

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ИНСТИТУТ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ И ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Кафедра «Радиоэлектроника и телекоммуникации»

ОПТИМИЗАЦИЯ ФИЛЬТРА ВТОРОГО ПОРЯДКА НА ОПЕРАЦИОННОМ УСИЛИТЕЛЕ

Учебно-методическое пособие
по выполнению расчетно-графического задания по дисциплине
«Математическое моделирование
инфокоммуникационных устройств и систем»
для студентов очной и заочной форм обучения направления
11.04.01 - Радиотехника и
11.04.02 - Информационные технологии и системы связи

Севастополь
СевГУ
2021

УДК 621.372.54:517.977.5(076.5)
ББК 32.844-04в631я73
О-627

Р е ц е н з е н т:

И. Л. Афонин – д-р техн. наук, профессор

Ответственный за выпуск:

И. Л. Афонин – д-р техн. наук, профессор,
заведующий кафедрой «Радиоэлектроника и телекоммуникации»

Составители : А. А. Щекатурин, Е. П. Руднев

О-627 Оптимизация фильтра второго порядка на операционном усилителе : учебно-методическое пособие по выполнению расчетно-графического задания по дисциплине «Математическое моделирование инфокоммуникационных устройств и систем» для студентов очной и заочной форм обучения направления 11.04.01 - Радиотехника и 11.04.02 - Информационные технологии и системы связи / Севастопольский государственный университет, Институт радиоэлектроники и информационной безопасности, кафедры «Радиоэлектроника и телекоммуникации» ; составители: А. А. Щекатурин, Е. П. Руднев. – Севастополь : Изд-во СевГУ, 2021. – 21 с. – Текст : электронный.

Цель пособия: оказание помощи в выполнении расчетно-графической работы по дисциплине «Математическое моделирование инфокоммуникационных устройств и систем». В процессе работы студентом углубляются и укрепляются знания, полученные при изучении дисциплины, а также развиваются практические навыки по разработке алгоритмов и программ оптимизации.

УДК 621.372.54:517.977.5(076.5)
ББК 32.844-04в631я73

Учебно-методическое пособие рассмотрено и рекомендовано к изданию на заседании методической комиссии Института радиоэлектроники и информационной безопасности, протокол от № 9 от 25 марта 2021 г.

© ФГАОУ ВО «Севастопольский
государственный университет», 2021

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
1. Основные части расчетно-графической работы	5
2. Задание и исходные данные для выполнения расчетно-графической работы.....	6
2.1. Тема работы.....	6
2.2. Задание на расчетно-графическую работу.....	6
2.3. Исходные данные	6
3. Теоретические сведения	8
3.1. Общие понятия оптимизации	8
3.2. Методы многомерной оптимизации.....	9
3.2.1. Метод покоординатного спуска	9
3.2.2. Метод наискорейшего спуска	9
3.3. Методы одномерной оптимизации	10
3.3.1. Метод дихотомии	11
3.3.2. Метод золотого сечения	11
3.3.3. Метод Фибоначчи	13
3.3.4. Эффективность методов одномерной оптимизации	14
4. Рекомендации по выполнению расчетно-графической работы	15
4.1. Введение и выводы.....	15
4.2. Первый раздел.....	15
4.3. Второй раздел.....	16
4.4. Третий раздел.....	16
4.5. Четвертый раздел.....	16
4.6. Пятый раздел.....	17
4.7. Шестой раздел.....	17
Библиографический список.....	18
Приложение А. Образец титульного листа	19
Приложение Б. Образец заполнения бланка задания	20

ВВЕДЕНИЕ

Расчетно-графическая работа является завершающим этапом в процессе изучения дисциплины «Математическое моделирование и вычислительная техника», выполняется студентами очной и очно-заочной формы обучения в 1-м учебном семестре. В процессе выполнения расчетно-графической работы студенты должны разработать алгоритм и программу оптимизации активного фильтра второго порядка по заданной амплитудно-частотной характеристике. В процессе выполнения задания студенты должны проявить свои знания и умения при моделировании радиотехнического устройства, оптимизации его параметров и симуляции его работы в программном пакете *Electronic Work Bench (EWB)*. В этих указаниях изложены необходимые теоретические сведения, а также в них содержатся ссылки на литературные источники, сведения из которых понадобятся при выполнении расчетно-графической работы.

При выполнении расчетно-графической работы следует придерживаться следующих правил:

- номер варианта выбирается по последней и предпоследней цифрам зачетной книжки;
- расчетно-графическая работа выполняется на листах бумаги стандартного формата А4;
- оформление работы (рубрикация, нумерация разделов, страниц, подписей, названия таблиц и т.д.) осуществляется в строгом соответствии с требованиями Государственных стандартов и Методических указаний по оформлению текстовых работ [1];
- обязательны ссылки на литературу. Перечень ссылок, оформленный в соответствии с требованиями стандартов, приводится в конце работы. Ссылка дается в скобках [k], где k — порядковый номер источника в списке литературы;
- в заключение каждого раздела необходимо привести четко сформулированные выводы;
- общий объем пояснительной записки расчетно-графической работы 30 - 35 страниц;
- срок представления оформленной работы — 15 мая.

1. ОСНОВНЫЕ ЧАСТИ РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКОЙ РАБОТЫ

Расчетно-графическая работа должна содержать следующие части:

- титульный лист (приведен в приложении А);
- заполненный бланк задания (приведен в приложении Б);
- содержание;
- введение;
- первый раздел, посвященный выбору типа фильтра и передаточной функции;
- второй раздел, посвященный выбору целевой функции;
- третий раздел, посвященный разработке блок-схемы алгоритма минимизации;
- четвертый раздел, посвященный разработке программы минимизации целевой функции;
- пятый раздел, посвященный выбору принципиальной схемы фильтра и расчету его элементов;
- шестой раздел, содержащий результаты моделирования работы разработанного активного фильтра в программе *EWB*;
- выводы;
- перечень ссылок;
- обязательное приложение (перечень элементов);
- дополнительные приложения, если они необходимы.

Бланк задания выдается каждому студенту на установочной сессии (ЗФО), заполняется студентом и подписывается преподавателем.

Второй раздел должен содержать подразделы, посвященные разработке блок-схем алгоритмов и программ одномерной и многомерной минимизации.

В расчетно-графической работе представляются следующие графические материалы:

- рисунок принципиальной схемы активного фильтра второго порядка;
- рисунок блок-схемы алгоритма одномерной минимизации;
- рисунок блок-схемы алгоритма многомерной минимизации;
- совмещенные на одном рисунке графики заданной амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) фильтра; АЧХ, полученной из передаточной функции с параметрами, найденными в результате минимизации; АЧХ, рассчитанной в *EWB*.

2. ЗАДАНИЕ И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКОЙ РАБОТЫ

2.1 Тема работы: «Параметрическая оптимизация активного фильтра второго порядка на операционном усилителе».

2.2 Задание на расчетно-графическую работу: Разработать принципиальную схему активного фильтра второго порядка на операционном усилителе. Параметры фильтра должны быть оптимизированы таким образом, чтобы АЧХ разработанного устройства наилучшим образом соответствовала заданной АЧХ.

2.3. Исходные данные

Исходные данные для выполнения расчетно-графической работы приведены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1 — Выбор метода многомерной оптимизации и частот

Предпоследняя цифра номера зачетной книжки	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Метод многомерной оптимизации	ПС	НС	ПС	НС	ПС	НС	ПС	НС	ПС	НС
f_0 , кГц	11	13	12	13	10	9	15	13	9	11
f_1 , кГц	2	4	3	5	2	3	6	2	1	3
f_2 , кГц	3	5	5	6	4	4	7	4	3	6
f_3 , кГц	5	8	6	7	5	5	9	6	4	7
f_4 , кГц	7	9	7	8	7	6	10	8	5	8

Таблица 2 — Выбор типа фильтра и метода одномерной минимизации

Последняя цифра номера зачетной книжки	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Тип частотной характеристики, номер рисунка	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2
Метод одномерной минимизации	ДХ	ЗС	Ф	ДХ	ЗС	Ф	ДХ	ЗС	Ф	ДХ

В таблицах 1 и 2 использованы следующие обозначения: ПС — метод покоординатного спуска, НС — метод наискорейшего спуска, ДХ — метод дихотомии, ЗС — метод золотого сечения, Ф — метод Фибоначчи.

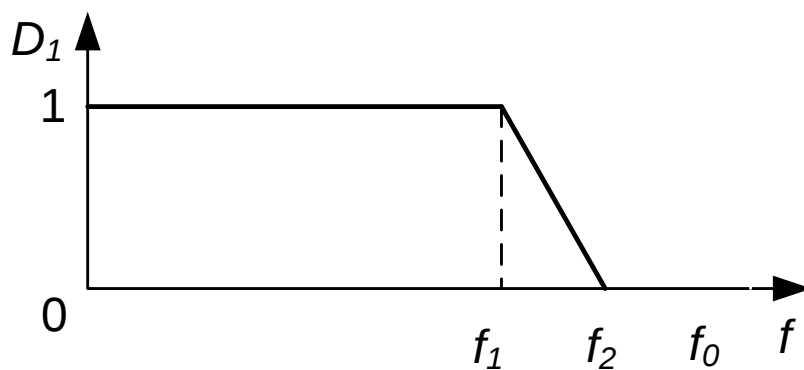


Рис. 1 — Модуль амплитудно-частотной характеристики фильтра нижних частот

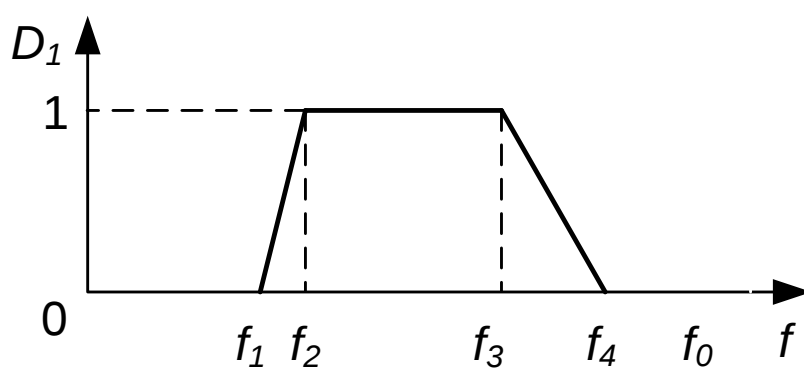


Рис. 2 — Модуль амплитудно-частотной характеристики полосно-пропускающего фильтра

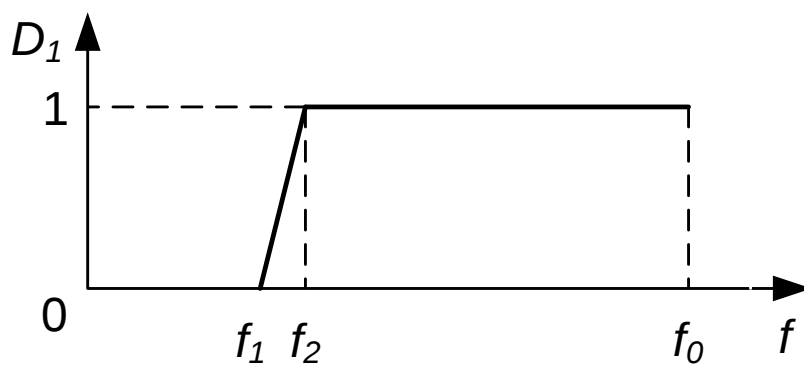


Рис. 3 — Модуль амплитудно-частотной характеристики фильтра верхних частот

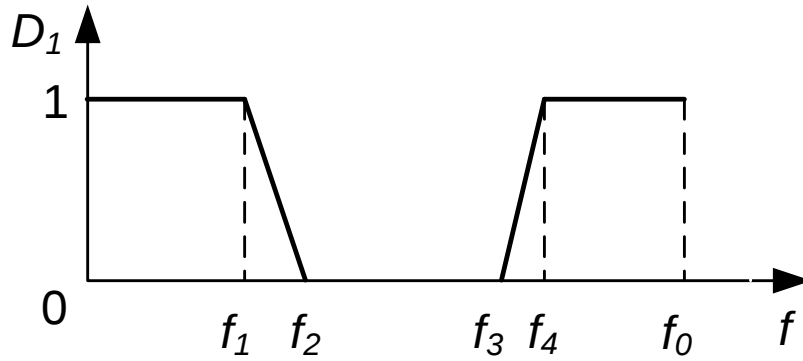


Рис. 4 — Модуль амплитудно-частотной характеристики полосно-заграждающего фильтра

3. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

3.1. Общие понятия оптимизации

Как правило, работа технического устройства определяется несколькими параметрами $x_1, x_2, \dots, x_M$. Для рассчитываемого в расчетно-графической работе активного фильтра второго порядка этими параметрами являются коэффициент усиления K , добротность q_p и частота полюса ω_p . Параметры можно рассматривать как вектор $\vec{X} = [x_1, x_2, \dots, x_M]^T$, являющийся элементом M -мерного евклидова пространства (значок «Т» означает транспонирование).

Для оценки степени соответствия получаемых характеристик устройства заданным вводится целевая функция $F(\vec{X})$. Нет однозначного способа получения целевой функции, для одной и той же задачи целевая функция может быть выбрана по-разному. Единственным правилом выбора целевой функции является требование уменьшения значения целевой функции при приближении текущего решения $\vec{X}$ к точному решению $\vec{X}^*$. В этом случае точному решению $\vec{X}^*$ соответствует минимум целевой функции $F(\vec{X})$. Таким образом, решение задачи оптимизации сводится к отысканию в M -мерном евклидовом пространстве точки $\vec{X}^*$, в которой функция $F(\vec{X})$ имеет минимум.

Процесс поиска оптимальных значений параметров $\vec{X}$ представляет собой последовательность приближений к точному решению: $\vec{X}^0 \rightarrow \vec{X}^1 \rightarrow \vec{X}^2 \rightarrow \dots \vec{X}^{k-1} \rightarrow \vec{X}^k \rightarrow \dots$, где $\vec{X}^0$ — начальное приближение, $\vec{X}^k$ — k -е приближение. При этом каждое новое решение ближе к точному, чем предыдущее, но сам процесс уточнения решения может быть бесконечным.

Принятие решения о прекращении процесса поиска может быть осуществлено путем введения специального критерия. Например, процесс вычисления может быть прекращен, если выполняется условие $|F(\vec{X}) - F^*| \leq \delta$, где $\delta > 0$ — наперед заданное малое число.

Направление поиска характеризуется направлением вектора перехода к очередной точке $\Delta \vec{X}^k = \vec{X}^k - \vec{X}^{k-1}$ и определяется выбранным методом оптимизации.

Основные определения и методы оптимизации описаны в [2], [3], [4].

3.2. Методы многомерной минимизации

3.2.1. Метод покоординатного спуска

В методе покоординатного спуска процесс поиска организуется следующим образом. Сначала варьируется параметр x_1 при фиксированных остальных, этот процесс продолжается до тех пор, пока не будет найден минимум целевой функции как функции от x_1 (т.е. на этом этапе ищется минимум функции одной переменной). Параметру x_1 присваивается найденное значение, соответствующее минимуму целевой функции. После этого аналогичным образом варьируется параметр x_2 (при новом значении x_1 и фиксированными значениями остальных параметров). После этого аналогичным образом варьируется параметр x_2 , затем x_3 и т.д. После нахождения минимума по x_M снова варьируется x_1 и т.д. Процесс поиска методом покоординатного спуска иллюстрируется на рис. 5 на примере случая $M = 2$.

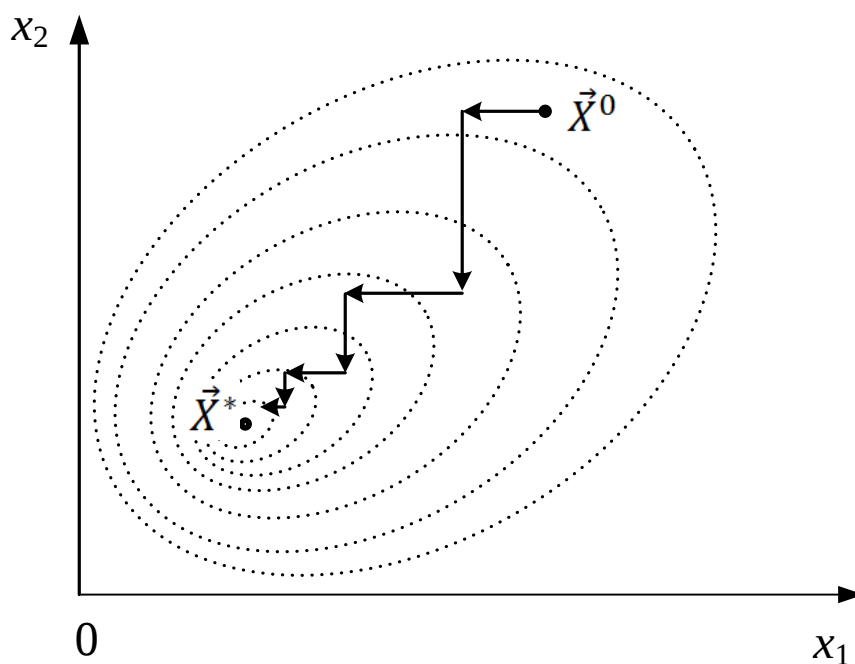


Рис.5 — Реализация метода покоординатного спуска

Замкнутыми сплошными линиями на рис. 5 показаны линии равного уровня, в точках каждой из которых целевая функция принимает одно и то же значение.

3.2.2. Метод наискорейшего спуска

В методе наискорейшего спуска направление вектора перехода $\Delta \vec{X}^k$ выбирается противоположно направлению градиента целевой функции (она должна быть дифференцируемой по каждой переменной). Вектор перехода определяется по формуле

$$\Delta \vec{X}^k = \frac{p}{\sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial x_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial x_2}\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial F}{\partial x_M}\right)^2}} \left[\frac{\partial F}{\partial x_1}, \frac{\partial F}{\partial x_2}, \dots, \frac{\partial F}{\partial x_M} \right]^T, \text{ где } p \text{ — абсолютная величина шага в}$$

выбранном направлении.

Величина $\Delta \vec{X}^k$ определяется одним действительным параметром p , который находится из условия минимума целевой функции (т.е. выполняется одномерная минимизация по параметру p).

Процесс поиска методом наискорейшего спуска иллюстрируется на рис.6 также на примере случая $M = 2$.

Из сравнения с рис.5, где траектория точки представляет собой ломаную, отрезки которой параллельны координатным осям, видно, что в методе наискорейшего спуска траектория пересекает линии равного уровня всегда под прямым углом и, благодаря этому, получается более короткой.

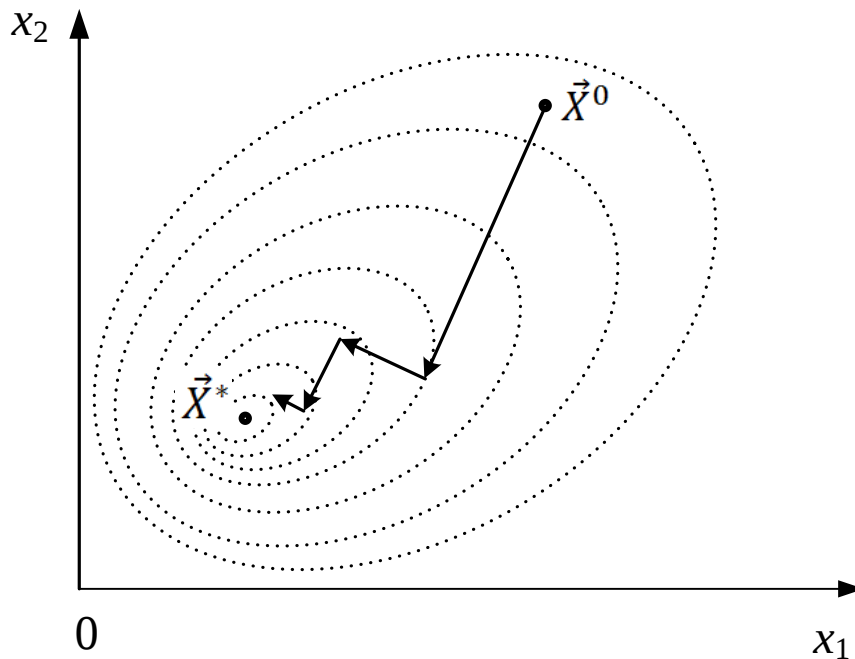


Рис. 6 — Реализация метода наискорейшего спуска

Поэтому, хотя вычисление частных производных требует дополнительных вычислений, в методе наискорейшего спуска процесс оптимизации проходит, как правило, быстрее.

3.3. Методы одномерной минимизации

При многомерной минимизации необходимо многократно выполнять одномерную минимизацию, при которой находится значение параметра (x_i для метода покоординатного спуска или p для метода наискорейшего спуска), соответствующего минимуму целевой функции. При одномерной минимизации целевая функция зависит от одного параметра.

Методы одномерной минимизации основываются на разбиении отрезка области определения на части и отбрасывания частей, на которых нет минимума целевой

функции. Оставшийся отрезок снова делится на части и т.д. Таким образом область неопределенности параметра уменьшается, ее границы приближаются к точному значению параметра.

3.3.1. Метод дихотомии

Предположим, что точка минимума целевой функции $F(x)$ находится внутри отрезка $x^a \leq x \leq x^b$. На первом шаге исходный отрезок делится пополам точкой $\tilde{x} = \frac{x^a + x^b}{2}$. Для того, чтобы определить, с какой стороны от этой точки находится минимум целевой функции, нужно вычислить значение функции в точках $x^1 = \tilde{x} - \frac{\varepsilon}{2}$, $x^2 = \tilde{x} + \frac{\varepsilon}{2}$ (здесь ε — интервал нечувствительности). Если $F\left(\tilde{x} + \frac{\varepsilon}{2}\right) > F\left(\tilde{x} - \frac{\varepsilon}{2}\right)$, точка минимума находится слева от $\tilde{x}$ и нужно отбросить правую часть отрезка, в противном случае отбрасывается левая часть. Оставшийся отрезок также делится пополам и производятся аналогичные вычисления. Процесс поиска минимума продолжается заданное число раз или до тех пор, пока отрезок, содержащий точку минимума, не станет меньше или равным ε .

3.3.2. Метод золотого сечения

В этом методе для определения следующего интервала неопределенности $[x^{a(k+1)}, x^{b(k+1)}]$ также производится вычисление функции $F(x)$ в точках $x^{1(k)}$, $x^{2(k)}$. Но в отличие от метода дихотомии эти точки расположены симметрично относительно граничных значений предыдущего интервала неопределенности $[x^{a(k)}, x^{b(k)}]$. Более того, выбор значений переменных $x^{1(k)}$, $x^{2(k)}$ осуществляется таким образом, что отношение τ длины отрезка $x^{b(k)} - x^{a(k)}$ к большей его части $x^{2(k)} - x^{1(k)}$ равно отношению этой большей части к меньшей $x^{1(k)} - x^{a(k)}$:

$$\frac{x^{b(k)} - x^{a(k)}}{x^{2(k)} - x^{a(k)}} = \frac{x^{2(k)} - x^{a(k)}}{x^{1(k)} - x^{a(k)}} = \tau \quad (1)$$

Такое деление отрезка называется золотым сечением. Покажем, что при золотом сечении отрезка

$$\tau = \frac{1+\sqrt{5}}{2} \approx 1,62. \quad (2)$$

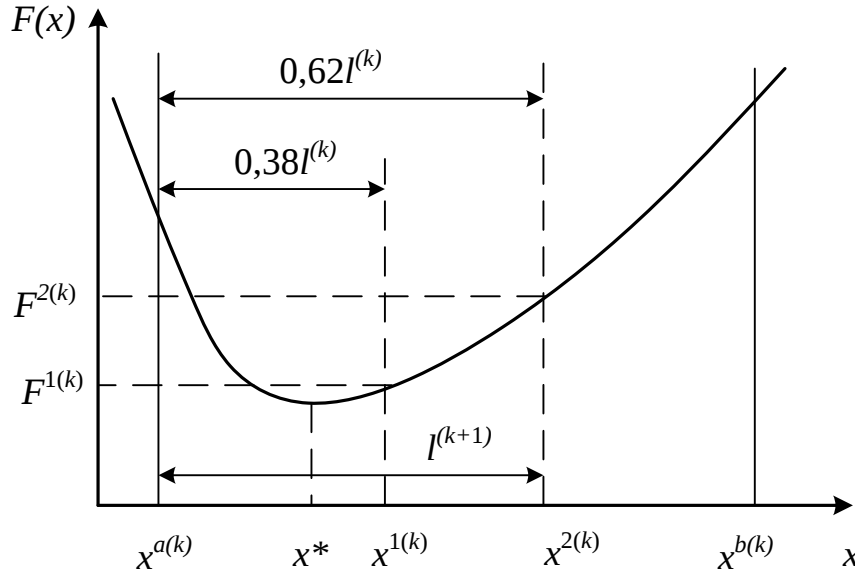


Рис. 7 — Схема метода золотого сечения для случая $F^{1(k)} < F^{2(k)}$

В силу симметрии точек $x^{1(k)}$, $x^{2(k)}$ длины отрезков $[x^{a(k)}, x^{1(k)}]$, $[x^{2(k)}, x^{b(k)}]$ одинаковы, т.е.

$$x^{1(k)} - x^{a(k)} = x^{b(k)} - x^{2(k)}. \quad (3)$$

Кроме того, согласно рис. 7 длина отрезка $[x^{a(k)}, x^{b(k)}]$ равна сумме длин отрезков $[x^{a(k)}, x^{2(k)}]$, $[x^{2(k)}, x^{b(k)}]$. Таким образом,

$$(x^{2(k)} - x^{a(k)}) + (x^{b(k)} - x^{2(k)}) = (x^{b(k)} - x^{a(k)}), \quad (4)$$

или, учитывая соотношение (3), имеем

$$(x^{2(k)} - x^{a(k)}) + (x^{1(k)} - x^{a(k)}) = (x^{b(k)} - x^{a(k)}). \quad (5)$$

Разделив левую и правую части уравнения (4) на $(x^{1(k)} - x^{a(k)})$ с учетом соотношения (1), получим

$$\tau + 1 = \tau^2, \text{ или } \tau^2 - \tau - 1 = 0, \quad (6)$$

Откуда и следует справедливость соотношения (2).

Подставляя значение τ из формулы (2) в (1), определяем местоположение экспериментов на n -м шаге метода:

$$x^{1(k)} = x^{a(k)} + a_1(x^{b(k)} - x^{a(k)}); \quad (7)$$

$$x^{2(k)} = x^{a(k)} + a_2(x^{b(k)} - x^{a(k)}). \quad (8)$$

Здесь под экспериментом понимают процедуру определения значения минимизируемой функции, а коэффициенты

$$a_1 = \frac{3-\sqrt{5}}{2} \approx 0.32 = \frac{1}{\tau^2} \quad (9)$$

$$a_2 = \frac{\sqrt{5}-1}{2} \approx 0.62 = \frac{1}{\tau} \quad (10)$$

Называют дробями Фибоначчи.

Важным следствием соотношения (1) является то, что двукратное вычисление функции $F(x)$ требуется только при определении первого интервала неопределенности $[x^{a(1)}, x^{b(1)}]$. Для выбора последующих интервалов необходим только один

эксперимент, поскольку другой совпадает с одним из экспериментов, проведенных на этапе определения предыдущего интервала неопределенности.

Выбор $(k + 1)$ -го интервала неопределенности по результатам эксперимента на k -м интервале осуществляется в соответствии со следующими правилами.

Если $F(x^{1(k)}) < F(x^{2(k)})$, то $x^{a(k+1)} = x^{a(k)}$, $x^{b(k+1)} = x^{2(k)}$, $x^{2(k+1)} = x^{1(k)}$, а $x^{1(k+1)}$ вычисляется по формуле (7) для $(k + 1)$ -го шага.

Если $F(x^{1(k)}) \geq F(x^{2(k)})$, то $x^{a(k+1)} = x^{1(k)}$, $x^{b(k+1)} = x^{b(k)}$, $x^{1(k+1)} = x^{2(k)}$, а $x^{2(k+1)}$ вычисляется согласно выражению (8) для $(k + 1)$ -го шага.

3.3.3. Метод Фибоначчи

Как и в методе золотого сечения, для выбора текущего интервала неопределенности $[x^{a(k+1)}, x^{b(k+1)}]$ значение функции $F(x)$ вычисляется в двух точках $x^{1(k)}$, $x^{2(k)}$ предшествующего интервала $[x^{a(k)}, x^{b(k)}]$, расположенных симметрично относительно его граничных точек $x^{a(k)}$, $x^{b(k)}$ соответственно. Выбор интервала $[x^{a(k+1)}, x^{b(k+1)}]$ осуществляется в результате анализа значений $F(x^{1(k)})$, $F(x^{2(k)})$. Причем этот интервал содержит в себе обе точки $x^{1(k)}$, $x^{2(k)}$, одну из них в качестве граничной, а вторую как местоположение нового эксперимента ($x^{1(k+1)}$ или $x^{2(k+1)}$) в зависимости от соотношения значений $F(x^{1(k)})$ и $F(x^{2(k)})$. Местоположение второго эксперимента, необходимого для определения следующего интервала неопределенности $[x^{a(k+2)}, x^{b(k+2)}]$, выбирается из соображений симметричности расположения экспериментов $x^{1(k+1)}$, $x^{2(k+1)}$ относительно граничных точек $x^{a(k+1)}$, $x^{b(k+1)}$ соответственно. Правила выбора $(k + 1)$ -го интервала неопределенности и координат для проведения следующего эксперимента по результатам предыдущего эксперимента $F(x^{1(k)})$ и $F(x^{2(k)})$ выглядят так.

1. Если $F(x^{1(k)}) < F(x^{2(k)})$, то $x^{a(k+1)} = x^{a(k)}$; $x^{b(k+1)} = x^{2(k)}$; $x^{2(k+1)} = x^{1(k)}$; $x^{1(k+1)} = x^{a(k)} + (x^{2(k)} - x^{1(k)})$.
2. Если $F(x^{1(k)}) \geq F(x^{2(k)})$, то $x^{a(k+1)} = x^{1(k)}$; $x^{b(k+1)} = x^{b(k)}$; $x^{1(k+1)} = x^{2(k)}$; $x^{2(k+1)} = x^{bx^{C(k+1)}=x^{2(k)}(k)} + (x^{2(k)} - x^{1(k)})$.

Как видим, эти правила можно применять и для поиска по методу золотого сечения. Действительно, оба метода — золотое сечение и Фибоначчи — очень похожи. Основное их отличие заключается в выборе начального эксперимента $x^{1(1)}$. Можно показать, что в методе Фибоначчи значение $x^{1(1)}$ зависит от числа экспериментов и определяется выражением

$$x^{1(1)} = x^a + \frac{\Phi_{n-2}}{\Phi_n} (x^b - x^a) - \frac{(-1)^n \varepsilon}{\Phi_n}. \quad (11)$$

Здесь ε — интервал нечувствительности, т.е. разница между расположением двух экспериментов, позволяющая отличить $F(x^1)$ от $F(x^2)$; Φ_i — числа Фибоначчи, образующие бесконечный числовой ряд согласно следующему закону:

$$\Phi_0 = 1, \Phi_1 = 1; \Phi_i = \Phi_{i-1} + \Phi_{i-2} \text{ для } i > 1.$$

$$\Phi_i = \{1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55, 89 \dots\}.$$

Рекуррентное соотношение для определения местоположения экспериментов, расположенных внутри n -го интервала неопределенности, по методу Фибоначчи можно представить в виде

$$x^{1(k)} = x^{a(k)} + \frac{\Phi_{n-k-1}}{\Phi_{n-k+1}} (x^{b(k)} - x^{a(k)}) - \frac{(-1)^{n-k+1}}{\Phi_{n-k+1}} \varepsilon;$$

$$x^{2(k)} = x^{a(k)} + \frac{\Phi_{n-k}}{\Phi_{n-k+1}} (x^{b(k)} - x^{a(k)}) + \frac{(-1)^{n-k+1}}{\Phi_{n-k+1}} \varepsilon.$$

Отсюда при $k = 1$ вытекает выражение (11) для местоположения первого эксперимента $x^{1(1)}$. Очевидно, что второй эксперимент расположен в точке

$$x^{2(1)} = x^a + \frac{\Phi_{n-1}}{\Phi_n} (x^b - x^a) + \frac{(-1)^n}{\Phi_n} \varepsilon.$$

3.3.4. Эффективность методов одномерной минимизации

Оценка эффективности одномерного поиска обычно определяется как отношение интервала неопределенности, полученного в результате n экспериментов, к исходному:

$$E = \frac{x^{b(n)} - x^{a(n)}}{x^b - x^a}. \quad (12)$$

Для метода дихотомии

$$E = \frac{1}{2^{(n/2)}} = \frac{1}{2^K}, \quad (13)$$

где n — общее число экспериментов; $K = n / 2$ — число шагов поиска, которое при отсутствии ограничений на количество экспериментов вычисляется в соответствии со следующим соотношением:

$$\frac{x^{b(0)} - x^{a(0)}}{2^{K+1}} \leq \varepsilon < \frac{x^{b(0)} - x^{a(0)}}{2^K}.$$

Эффективность поиска по методу золотого сечения

$$E = \frac{1}{1,62^{n-1}}.$$

Эффективность поиска по методу Фибоначчи

$$E = \frac{1}{\Phi_n} + \frac{\Phi_{n-2}}{\Phi_n} \cdot \frac{\varepsilon}{x^b - x^a}$$

несколько лучше, чем по методу золотого сечения, который в $\frac{(1,44)^n}{1,62}$ раз эффективнее метода дихотомии. Недостатком метода Фибоначчи является зависимость местоположения его начального эксперимента $x^{1(1)}$ от их количества.

4. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКОЙ РАБОТЫ

4.1. Введение и выводы

Во введении необходимо обосновать актуальность оптимизации устройств, сформулировать цель работы и задачи, которые необходимо решить для достижения поставленной цели.

Объем введения — 1...2 страницы.

Выводы формулируют в прошедшем времени («разработано», «выполнено» и т.д.), В выводах следует констатировать факт достижения поставленной цели.

Объем выводов — 1...2 страницы.

4.2 Первый раздел

Первый раздел посвящен выбору типа фильтра и передаточной функции. АЧХ рис.2 соответствует фильтр нижних частот (ФНЧ), рис.3 — полосно-пропускающий (ППФ), рис.3 — фильтр верхних частот (ФВЧ), рис.4 — полосно-заграждающий (ПЗФ).

Передаточная функция ФНЧ имеет вид

$$T(s) = K \frac{\omega_p^2}{s^2 + \frac{\omega_p}{q_p} s + \omega_p^2},$$

передаточная функция ППФ имеет вид

$$T(s) = -K \frac{\frac{\omega_p}{q_p} s}{s^2 + \frac{\omega_p}{q_p} s + \omega_p^2},$$

передаточная функция ФВЧ имеет вид

$$T(s) = \frac{K s^2}{s^2 + \frac{\omega_p}{q_p} s + \omega_p^2},$$

передаточная функция ПЗФ имеет вид

$$T(s) = K \frac{s^2 + \omega_p^2}{s^2 + \frac{\omega_p}{q_p} s + \omega_p^2},$$

где $s = i\omega$, i — мнимая единица, ω — циклическая частота.

АЧХ $D(\omega)$ является модулем передаточной функции $T(s)$, $D(\omega) = |T(i\omega)|$.

Рекомендуемый объем первого раздела — 2...4 страниц.

4.3. Второй раздел

Второй раздел посвящен выбору целевой функции.

На рис. 8 штриховой линией показана заданная АЧХ, сплошной линией показана расчетная АЧХ, f — частота.

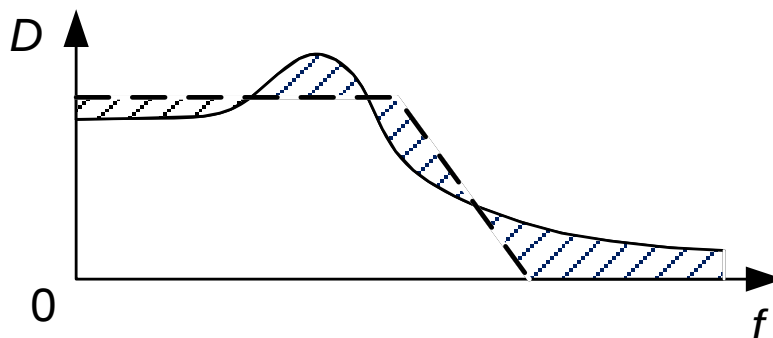


Рис. 8 — Заданная амплитудно-частотная характеристика и амплитудно-частотная характеристика реального фильтра

Целевая функция должна быть выбрана таким образом, чтобы уменьшение отклонение АЧХ устройства от заданной АЧХ приводило к уменьшению целевой функции. В минимуме целевой функции такое отклонение (заштрихованная область на рис.8) должно быть минимальным.

Как уже отмечалось в подразделе 3.1, целевая функция может быть выбрана несколькими способами.

Целевая функция может быть выбрана, например, следующим образом:

$$F(K, q_p, \omega_p) = \int_0^{\omega_0} \left(D_2(K, q_p, \omega_p, \omega) - D_1(\omega) \right)^2 d\omega,$$

где $D_2(K, q_p, \omega_p, \omega)$ — АЧХ устройства, $D_1(\omega)$ — заданная АЧХ, $\omega_0 = 2\pi f_0$.

Целевая функция F является функцией трех параметров K, q_p, ω_p . В результате минимизации должны быть найдены значения этих параметров, соответствующие минимуму целевой функции.

Рекомендованный объем второго раздела — 2 - 4 страниц.

4.4. Третий раздел

Третий раздел посвящен разработке блок-схемы алгоритма минимизации целевой функции.

Рекомендуемый объем третьего раздела — 4 - 6 страниц.

4.5. Четвертый раздел

Четвертый раздел посвящен разработке программы минимизации целевой функции на языке высокого уровня. В результате выполнения программы должны быть получены оптимальные значения параметров K, q_p, ω_p .

Рекомендуемый объем четвертого раздела — 6 - 8 страниц.

4.6. Пятый раздел

Пятый раздел посвящен выбору принципиальной схемы активного фильтра второго порядка и расчету значений элементов. По полученному значению q_p определяется, является фильтр низкодобротным, среднедобротным или высокодобротным. После этого по типу фильтра выбирается его принципиальная схема [5].

Для выбранной принципиальной схемы по определенным в результате минимизации параметрам K , q_p , ω_p рассчитываются значения элементов фильтра (емкости конденсаторов и сопротивления резисторов) [5].

Рекомендуемый объем пятого раздела — 2 - 4 страниц.

4.7. Шестой раздел

Для рассчитанного фильтра проводится моделирование его работы в программе *Electronics Work Bench*, строятся на одном графике заданная АЧХ, АЧХ фильтра, полученная по передаточной функции и АЧХ фильтра, рассчитанная в *Electronics Work Bench*.

Рекомендуемый объем шестого раздела — 3 - 4 страниц.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Оформление текстовых работ: методические указания / СевГУ; сост. В. Г. Слезкин, П. П. Ермолов. — Севастополь : Изд-во СевГУ, 2015. — 19 с. Евдокимов, А.Г. Минимизация функций и ее приложения к задачам автоматизированного управления инженерными сетями // А.Г. Евдокимов. — Х.: Вища шк. Изд-во при Харьк. Ун-те, 1985. — 288 с.
2. Банди, Б. Методы оптимизации. Вводный курс: Пер. с англ. // Б. Банди. — М.: Радио и связь, 1988. — 128 с.
3. Васильев, Ф.П. Численные методы решения экстремальных задач // Ф.П. Васильев. — М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1980. — 518 с.
4. Мошиц, Г. Проектирование активных фильтров: Пер. с англ. // Г. Мошиц, П. Хорн. — М.: Мир, 1984. — 320 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А
(справочное)
Образец титульного листа

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»
Институт радиоэлектроники и информационной безопасности
Кафедра радиоэлектроники и телекоммуникаций

РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКАЯ РАБОТА
на тему

**ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ФИЛЬТРА ВТОРОГО
ПОРЯДКА НА ОПЕРАЦИОННОМ УСИЛИТЕЛЕ**

по дисциплине
«Математическое моделирование
инфокоммуникационных устройств и систем»

Выполнил:
студент гр. ИКС/м-21-1-о
А.Н. Николаев
№ зачетной книжки 456791

Принял:
к.т.н., доцент
А.А. Щекатурин

Севастополь
2021

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(справочное)

Образец заполнения бланка задания

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Севастопольский государственный университет»
Институт радиоэлектроники и информационной безопасности
Кафедра радиоэлектроники и телекоммуникаций
Направление 11.04.02 Инфокоммуникационные технологии и системы
связи
Курс 1 Группа ИКС/м-21-1-о Семестр 1

ЗАДАНИЕ

на расчетно-графический проект (работу) студента
Васильева Александра Николаевича

1. Тема проекта (работы) *Параметрическая оптимизация активного фильтра второго порядка на операционном усилителе*

2. Срок сдачи студентом законченного проекта (работы) 15.12.21

3. Исходные данные для выполнения проекта (работы) *Метод покоординатного спуска, метод золотого сечения, фильтр нижних частот, $f_1 = 3 \text{ КГц}$, $f_2 = 4 \text{ КГц}$, $f_0 = 7 \text{ КГц}$.*

4. Состав расчетно-пояснительной записки (перечень вопросов, подлежащих разработке) *Введение 1. Выбор типа фильтра и передаточной функции 2. Выбор целевой функции. 3. Разработка блок-схемы алгоритма. 4. Разработка программы 5. Выбор принципиальной схемы активного фильтра второго порядка и расчет значений элементов 6. Моделирование работы фильтра в EWB. Выводы. Библиографический список.*

5. Перечень графических материалов (с точным указанием обязательных чертежей) *1. Рисунок принципиальной схемы активного фильтра второго порядка 2. Рисунок блок-схемы алгоритма одномерной минимизации 3. Рисунок блок-схемы алгоритма многомерной минимизации 4. Программа минимизации на языке высокого уровня 5. Совмещенные на одном рисунке графики заданной амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) фильтра; АЧХ, полученной из передаточной функции с параметрами, найденными в результате минимизации; АЧХ, рассчитанной в EWB.*

6. Дата выдачи задания 8.09.21

КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН

№ п/п	Название этапов расчетно-графической работы	Сроки выполнения этапов работы	Примечания
1	<i>Выбор типа фильтра и передаточной функции</i>	9.09.21 — 22.9.21	
2	<i>Выбор целевой функции</i>	23.9.21 — 6.10.21	
3	<i>Разработка блок-схемы алгоритма</i>	7.10.21 — 20.10.21	
4	<i>Разработка программы</i>	21.10.21 — 3.11.21	
5	<i>Выбор принципиальной схемы активного фильтра второго порядка и расчет значений элементов</i>	4.11.21 — 17.11.21	
6	<i>Моделирование работы фильтра в EWB</i>	18.11.21 — 1.12.21	
7	<i>Оформление пояснительной записки</i>	2.12.21 — 14.12.21	

Студент

Руководитель

8 сентября 2021 г.

**ОПТИМИЗАЦИЯ ФИЛЬТРА
ВТОРОГО ПОРЯДКА
НА ОПЕРАЦИОННОМ УСИЛИТЕЛЕ**

*Учебно-методическое пособие
по выполнению расчетно-графического задания*

*Составители : Щекатурин Андрей Алексеевич,
Руднев Евгений Петрович*

В авторской редакции

Изд. № 44/2021. Объем 1,5 п.л.
РИИЦМ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»