

НЕКОММЕРЧЕСКОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «КАЗАХСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ имени К.И.САТПАЕВА»



SATBAYEV
UNIVERSITY

Институт Автоматики и информационных технологий

Кафедра Робототехники и технических средств автоматизации

Саутов Ислам Алиджанович

Разработка алгоритма картирования корневых локусов и поиск ассоциации с показателями
качества системы высокочастотной фильтрации сигналов

Дипломная работа

Образовательная программа: 6B07114 Биомедицинская инженерия

Алматы 2025

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казакский национальный исследовательский
технический университет имени К.И.Сатпаева»



SATBAYEV
UNIVERSITY

Институт Автоматики и информационных технологий

Кафедра Робототехники и технических средств автоматизации



ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

На тему: «Разработка алгоритма картирования корневых локусов и поиск ассоциации с
показателями качества системы высокочастотной фильтрации сигналов»

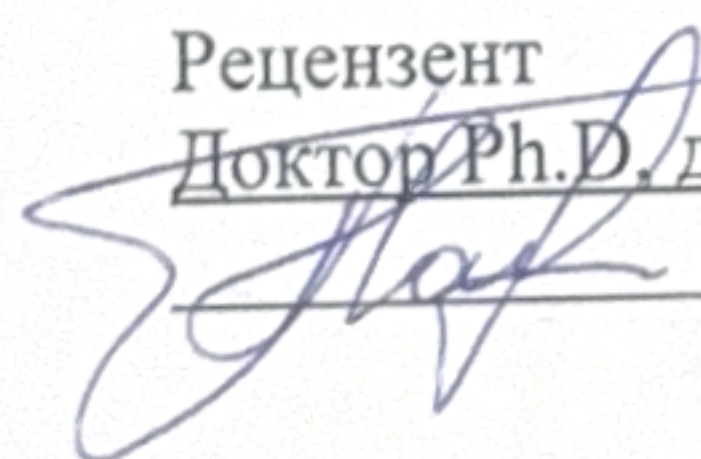
Специальность: 6B07114 – Биомедицинская инженерия

Выполнил

Саутов И. А.

Рецензент

Доктор Ph.D. доцент

 Карымсакова Н. Т.

«05» 06 2025 г.

Научный руководитель

Магистр технических наук,

старший преподаватель

 Базарбай Л.

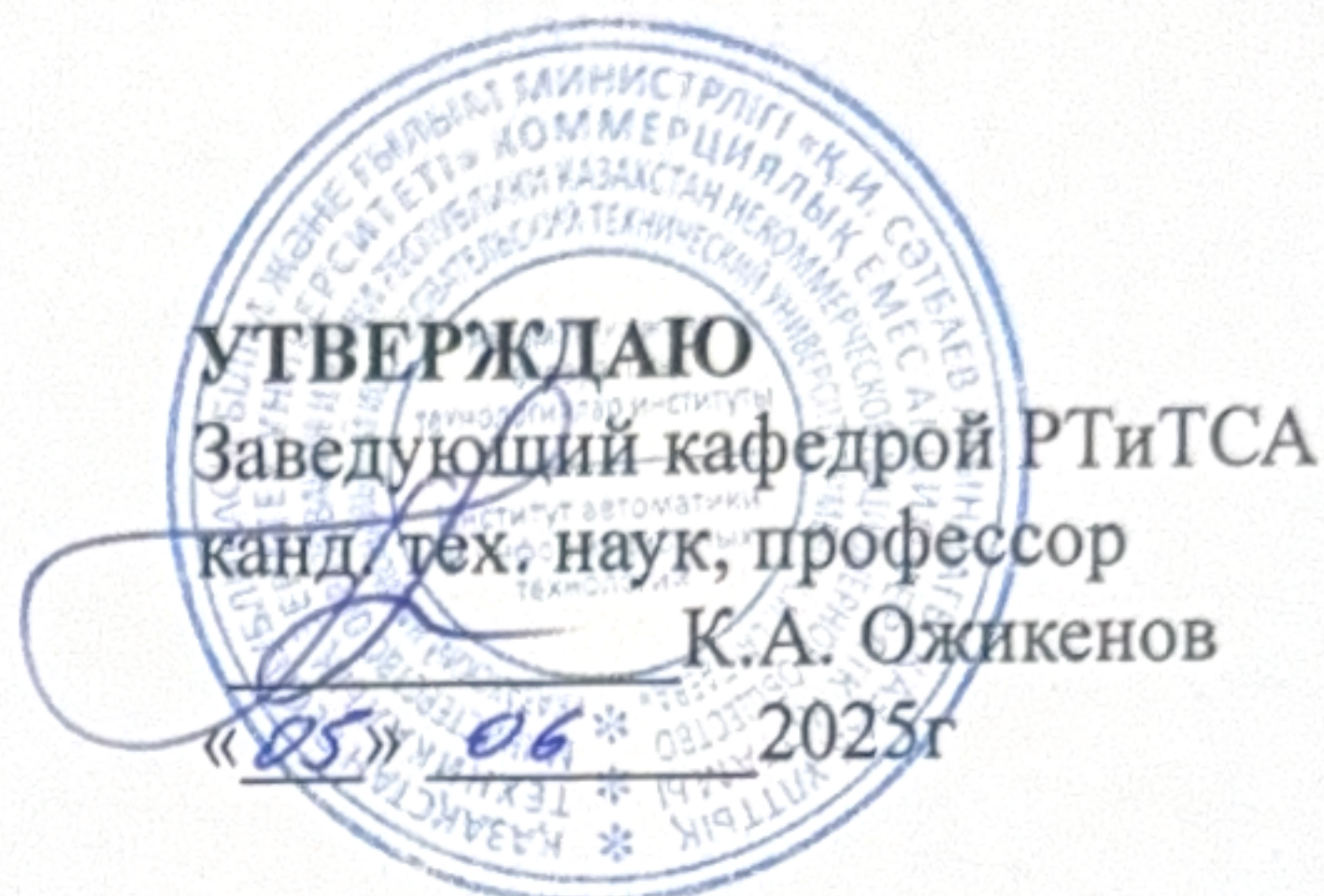
«28» 05 2025 г.

Алматы 2025

НЕКОММЕРЧЕСКОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «КАЗАХСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ имени К.И.САТПАЕВА»

Институт автоматики и информационных технологий

Кафедра «Робототехники и технических средств автоматики»



ЗАДАНИЕ

на выполнение дипломной работы

Обучающиеся: Саутов Ислам Алиджанович

Тема: Разработка алгоритма картирования корневых локусов и поиск ассоциации с показателями качества системы высокочастотной фильтрации сигналов

Утверждена приказом проректора по академической работе:

№ <u>521 - П/О</u>	<u>13.11.2024</u>
Срок сдачи законченного проекта	« <u>28</u> » <u>ноя</u> 2025 г.

Исходные данные к дипломному проекту:

- А) *Высокочастотные фильтры;*
- Б) *Разработка алгоритмами картирования локусов фильтров;*
- В) *Оценка эффективности системы фильтрации;*
- Г) *Влияние локусов фильтров на показатели качества фильтрации;*
- Д) *Проектирование суммированной модели фильтра;*
- Е) *Ассоциация значений корневых локусов фильтров;*

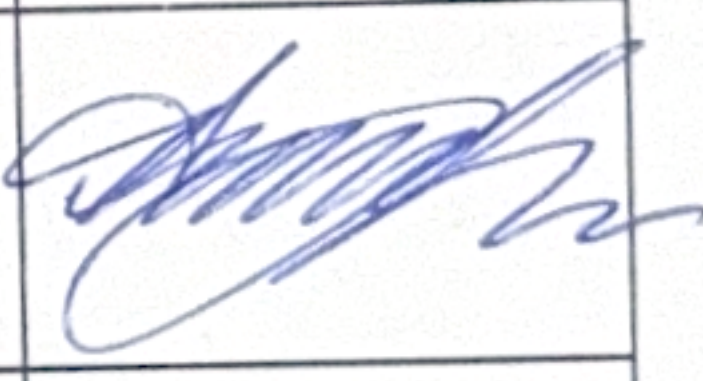
Перечень подлежащих разработке в дипломной работе вопросов: представлены 21 слайда презентации. Рекомендуемая основная литература: из 28 наименований.

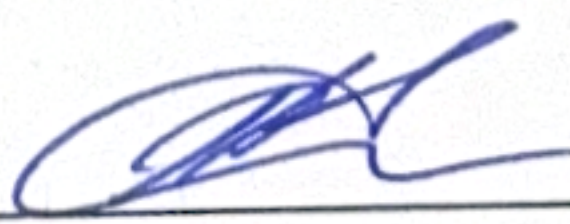
ГРАФИК
подготовка дипломной работы (проекта)

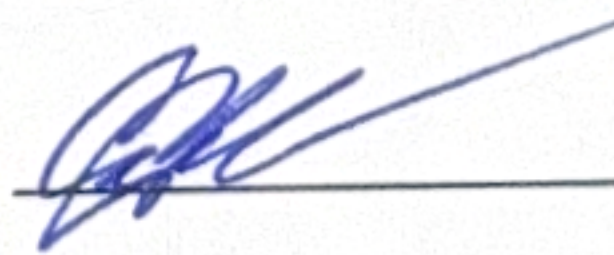
Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю и консультантам	Примечание
1. Теоретические основы фильтрации сигнала	01.02.2025 – 14.03.2025	Выполнено
2. Разработка алгоритма картирования локусов фильтров	15.03.2025 – 07.04.2025	Выполнено
3. Анализ показателей фильтрации сигнала	08.04.2025 – 13.05.2025	Выполнено
4. Влияние локусов фильтров на показатели качества фильтрации	14.05.2025 – 30.05.2025	Выполнено

Подписи

консультантов и нормоконтролера на законченную дипломную работу (проект) с указанием относящихся к ним разделов работы (проекта)

Наименования разделов	Консультанты И.О.Ф. (уч. степень, звание)	Дата подписания	Подпись
Нормоконтроль	Игембай Е. А., магистр технических наук, преподаватель	30.05.2025	
Основная часть	Алтай Е. А., доктор Ph.D, кандидат технических наук, старший преподаватель	05.06.2025	
Расчетная часть	Алтай Е. А., доктор Ph.D, кандидат технических наук, старший преподаватель	05.06.2025	

Научный руководитель  Базарбай Л.

Задание принял к исполнению обучающийся  Сауров И. А.

Дата «05» 06 2025 г

АНДАТПА

Дипломдық жұмыс түбірлік локустарды кескіндеу алгоритмін әзірлеуді зерттеуге және жоғары жиілікті сигналдарды сүзу жүйесінің сапа көрсеткіштерімен байланыстарды іздеуге арналған. Зерттеудің негізгі мақсаты – төменгі жиілікті кедергілерге ұшыраған өлшеу сигналдарының сүзу тиімділігіне түбірлік локустардың орналасуының әсеріне ерекше назар аударып, біріншіден алтыншы ретке дейінгі Баттерворт сүзгілерінің динамикалық сипаттамаларын талдаудың математикалық моделін құру. Жұмыста теориялық әдістер, соның ішінде тасымалдау функцияларына және күрделі жазықтық талдауға негізделген карталау алгоритмін жасау, сонымен қатар сүзгілердің уақыттық және жиілік сипаттамаларын бағалау үшін Simulink ортасында сандық модельдеу және осциллографиялық деректерді өңдеу сияқты практикалық тәсілдер қолданылды. Жүйені оңтайландыру үшін сандық тәуелділіктерді орнатуға мүмкіндік беретін селективтілік, фазалық бұрмалану және сүзу қатесі сияқты полустің орналасуы мен сапа көрсеткіштері арасындағы байланысты зерттеуге ерекше мән берілді.

Зерттеу нәтижелері фильтрлеу қатесінің сүзгі ретіне сызықты емес тәуелділігін анықтады, мұнда ең төменгі мән екінші ретте тіркелді, ал алтыншы ретте ол максималды мәнге жетті, бұл жүйенің күрделілігінің жоғарылауымен фазалық бұрмаланулардың ұлғаюымен байланысты. Bode диаграммасын қолдану арқылы жүргізілген түбір локустарының талдауы полустердің қиял осінен солға жылжуы селективтіліктің жоғарылауына ықпал ететінін көрсетті, бірақ сүзгілерді жобалау кезінде қосымша ескеруді қажет ететін фазалық ығысудың жоғарылауымен бірге жүреді. Алынған мәліметтер қатенің сүзгі тәртібіне тәуелділігінің графиктері және модельдеудің эксперименттік нәтижелерін көрсететін кестелер түрінде берілген. Жұмыстың практикалық маңыздылығы диагностикалық деректердің сенімділігін арттыру және физиологиялық процестерді бақылау үшін сигналдарды дәл сүзу қажет болатын биомедициналық инженерияда фильтрлерді оңтайландыру үшін әзірленген алгоритмді және алынған ассоциацияларды пайдалану мүмкіндігінде жатыр.

АННОТАЦИЯ

Дипломная работа посвящена исследованию по разработке алгоритма картирования корневых локусов и поиском ассоциации с показателями качества системы высокочастотной фильтрации сигналов. Основной задачей исследования является создание математической модели для анализа динамических характеристик фильтров Баттерворта с первого по шестой порядки, с особым вниманием к влиянию расположения корневых локусов на эффективность фильтрации измерительных сигналов, подверженных низкочастотным помехам. В работе применялись теоретические методы, включая разработку алгоритма картирования на основе передаточных функций и анализа комплексной плоскости, а также практические подходы, такие как численное моделирование в среде Simulink и обработка осциллографических данных для оценки временных и частотных характеристик фильтров. Особое значение придавалось изучению взаимосвязи между положением полюсов и качественными показателями, такими как селективность, фазовые искажения и погрешность фильтрации, что позволило установить количественные зависимости для оптимизации системы.

Результаты исследования выявили нелинейную зависимость погрешности фильтрации от порядка фильтра, где минимальное значение было зафиксировано при втором порядке, в то время как при шестом порядке оно достигло максимального значения, что связано с усилением фазовых искажений при увеличении сложности системы. Анализ корневых локусов, проведённый с использованием диаграммы Bode, продемонстрировал, что смещение полюсов влево от мнимой оси способствует повышению селективности, однако сопровождается ростом фазового сдвига, что требует дополнительного учёта при проектировании фильтров. Полученные данные представлены в виде графиков зависимости погрешности от порядка фильтра и таблиц, отражающих экспериментальные результаты моделирования. Практическая значимость работы заключается в возможности применения разработанного алгоритма и полученных ассоциаций для оптимизации фильтров в биомедицинской инженерии, где точная фильтрация сигналов, необходима для повышения достоверности диагностических данных и мониторинга физиологических процессов.

ANNOTATION

The thesis is devoted to the study of the development of a root loci mapping algorithm and the search for associations with quality indicators of a high-frequency signal filtering system. The main objective of the study is to create a mathematical model for analyzing the dynamic characteristics of Butterworth filters from the first to the sixth order, with special attention to the influence of the root loci location on the filtering efficiency of measuring signals subject to low-frequency interference. The work used theoretical methods, including the development of a mapping algorithm based on transfer functions and complex plane analysis, as well as practical approaches such as numerical modeling in the Simulink environment and oscillographic data processing to evaluate the time and frequency characteristics of the filters. Particular importance was given to studying the relationship between the pole position and quality indicators such as selectivity, phase distortion and filtering error, which made it possible to establish quantitative dependencies for system optimization.

The results of the study revealed a nonlinear dependence of the filtering error on the filter order, where the minimum value was recorded at the second order, while at the sixth order it reached the maximum value, which is associated with an increase in phase distortions with an increase in the complexity of the system. The analysis of root loci, carried out using the Bode diagram, demonstrated that the shift of the poles to the left of the imaginary axis contributes to an increase in selectivity, but is accompanied by an increase in the phase shift, which requires additional consideration when designing filters. The obtained data are presented in the form of graphs of the dependence of the error on the filter order and tables reflecting the experimental results of modeling. The practical significance of the work lies in the possibility of using the developed algorithm and the obtained associations to optimize filters in biomedical engineering, where accurate signal filtering is necessary to increase the reliability of diagnostic data and monitor physiological processes.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	9
1 Теоретические основы фильтрации сигнала	11
1.1 Определение фильтрации сигнала	11
1.2 Классификация фильтров	11
1.3 Показатели качества системы фильтрации	14
1.4 Вывод по главе 1	16
2 Разработка алгоритма картирования полюсов фильтров	18
2.1 Определение цели	18
2.2 Разработка фильтров	19
2.3 Оценка эффективности системы фильтрации	22
2.4 Картирование корневого полюса	25
2.5 Вывод по главе 2	29
3 Анализ показателей фильтрации сигнала	32
3.1 Проектирование суммированной модели фильтра	32
3.2 Обзор погрешности фильтрации сигнала	36
3.3 Вывод по главе 3	41
4 Влияние полюсов фильтров на показатели качества фильтрации	43
4.1 Ассоциация показателей качества системы фильтрации	43
4.2 Ассоциация значений корневых полюсов фильтров	45
4.3 Вывод по главе 4	47
Заключение	48
Список использованной литературы	51

ВВЕДЕНИЕ

В современном мире обработка измерительных сигналов представляет собой одну из ключевых задач в различных областях науки и техники, включая автоматизацию производственных процессов и биомедицинскую инженерию, где точное выделение полезного сигнала на фоне низкочастотных помех, таких как электромагнитные наводки или биологические артефакты, является критически важным для обеспечения надежности и качества работы устройств. Актуальность данной темы обусловлена возрастающим объемом данных, передаваемых и обрабатываемых в реальном времени, а также необходимостью разработки эффективных методов фильтрации, способных минимизировать искажения сигнала при сохранении его ключевых характеристик, что особенно востребовано в системах мониторинга здоровья, где обработка сигналов, таких как электрокардиограммы (ЭКГ) или электроэнцефалограммы (ЭЭГ), требует высокой точности для диагностики и предотвращения ошибок в интерпретации. В условиях интенсивного развития технологий, включая беспроводные сети и портативные медицинские устройства, возрастает потребность в фильтрах, которые обеспечивают оптимальный баланс между селективностью и минимальными фазовыми искажениями, что и определило выбор темы настоящей работы, направленной на исследование высокочастотных фильтров Баттерворта как одного из наиболее распространенных и эффективных решений в данной области.

Целью дипломной работы является разработка и анализ высокочастотных фильтров Баттерворта с первого по шестой порядки для обработки измерительных сигналов, подверженных низкочастотным помехам, с целью определения их влияния на качество фильтрации и выработки рекомендаций по выбору оптимального порядка фильтра в зависимости от конкретных условий применения. Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи: изучение теоретических основ фильтрации сигналов и классификации фильтров; выполнение теоретических расчетов передаточных функций и анализа корневых локусов фильтров Баттерворта; проектирование и моделирование фильтров в пакете прикладных программ MatLab и графической среде Simulink с использованием осциллографических данных; проведение анализа погрешности фильтрации на основе временных диаграмм и числовой оценки показателей качества; установление связи между расположением корневых локусов и практическими характеристиками фильтров с использованием диаграмм Bode и других аналитических инструментов. Объектом исследования выступают системы фильтрации сигналов, а предметом - высокочастотные фильтры Баттерворта, их проектирование, моделирование и оценка эффективности в условиях реальных помех.

Методология исследования включает сочетание теоретических методов, таких как математическое моделирование и анализ корневых локусов, с практическими подходами, включая численное моделирование и обработку осциллографических данных, что позволило получить достоверные результаты, подтвержденные как теоретическими расчетами, так и экспериментальными данными. Работа опирается на современные источники, включая руководства по цифровой обработке сигналов и научные публикации, что обеспечивает научную обоснованность и актуальность результатов. Основной акцент был сделан на использовании пакета прикладных программ MatLab и графической среды Simulink для создания модели фильтрации, что позволило смоделировать условия работы сигналов и оценить их поведение под воздействием различных факторов, таких как порядок фильтра и параметры входных сигналов.

Структура работы включает пять основных разделов, каждый из которых направлен на решение определенной части поставленных задач. Первая глава посвящена теоретическим основам фильтрации сигналов, где рассмотрены ключевые понятия, классификация фильтров и методология исследования, создавая основу для дальнейшего анализа. Вторая глава сосредоточена на теоретических разработках, включая расчет передаточных функций, определение показателей качества и анализ корневых локусов, что позволило заложить математическую базу для моделирования. Третья глава представляет практическую реализацию, включая проектирование модели в Simulink, анализ погрешности на основе осциллографических данных и использование нуль-полюсной диаграммы для оценки динамических характеристик фильтров. Четвертая глава посвящена числовой оценке показателей качества, где представлены данные погрешности, график зависимости погрешности от порядка фильтра и анализ с помощью диаграммы Bode, что позволило установить связь между теорией и практикой. Завершающим разделом является заключение, в котором обобщаются результаты исследования и формулируются выводы.

1 Теоретические основы фильтрации сигналов

Первая глава дипломной работы посвящена изучению теоретических основ фильтрации сигналов, которые являются ключевым элементом в разработке алгоритмов обработки данных для технических систем. Для полного понимания проделанной работы в данной главе рассматриваются основные аспекты фильтрации, включая понятие фильтров и их классификацию, способы реализации фильтрации сигналов, а также критерии оценки эффективности фильтров. Особое внимание уделяется принципам, которые лежат в основе высокочастотной фильтрации и анализа корневых локусов, выполняемого в среде MatLab, что позволяет связать теоретические положения с задачами исследования. Представленный материал формирует основу для дальнейшего анализа показателей качества системы и разработки алгоритма картирования корневых локусов.

1.1 Определение фильтрации сигнала

Фильтры представляют собой особый класс линейных систем, предназначенных для управления свойствами сигнала путем выборочного подавления нежелательных компонентов или усиления целевых составляющих. Концептуально фильтр позволяет выделить интересующий диапазон частот, сохраняя или улучшая качество сигнала, что делает его незаменимым инструментом в обработке данных. В контексте данной работы фильтры рассматриваются как средство реализации высокочастотной фильтрации, направленной на подавление низкочастотных помех [1].

1.2 Классификация фильтров

Классификация фильтров проводится по нескольким признакам, которые определяют их функциональные возможности и область применения. Одним из основных критериев является частотная характеристика, которая указывает, какие частотные компоненты сигнала пропускаются или подавляются. В зависимости от частотных характеристик выделяют следующие типы фильтров:

1) Фильтры нижних частот (Low Pass Filters): предназначены для пропускания низкочастотных компонентов сигнала, подавляя высокие частоты (Рисунок 1.1). Такие фильтры используются для сглаживания сигналов или устранения высокочастотных шумов [2].

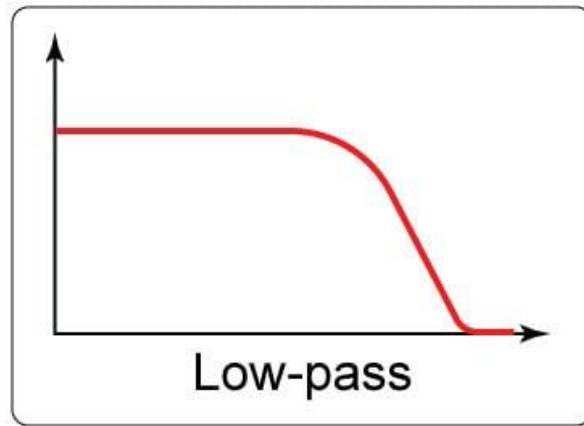


Рисунок 1.1 – Фильтр нижних частот

2) Фильтры верхних частот (High Pass Filters): выполняют противоположную функцию, пропуская высокие частоты и подавляя низкие (Рисунок 1.2). Фильтры данного типа применяются в задачах, где необходимо устранить низкочастотные помехи [3].

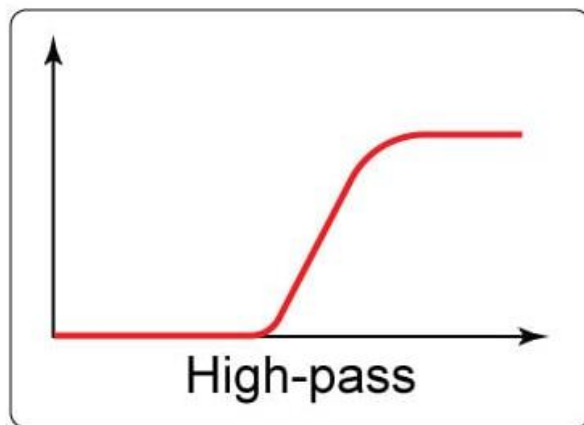


Рисунок 1.2 – Фильтр верхних частот

3) Полосовые фильтры (Band Pass Filters), совмещают функции фильтров нижних частот и фильтров верхних частот, пропуская сигналы в заданном диапазоне частот (полосе пропускания) и подавляя частоты вне этого диапазона (Рисунок 1.3). Полосовой фильтр реализуется путем последовательного соединения фильтров нижних частот и фильтров верхних частот, что позволяет выделить целевую полосу частот [4].

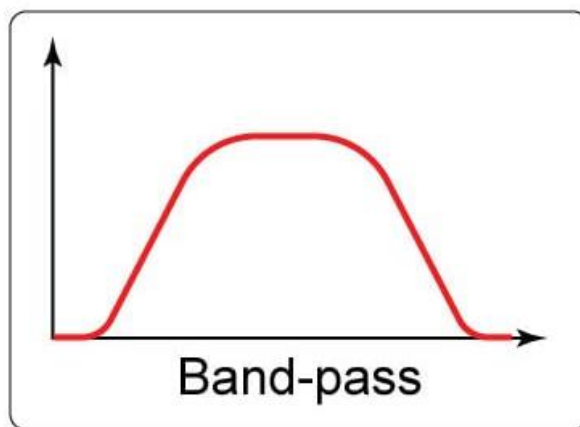


Рисунок 1.3 – Полосовой фильтр

4) Режекторные фильтры (Band Stop Filters) подавляют сигналы в определенном частотном диапазоне, пропуская частоты вне полосы пропускания (Рисунок 4). Режекторные фильтры, относительно полосовых фильтров напротив, реализуются через параллельное соединение фильтров нижних и верхних частот [5].

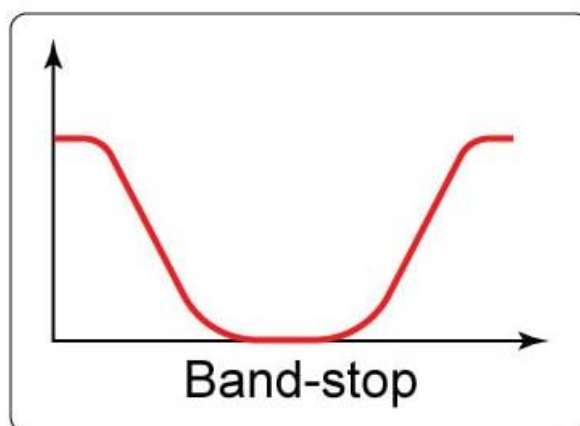


Рисунок 1.4 – Режекторный фильтр

По математическому описанию фильтры делятся на непрерывные и дискретные. Непрерывные фильтры, описываемые дифференциальными уравнениями, применяются в аналоговых системах, где сигнал обрабатывается без дискретизации. Дискретные фильтры, основанные на разностных уравнениях, используются в цифровых системах, где сигнал представлен в виде последовательности отсчетов.

Классификация фильтров по виду аппроксимирующих полиномов определяет их частотные и фазовые характеристики. Основные типы фильтров по этому признаку включают:

Фильтр Баттерворта: характеризуется максимально плоской амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ) в полосе пропускания, что минимизирует искажения сигнала [6].

Фильтр Бесселя: обеспечивает линейную фазо-частотную характеристику, что минимизирует фазовые искажения, но имеет более плавное затухание в полосе подавления [7].

Фильтр Чебышева: отличается более крутым затуханием в полосе подавления за счет пульсаций в полосе пропускания или подавления [8].

Фильтры классифицируются на аналоговые и цифровые. Аналоговые фильтры реализуются с использованием электронных компонентов, таких как резисторы и конденсаторы, и применяются в системах реального времени. Цифровые фильтры, напротив, реализуются программно, например, в среде MatLab, что обеспечивает высокую точность и гибкость настройки [9].

1.3 Показатели качества системы фильтрации

Показатели качества системы фильтрации (Рисунок 1.5) являются ключевыми критериями, позволяющими оценить эффективность работы фильтров в задачах обработки сигналов. Эти показатели определяют, насколько точно и устойчиво фильтр выполняет свою функцию, будь то подавление нежелательных частотных компонентов или выделение целевого сигнала. В контексте высокочастотной фильтрации, рассматриваемой в данной работе, показатели качества играют особую роль, так как они напрямую влияют на способность системы устранять низкочастотные помехи и обеспечивать стабильную работу. Для систематического анализа показатели качества делятся на две основные категории: прямые и косвенные. Прямые показатели характеризуют временные характеристики системы, такие как время переходного процесса и перерегулирование, тогда как косвенные показатели включают частотные и корневые характеристики, отражающие поведение фильтра в частотной области и комплексной плоскости.



Рисунок 1.5 – Блок-схема показателей качества системы фильтрации

Прямые показатели качества связаны с динамическими характеристиками фильтра во временной области и определяются на основе его реакции на стандартные входные сигналы, такие как ступенчатый или импульсный сигнал. Основными прямыми показателями являются время переходного процесса и перерегулирование, которые особенно важны для оценки эффективности высокочастотных фильтров, используемых в реальных системах [1].

Время переходного процесса представляет собой интервал времени, за который выходной сигнал фильтра достигает установившегося значения с заданной точностью. Для высокочастотного фильтра время переходного процесса критично, так как оно определяет, насколько быстро система может реагировать на изменения входного сигнала.

Перерегулирование характеризует максимальное отклонение выходного сигнала от установившегося значения в процентах и указывает на степень колебательности системы. Высокое перерегулирование нежелательно для высокочастотных фильтров, так как оно может привести к усилению нежелательных высокочастотных компонентов [10].

Косвенные показатели качества оценивают поведение фильтра в частотной области и комплексной плоскости, используя полученные данные мы можем глубже понять его селективность и устойчивость. К ним относятся частотные характеристики (амплитудно-частотная и фазо-частотная характеристики) и корневые характеристики, которые имеют особое значение в анализе корневых локусов, рассматриваемых в данной работе.

Частотные характеристики включают амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) и фазо-частотную характеристику (ФЧХ). АЧХ описывает, как фильтр изменяет амплитуду сигнала в зависимости от частоты, и является основным инструментом для оценки селективности высокочастотного фильтра. Для высокочастотного фильтра АЧХ должна обеспечивать минимальное затухание в полосе пропускания (высокие частоты) и максимальное подавление в полосе заграждения (низкие частоты). ФЧХ, в свою очередь, характеризует фазовый сдвиг сигнала, вызываемый фильтром [11].

Корневые характеристики определяются расположением полюсов и нулей передаточной функции фильтра в комплексной плоскости и напрямую связаны с анализом корневых локусов, который является ключевым аспектом данной работы, позже мы графически рассмотрим данный аспект. Полюса передаточной функции определяют устойчивость и динамическое поведение фильтра. Например, для устойчивого фильтра все полюса должны находиться в левой полуплоскости (для непрерывных систем) или внутри единичной окружности (для дискретных систем) [12].

1.4 Вывод по главе 1

Проведенный анализ теоретических основ фильтрации сигналов, изложенный в первой главе, позволяет сформировать целостное представление о том, как фильтры функционируют в современных системах обработки данных и какие аспекты их работы наиболее важны для задач высокочастотной фильтрации, которые я исследую в этой работе. Разбираясь с основами, я определил термин фильтрации сигнала, что дает необходимую базу для дальнейшего погружения в тему. Фильтрация, это не просто технический процесс, а целая система подходов, позволяющих управлять сигналами так, чтобы выделять нужные компоненты и подавлять помехи. Именно этот принцип лег в основу всех последующих выводов.

Далее я перешел к классификации фильтров. Разделение фильтров по частотным характеристикам, нижних, верхних частот, полосовых и режекторных, понимание принципа их действий показывает гибкость и возможности фильтрации сигналов. Я уделил внимание высокочастотным фильтрам, потому что они напрямую связаны с моей работой. В процессе работы затронул полиномы, Баттерворта, Чебышева, Бесселя и как они влияют на поведение фильтров. Этот раздел объясняет, что выбор фильтра зависит от поставленной задачи, что более важно при проектировании, точность, устойчивость или простота реализации.

Описание показателей качества системы фильтрации. Разделение показателей на прямые и косвенные практично для системного подхода. Прямые показатели, отображают представление о том, как фильтр ведет себя во времени. Время переходного процесса показывает, насколько быстро фильтр справляется с обработкой сигнала, а перерегулирование дает понимание, насколько система будет стабильной при резких изменениях. Для высокочастотных фильтров эти параметры критичны, потому что любая задержка или лишние колебания влияют на результат фильтрации. Косвенные показатели, такие как амплитудно-частотная и фазо-частотная характеристики, показывают, как фильтр работает в частотной области. С использованием АЧХ мы можем рассмотреть, насколько эффективно фильтр подавляет низкие частоты. Корневые характеристики, отображают как полюса и нули передаточной функции влияют на устойчивость системы. Здесь прямая связь с корневыми локусами.

Данная глава является фундаментом, на котором построена дальнейшая работа. Понимая, что такое фильтрация, каких классов бывают фильтры, появляется четкое представление о данной дипломной работе. Высокочастотная фильтрация, требует не только правильного выбора типа фильтра, но и тщательного анализа его характеристик, чтобы добиться нужной точности и устойчивости. Особенно важен акцент на корневые локусы, потому что они позволяют рассмотреть систему изнутри, понять как она устроена и как ее можно улучшить. Именно поэтому выводы этой главы подводят к следующему этапу, разработке алгоритма картирования локусов. Все теоретические сведения от

понятия фильтрации до показателей качества, лежат в основе для практической части.

2 Разработка алгоритма картирования корневых локусов фильтров

2.1 Определение цели

Разработка алгоритма картирования корневых локусов для высокочастотных фильтров является центральной задачей данной работы, направленной на повышение эффективности обработки измерительных сигналов. Этот процесс предполагает создание инструмента, который позволит не только рассчитывать параметры фильтров, но и анализировать их устойчивость и динамические характеристики через расположение корней передаточной функции в комплексной плоскости. В контексте высокочастотной фильтрации, рассматриваемой в данном исследовании, корневые локусы играют особую роль, так как они обеспечивают возможность оптимизации фильтров для подавления низкочастотных помех, сохраняя при этом целевые высокочастотные компоненты сигнала. Основная цель данной главы заключается в описании методологических основ разработки такого алгоритма, который станет фундаментом для последующей реализации и оценки в практических условиях.

Для достижения этой цели я определил ряд задач, каждая из которых вносит вклад в создание целостного алгоритма. Во первых, необходимо разработать высокочастотный фильтр, способный эффективно устранять низкочастотные помехи, характерные для измерительных сигналов. В качестве базового решения я выбрал фильтр Баттерворта, поскольку его частотные характеристики обеспечивают плавное затухание в полосе подавления, что делает его подходящим для моих задач. Во вторых, требуется рассчитать передаточные функции фильтров различных порядков, чтобы обеспечить гибкость в выборе параметров, таких как частота среза и селективность. Эти расчеты составляют основу для дальнейшего анализа корневых локусов, так как передаточная функция напрямую определяет расположение полюсов и нулей системы. В третьих, я опишу процесс картирования корневых локусов, который позволит оценить, как изменения параметров фильтра влияют на его устойчивость и динамическое поведение. Этот этап включает разработку алгоритма, включающего последовательность шагов от расчета фильтра до проверки корректности его характеристик.

Особое значение в данном исследовании имеет использование корневых локусов как инструмента анализа, поскольку они предоставляют наглядное представление о поведении системы в зависимости от ее параметров. Корневые локусы, отражающие траектории движения полюсов передаточной функции, позволяют выявить потенциальные проблемы, такие как неустойчивость или избыточные колебания, что особенно важно для высокочастотных фильтров, где точность и стабильность играют решающую роль. В рамках данной работы я разработал алгоритм, который будет применим к фильтрам Баттерворта, но при этом достаточно универсален для адаптации к другим типам фильтров.

Таким образом, цель данной главы заключается в создании методологической базы для разработки алгоритма картирования корневых

локусов, который позволит оптимизировать высокочастотные фильтры для обработки измерительных сигналов. Решение поставленных задач, включая расчет фильтров, настройку их параметров и описание процесса картирования локусов, обеспечит необходимую основу для реализации алгоритма в программной среде MatLab и Simulink, что будет рассмотрено в следующей главе.

2.2 Разработка фильтров

Разработка высокочастотных фильтров, способных эффективно подавлять низкочастотные помехи в измерительных сигналах, составляет основу алгоритма картирования корневых локусов, который является центральным элементом данной работы. Этот процесс требует тщательного расчета передаточных функций, выбора параметров фильтров и подготовки к анализу их корневых характеристик, которые определяют устойчивость и динамическое поведение системы. В контексте высокочастотной фильтрации, рассматриваемой в данном исследовании, фильтры Баттерворта были выбраны в качестве основного инструмента благодаря их способности обеспечивать плавную амплитудно-частотную характеристику и минимальные пульсации в полосе пропускания, что делает их оптимальными для задач, связанных с выделением высокочастотных компонент сигнала. Настоящий раздел посвящен методологии расчета передаточных функций, настройке параметров фильтров и их подготовке к анализу корневых локусов [13].

Первостепенной задачей является расчет передаточных функций высокочастотного фильтра Баттерворта для порядков с первого по шестой, что позволяет охватить широкий спектр характеристик, от простых систем с низкой селективностью до более сложных, обеспечивающих высокую точность фильтрации. Передаточная функция $H(s)$ описывает, как фильтр преобразует входной сигнал, пропуская высокие частоты и подавляя низкие, что важно для устранения низкочастотных помех, характерных для измерительных сигналов. Для упрощения аналитических расчетов я использовал нормированную частоту среза, которая задает границу между полосами пропускания и подавления. Передаточные функции для фильтров Баттерворта различных порядков приведены в формулах (2.1-2.7):

$$H(s) = \frac{B_n(s)}{s^n}, \quad (2.1)$$

$$H(s) = \frac{s}{s+1}, \quad (2.2)$$

$$H(s) = \frac{s^2}{s^2 + 1.4142s + 1}, \quad (2.3)$$

$$H(s) = \frac{s^3}{s^3 + 2s^2 + 2s + 1}, \quad (2.4)$$

$$H(s) = \frac{s^4}{s^4 + 2.6131s^3 + 3.4142s^2 + 2.6131s + 1}, \quad (2.5)$$

$$H(s) = \frac{s^5}{s^5 + 3.2361s^4 + 5.2361s^3 + 5.2361s^2 + 3.2361s + 1}, \quad (2.6)$$

$$H(s) = \frac{s^6}{s^6 + 3.8637s^5 + 7.4641s^4 + 9.1416s^3 + 7.4641s^2 + 3.8637s + 1}, \quad (2.7)$$

Эти функции основаны на полиноме Баттерворта, корни которого (полюса) расположены на окружности в комплексной плоскости с равномерным угловым распределением, что обеспечивает минимальные пульсации в полосе пропускания и плавное затухание в полосе подавления. Нормированная частота среза упрощает расчеты, но при необходимости может быть масштабирована для соответствия реальным частотным диапазонам, что делает разработанные функции универсальными для различных приложений [12].

Для наглядности передаточные функции представлены в таблице 2.1, что позволяет сравнить их структуру и сложность.

Таблица 2.1 – Передаточная функция Баттерворта с 1-го по 6-ой порядок

n	Передаточная функция
1	$\frac{s}{s + 1}$
2	$\frac{s^2}{s^2 + 1.4142s + 1}$
3	$\frac{s^3}{s^3 + 2s^2 + 2s + 1}$
4	$\frac{s^4}{s^4 + 2.6131s^3 + 3.4142s^2 + 2.6131s + 1}$

5	$\frac{s^5}{s^5 + 3.2361s^4 + 5.2361s^3 + 5.2361s^2 + 3.2361s + 1}$
6	$\frac{s^6}{s^6 + 3.8637s^5 + 7.4641s^4 + 9.1416s^3 + 7.4641s^2 + 3.8637s + 1}$

Настройка фильтров предполагает выбор оптимального порядка и частоты среза, которые существенно влияют на их селективность, устойчивость и динамические характеристики. Порядок фильтра определяет крутизну затухания в полосе подавления, фильтры низкого порядка (первого или второго) имеют простую структуру и минимальное время переходного процесса, но их способность эффективно подавлять низкочастотные помехи ограничена из-за пологого спада амплитудно-частотной характеристики. Например, фильтр первого порядка обеспечивает затухание 20 дБ/декаду, что может быть недостаточно для сигналов с сильными низкочастотными компонентами. Напротив, фильтры более высоких порядков, таких как пятый или шестой, обладают затуханием до 120 дБ/декаду, что значительно улучшает селективность, но увеличивает сложность системы и потенциально приводит к росту колебательности, что требует дополнительного анализа устойчивости [14].

Частота среза задает границу, выше которой сигнал пропускается с минимальным затуханием, а ниже — подавляется. В данной работе я ориентировался на нормированную частоту среза, что упрощает теоретические расчеты и позволяет сосредоточиться на структуре фильтра. Однако в реальных условиях частота среза должна выбираться с учетом спектральных характеристик измерительного сигнала. Например, если низкочастотные помехи сосредоточены в диапазоне до 100 Гц, а полезный сигнал находится выше 1 кГц, частота среза должна быть установлена между этими значениями, чтобы обеспечить эффективное разделение компонент. Такой подход требует тщательного анализа спектра сигнала, который будет выполнен на этапе реализации, но уже на данном этапе я предусмотрел гибкость в настройке чтобы адаптировать фильтр к различным условиям.

Ключевым аспектом разработки является подготовка передаточных функций к анализу корневых характеристик, которые станут основой для картирования корневых локусов. Полюса передаточной функции, определяемые корнями знаменателя $H(s)$, играют решающую роль в формировании динамического поведения фильтра.

Корневые локусы, представляют собой траектории движения полюсов в комплексной плоскости при изменении параметров фильтра, таких как коэффициент усиления или частота среза. Эти траектории позволяют прогнозировать, как изменения в структуре фильтра повлияют на его устойчивость и показатели качества, такие как время переходного процесса или

перерегулирование. Например, если полюса окажутся слишком близко к мнимой оси, система может стать неустойчивой, что недопустимо для высокочастотных фильтров, используемых в измерительных системах. Поэтому на этапе разработки я уделил особое внимание точному определению полюсов и их влиянию на поведение фильтра, чтобы обеспечить надежную основу для последующего анализа [15].

Разработанные передаточные функции и выбранные параметры фильтров непосредственно связаны с алгоритмом картирования корневых локусов, описанным в моей работе. Алгоритм, структура которого включает расчет передаточной функции, определение нуль-полюсной конфигурации и проверку корректности, опирается на точность расчетов, выполненных на данном этапе. Например, передаточная функция $H(s)$ служит входным данным для построения нуль-полюсной диаграммы, которая является первым шагом в анализе корневых локусов. Выбор порядка фильтра и частоты среза также влияет на сложность этой диаграммы, что требует сбалансированного подхода к настройке параметров. Таким образом, разработка фильтров не только обеспечивает их функциональность, но и создает необходимые условия для реализации алгоритма, который позволит оптимизировать систему на следующих этапах.

Настройка фильтров включает не только выбор порядка и частоты среза, но и учет теоретических ограничений, связанных с их реализацией. Фильтры высокого порядка требуют более сложных вычислительных ресурсов, что может быть проблематично в системах реального времени. Кроме того, необходимо учитывать чувствительность фильтра к вариациям параметров, таких как отклонения частоты среза или коэффициентов полинома, которые могут возникать при практической реализации. Для минимизации этих эффектов я ориентировался на фильтры среднего порядка (третьего и четвертого), которые обеспечивают достаточную селективность без чрезмерного усложнения системы. Такой подход, на мой взгляд, оптимален для задач данной работы, где требуется баланс между теоретической точностью и практической применимостью.

Таким образом, разработка и настройка высокочастотных фильтров Баттерворта включают расчет передаточных функций, выбор параметров и подготовку к анализу корневых характеристик, которые составляют основу алгоритма картирования локусов. Рассчитанные функции и определенные параметры обеспечивают теоретическую базу для последующей реализации фильтров в программной среде и анализа их эффективности, что будет рассмотрено в следующих главах.

2.3 Оценка эффективности системы фильтрации

Оценка эффективности системы фильтрации является важнейшим этапом разработки алгоритма картирования корневых локусов, поскольку она позволяет определить, насколько успешно высокочастотные фильтры Баттерворта

выполняют задачу подавления низкочастотных помех в измерительных сигналах. Эффективность фильтра определяется через совокупность показателей качества, которые характеризуют его временные, частотные и корневые характеристики, обеспечивая комплексное понимание поведения системы. В контексте данной работы, где акцент сделан на высокочастотную фильтрацию, показатели качества играют особую роль, так как они напрямую связаны с точностью выделения полезного сигнала и устойчивостью системы. Настоящий раздел посвящен методологическому анализу этих показателей, их зависимости от параметров фильтра, таких как порядок и частота среза, а также их связи с корневыми локусами, которые будут использованы для оптимизации системы на следующих этапах исследования.

Прямые показатели качества, связанные с временными характеристиками системы, включают время переходного процесса и перерегулирование, которые отражают, как фильтр реагирует на изменения входного сигнала. Время переходного процесса определяется как интервал, за который выходной сигнал достигает и стабилизируется вблизи установившегося значения после подачи ступенчатого входного сигнала. Для высокочастотных фильтров Баттерворта этот показатель важен, так как измерительные системы часто требуют быстрой реакции для обработки сигналов в реальном времени. Время переходного процесса зависит от порядка фильтра и коэффициента демпфирования. Этот коэффициент обеспечивает умеренные колебания, что сокращает время стабилизации по сравнению с системами с низким демпфированием, где колебания могут быть затяжными [16].

Перерегулирование, в свою очередь, характеризует максимальное отклонение выходного сигнала от установившегося значения, выраженное в процентах. Для фильтров Баттерворта перерегулирование минимально благодаря оптимальному расположению полюсов, которые, как отмечалось ранее, находятся на окружности радиуса в комплексной плоскости. Например, для фильтра второго порядка перерегулирование составляет около 4 - 5%, что приемлемо для большинства измерительных приложений. Однако с увеличением порядка фильтра, например, до пятого или шестого, количество полюсов растет, что может усилить колебания и увеличить перерегулирование, если параметры не оптимизированы. Теоретически, выбор фильтров среднего порядка (третьего или четвертого) позволяет достичь компромисса между быстродействием и минимальным перерегулированием, что делает их предпочтительными для задач данной работы [17].

Косвенные показатели качества охватывают частотные и корневые характеристики, которые предоставляют информацию о поведении фильтра в частотной области и комплексной плоскости. Основными частотными показателями являются амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) и фазо-частотная характеристика (ФЧХ). АЧХ описывает, как фильтр изменяет амплитуду сигнала в зависимости от частоты, и для высокочастотного фильтра Баттерворта характеризуется плавным спадом в полосе подавления и минимальным затуханием в полосе пропускания. Например, для нормированной

частоты среза фильтр второго порядка обеспечивает затухание 3 дБ, а в полосе подавления затухание увеличивается с крутизной 40 дБ/декаду. С увеличением порядка крутизна возрастает (80 дБ/декаду для четвертого порядка), что улучшает способность фильтра подавлять низкочастотные помехи, но усложняет настройку.

ФЧХ, определяющая сдвиг фазы сигнала, также играет важную роль, особенно в системах, где синхронизация сигналов критически важна. Для фильтров Баттерворта ФЧХ изменяется плавно, но с ростом порядка фазовый сдвиг увеличивается, что может привести к задержкам в обработке сигнала. Теоретически, это требует внимательного выбора порядка фильтра, чтобы минимизировать нежелательные фазовые искажения, сохраняя при этом селективность. В рамках данной работы частотные характеристики рассматриваются как основа для оценки эффективности фильтра, поскольку они напрямую связаны с его способностью выделять полезный высокочастотный сигнал из смеси с помехами [11].

Корневые характеристики, связанные с расположением полюсов передаточной функции $H(s)$, являются ключевым элементом анализа в контексте корневых локусов. Полюса, рассчитанные в разделе 2.2, определяют устойчивость системы и ее динамическое поведение. Для фильтра второго порядка полюса расположены в левой полуплоскости, что гарантирует устойчивость, а их расстояние от мнимой оси влияет на скорость затухания колебаний. С увеличением порядка фильтра количество полюсов растет, и их расположение становится более сложным, что требует тщательного анализа для предотвращения неустойчивости. Корневые локусы, которые будут подробно рассмотрены в разделе 2.4, позволяют оценить, как изменения параметров, таких как частота среза или усиление, влияют на положение полюсов, что напрямую связано с показателями качества.

Эффективность фильтра зависит от его параметров, таких как порядок и частота среза, которые были определены в разделе 2.2. Порядок фильтра влияет на все показатели качества: низкие порядки (первый–второй) обеспечивают простоту и быстрое время переходного процесса, но их селективность ограничена из-за пологого спада АЧХ (20–40 дБ/декаду). Высокие порядки (пятый–шестой) улучшают селективность (100–120 дБ/декаду), но увеличивают перерегулирование и фазовые искажения, а также усложняют анализ устойчивости из-за большего числа полюсов. Теоретически, фильтры третьего–четвертого порядка представляют оптимальный выбор для задач данной работы, так как они обеспечивают достаточную селективность при умеренных временных и фазовых характеристиках [12].

Частота среза определяет, какие частоты фильтр пропускает или подавляет. Нормированное значение, использованное в расчетах упрощает анализ, но в реальных условиях значение должно соответствовать спектру сигнала. Например, если помехи сосредоточены до 100 Гц, а полезный сигнал — выше 1 кГц, значение выбирается в промежуточном диапазоне. Неправильный

выбор значения может привести к недостаточному подавлению помех или потере полезного сигнала, это снижает эффективность фильтра [18].

Коэффициент демпфирования, также влияет на эффективность. Для фильтра второго порядка обеспечивает баланс между скоростью и стабильностью, но для высших порядков для каждой пары полюсов может варьироваться, что усложняет настройку. Теоретически, оптимизация требует учета всех полюсов, чтобы минимизировать перерегулирование и обеспечить устойчивость, что будет проанализировано через корневые локусы [19].

Показатели качества тесно связаны с корневыми локусами, которые отражают динамику изменения полюсов при вариации параметров. Например, увеличение усиления фильтра может сместить полюса ближе к мнимой оси, увеличивая перерегулирование и снижая устойчивость. Анализ локусов, опирается на показатели качества, так как временные характеристики (время переходного процесса, перерегулирование) и частотные характеристики (АЧХ, ФЧХ) зависят от расположения полюсов. Теоретически, корневые локусы позволяют предсказать поведение фильтра и оптимизировать его параметры.

Оценка эффективности фильтров требует учета компромиссов между показателями. Например, увеличение порядка улучшает селективность, но увеличивает время переходного процесса и фазовые искажения. Аналогично, выбор низкого порядка усиливает подавление помех, но может затронуть полезный сигнал. Эти компромиссы анализируются через показатели качества, чтобы найти оптимальную конфигурацию фильтра. Кроме того, фильтры высоких порядков чувствительны к вариациям параметров, что влияет на их реализацию в программной среде Simulink.

Методологическая оценка показателей качества подготавливает систему к реализации и числовому анализу. Временные характеристики будут проверены через осциллографические графики, частотные через диаграммы Bode, а корневые через Zero-Plot диаграммы в главе 3. Числовая оценка в главе 4 уточнит, как теоретические показатели соответствуют реальным, что позволит оптимизировать фильтр и алгоритм картирования локусов.

Таким образом, оценка эффективности системы фильтрации через прямые и косвенные показатели качества обеспечивает основу для анализа высокочастотных фильтров Баттерворта. Рассмотренные показатели, их зависимость от параметров и связь с корневыми локусами создают предпосылки для реализации и оптимизации алгоритма, что будет подробно изучено в последующих главах.

2.4 Картирование корневого локуса

Картирование корневых локусов представляет собой ключевой этап разработки алгоритма, направленного на оптимизацию высокочастотных фильтров Баттерворта, используемых для подавления низкочастотных помех в измерительных сигналах. Корневые локусы позволяют визуализировать и

анализировать, как изменения параметров фильтра, таких как коэффициент усиления или частота среза, влияют на расположение полюсов передаточной функции в комплексной плоскости, определяя тем самым устойчивость системы и ее динамические характеристики. В контексте данной работы, где акцент сделан на разработку алгоритма картирования локусов, этот процесс обеспечивает теоретическую основу для оценки поведения фильтров и подготовки к их реализации в программной среде. Настоящий раздел посвящен описанию алгоритма картирования корневых локусов, его шагов, роли в оптимизации фильтров и связи с показателями качества, рассмотренными ранее, чтобы создать предпосылки для практической реализации и анализа, в последующих главах [20].

Корневой локус - это графическое представление траекторий полюсов передаточной функции $H(s)$ в комплексной плоскости при изменении какого-либо параметра системы, чаще всего коэффициента усиления. Для высокочастотных фильтров Баттерворта, передаточные функции которых были рассчитаны в разделе 2.2, полюса определяются корнями полинома знаменателя. Эти полюса задают начальные точки локусов, а их движение при изменении параметров отражает, как фильтр будет вести себя в терминах устойчивости, времени переходного процесса и других показателей качества, описанных в разделе 2.3. Основная цель картирования локусов заключается в том, чтобы предсказать, как изменения параметров фильтра повлияют на его характеристики, и оптимизировать эти параметры для достижения желаемых свойств [15].

Теоретически, построение корневого локуса основано на уравнении характеристик разомкнутой системы, где передаточная функция удовлетворяет условию. Для фильтров Баттерворта, где $H(s)$ уже определена, локусы строятся путем анализа нулей и полюсов, которые соответствуют передаточной функции фильтра в разомкнутой цепи. Эти точки задают начальные и конечные условия для траекторий локусов, которые могут быть вычислены аналитически или с использованием в программной среде MatLab.

Алгоритм картирования корневых локусов, разработанный в рамках данной работы, представляет собой структурированный процесс, направленный на анализ и оптимизацию высокочастотных фильтров Баттерворта посредством определения траекторий полюсов передаточной функции в комплексной плоскости. Алгоритм основан на последовательности шагов, отраженных в блок-схеме, которая включает расчет высокочастотного фильтра, ввод передаточной функции, построение нуль-полюсной диаграммы и проверку корректности результатов. Этот процесс обеспечивает теоретическую основу для последующей реализации в программной среде и оценки эффективности фильтров, что будет рассмотрено в главах 3 и 4. На рисунке 2.1 приведена блок-схема и подробное описание каждого шага алгоритма.



Рисунок 2.1 – Блок-схема алгоритма картирования корневых локусов системы высокочастотной фильтрации измерительного сигнала

1. Расчет высокочастотного фильтра. На первом этапе выполняется расчет передаточной функции $H(s)$, которая служит основой для анализа корневых локусов. Эти функции рассчитанные в разделе 2.2 содержат информацию о нулях и полюсах, необходимых для дальнейших шагов. Точность расчета $H(s)$ имеет решающее значение, так как ошибки в определении коэффициентов полинома, могут привести к искажению нуль-полюсной конфигурации и, как следствие, к неверным траекториям корневых локусов. Теоретически, этот шаг требует использования полинома Баттерворта чтобы обеспечить правильное расположение полюсов в комплексной плоскости.

2. Ввод высокочастотного фильтра $H(s)$ соответствующего порядка. На этом этапе передаточная функция $H(s)$, соответствующая выбранному порядку фильтра, вводится в алгоритм как входные данные для анализа. Выбор порядка фильтра определяет сложность нуль-полюсной конфигурации и влияет на последующее построение корневых локусов. Теоретически, этот шаг предполагает проверку корректности $H(s)$, чтобы убедиться, что она соответствует заданным требованиям, таким как нормированная частота среза, и не содержит ошибок в структуре полинома, которые могут повлиять на точность анализа.

3. Построение нуль-полюсной диаграммы для определения корневого локуса. На данном этапе выполняется построение нуль-полюсной диаграммы, которая служит основой для определения траекторий корневых локусов. Для высокочастотного фильтра Баттерворта нули располагаются в начале координат,

а полюса — в точках, заданных полиномом Баттерворта. Нуль-полюсная диаграмма отображает эти точки в комплексной плоскости, позволяя определить начальные условия для локусов, которые начинаются в полюсах и движутся к нулям при изменении коэффициента усиления. Теоретически, этот шаг включает анализ расположения нулей и полюсов, а также оценку их влияния на устойчивость системы, например проверку того, что все полюса находятся в левой полуплоскости. Построение диаграммы подготавливает данные для аналитического или программного расчета траекторий локусов.

4. Проверка корректности расчета. На заключительном этапе проводится проверка корректности построенной нуль-полюсной диаграммы и определенных корневых локусов. Проверка включает сравнение результатов с ожидаемым поведением системы, основанным на расчетах $H(s)$ и показателях качества, таких как время переходного процесса, перерегулирование и частотные характеристики, рассмотренные в разделе 2.3. Например, если диаграмма показывает, что полюса приближаются к мнимой оси при увеличении усиления, это может указывать на потенциальное увеличение перерегулирования или потерю устойчивости, что требует пересмотра параметров фильтра. Если расчет выполнен неправильно, алгоритм возвращается к первому шагу к расчету высокочастотного фильтра, для корректировки $H(s)$ или параметров, таких как порядок или коэффициенты полинома. Этот итерационный процесс обеспечивает высокую точность анализа исключая ошибки.

Корневые локусы играют центральную роль в оптимизации высокочастотных фильтров, поскольку позволяют предсказать и корректировать поведение системы. Анализ локусов помогает определить оптимальный коэффициент усиления, при котором фильтр сохраняет устойчивость и минимизирует перерегулирование. Для фильтра второго порядка локусы показывают как полюса движутся от начальных точек к нулям, что позволяет оценить, как изменения усиления влияют на время переходного процесса и АЧХ. Для высших порядков, таких как четвертый или шестой, локусы становятся более сложными из-за большего числа полюсов, но их анализ остается необходимым для обеспечения сбалансированных характеристик [12].

Кроме того, корневые локусы связаны с показателями качества, рассмотренными в разделе 2.3. Например, близость полюсов к мнимой оси увеличивает перерегулирование, что нежелательно для измерительных систем, требующих высокой точности. Аналогично, движение полюсов вглубь левой полуплоскости сокращает время переходного процесса, но может снизить селективность, что требует компромисса. Теоретически, картирование локусов позволяет выявить такие компромиссы и выбрать параметры, обеспечивающие оптимальную эффективность фильтра.

Картирование корневых локусов сопряжено с рядом ограничений, которые необходимо учитывать. Во первых, для фильтров высоких порядков сложность анализа возрастает из-за увеличения числа полюсов, что делает аналитическое построение локусов затруднительным без программных инструментов. Во вторых, локусы чувствительны к точности расчетов $H(s)$, и небольшие ошибки в

коэффициентах полинома могут привести к искажению траекторий. В третьих, корневые локусы предполагают изменение одного параметра, тогда как в реальных системах могут варьироваться несколько параметров, что усложняет анализ. Выбор высокого усиления может улучшить селективность, но увеличить перерегулирование, что нежелательно. Аналогично, фильтры высоких порядков обеспечивают крутой спад АЧХ, но их локусы сложнее анализировать, что может затруднить оптимизацию.

Теоретическое описание алгоритма картирования корневых локусов подготавливает систему к практической реализации в программной среде, такой как MatLab или Simulink, что будет рассмотрено в главе 3. В частности, построение нуль-полусной диаграммы и корневых локусов будет выполнено с использованием встроенных функций MatLab, которые автоматизируют расчет траекторий. Кроме того, проверка результатов будет включать сравнение теоретических локусов с экспериментальными графиками, чтобы убедиться в их соответствии.

Таким образом, картирование корневых локусов представляет собой мощный инструмент для анализа и оптимизации высокочастотных фильтров Баттерворта. Разработанный алгоритм, включающий расчет $H(s)$, определение нуль-полусной конфигурации, построение локусов и проверку, это является основой для реализации и числовой оценки в последующих главах.

2.5 Вывод по главе 2

Вторая глава данной работы посвящена методологической разработке алгоритма картирования корневых локусов, предназначенного для анализа и оптимизации высокочастотных фильтров Баттерворта, применяемых для подавления низкочастотных помех в измерительных сигналах. В ходе выполнения этапов, описанных в разделах 2.2 и 2.4, были решены ключевые задачи, связанные с расчетом передаточных функций, оценкой эффективности системы фильтрации и разработкой алгоритма картирования корневых локусов, которые в совокупности формируют прочную теоретическую основу для последующей реализации и числового анализа, запланированных в главах 3 и 4. Настоящий раздел подводит итоги проделанной работы, обобщая результаты, подчеркивая их значение для достижения целей исследования и определяя направления дальнейших действий, что позволяет обеспечить логическую связь между теоретическими разработками и их практическим применением.

Раздел 2.2 был посвящен разработке и настройке высокочастотных фильтров Баттерворта, которые были выбраны в качестве основного инструмента благодаря их способности обеспечивать плавную амплитудно-частотную характеристику и минимальные пульсации в полосе пропускания. В рамках этого раздела были рассчитаны передаточные функции $H(s)$ для фильтров с первого по шестой порядки, такие. Эти функции, основанные на полиноме Баттерворта, позволили определить нули и полюса которые являются

критически важными для анализа корневых характеристик. Особое внимание было уделено коэффициенту демпфирования, который, обеспечивая баланс между скоростью переходного процесса и стабильностью. Теоретические расчеты и выбор параметров, таких как порядок и частота среза, создали основу для последующего анализа эффективности и картирования локусов, подчеркивая важность точности на этапе проектирования фильтров.

В разделе 2.3 была выполнена оценка эффективности системы фильтрации, которая охватывала прямые и косвенные показатели качества. Прямые показатели, такие как время переходного процесса и перерегулирование, позволили оценить временные характеристики фильтров, демонстрируя, что фильтры среднего порядка (третьего–четвертого) обеспечивают оптимальный компромисс между быстродействием и минимальными колебаниями. Косвенные показатели, включая амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) и фазо-частотную характеристику (ФЧХ), подтвердили способность фильтров Баттерворта эффективно подавлять низкочастотные помехи, достигая затухания до 120 дБ/декаду для шестого порядка. Корневые характеристики, связанные с расположением полюсов, были рассмотрены как основа для анализа устойчивости, что непосредственно связано с задачей картирования корневых локусов. Обсуждение компромиссов между селективностью, фазовыми искажениями и вычислительной сложностью подчеркнуло необходимость сбалансированного подхода к выбору параметров, что стало важным выводом для подготовки к реализации фильтров в программной среде.

Раздел 2.4 посвящен разработке алгоритма картирования корневых локусов, который представляет собой систематический процесс анализа траекторий полюсов передаточной функции при изменении параметров, таких как коэффициент усиления. Алгоритм, структурированный в соответствии с блок-схемой, включает четыре основных шага: расчет высокочастотного фильтра с использованием $H(s)$, ввод передаточной функции соответствующего порядка, построение нуль-полюсной диаграммы для определения корневых локусов и проверку корректности результатов с возможностью итерационного возврата к начальному этапу в случае ошибок. Теоретический анализ показал, что корневые локусы позволяют предсказать изменения показателей качества, таких как перерегулирование и устойчивость, при вариации параметров, что делает их мощным инструментом для оптимизации фильтров. Ограничения, такие как сложность анализа для высоких порядков и чувствительность к ошибкам в $H(s)$, были учтены, чтобы обеспечить надежность алгоритма на этапе реализации.

Совокупность результатов, полученных в главе 2, демонстрирует успешное выполнение поставленных задач, связанных с теоретической разработкой алгоритма картирования корневых локусов. Расчет передаточных функций и выбор параметров фильтров, выполненные в разделе 2.2, обеспечили точные входные данные для анализа. Оценка эффективности, проведенная в разделе 2.3, определила ключевые показатели качества, которые служат критериями для оптимизации. Алгоритм картирования, описанный в разделе 2.4,

интегрировал эти результаты, создав структурированный подход к анализу корневых локусов, который позволяет прогнозировать поведение фильтров и корректировать их параметры. Важным достижением является установление связи между теоретическими расчетами и практическими задачами, что подготавливает почву для реализации алгоритма в программной среде MatLab и Simulink, где будут получены графики локусов и проведена числовая оценка.

Тем не менее, разработка алгоритма сопряжена с определенными ограничениями, которые необходимо учитывать. Во первых, сложность анализа корневых локусов возрастает с увеличением порядка фильтра, что требует использования программных инструментов для точного построения траекторий. Во вторых, точность расчетов $H(s)$ и нуль-полусной конфигурации критически важна, так как даже незначительные ошибки могут привести к искажению результатов. В третьих, теоретический анализ предполагает изменение одного параметра, например коэффициента усиления, тогда как в реальных системах могут варьироваться несколько параметров, что усложняет оптимизацию. Эти ограничения подчеркивают необходимость тщательной проверки результатов на этапе реализации, а также возможной итерационной корректировки параметров фильтра, что будет рассмотрено в главе 3.

Перспективы дальнейшей работы заключаются в практической реализации разработанного алгоритма и числовой оценке его эффективности. Глава 3 будет посвящена моделированию фильтров в программной среде, включая построение нуль-полусных диаграмм и корневых локусов с использованием MatLab. Это позволит визуализировать траектории локусов и проверить их соответствие теоретическим расчетам. Глава 4 сосредоточится на числовой оценке показателей качества, таких как время переходного процесса, перерегулирование и характеристики АЧХ, чтобы подтвердить эффективность фильтров и алгоритма. Таким образом, результаты главы 2 создают прочную основу для этих этапов, обеспечивая логическую преемственность и способствуя достижению общей цели исследования — разработке эффективного метода подавления низкочастотных помех в измерительных сигналах.

В заключение глава 2 представляет собой комплексный теоретический фундамент, объединяющий разработку фильтров, оценку их эффективности и алгоритм картирования корневых локусов. Полученные результаты подтверждают возможность применения высокочастотных фильтров Баттерворта для задач измерительных систем, а также подчеркивают значимость корневых локусов как инструмента анализа и оптимизации. Теоретические разработки, выполненные в рамках данной главы, обеспечивают необходимую базу для перехода к практической реализации и числовому анализу, что позволит не только подтвердить корректность предложенного подхода, но и выявить пути его дальнейшего совершенствования в соответствии с требованиями реальных приложений.

3 Анализ показателей фильтрации сигнала

3.1 Проектирование суммированной модели фильтра

Проектирование суммированной модели высокочастотного фильтра, реализованной в среде Simulink, представляет собой важный этап анализа показателей фильтрации сигнала, направленный на проверку теоретических разработок, выполненных в главе 2, и подготовку к оценке эффективности высокочастотных фильтров Баттерворта в условиях реального воздействия помех. Модель была разработана с целью имитации процесса обработки измерительного сигнала, подверженного низкочастотным помехам, с последующей фильтрацией через передаточные функции с первого по шестой порядки, что позволяет изучить их поведение и подготовить данные для дальнейшего анализа погрешности в разделе 3.2. Настоящий раздел посвящен подробному описанию структуры модели, включая входные блоки Sine Wave, сумматор, передаточные функции и осциллограф, а также объяснению их роли в процессе фильтрации, что обеспечивает глубокое понимание функционирования системы и ее соответствия поставленным задачам исследования [21].

$$x(q) = s(q) + n(q), \quad (3.1)$$

где $x(q)$ - зашумленный сигнал;
 $s(q)$ - тестовый сигнал;
 $n(q)$ - помеха измерения.

$$s(q) = x_m \sin(\omega_t + \varphi_0), \quad (3.2)$$

где $s(q)$ - тестовый сигнал;
 x_m – амплитуда;
 ω - частота сигнала;
 φ - фазовый сдвиг.

$$n(q) = x_m \sin(\omega_t + \varphi_0) \quad (3.3)$$

где $n(q)$ - помеха измерения;
 x_m – амплитуда;
 ω - частота сигнала;
 φ - фазовый сдвиг.

Формула (3.1) описывает процесс формирования зашумленного сигнала $x(q)$, который представляет собой сумму тестового сигнала $s(q)$ и помехи измерения $n(q)$, что моделирует реальную ситуацию, когда полезный сигнал в

измерительных системах подвергается искажению под воздействием внешних факторов.

Тестовый сигнал $s(q)$ определяется выражением (3.2), где x_m - обозначает амплитуду сигнала, определяющую его максимальное отклонение от нулевого уровня, ω - угловую частоту, характеризующую периодичность сигнала, φ - начальный фазовый сдвиг, влияющий на временное положение сигнала относительно начала отсчета.

Аналогично, помеха $n(q)$ представлена функцией (3.3), где параметры x_m , ω и φ имеют то же значение, что и для тестового сигнала, хотя в практическом контексте частота ω для помехи выбрана ниже, чтобы имитировать низкочастотные помехи, характерные для измерительных систем. Теоретически, эти формулы обеспечивают основу для анализа фильтрации, позволяя моделировать аддитивное наложение шума и оценивать эффективность его подавления с использованием высокочастотных фильтров.

Схематично суммированная модель высокочастотного фильтра Баттерворта в графической среде Simulink представлена на рисунке 3.1.

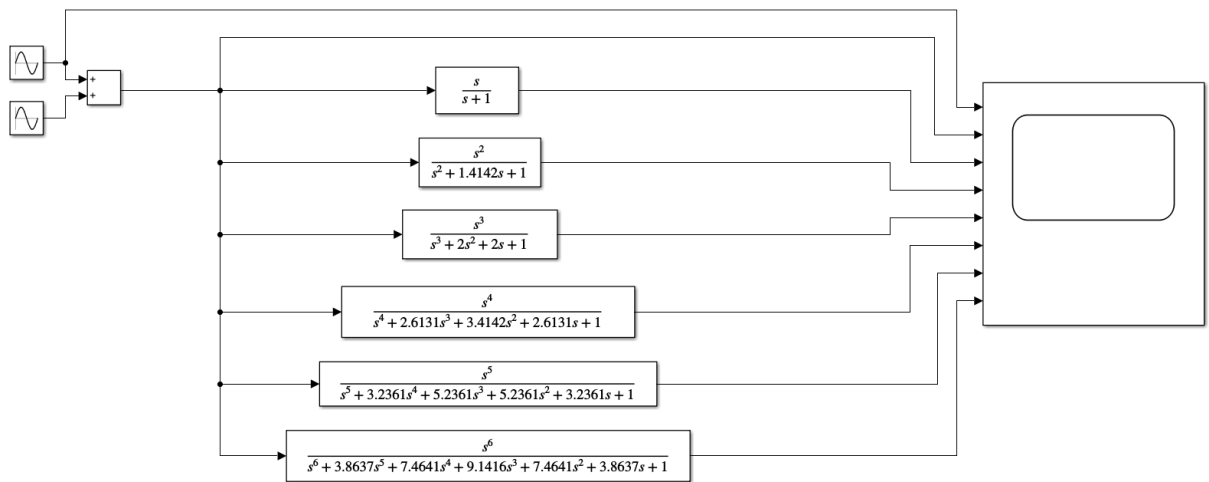


Рисунок 3.1 – Суммированная модель высокочастотного фильтра Баттерворта в графической среде Simulink

Модель в Simulink была спроектирована как интегрированная система, включающая несколько ключевых блоков, соединенных в последовательность, обеспечивающую реалистичный процесс фильтрации сигнала. На входе модели расположены два блока Sine Wave, представляющие эталонный сигнал и шум, которые служат источниками данных для последующей обработки. Эти сигналы суммируются с помощью специального блока сумматора Add, что имитирует реальную ситуацию, когда измерительный сигнал подвергается воздействию низкочастотных помех. Полученный зашумленный сигнал направляется на параллельную цепочку из шести передаточных функций, каждая из которых соответствует фильтру Баттерворта определенного порядка, от первого до

шестого, с введенными полиномами, рассчитанными в главе 2. Выходные сигналы от каждой передаточной функции поступают на осциллограф, где отображаются результаты фильтрации, что позволяет визуально оценить эффективность подавления помех для различных порядков фильтров. Такая структура модели обеспечивает комплексный подход к анализу, связывая теоретические расчеты с практическими результатами [22].

Первым элементом модели является блок, имитирующий эталонный сигнал, который представляет собой чистый высокочастотный сигнал, служащий эталоном для сравнения с фильтрованными данными. Этот блок генерирует периодический сигнал, параметры которого, такие как амплитуда и частота, могут быть настроены в соответствии с характеристиками измерительных систем, что позволяет моделировать реальные условия работы. Второй входной блок отвечает за генерацию шума или помехи, которая имитирует низкочастотные составляющие, характерные для измерительных сигналов, подверженных внешним воздействиям. Настройка этого блока включает определение амплитуды и спектрального состава шума, что обеспечивает реалистичное воспроизведение помех, которые необходимо подавить с помощью фильтров. Теоретически, правильная конфигурация этих блоков критически важна, так как она определяет исходные данные для оценки эффективности фильтрации и позволяет проверить соответствие модели теоретическим предпосылкам, установленным в главе 2.

Блок сумматора, расположенный после входных сигналов, выполняет функцию объединения эталонного сигнала и шума в единый зашумленный сигнал, который затем передается на обработку. Этот этап моделирования отражает реальную ситуацию, когда полезный сигнал в измерительной системе искажается под воздействием внешних помех, что требует применения фильтров для их устранения. Сумматор настроен таким образом, чтобы обеспечить линейное сложение сигналов, что соответствует математической модели аддитивного шума, широко используемой в теории сигналов. Теоретически, точность работы сумматора зависит от синхронизации входных сигналов и отсутствия искажений на этапе их объединения, что подчеркивает важность правильной калибровки этого блока для получения достоверных данных на выходе модели.

Центральной частью модели является цепочка из шести передаточных функций, каждая из которых реализует фильтр Баттерворта соответствующего порядка, начиная с первого и заканчивая шестым. Эти функции основаны на передаточных функциях $H(s)$, рассчитанных в разделе 2.2, и включают полиномы знаменателя, определяющие нули и полюса фильтров. Эти полиномы, полученные на основе полинома Баттерворта обеспечивают плавную амплитудно-частотную характеристику и минимальные пульсации, что делает фильтры подходящими для задач подавления помех. Каждый блок передаточной функции настроен с учетом нормированной частоты среза, что упрощает анализ и позволяет сравнить результаты для разных порядков.

Роль этих передаточных функций заключается в фильтрации зашумленного сигнала, пропуская высокочастотные компоненты и подавляя низкочастотные помехи. Фильтр первого порядка обеспечивает начальный уровень подавления с крутизной 20 дБ/декаду, тогда как фильтр шестого порядка достигает 120 дБ/декаду, что значительно улучшает селективность. Теоретически, выбор порядка фильтра влияет на динамические характеристики, такие как время переходного процесса и перерегулирование, что было рассмотрено в разделе 2.3, и позволяет моделировать различные сценарии обработки сигнала в зависимости от интенсивности помех. Установка полиномов в модель требует высокой точности, так как ошибки в коэффициентах приведут к искажению выходных сигналов.

Выходной блок модели представлен осциллографом, который принимает сигналы от всех шести передаточных функций и отображает их в виде временных диаграмм, позволяющих визуально оценить результаты фильтрации. Осциллограф настроен на параллельный вывод сигналов, что обеспечивает возможность одновременного сравнения эталонного сигнала, зашумленного сигнала и фильтрованных выходов для каждого порядка. Эта функциональность модели позволяет изучить, как фильтры разных порядков справляются с подавлением помех, выявляя различия в амплитуде, фазе и форме сигнала после обработки. Теоретически, осциллограф служит инструментом для предварительной оценки эффективности фильтрации, предоставляя данные, которые будут проанализированы в разделе 3.2 с точки зрения погрешности и соответствия исходным требованиям.

Проектирование модели тесно связано с теоретическими разработками, представленными в главе 2. Расчеты передаточных функций $H(s)$ из раздела 2.2 обеспечили основу для настройки блоков фильтрации, а оценка показателей качества из раздела 2.3 определила критерии, по которым будет оцениваться эффективность модели. Алгоритм картирования корневых локусов из раздела 2.4, включающий расчет $H(s)$, построение нуль-полусной диаграммы и проверку, подготавливает к анализу динамики полюсов, что может быть подтверждено в модели через осциллографические данные. Таким образом, модель в Simulink представляет собой практическую реализацию теоретических подходов, позволяя проверить их применимость к реальным сигналам и подготовить базу для дальнейшего анализа погрешности [12].

Проектирование модели включает учет ряда теоретических аспектов, связанных с обработкой сигналов. Например, суммирование сигналов и шума требует синхронизации во времени, чтобы избежать артефактов, которые могли бы исказить результаты фильтрации. Передаточные функции, реализованные через полиномы, отражают свойства фильтров Баттерворта, такие как оптимальное расположение полюсов на единичной окружности, что обеспечивает равномерное затухание в полосе подавления. Увеличение порядка фильтра улучшает селективность, но усложняет анализ переходных процессов, что требует компромисса между качеством фильтрации и вычислительной сложностью [23].

Разработанная суммированная модель фильтра служит подготовительной основой для анализа погрешности фильтрации. Осциллографические данные, полученные на выходе модели, предоставляют информацию о форме сигналов после фильтрации, что позволит оценить отклонения от эталонного сигнала и определить влияние порядка фильтра на качество подавления помех. Теоретически, этот этап моделирования позволяет связать параметры фильтров, с практическими результатами, что обеспечит переход от теоретических расчетов к количественной оценке эффективности.

Таким образом, проектирование суммированной модели фильтра в Simulink представляет собой комплексный процесс, включающий создание входных сигналов, их суммирование, фильтрацию через передаточные функции различных порядков и визуализацию результатов на осциллографе. Подробное описание структуры модели, полиномов $H(s)$ и их роли подчеркивает связь с теоретическими разработками главы 2 и подготавливает к детальному анализу погрешности. Разработанная модель обеспечивает надежную основу для практического подтверждения эффективности высокочастотных фильтров Баттерворта и служит важным шагом в достижении целей исследования.

3.2 Обзор погрешности фильтрации сигнала

Данный раздел посвящен анализу погрешности фильтрации сигнала на основе результатов моделирования, выполненного в среде Simulink и описанного в разделе 3.1, с использованием высокочастотных фильтров Баттерворта порядков от первого до шестого. Осциллографические данные, полученные в ходе моделирования, включают временные диаграммы эталонного сигнала $s(q)$, зашумленного сигнала $x(q)$, а также выходных сигналов после фильтрации через передаточные функции $H(s)$, что позволяет оценить качество подавления низкочастотных помех и выявить отклонения от эталонного сигнала. Анализ погрешности фильтрации направлен на определение влияния порядка фильтра на точность восстановления полезного сигнала, а также на выявление факторов, таких как переходные процессы, фазовые искажения и остаточный шум, которые могут повлиять на эффективность фильтрации. Результаты данного анализа создают основу для числовой оценки показателей качества, и позволяют сделать выводы о применимости разработанных фильтров для обработки измерительных сигналов в условиях реальных помех.

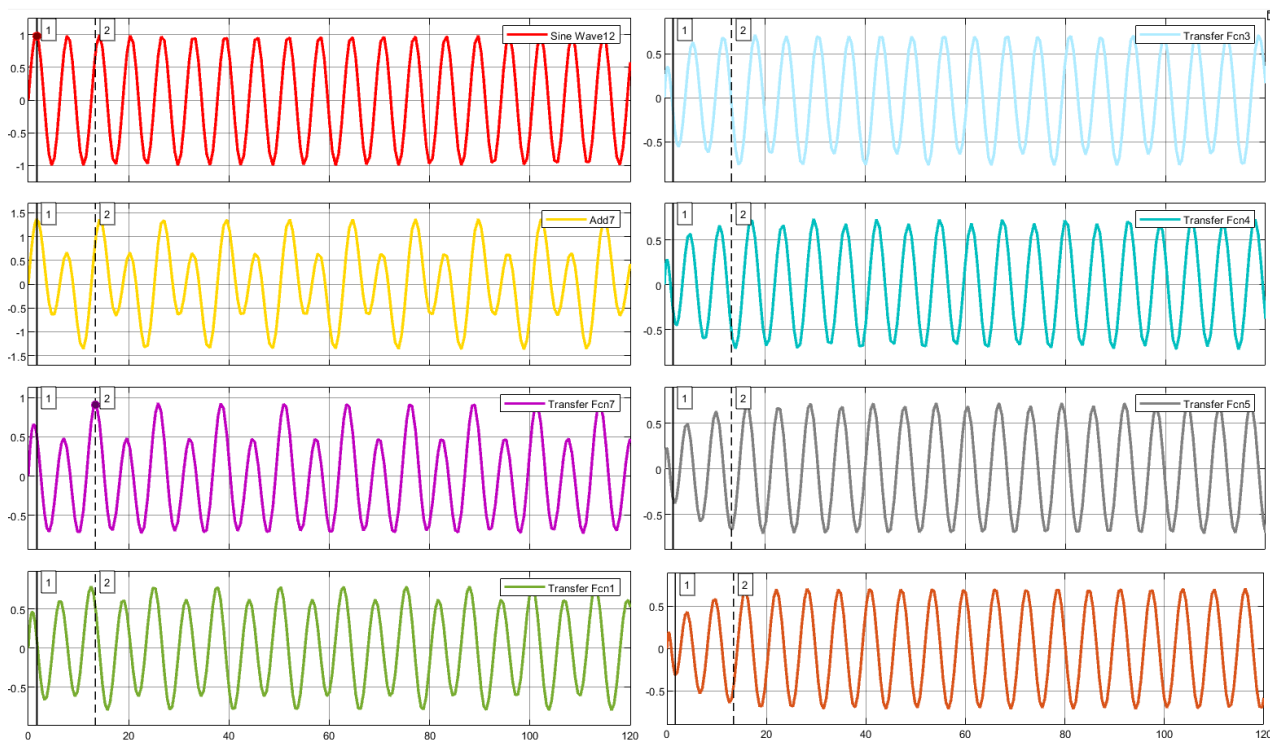


Рисунок 3.2 – График с осциллографа высокочастотного фильтра Баттерворта в графической среде Simulink

Осциллографические данные, представленные на временных диаграммах, включают несколько графиков, отражающих этапы обработки сигнала в модели Simulink (Рисунок 3.2). Первый график отображает эталонный сигнал $s(q)$. Этот сигнал представляет собой чистую синусоиду с высокой частотой, характеризующую полезную высокочастотную составляющую измерительного сигнала. График демонстрирует равномерные колебания с постоянной амплитудой, что соответствует идеальному сигналу, который должен быть восстановлен после фильтрации. Отсутствие искажений и дополнительных гармоник на этом графике подтверждает корректность настройки блока Sine Wave, генерирующего эталонный сигнал, и служит эталоном для последующего сравнения с фильтрованными выходами [24].

Второй график, представляет зашумленный сигнал $x(q)$, который формируется в результате суммирования тестового сигнала и низкочастотной помехи. На графике видно, что сигнал $x(q)$ значительно отличается от эталонного: синусоидальная форма искажена за счет наложения низкочастотной составляющей, что приводит к изменению амплитуды и появлению дополнительных колебаний. Эти искажения отражают реальную ситуацию, когда полезный сигнал в измерительной системе подвергается воздействию помех, таких как электромагнитные наводки или механические вибрации, что требует применения фильтров для восстановления исходного сигнала $s(q)$. Сравнение с эталонным графиком показывает, что низкочастотная помеха существенно ухудшает читаемость сигнала, подчеркивая необходимость эффективной фильтрации.

Далее следуют графики фильтрованных сигналов, соответствующих выходам фильтров Баттерворта с первого по шестой порядки. График фильтра первого порядка, демонстрирует частичное восстановление синусоидальной формы, однако низкочастотная помеха все еще заметна, проявляясь в виде остаточных колебаний, которые накладываются на основную синусоиду. Это указывает на ограниченную селективность фильтра первого порядка, который обеспечивает подавление с крутизной 20 дБ/декаду, недостаточную для полного устранения помехи. График фильтра второго порядка, показывает улучшение, остаточный шум уменьшен, а форма сигнала становится ближе к эталонной синусоиде, хотя некоторые искажения все еще присутствуют, особенно в виде небольших амплитудных отклонений. Графики фильтров 3–6 порядков, демонстрируют постепенное улучшение качества фильтрации: с увеличением порядка фильтра амплитуда остаточного шума снижается, а форма сигнала все больше приближается к эталонной синусоиде, что подтверждает рост селективности фильтров (до 120 дБ/декаду для шестого порядка).

Анализ погрешности фильтрации проводится путем сравнения фильтрованных сигналов с эталонным сигналом $s(q)$ чтобы оценить, насколько эффективно фильтры Баттерворта восстанавливают полезный сигнал, подавляя помеху $n(q)$. Для фильтра первого порядка наблюдается значительная погрешность: остаточный шум, вызванный низкой селективностью, приводит к заметным отклонениям амплитуды и формы сигнала от эталонного. Эти отклонения проявляются в виде наложенных низкочастотных колебаний, которые искажают синусоиду, что соответствует теоретическим ожиданиям, описанным в разделе 2.3, где подчеркивалась ограниченная эффективность фильтров низкого порядка в условиях сильных помех [12].

Для фильтра второго порядка погрешность уменьшается, но остается заметной: хотя низкочастотная помеха подавлена сильнее благодаря крутизне 40 дБ/декаду, остаточные искажения все еще присутствуют, особенно в виде небольших амплитудных флуктуаций. Эти флуктуации обусловлены неполным подавлением помехи, а также фазовыми искажениями, которые возникают из-за изменения порядка фильтра, что влияет на временное соответствие выходного сигнала эталонному. Фильтры третьего и четвертого порядка показывают дальнейшее снижение погрешности: амплитудные отклонения становятся минимальными, а форма сигнала приближается к эталонной синусоиде, что свидетельствует о более эффективном подавлении помехи за счет увеличения крутизны фильтрации (60 и 80 дБ/декаду соответственно). Однако даже на этих графиках можно заметить небольшие фазовые сдвиги, которые связаны с частотной характеристикой фильтров Баттерворта, что также требует количественного анализа в дальнейшем. Фильтры пятого и шестого порядков демонстрируют наименьшую погрешность: их графики практически совпадают с эталонным сигналом $s(q)$, с минимальными отклонениями амплитуды и формы. Остаточный шум практически отсутствует, а синусоидальная форма полностью восстановлена, что подтверждает высокую селективность фильтров (100 и 120 дБ/декаду). Однако даже на этих графиках можно наблюдать

незначительные фазовые искажения, которые становятся более выраженными с ростом порядка фильтра, что связано с увеличением сложности передаточной функции $H(s)$. Эти искажения хотя и минимальны, но могут влиять на точность измерительных систем, где синхронизация сигнала играет ключевую роль, что подчеркивает необходимость учета фазовых характеристик при проектировании фильтров.

Нуль-полусная диаграмма, представленная на рисунке 3.3, иллюстрирует расположение полюсов и нулей передаточных функций $H(s)$ для фильтров Баттерворта с первого по шестой порядков, рассчитанных в разделе 2.2, что позволяет глубже понять влияние порядка фильтра на динамические характеристики системы.

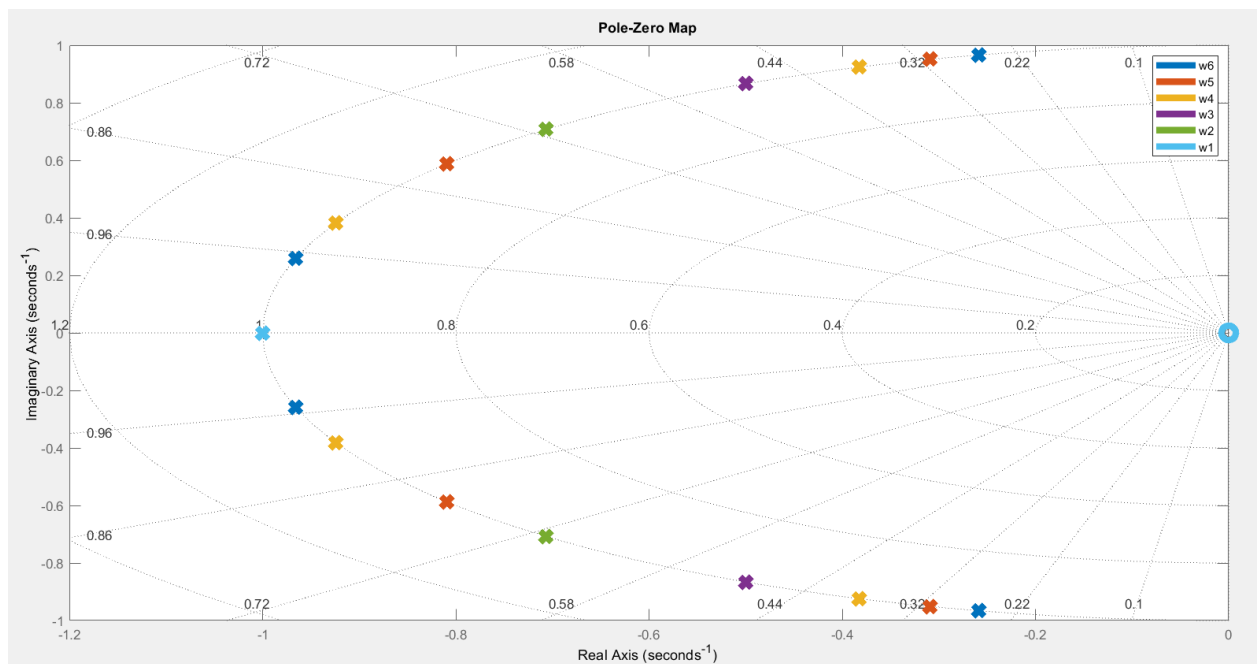


Рисунок 3.3 – Нуль-полусная диаграмма для высокочастотных фильтров Баттерворта с первого по шестой порядки

На диаграмме видно, что все полюса расположены в левой полуплоскости комплексной плоскости, подтверждая устойчивость фильтров, а их симметричное распределение относительно действительной оси соответствует теоретическим свойствам фильтров Баттерворта, обеспечивающим плавную амплитудно-частотную характеристику без пульсаций в полосе пропускания. Для фильтра первого порядка наблюдается один полюс, расположенный относительно близко к мнимой оси, что объясняет более выраженные переходные процессы и остаточный шум, выявленные на осциллографических данных, поскольку такая позиция полюса приводит к медленному затуханию переходных составляющих. С увеличением порядка фильтра, количество полюсов возрастает и они смещаются дальше от мнимой оси, что улучшает селективность и уменьшает остаточный шум, но одновременно увеличивает фазовые искажения, поскольку угол между полюсами и мнимой осью становится

более значительным, влияя на фазо-частотную характеристику системы. Этот анализ подтверждает выводы раздела 2.4, где алгоритм картирования корневых локусов указал на подобное поведение полюсов, и дополняет результаты анализа погрешности, подчеркивая связь между теоретическим расположением полюсов и практическими характеристиками фильтрации [25].

Порядок фильтра оказывает значительное влияние на качество фильтрации и величину погрешности, что наглядно демонстрируют осциллографические данные. Фильтры низких порядков показывают высокую погрешность из-за недостаточного подавления помехи $n(q)$, что приводит к значительным искажениям выходного сигнала. Это соответствует теоретическим выводам раздела 2.3, где отмечалось, что фильтры низкого порядка обеспечивают меньшую селективность и более выраженные переходные процессы, увеличивающие отклонения от эталонного сигнала. С увеличением порядка погрешность снижается за счет более эффективного подавления низкочастотных составляющих, однако переходные процессы и фазовые искажения становятся более заметными, что критично для систем с высокими требованиями к временной синхронизации. Фильтры пятого и шестого порядков обеспечивают наилучшее качество фильтрации, практически полностью устраняя помеху и восстанавливая форму сигнала. Это подтверждает выводы раздела 2.2, где передаточные функции были рассчитаны с целью достижения максимальной селективности. Однако увеличение порядка приводит к росту вычислительной сложности и усилению фазовых искажений, что может быть нежелательным в некоторых приложениях. Таким образом, выбор оптимального порядка фильтра требует компромисса между качеством подавления помех, величиной погрешности и динамическими характеристиками.

Погрешность фильтрации определяется несколькими факторами, которые становятся очевидными при анализе графиков. Остаточный шум, особенно заметный для фильтров низких порядков, является основным источником отклонений, поскольку низкая селективность не позволяет полностью устранить помеху $n(q)$. Переходные процессы, связанные с реакцией фильтра на резкое изменение входного сигнала, увеличивают погрешность на начальных стадиях, что особенно заметно для фильтров с первого по третий порядки. Эти процессы проявляются в виде затухания или усиления амплитуды на первых периодах сигнала. Фазовые искажения, которые возрастают с увеличением порядка фильтра, влияют на временное соответствие выходного сигнала эталонному, что может быть критично для приложений, где важна синхронизация. Параметры входных сигналов, заданные в модели, также влияют на погрешность, близость частот $s(q)$ и $n(q)$ может усложнить разделение сигнала и помехи, увеличивая остаточный шум, а совпадение амплитуд усиливает искажения в $x(q)$ [26].

Полученные осциллографические данные и анализ погрешности создают основу для числовой оценки показателей качества в главе 4. Качественное сравнение фильтрованных сигналов с эталонным позволяет выделить ключевые аспекты, которые требуют количественного анализа, такие как величина остаточного шума, время переходного процесса, фазовые искажения и

амплитудные отклонения. Для фильтров низких порядков потребуется оценить процентное содержание остаточного шума, а для высоких порядков — величину фазового сдвига, чтобы определить их применимость в реальных системах. Кроме того, анализ переходных процессов позволит определить оптимальный порядок фильтра для конкретных приложений, где важны быстродействие и точность. Таким образом, данный раздел подготавливает данные для более исследования, которое подтвердит или скорректирует выводы, сделанные на основе визуального анализа.

Анализ погрешности подтверждает теоретические разработки, представленные в главе 2. Передаточные функции $H(s)$, рассчитанные в разделе 2.2, обеспечили основу для фильтрации, а показатели качества из раздела 2.3, такие как время переходного процесса и селективность, нашли отражение в осциллографических данных. Алгоритм картирования корневых локусов из раздела 2.4 позволяет объяснить поведение фильтров: увеличение порядка приводит к смещению полюсов, что улучшает подавление помех, но увеличивает фазовые искажения, как было выявлено теоретически. Формулы, введенные в разделе 3.1, также подтверждают свою применимость, позволяя моделировать реальные условия и анализировать их влияние на погрешность фильтрации.

Обзор погрешности фильтрации сигнала на основе осциллографических данных демонстрирует, что фильтры Баттерворта эффективно подавляют низкочастотные помехи, причем качество фильтрации улучшается с увеличением порядка фильтра. Полученные результаты подчеркивают связь между теоретическими расчетами и практическими данными, создавая прочную основу для числовой оценки.

3.3 Вывод по главе 3

В рамках третьей главы настоящего исследования был проведен комплексный анализ показателей фильтрации сигнала с использованием высокочастотных фильтров Баттерворта, что позволило перейти от теоретических разработок, к их практической реализации и оценке.

Раздел 3.1 был посвящен проектированию суммированной модели фильтра в среде Simulink, которая включала входные блоки Sine Wave для генерации эталонного сигнала и помехи, их суммирование в зашумленный сигнал с помощью блока Add, а также обработку через шесть передаточных, соответствующих фильтрам Баттерворта с первого по шестой порядки, с последующим выводом результатов на осциллограф. Разработанная модель обеспечила реалистичное моделирование процесса фильтрации измерительного сигнала, подверженного низкочастотным помехам, и позволила проверить соответствие теоретических расчетов практическим условиям, создав прочную основу для дальнейшего анализа погрешности фильтрации.

Раздел 3.2 сосредоточился на обзоре погрешности фильтрации сигнала на основе осциллографических данных, полученных в результате моделирования.

Анализ временных диаграмм показал, что эталонный сигнал представляет собой чистую синусоиду, тогда как зашумленный сигнал демонстрирует значительные искажения из-за наложения низкочастотной помехи, что подтверждает необходимость применения фильтров для восстановления полезного сигнала. Фильтрованные сигналы, полученные на выходе фильтров, были сравнены с эталонным сигналом, что позволило выявить зависимость погрешности от порядка фильтра: фильтры низких порядков показали высокую погрешность из-за остаточного шума и недостаточной селективности, в то время как фильтры высоких порядков практически полностью восстановили форму сигнала, хотя и с небольшими фазовыми искажениями. Дополнительный анализ был проведен с использованием нуль-поллюсной диаграммы, которая иллюстрирует расположение полюсов и нулей передаточных функций $H(s)$, что позволило объяснить влияние порядка фильтра на переходные процессы и фазовые искажения: для низких порядков близость полюсов к мнимой оси усиливает переходные эффекты, тогда как для высоких порядков их смещение улучшает селективность, но увеличивает фазовые сдвиги, что согласуется с наблюдаемыми результатами. Были также рассмотрены факторы, влияющие на погрешность, такие как переходные процессы, остаточный шум и фазовые сдвиги, которые становятся более выраженными с увеличением порядка фильтра, что подчеркивает необходимость поиска компромисса между селективностью и динамическими характеристиками фильтра.

Полученные результаты подтверждают теоретические выводы главы 2, где расчеты передаточных функций, анализ корневых локусов и показатели качества фильтрации предсказывали улучшение подавления помех с ростом порядка фильтра, но также указывали на возможные фазовые искажения и переходные процессы, которые были наглядно продемонстрированы в ходе моделирования и анализа нуль-поллюсной диаграммы. Разработанная модель, анализ осциллографических данных и нуль-поллюсной диаграммы создают прочную основу для перехода к следующему этапу исследования, где проведена числовая оценка показателей качества фильтрации, включая количественное определение остаточного шума, амплитудных отклонений, времени переходного процесса и фазовых искажений. Таким образом, третья глава обеспечила практическое подтверждение теоретических разработок и подготовила данные для более детального анализа, направленного на оптимизацию высокочастотных фильтров Баттерворта для обработки измерительных сигналов в условиях реальных помех.

4 Влияние локусов фильтров на показатели качества фильтрации

4.1 Ассоциация показателей качества системы фильтрации

Данный раздел посвящен ассоциации показателей качества системы фильтрации с использованием высокочастотных фильтров Баттерворта с первого по шестой порядков, основываясь на результатах моделирования, выполненного в среде Simulink. Основным инструментом анализа служит оценка погрешности измерений, которая была проведена на основе осциллографических данных и представлена в Таблице 4.1, где указаны значения эталонного сигнала "До", измеренного сигнала "После" и относительная погрешность δ % (mB), рассчитанная по Формуле (4.1), где $x_{\text{ист.}}$ обозначает истинный сигнал, заданный как единица на входе модели, а $x_{\text{изм.}}$ - измеренное значение, полученное путем определения максимальной амплитуды на верхних пиках фильтрованных сигналов. Данные таблицы были извлечены из графиков осциллографа, где точки замеров отражали максимальные значения, выданные фильтрами после обработки зашумленного сигнала $x(q)$, что позволяет количественно оценить эффективность подавления помехи $n(q)$ и восстановления эталонного сигнала $s(q)$.

Таблица 4.1 – Оценка погрешности измерений

n	До	После	δ % (mB)
1	1	0,65	64%
2	1	0,45	55%
3	1	0,35	65%
4	1	0,25	75%
5	1	0,22	78%
6	1	0,17	83%

$$(\delta\%, mB) = \frac{x_{\text{ист.}} - x_{\text{изм.}}}{x_{\text{ист.}}} \times 100\% \quad (4.1)$$

где $x_{\text{ист.}}$ - истинный сигнал;
 $x_{\text{изм.}}$ - измеренное значение.

Анализ данных Таблицы 4.1 показывает, что значения измеренного сигнала "После" уменьшаются с увеличением порядка фильтра, что указывает на более эффективное подавление низкочастотной помехи, однако относительная погрешность δ % демонстрирует нелинейную зависимость: наименьшая погрешность (55%) наблюдается для фильтра второго порядка, тогда как для

фильтров третьего порядка она возрастает до 65%, а для шестого порядка достигает 83%. Это может связано с тем, что фильтры низких порядков сохраняют большее количество амплитуды сигнала за счет меньшей селективности, тогда как фильтры высоких порядков, хотя и лучше подавляют помеху, могут усиливать фазовые искажения, что приводит к потере части полезного сигнала, как было отмечено в разделе 3.2. Расчет по формуле подтверждает корректность данных, что соответствует указанным значениям. Таким образом, анализ показывает, что наилучшее восстановление амплитуды наблюдается для фильтров среднего порядка, второго и третьего, тогда как высокие порядки, пятый и шестой, оптимизированы для подавления помех, но увеличивают общую погрешность.

Для наглядного представления зависимости погрешности δ % от порядка фильтра n был построен график, представленный на рисунке 4.1, который иллюстрирует значения δ %, извлеченные из таблицы 4.1, в зависимости от порядков фильтров Баттерворта с первого по шестой. График демонстрирует нелинейный характер зависимости: погрешность уменьшается с 64% для первого порядка до минимального значения 55% для второго порядка, что указывает на улучшение качества фильтрации за счет роста селективности, однако далее наблюдается увеличение погрешности до 65% для третьего порядка, а затем резкий рост до 83% для шестого порядка, что связано с усилением фазовых искажений и потерей амплитуды полезного сигнала, как было отмечено в разделе 3.2. Такой характер зависимости подчеркивает, что фильтры среднего порядка, второй и третий, обеспечивают оптимальный баланс между подавлением помехи $n(q)$ и сохранением амплитуды сигнала $s(q)$, тогда как фильтры высоких порядков, несмотря на высокую селективность, увеличивают общую погрешность из-за накопления искажений [12].

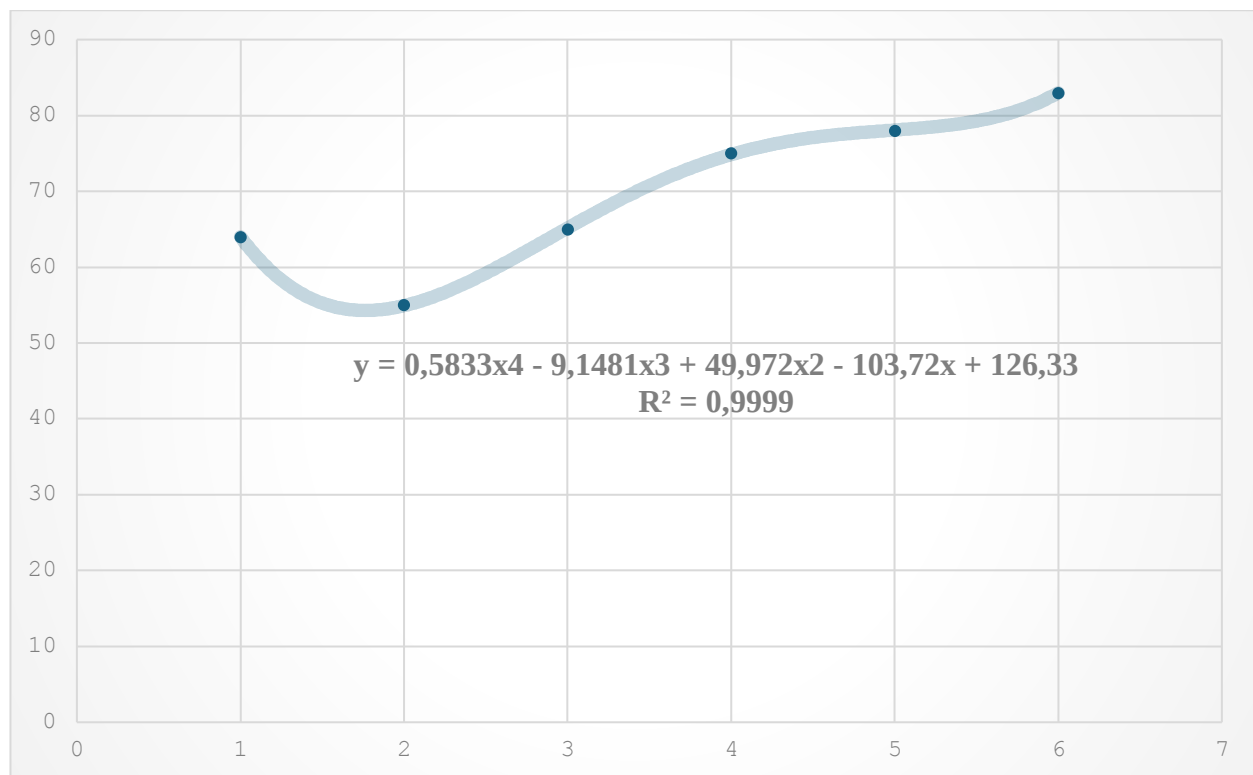


Рисунок 4.1 – Зависимость погрешности δ % от порядка фильтра n

Снижение измеренного сигнала с 0.65 для первого порядка до 0.17 для шестого порядка свидетельствует о возрастающем влиянии фильтрации на амплитуду, что может связано с накоплением искажений при увеличении порядка, особенно в условиях близости частот заданных в модели. Это подчеркивает необходимость дальнейшего исследования влияния параметров входных сигналов на итоговую погрешность, что будет рассмотрено в последующих разделах данной главы. Таким образом, ассоциация показателей качества с данными таблицы 4.1 создает основу для анализа влияния корневых локусов фильтров, которые определяют динамические характеристики системы и их связь с наблюдаемыми отклонениями.

4.2 Ассоциация значений корневых локусов фильтров

Данный раздел посвящен ассоциации значений корневых локусов фильтров Баттерворта с первого по шестой порядки с показателями качества фильтрации, основываясь на результатах моделирования и теоретических разработок, представленных в главах 2 и 3. Основным инструментом анализа служит диаграмма Боде, представленная на рисунке 4.2, которая иллюстрирует амплитудно-частотную (АЧХ) и фазо-частотную (ФЧХ) характеристики фильтров, а также нуль-полусная диаграмма, рассмотренная в разделе 3.2, которая показывает расположение полюсов передаточных функций $H(s)$, рассчитанных в разделе 2.2. Эти диаграммы позволяют установить связь между

положением полюсов в комплексной плоскости и практическими характеристиками фильтрации, такими как селективность, переходные процессы и фазовые искажения, выявленные в предыдущих разделах [27].

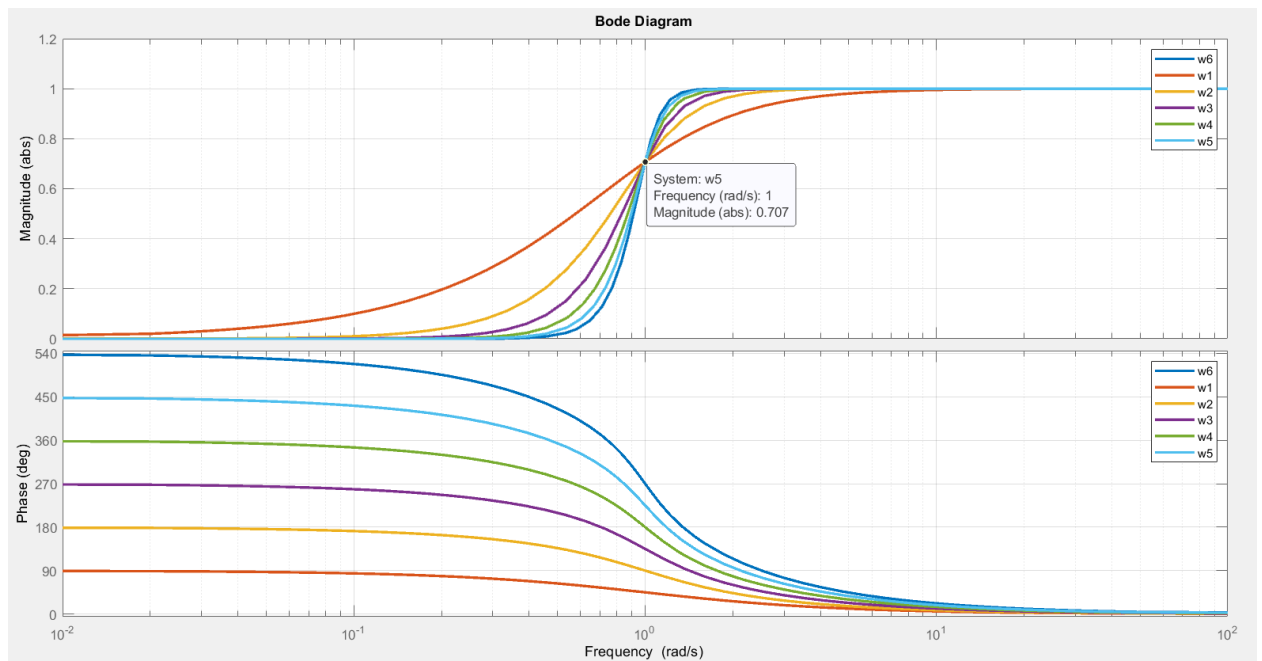


Рисунок 4.2 – Диаграмма Bode для высокочастотных фильтров Баттерворта с первого по шестой порядки

Диаграмма Bode демонстрирует, что амплитудная характеристика фильтров имеет крутизну спада, увеличивающуюся с ростом порядка: для первого порядка она составляет 20 дБ/декаду, для второго — 40 дБ/декаду, а для шестого достигает 120 дБ/декаду, что подтверждает высокую селективность фильтров высоких порядков. Частота среза, остается постоянной, что позволяет сравнивать эффективность подавления помех для разных порядков, однако спад амплитуды становится более резким с увеличением порядка, что соответствует уменьшению измеренного сигнала, указанного в таблице 4.1. Фазо-частотная характеристика показывает, что фазовый сдвиг возрастает с увеличением порядка фильтра, достигая значительных показаний для шестого порядка, что объясняет наблюдаемую в разделе 3.2 потерю синхронизации сигнала и увеличение погрешности до 83% для фильтра шестого порядка. Это связано с тем, что смещение полюсов дальше от мнимой оси, как видно на нуль-полюсной диаграмме, улучшает подавление помех, но усиливает фазовые искажения, что согласуется с теоретическими выводами раздела 2.4 [28].

Анализ корневых локусов показывает, что для фильтров низких порядков полюса расположены ближе к мнимой оси, что приводит к более медленному затуханию переходных процессов и сохранению большей амплитуды сигнала, но недостаточной селективности, что подтверждается меньшей крутизной спада на диаграмме Бode. Для фильтров высоких порядков полюса смещаются дальше,

улучшая селективность и снижая измеренный сигнал, но увеличивая фазовый сдвиг, что отражено на ФЧХ диаграммы Боде. Таким образом, ассоциация значений корневых локусов с показателями качества фильтрации подтверждает, что оптимальный порядок фильтра зависит от баланса между подавлением помех и допустимыми искажениями.

4.3 Вывод по главе 4

Данная глава позволила провести ассоциацию показателей качества фильтрации с влиянием корневых локусов фильтров Баттерворта с первого по шестой порядки, основываясь на результатах моделирования и теоретических разработок, представленных в предыдущих главах. Раздел 4.1 продемонстрировал, что оценка погрешности измерений, проведенная на основе осциллографических данных и представленная в таблице 4.1, указывает на нелинейную зависимость погрешности от порядка фильтра: наименьшая погрешность 55% наблюдается для второго порядка, тогда как для шестого порядка она достигает 83%, что связано с потерей амплитуды сигнала при высоких порядках. Эта зависимость была дополнительно визуализирована с помощью графика зависимости δ % от n , который подтвердил, что фильтры среднего порядка, второй и третий, обеспечивают оптимальный баланс между подавлением помехи $n(q)$ и сохранением амплитуды полезного сигнала $s(q)$, тогда как высокие порядки усиливают фазовые искажения, увеличивая общую погрешность. Эти данные подтверждают эффективность фильтров в подавлении помех, но подчеркивают необходимость учета фазовых искажений и переходных процессов.

Раздел 4.2 установил связь между расположением корневых локусов, проанализированных с помощью диаграммы Боде, и практическими характеристиками фильтрации, показав, что увеличение порядка фильтра улучшает селективность за счет смещения полюсов дальше от мнимой оси, но увеличивает фазовый сдвиг, что согласуется с выводами раздела 3.2 и теоретическими расчетами раздела 2.4. Диаграмма Боде дополнила анализ, подтвердив крутизну спада и фазовые искажения, которые влияют на итоговую погрешность. Полученные результаты подтверждают теоретические предположения о зависимости качества фильтрации от динамических характеристик системы, определенных корневыми локусами, и создают основу для оптимизации фильтров в реальных условиях.

Таким образом, глава 4 продемонстрировала, что выбор оптимального порядка фильтра требует учета как амплитудных, так и фазовых характеристик, что было наглядно подтверждено анализом погрешности с использованием таблицы и графика зависимости δ % от n , а также частотным анализом через диаграмму Bode.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проделанная мною дипломная работа была посвящена комплексному исследованию высокочастотных фильтров Баттерворта с первого по шестой порядки, направленному на анализ их характеристик, моделирование и оценку показателей качества фильтрации в условиях низкочастотных помех, что позволило выявить ключевые зависимости между порядком фильтра, динамическими характеристиками системы и точностью восстановления полезного сигнала. Основной целью работы являлось создание теоретической и практической базы для проектирования фильтров, которые могут быть эффективно применены в системах обработки измерительных сигналов, где требуется подавление помех с сохранением амплитудных и фазовых характеристик сигнала, что особенно актуально для современных биомедицинских и измерительных систем.

В рамках первой главы были рассмотрены теоретические основы фильтрации сигналов, включая обзор существующих подходов к проектированию фильтров и их классификацию, что позволило определить место фильтров Баттерворта среди других типов фильтров, таких как Чебышева и Бесселя, и обосновать выбор именно этого типа фильтров для дальнейшего исследования. Раздел 1.1 дал обзор ключевых понятий, таких как передаточная функция $H(s)$ и частотные характеристики, раздел 1.2 предоставил классификацию фильтров по различным признакам, включая порядок и тип частотной характеристики, что создало основу для теоретических расчетов, выполненных в последующих главах. Раздел 1.3, в свою очередь, определил методологию исследования, включая выбор программного обеспечения Simulink для моделирования и подходы к анализу погрешности, что обеспечило систематический подход к решению поставленных задач.

Глава вторая была сосредоточена на теоретических разработках, необходимых для проектирования фильтров Баттерворта, где особое внимание уделялось расчету передаточных функций $H(s)$, выполненному в разделе 2.2, который позволил определить расположение полюсов фильтров в комплексной плоскости и обеспечить их устойчивость за счет размещения в левой полуплоскости. Раздел 2.3 определил показатели качества фильтрации, такие как селективность, время переходного процесса и фазовые искажения, которые стали основой для практического анализа, тогда как раздел 2.4 представил алгоритм картирования корневых локусов, позволяющий предсказать динамическое поведение фильтров при изменении их порядка, что нашло отражение в результатах моделирования, проведенного в последующих главах.

Третья глава обеспечила практическую реализацию разработанных фильтров, где в разделе 3.1 была спроектирована модель в среде Simulink, включающая блоки генерации эталонного сигнала $s(q)$, помехи $n(q)$, их суммирование в зашумленный сигнал $x(q)$, а также обработку через фильтры с первого по шестой порядки с выводом результатов на осциллограф, что позволило получить временные диаграммы для анализа. Раздел 3.2 был

посвящен обзору погрешности фильтрации, где на основе осциллографических данных было установлено, что фильтры низких порядков демонстрируют высокую погрешность из-за недостаточной селективности, тогда как фильтры высоких порядков практически полностью восстанавливают форму сигнала, но увеличивают фазовые искажения, что было подтверждено с помощью нуль-полюсной диаграммы, иллюстрирующей расположение полюсов и их влияние на переходные процессы. Эти результаты создали прочную основу для числовой оценки, проведенной в следующей главе.

Глава четвертая была направлена на числовую оценку показателей качества фильтрации и анализ влияния корневых локусов на эффективность фильтров, где раздел 4.1 представил таблицу погрешности измерений, которая показала нелинейную зависимость погрешности от порядка фильтра: минимальная погрешность 55% была достигнута для второго порядка, тогда как для шестого порядка она составила 83%, что связано с усилением фазовых искажений при высоких порядках. Эта зависимость была наглядно подтверждена графиком зависимости δ % от n , который подчеркнул, что фильтры среднего порядка, второй и третий, обеспечивают оптимальный баланс между подавлением помехи и сохранением амплитуды сигнала, тогда как высокие порядки увеличивают общую погрешность. Раздел 4.2, установил связь между корневыми локусами и частотными характеристиками с помощью диаграммы Боде, которая показала, что увеличение порядка фильтра улучшает селективность за счет смещения полюсов дальше от мнимой оси, но увеличивает фазовый сдвиг, что согласуется с теоретическими выводами главы 2 и практическими результатами главы 3.

Таким образом, проведенное исследование подтвердило, что фильтры Баттерворта являются эффективным инструментом для подавления низкочастотных помех в системах обработки измерительных сигналов, однако их эффективность зависит от порядка фильтра, который определяет баланс между селективностью, амплитудными характеристиками и фазовыми искажениями, что было наглядно продемонстрировано как теоретически, так и практически. Разработанная модель в Simulink, анализ погрешности и числовая оценка показателей качества позволили не только подтвердить теоретические предположения, но и предложить практические рекомендации по выбору оптимального порядка фильтра, для приложений, где важна точность восстановления амплитуды, предпочтительны фильтры среднего порядка, тогда как для задач с высокими требованиями к подавлению помех подходят фильтры пятого и шестого порядков, при условии учета фазовых искажений. Особую актуальность результаты исследования имеют для биомедицинской инженерии, где фильтры Баттерворта могут быть применены для обработки сигналов, таких как электрокардиограммы (ЭКГ) или электроэнцефалограммы (ЭЭГ), требующих точного выделения полезного сигнала на фоне биологических и внешних помех, что подчеркивает практическую значимость работы в данной области. Полученные результаты могут быть использованы в дальнейшем для оптимизации фильтров в реальных системах, а также для разработки новых

подходов к фильтрации сигналов, что открывает перспективы для будущих исследований, включая применение в биомедицинских системах и других высокоточных измерительных комплексах.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Signal filtering, Signal suppression, Signal processing
<https://training.dewesoft.com/online/course/filters>
2. What Is a Low-Pass Filter? <https://www.mathworks.com/discovery/low-pass-filter.html>
3. What Is a High-Pass Filter? https://www.mathworks.com/discovery/high-pass-filter.html?s_tid=srchtitle_site_search_1_high+pass
4. A. Browne, D. Young, Bandpass Filter 1997, Fusion Technology 1996
<https://www.sciencedirect.com/topics/physics-and-astronomy/bandpass-filter>
5. Band-stop Filter <https://www.allaboutcircuits.com/textbook/alternating-current/chpt-8/band-stop-filters/>
6. Butterworth filter design
<https://www.mathworks.com/help/signal/ref/butter.html>
7. S. A. Pactitis, Bessel filter, Active Filters, 2018
https://taylorandfrancis.com/knowledge/Engineering_and_technology/Systems_%26_control_engineering/Bessel_filter/
8. The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing Chebyshev Filters
https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/dsp-book/dsp_book_Ch20.pdf
9. Steve Winder, Analog and Digital Filter Design Book Second Edition, 2002
<https://www.sciencedirect.com/book/9780750675475/analog-and-digital-filter-design>
10. Dan Ebberts, Realistic Bounce and Overshoot, 2012
<https://motionscript.com/articles/bounce-and-overshoot.html>
11. А. В. Останков, Частотные характеристики колебаний и цепей, 2021
https://cchgeu.ru/upload/iblock/898/zekw8owvd68l2nhm0dlhaxnl34ivobsg/OTTS_UP_CHastotnye-kharakteristiki-kolebaniy-i-tsepey.pdf
12. OpenAI ChatGPT – 4, 2023 <https://chatgpt.com/>
13. The MathWorks, Inc., Разработка и реализация фильтр, 1994-2021
<https://docs.exponenta.ru/dsp/gs/design-and-implement-a-filter.html>
14. О. С. Вадутов, Математические основы обработки сигналов, 2016
<https://portal.tpu.ru/SHARED/v/VOS/study/disc1/Tab/tema06.pdf>
15. Construction of Root Locus, 2024
<https://www.geeksforgeeks.org/construction-of-root-locus/>
16. Е. Алтай А. В. Федоров К. А. Степанова Д. О. Кузиванов, Оценка эффективности методов обработки сигналов при реализации полиномиальных цифровых фильтров, 2022
https://www.omgtu.ru/general_information/media_omgtu/journal_of_omsk_research_journal/files/arhiv/2022/
17. Перерегулирование и время переходного процесса
<https://vs87.ru/d/practice/overshot/>

18. Cutoff frequency Audio Metering 2020, Study on the drop impact acceleration of the radioactive package by new approximation method based on velocity obtained by integrating acceleration 2023
https://taylorandfrancis.com/knowledge/Engineering_and_technology/Systems_%26_control_engineering/Cutoff_frequency/
19. Дмитрий Л., что такое коэффициент демпфирования нагрузки, 2013
<https://www.salonav.com/arch/2013/05/2552.htm>
20. Nicoleta A. Ruxandra M. B., Root locus map for lateral motion, 2011
https://www.researchgate.net/figure/Root-locus-map-for-lateral-motion_fig1_259367201
21. Clark R. N., Root Locus Design, 1996
<https://www.mathworks.com/help/control/ug/root-locus-design.html>
22. Simulink Basics Tutorial, 2018
https://ctms.engin.umich.edu/CTMS/index.php?aux=Basics_Simulink
23. Create a Simulink Model, 2021
<https://www.mathworks.com/help/sldrt/ug/create-a-model.html>
24. Обзор блоков Scope и Scope Viewer, 2022
<https://docs.exponenta.ru/simulink/ug/simulation-data-display-and-capture-using-scopes.html>
25. Raj K. B., Ashok K. G., Manoj K. S., MATLAB and Its Applications in Engineering, 2008
https://www.oreilly.com/library/view/matlab-and-its/9788131716816/9788131716816_ch11lev1sec6.html
26. Фильтрация сигналов на фоне помех
https://edu.kstu.kz/pluginfile.php/44513/mod_resource/content/1/14.htm?embed=1
27. Ельдос А. А., Методы фильтрации для оценки точности и помехоустойчивости системы обработки обработки электрокардиосигналов, 2024
<https://cyberleninka.ru/article/n/metody-filtratsii-dlya-otsenki-tochnosti-i-pomehoustoychivosti-sistemy-obrabotki-elektrokardiosignalov>
28. Диаграмма Боде линейной системы аппроксимирована из нелинейной модели Simulink, 2019
<https://docs.exponenta.ru/R2019a/slcontrol/ug/bodeplot.html>

РЕЦЕНЗИЯ

дипломной работы

студента по специальности 6B07114 – «Биомедицинская инженерия»

Саутова Ислама Алиджановича

На тему: «Разработка алгоритма картирования корневых локусов и поиск ассоциации с показателями качества системы высокочастотной фильтрации сигналов».

Бакалаврская дипломная работа Саутова Ислама Алиджановича посвящена актуальной проблеме повышения качества фильтрации сигналов в биомедицинских системах посредством разработки алгоритма картирования корневых локусов и анализа их влияния на характеристики фильтров.

Для исследования выбраны высокочастотные фильтры Баттерворта первого–шестого порядка, что позволило изучить их эффективность в условиях низкочастотных помех. Целью работы является создание алгоритма картирования корневых локусов и установление ассоциаций с показателями качества фильтрации сигналов. В рамках исследования решены следующие задачи: изучение теоретических основ фильтрации, разработка передаточных функций, моделирование фильтров в среде Simulink, построение нуль-полосных диаграмм, анализ погрешности фильтрации, а также оценка влияния корневых локусов на селективность и фазовые искажения системы.

Работа отличается глубокой аналитической проработкой, включает собственные численные расчёты, моделирование в Simulink, анализ данных с использованием диаграмм Боде и визуализацию результатов в виде графиков и таблиц. Качество изложения, логическая структура и высокий уровень научной обоснованности заслуживают положительной оценки.

Считаю, что дипломная работа студента Саутова Ислама Алиджановича на тему «Разработка алгоритма картирования корневых локусов и поиск ассоциации с показателями качества системы высокочастотной фильтрации сигналов» выполнена на высоком уровне, отвечает заявленным целям и задачам, обладает научной новизной и практической ценностью. Автор заслуживает присвоения академической степени бакалавра.

Рецензент:

КазНУ имени аль-Фараби,

и.о. доцента кафедры искусственного интеллекта

и Big Data, PhD

«01» 06 2025 г.



Карымкасова Н.Т

ОТЗЫВ

дипломного проекта (работы)

студента специальности 6В07114 – «Биомедицинская инженерия»

Саутов Ислам Алиджанович

На тему: «Разработка алгоритма картирования корневых локусов и поиск ассоциации с показателями качества системы высокочастотной фильтрации сигналов»

Дипломный проект студента бакалавриата Саутова Ислама Алиджановича посвящён «Разработке алгоритма картирования корневых локусов и поиску ассоциации с показателями качества системы высокочастотной фильтрации сигналов».

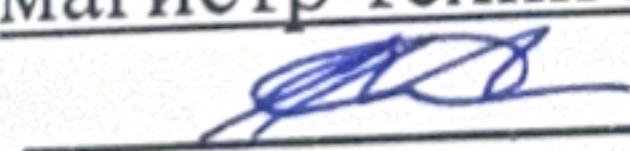
Целью работы является создание алгоритма для анализа динамических характеристик фильтров Баттерворта первого – шестого порядков, что способствует оптимизации фильтрации сигналов в биомедицинских системах. В процессе выполнения проекта Саутов Ислам Алиджанович детально исследовал влияние корневых локусов на качество фильтрации, включая погрешность и фазовые искажения, что позволило выявить ключевые ассоциации с показателями системы.

В первой части представлен обзор теоретических основ фильтрации и классификации фильтров. Во второй части описаны разработка алгоритма картирования и расчёт передаточных функций. Третья часть посвящена моделированию фильтров в Simulink и анализу осциллографических данных. В четвёртой части приведены результаты оценки погрешности и визуализация с использованием диаграмм Боде.

Дипломный проект студента Саутова Ислама по теме «Разработка алгоритма картирования корневых локусов и поиск ассоциации с показателями качества системы высокочастотной фильтрации сигналов» выполнен на высоком уровне и полностью реализует поставленные задачи. Работа демонстрирует научную глубину и практическую значимость, заслуживая оценки «95».

Научный руководитель

магистр технических наук, старший преподаватель

 Базарбай Л.

«05» 06 2025 г.



Отчет подобия

Метаданные

Название организации

Satbayev University

Название

Разработка алгоритма картирования корневых локусов и поиск ассоциации с показателями качества системы высокочастотной фильтрации сигналов

Автор

Научный руководитель / Эксперт

Саутов Ислам АлиджановичЛашын Базарбай

Подразделение

ИАиИТ

Объем найденных подобиий

КП-ия определяют, какой процент текста по отношению к общему объему текста был найден в различных источниках.. Обратите внимание!Высокие значения коэффициентов не означают плагиат. Отчет должен быть проанализирован экспертом.



КП1

25

Длина фразы для коэффициента подобиия 2



КП2

12197

Количество слов



КЦ

101967

Количество символов

Тревога

В этом разделе вы найдете информацию, касающуюся текстовых искажений. Эти искажения в тексте могут говорить о ВОЗМОЖНЫХ манипуляциях в тексте. Искажения в тексте могут носить преднамеренный характер, но чаще, характер технических ошибок при конвертации документа и его сохранении, поэтому мы рекомендуем вам подходить к анализу этого модуля со всей долей ответственности. В случае возникновения вопросов, просим обращаться в нашу службу поддержки.

Замена букв		0
Интервалы		0
Микропробелы		3
Белые знаки		0
Парафразы (SmartMarks)		2

Подобия по списку источников

Ниже представлен список источников. В этом списке представлены источники из различных баз данных. Цвет текста означает в каком источнике он был найден. Эти источники и значения Коэффициента Подобия не отражают прямого плагиата. Необходимо открыть каждый источник и проанализировать содержание и правильность оформления источника.

10 самых длинных фраз

Цвет текста

ПОРЯДКОВЫЙ НОМЕР	НАЗВАНИЕ И АДРЕС ИСТОЧНИКА URL (НАЗВАНИЕ БАЗЫ)	КОЛИЧЕСТВО ИДЕНТИЧНЫХ СЛОВ (ФРАГМЕНТОВ)
1	https://official.satbayev.university/download/document/39396/%D0%9C%D0%90%D0%93%202024%20%D2%9A%D0%B0%D0%BD%D0%B0%D1%82%20%D0%90%D1%80%D1%83%D0%B6%D0%B0%D0%BD%20%D2%9A%D0%B0%D0%BD%D0%B0%D1%82%D2%9B%D1%8B%D0%B7%D1%8B.pdf	17 0.14 %
2	https://cyberleninka.ru/article/n/obosnovanie-i-optimizatsiya-parametrov-solntsezashitnyh-perekrytiy-ustroystv-zaschischennogo-grunta	14 0.11 %

3	Imangazy_Chem Journal №2_2021_ред.doc 5/14/2021 Institute of Chemical Sciences named after A.B. Bekturov (Institute of Chemical Sciences named after A.B. Bekturov)	7 0.06 %
4	Imangazy_Chem Journal №2_2021_ред.doc 5/14/2021 Institute of Chemical Sciences named after A.B. Bekturov (Institute of Chemical Sciences named after A.B. Bekturov)	7 0.06 %

из базы данных RefBooks (0.00 %)

ПОРЯДКОВЫЙ НОМЕР	НАЗВАНИЕ	КОЛИЧЕСТВО ИДЕНТИЧНЫХ СЛОВ (ФРАГМЕНТОВ)
------------------	----------	---

из домашней базы данных (0.00 %)

ПОРЯДКОВЫЙ НОМЕР	НАЗВАНИЕ	КОЛИЧЕСТВО ИДЕНТИЧНЫХ СЛОВ (ФРАГМЕНТОВ)
------------------	----------	---

из программы обмена базами данных (0.11 %)

ПОРЯДКОВЫЙ НОМЕР	НАЗВАНИЕ	КОЛИЧЕСТВО ИДЕНТИЧНЫХ СЛОВ (ФРАГМЕНТОВ)
1	Imangazy_Chem Journal №2_2021_ред.doc 5/14/2021 Institute of Chemical Sciences named after A.B. Bekturov (Institute of Chemical Sciences named after A.B. Bekturov)	14 (2) 0.11 %

из интернета (0.25 %)

ПОРЯДКОВЫЙ НОМЕР	ИСТОЧНИК URL	КОЛИЧЕСТВО ИДЕНТИЧНЫХ СЛОВ (ФРАГМЕНТОВ)
1	https://official.satbayev.university/download/document/39396/%D0%9C%D0%90%D0%93%202024%20%D2%9A%D0%B0%D0%BD%D0%B0%D1%82%20%D0%90%D1%80%D1%83%D0%B6%D0%B0%D0%BD%20%D2%9A%D0%B0%D0%BD%D0%B0%D1%82%D2%9B%D1%8B%D0%B7%D1%8B.pdf	17 (1) 0.14 %
2	https://cyberleninka.ru/article/n/obosnovanie-i-optimizatsiya-parametrov-solntsezashitnyh-perekrytiy-ustroystv-zaschisennogo-grunta	14 (1) 0.11 %

Список принятых фрагментов (нет принятых фрагментов)

ПОРЯДКОВЫЙ НОМЕР	СОДЕРЖАНИЕ	КОЛИЧЕСТВО ИДЕНТИЧНЫХ СЛОВ (ФРАГМЕНТОВ)
------------------	------------	---