядок функции цифрового устройства режекции напрямую определяет степень энергопотребления (характеризуется количеством вентиляторов цифровой схемы) и требуемую площадь на кристалле. Критерием рационального выбора при сравнительной оценке альтернативных вариантов является минимум порядка функции.

Неравномерность характеристики группового времени запаздывания (ГВЗ) в полосе пропускания (ПП) характеризует степень искажения сигнала при условии подключения контура режекции. Подключение контура режекции нарушает условие согласованной фильтрации, заключающееся в том, что фазочастотная характеристика (ФЧХ) будет отличаться от требуемой, и ухудшает отношение сигнал/шум (ОСШ). Критерием рационального выбора при сравнительной оценке является минимум неравномерности ГВЗ.

Перерегулирование - отношение разности максимального значения переходной характеристики и ее установившегося значения к величине установившегося значения, характеризует запасы устойчивости.

Время переходного процесса t_{III} характеризует скорость обработки информации системой. Определяется как интервал времени от начала процесса до момента, когда отклонение выходной величины от установившегося значения $h_{\text{уст}}$ становится меньше значения Δ . Для общепромышленных систем $\Delta = 0,05 \cdot h_{\text{уст}}$.

Максимальное подавление на центральной частоте $a_{\text{min}}(f_0)$ является дополнительным фактором качества режекции и минимизирует влияние помехи. Критерием выбора при сравнительной оценке вариантов является максимум подавления на центральной частоте.

На основе взаимного расположения сигнала и помехи (рисунок 1), параметров сигнала и помехи (таблица 1), области рационального выбора (таблица 2) определены технические требования к устройству режекции на рисунке 3.

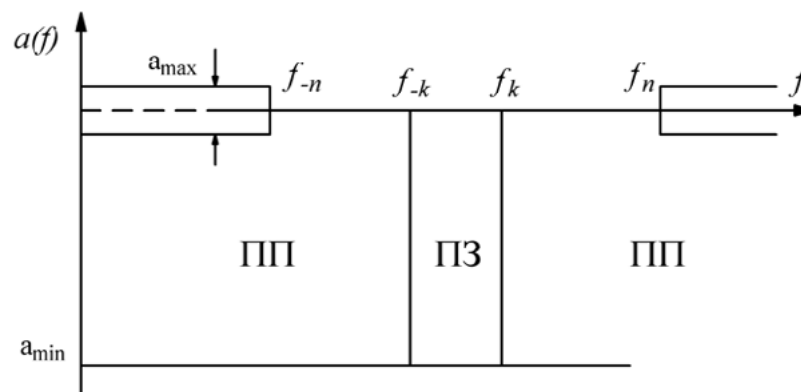


Рисунок 3 – Параметры характеристики затухания РФ

На рисунке 3 обозначено:

- 1 a_{min} , Дб – максимальная неравномерность в ПП;
- 2 a_{max} , Дб – минимальное затухание в ПЗ;
- 3 $f_{-э}$ – нижняя граница ПП;
- 4 $f_{э}$ – верхняя граница ПП;



$5 f_{-k}$ – нижняя граница ПЗ;

$6 f_k$ – верхняя граница ПЗ.

Определим требования к устройству режекции в таблице 3.

Таблица 3 – Требования к РФ

Параметр	a_{\min}	a_{\max}	$f_{-\text{э}}$	f_{-k}	f_k	$f_{\text{э}}$
Значение	60 дБ	0.1 дБ	149 МГц	149.5 МГц	150.5 МГц	151 МГц

Минимальное затухание определено из условия подавления помехи до 0.1 мкВ:

$$20 \log \left(\frac{100 \text{ мкВ}}{0,1 \text{ мкВ}} \right) = 60 \text{ дБ.} \quad (7)$$

Остальные параметры определены согласно взаимному расположению спектров сигнала и помехи и минимального искажения в ПП.

Разработанная модель представлена на рисунке 4. Источником сигнала является блок Chirp, который генерирует синусоидальный сигнал, частота которого линейно возрастает в течение времени – сигнал ЛЧМ. Имитацию узкополосной помехи воспроизводит блок Sine Wave, генерирующий синусоидальную волну. После суммирования в блоке Add, сумма помехи и полезного сигнала поступает на Scope (осциллограф), после на входы Digital Filter Design – цифровые фильтры и на Scope3.

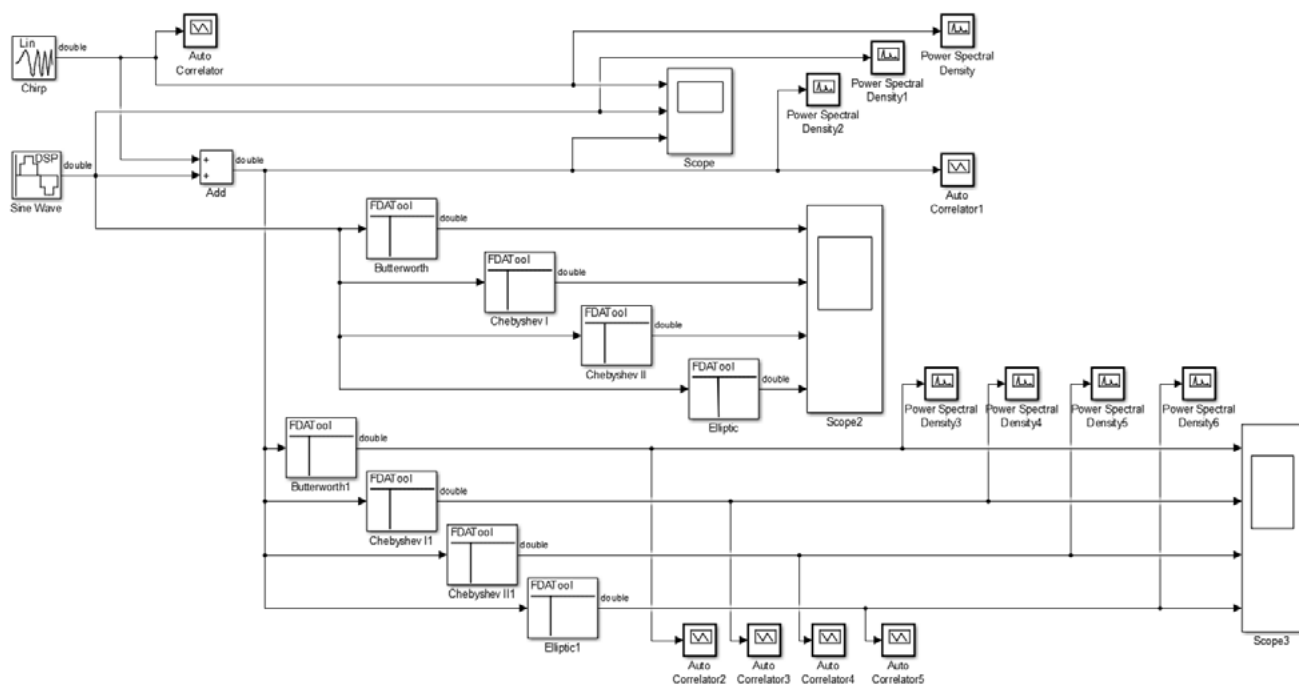


Рисунок 4 – Имитационная модель

Для анализа полученных данных используется Auto Correlator (автокорреляционные функции), Power Spectral Density для просмотра АЧХ и ФЧХ.



С помощью разработанной имитационной модели проведем анализ работы устройства защиты. Настроим все блоки модели, уставим оговоренные параметры и запустим процесс моделирования [2].

Неравномерность ГВЗ в ПП ($\Delta f_{гр}$) получена с помощью вкладки Group delay response, результат представлен на рисунке 5 для фильтра Баттерворта (аналогично для других фильтров). С помощью графика определяется минимальное f_{min} и максимальное f_{max} значение в полосе пропускания фильтра. Неравномерность ГВЗ определяется по формуле $\Delta f_{гр} = f_{max} - f_{min}$, полученные результаты занесены в таблицу 4.

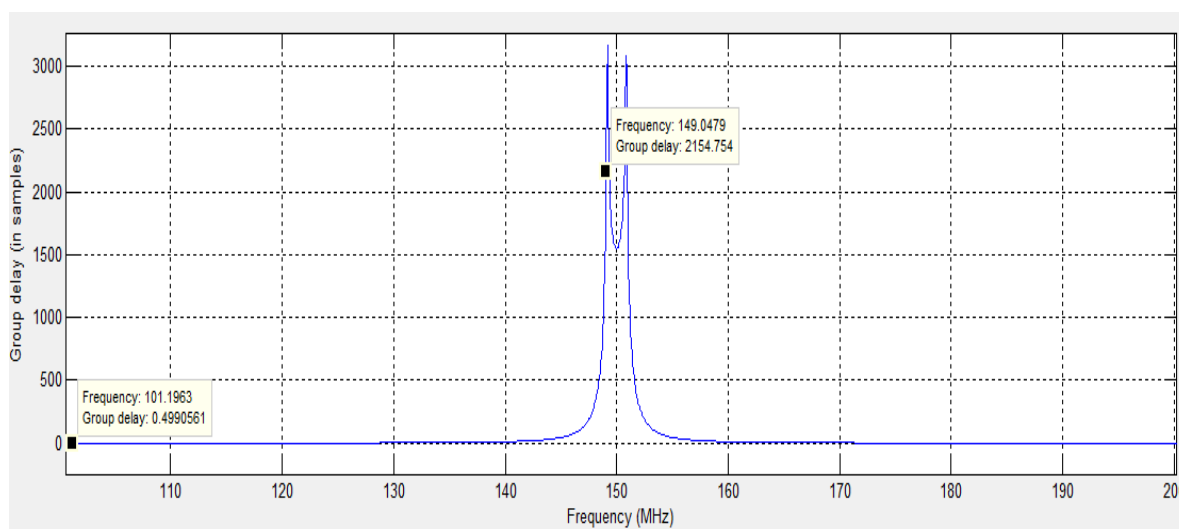


Рисунок 5 – Неравномерность ГВЗ в ПП для фильтра Баттерворта

Рассмотрена переходная характеристика фильтров (step response) для описания критериев время переходного процесса и перерегулирования, полученные данные занесены в таблицу 4.

Максимальное подавление на центральной частоте $a_{min}(f_0)$ определено в ходе анализа блока Digital Filter Design (таблица 4).

С помощью блока осциллографа получен широкополосный сигнал, помеха и зашумленный полезный сигнал (рисунок 6).

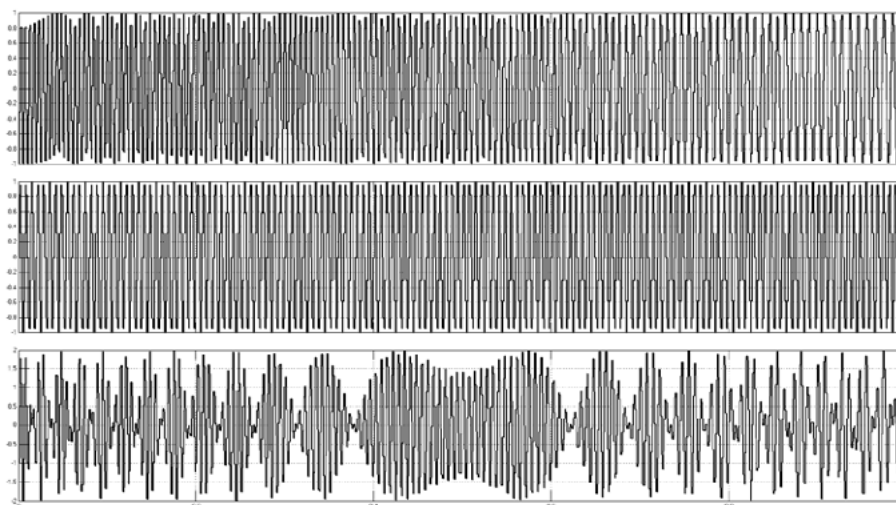


Рисунок 6 – Осциллограф Scope



Полученные данные сведены в таблицу 4.

Таблица 4 – Анализ результатов моделирования

Тип режекторного фильтра	Критерии оценки				
	N	$\Delta f_{гр}$	$t_{пп}$	$\delta, \%$	$a_{min}(f_0)$
Баттерворта	26	2 154	0,028	7,8	370
Чебышева 1 типа	16	3 347	0,026	7	270
Чебышева 2 типа	16	882	0,004	3,3	60
Золотарева-Кауэра	12	2 698	0,008	4	60

где N – порядок фильтра;

$\Delta f_{гр}$ – неравномерность ГВЗ в ПП;

$t_{пп}$, мкс – время переходного процесса;

$\delta, \%$ – перерегулирование;

$a_{min}(f_0)$, Дб – максимальное подавление на центральной частоте.

На основе таблицы 4 можно сделать вывод, что все параметры различны и нет возможности выбрать фильтр, который имел бы наилучший показатель по всем критериям, следовательно, для рационального выбора необходимо воспользоваться методом анализа иерархий (МАИ), созданный Т.Саати [3]. В отличии от идей, изложенных Л.С. Гуткиным [4], об использовании критериев качества, рассматриваемый метод информативнее и нагляднее, а также позволяет производить многокритериальный выбор без численных данных с помощью работы эксперта.

В таблицах 5-9 производится сравнение альтернатив по основным критериям, установленным ранее.

Таблица 5 – Сравнение альтернатив по критерию порядок фильтра

Порядок фильтра	Баттерворта	Чебышева 1 типа	Чебышева 2 типа	Золотарева-Кауэра	Вектор приоритетов
Баттерворта	1	1/5	1/5	1/7	0,0512
Чебышева 1 типа	5	1	1	1/3	0,2117
Чебышева 2 типа	5	1	1	1/3	0,2117
Золотарева-Кауэра	7	3	3	1	0,5251

Таблица 6 – Сравнение альтернатив по критерию неравномерность ГВЗ в ПП

Неравномерность ГВЗ в ПП	Баттерворта	Чебышева 1 типа	Чебышева 2 типа	Золотарева-Кауэра	Вектор приоритетов
Баттерворта	1	5	1/3	3	0,2549
Чебышева 1 типа	1/5	1	1/9	1/3	0,05
Чебышева 2 типа	3	9	1	5	0,581
Золотарева-Кауэра	1/3	3	1/5	1	0,114

Таблица 7 – Сравнение альтернатив по критерию время переходного процесса

Время переходного процесса	Баттерворта	Чебышева 1 типа	Чебышева 2 типа	Золотарева-Кауэра	Вектор приоритетов
Баттерворта	1	1/3	1/9	1/7	0,00465
Чебышева 1 типа	3	1	1/7	1	0,1395
Чебышева 2 типа	9	7	1	2	0,5779
Золотарева-Кауэра	7	1	1/2	1	0,2359



Таблица 8 – Сравнение альтернатив по критерию перегулирование

Перегулирование	Баттерворта	Чебышева 1 типа	Чебышева 2 типа	Золотарева-Кауэра	Вектор приоритетов
Баттерворта	1	1/3	1/5	1/4	0,0682
Чебышева 1 типа	3	1	1/4	1/3	0,1343
Чебышева 2 типа	5	4	1	3	0,5287
Золотарева-Кауэра	4	3	1/3	1	0,2686

Таблица 9 – Сравнение альтернатив по критерию максимальное подавление на центральной частоте

Максимальное подавление на центральной частоте	Баттерворта	Чебышева 1 типа	Чебышева 2 типа	Золотарева-Кауэра	Вектор приоритетов
Баттерворта	1	3	6	6	0,5646
Чебышева 1 типа	1/3	1	4	5	0,2814
Чебышева 2 типа	1/6	1/4	1	1	0,0791
Золотарева-Кауэра	1/6	3/5	1	1	0,0748

Результат парных сравнений представлен в таблице 10.

Таблица 10 – Итоговый результат

Альтернатива выбора устройства режекции	Приоритет
Чебышева 2 типа	0,3957
Золотарева-Кауэра	0,2437
Баттерворта	0,1971
Чебышева 1 типа	0,1634

Полученный результат в таблице 10 позволяет оценить качественные характеристики каждого варианта и выбрать наилучший, а именно режекторный фильтр Чебышева инверсный (2 типа), удовлетворяющий предельно допустимым значениям показателей качества со значительным запасом. С большой вероятностью можно ожидать, что фильтр будет приемлемым при любых уточнениях предельно допустимых значений показателей качества. Для остальных типов рассматриваемых фильтров, наоборот, проигрыш предельно допустимым значениям некоторых показателей настолько велик, что при любых уточнениях предельно допустимых значений показателей качества они неприемлемы.

Выводы. Произведено моделирование, в ходе которого был исследован принцип построения устройств защиты, исследованы режекторные фильтры четырех различных аппроксимаций, получены основные характеристики исследуемых фильтров, а также произведено сравнение их основных параметров. С помощью метода анализа иерархий и полученных данных обо всех типах фильтров произведен рациональный выбор устройства, которое соответствовало выбранным критериям.

Использование полученных результатов будет полезно при проектировании новых помехоустойчивых систем передачи информации и модернизации существующих в системах радиосвязи, которые подвержены влиянию сосредоточенных помех.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Харкевич А.А. Спектры и анализ. М.: ГИТТЛ, 1953. 276 с.
2. Солонина А.И., Арбузов С.М. Цифровая обработка сигналов. Моделирование в MATLAB: учебное пособие. СПб.: БХВ-Петербург, 2008. 816 с.
3. Саати Т. Л. Принятие решений. Метод анализа иерархий. М.: Радио и связь, 1989. 316 с.
4. Гуткин Л.С. Оптимизация радиоэлектронных устройств по совокупности показателей качества. М.: Радио и связь, 1975. 365 с.



REFERENCES

1. Harkevich A.A. Spektry i analiz. M.: GITTL, 1953. 276 p. (in Russian).
2. Solonina A.I., Arbuzov S.M. TSifrovaya obrabotka signalov. Modelirovanie v MATLAB: uchebnoe posobie. SPb.: BHV-Peterburg, 2008. 816 p. (in Russian).
3. Saati T. L. Prinyatie resheniy. Metod analiza ierarhiy. M.: Radio i svyaz', 1989. 316 p. (in Russian).
4. Gutkin L.S. Optimizatsiya radioelektronnyh ustroystv po sovokupnosti pokazateley kachestva. M.: Radio i svyaz', 1975. 365 p. (in Russian).

© Стучинская М.М., 2018

Стучинская Мария Михайловна, лаборант кафедры радиотехники и антенно-фидерных устройств, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, stuchinskaya.maria@yandex.ru.