

«Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті»
коммерциялық емес акционерлік қоғамы



**SATBAYEV
UNIVERSITY**

Автоматика және ақпараттық технологиялар институты
«Робототехника және автоматиканың техникалық құралдары» кафедрасы

Әблеш Ғалымжан Нұрғалиұлы

«Режекторлық сүзгі параметрлерінің сигналды өлшеу дәлдігіне әсерін
зерттеу»

МАГИСТРЛІК ДИССЕРТАЦИЯ

7M07107 - Робототехника және мехатроника

Алматы 2026

«Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті»
коммерциялық емес акционерлік қоғамы



**SATBAYEV
UNIVERSITY**

Автоматика және ақпараттық технологиялар институты

Қолжазба құқығында

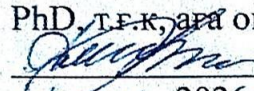
Магистр академиялық дәрежесін алу үшін

МАГИСТРЛІК ДИССЕРТАЦИЯ (ЖОБА)

Диссертацияның атауы: Режекторлық сүзгі параметрлерінің сигналды өлшеу
дәлдігіне әсерін зерттеу
Дайындау бағыты: 7М07107 - Робототехника және мехатроника

Ғылыми жетекші:

PhD, т.ғ.к., аға оқытушы

 Алтай Е.А.

«12» 01 2026 ж.

Рецензент:

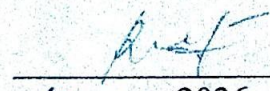
«Жалпы білім беру пәндері» кафедрасының доценті

 Сейдилдаева А.К.

«12» 01 2026 ж.

Нормобақылаушы:

PhD, қауымдастырылған профессор

 Рахметова П.М.

«12» 01 2026 ж.

ҚОРҒАУҒА ЖІБЕРІЛДІ

Кафедра меңгерушісі РТЖАТҚ
техника ғылымының кандидаты,
профессор



Ожикенов К.А.

«12» 01 2026 ж.

Алматы 2026

«К.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті»
коммерциялық емес акционерлік қоғамы



SATBAYEV
UNIVERSITY

Автоматика және ақпараттық технологиялар институты
«Робототехника және автоматиканың техникалық құралдары» кафедрасы

7M07107 - Робототехника және мехатроника

БЕКІТЕМІН
РТЖАТҚ кафедра
менгерушісі
техника ғылымының
кандидаты
Ожикенов К.А.
« 12 » 12 2026 ж.

Магистрлік диссертацияны орындауға арналған ТАПСЫРМА

Магистрант: Әблеш Ғалымжан Нұрғалиұлы

Тақырыбы: Режекторлық сүзгі параметрлерінің сигналды өлшеу дәлдігіне әсерін зерттеу

Университет ректорының 2024 ж. «03» 28 № 133 ІІ/Ө бұйрығымен бекітілген.

Аяқталған жұмысты тапсыру мерзімі: «16» 12 2025 ж.

Магистрлік диссертацияның бастапқы деректері:

Магистрлік диссертацияда қарастырылатын мәселелер тізімі:

- а) Режекторлық сүзгілердің беріліс функциясын есептеу.
- б) Режекторлық сүзгі параметрлерінің сигналды өлшеу дәлдігіне әсерін MATLAB-та есептеу.
- в) Simulink-те режекторлық сүзгіні жобалау.
- г) Режекторлық фильтрдің дискреттік моделін жүзеге асырылуы және оның тиімділігін эксперименттік тексеру.

Графикалық материалдың тізімі (міндетті сызбаларды дәл көрсете отырып):
жұмыс презентациясы 20 слайдтарда көрсетілген.

Ұсынылатын негізгі әдебиеттер:

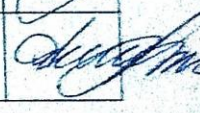
39 әдебиеттер тізімі.

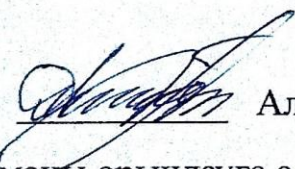
Магистрлік диссертацияны дайындау

КЕСТЕСІ

Бөлімдер атауы, зерттелетін сұрақтар тізбесі	Ғылыми жетекшіге ұсыну мерзімдері	Ескерту
Екінші ретті классикалық режекторлық сүзгінің математикалық моделі	01.09 - 20.09.2025 ж.	Орындалды
Демпфер коэффициенті бар режекторлық сүзгісін параметрлеу	21.09 – 18.10.2025 ж.	Орындалды
Бір жиілікті полиномдық режекторлық сүзгісін параметрлеу	19.10 – 15.11.2025 ж.	Орындалды
Режекторлық фильтрдің дискреттік моделін жүзеге асырылуы және оның тиімділігін роботтандырылған мехатродық құрылғыда эксперименттік тексеру	16.11 – 28.11.2025 ж.	Орындалды
Қорытынды бөлім	01.12 – 22.12.2025 ж.	Орындалды

Аяқталған магистрлік диссертация үшін, оған қатысты бөлімдердегі диссертациялар кеңесшілері мен қалып бақылаушының қолдары:

Бөлімдердің атауы	Кеңесшілер (тегі, аты, әкесінің аты, ғылыми дәрежесі, атағы)	Қол қойылған күні	Қол
Норма бақылаушы	Рахметова П.М., PhD, қауымдастырылған профессор	12.01.26	
Негізгі бөлім	Алтай.Е.А. PhD, т.ғ.к., аға оқытушысы	06.01.26	
Есептеу бөлім	Алтай.Е.А. PhD, т.ғ.к., аға оқытушысы	06.01.26	

Ғылыми жетекші:  Алтай Е.А.

Білім алушы тапсырманы орындауға алды:  Әблеш Ғ.Н.

Күні: « 12 » 01 2026 ж.

Мазмұны

КІРІСПЕ.....	3
1-тарау. Сигналды сүзгілеу және режекторлық сүзгілердің теориялық негіздері	4
1.1 Режекторлық сүзгілер	5
1.2 Режекторлық сүзгілердің қолданылуына мысалдар	6
1.3 Екінші ретті классикалық режекторлық сүзгінің математикалық моделі	8
1.4 Режекторлық сүзгілердің классификациясы	8
1.5 Тарау бойынша қорытынды	10
2-тарау Демпфер коэффициенті бар режекторлы сүзгісін параметрлеу	10
2.1 Баптау	10
2.2 Фильтр сипаттамаларын бағалау	13
2.3 Шулы сигналдарды өңдеу нәтижелерін бағалау	21
2.4 Тарау бойынша қорытынды	26
3-тарау Бір жиілікті полиномдық режекторлы сүзгісін параметрлеу ...	29
3.1 Баптау	29
3.2 Сүзгілерді модельдеу және олардың қасиеттерін бағалау	34
3.3 Шулы сигналдарды өңдеу нәтижелерін бағалау.	39
3.4 Тарау бойынша қорытынды	42
4-тарау Режекторлық фильтрдің дискреттік моделін жүзеге асырылуы және оның тиімділігін роботтандырылған мехатродыдық құрылғыда эксперименттік тексеру.....	43
4.1 Шудың пайда болу себептері.	44
4.2 Салмақтық дозатор сигналының эксперименттік зерттелуі	46
4.3 Режекторлық фильтрдің дискреттік формадағы практикалық жүзеге асырылуы	47
4.4 Тарау бойынша қорытындылар	51

Қорытынды	52
Пайдаланылған әдебиеттер тізімі	52

Аңдатпа

Бұл мақалада ойық сүзгі параметрлерінің шулы өлшеу сигналдарын өңдеу сапасына әсері қарастырылады. Демперлеуі бар классикалық екінші ретті ойық сүзгісі және Баттерворт жуықтауына негізделген бір жиілікті полиномдық сүзгі қарастырылады. Олардың жиілік және уақыт сипаттамалары MATLAB/Simulink көмегімен талданады. Сүзу тиімділігі SNR, MSE және корреляциялық метрикаларды пайдаланып бағаланады. Сүзгі параметрлерін таңдау селективтілікке, тұрақтылыққа және өлшеу дәлдігіне айтарлықтай әсер ететіні көрсетілген.

Аннотация

В работе исследуется влияние параметров режекторных фильтров на качество обработки зашумленных измерительных сигналов. Рассмотрены классический режекторный фильтр второго порядка с демпфированием и одночастотный полиномиальный фильтр на основе аппроксимации Баттерворта. Проведён анализ их частотных и временных характеристик с использованием MATLAB/Simulink. Эффективность фильтрации оценивалась по показателям SNR, MSE и корреляции. Показано, что выбор параметров фильтра существенно влияет на селективность, устойчивость и точность измерений.

Abstract

This paper examines the influence of notch filter parameters on the processing quality of noisy measurement signals. A classic second-order notch filter with damping and a single-frequency polynomial filter based on the Butterworth approximation are considered. Their frequency and time characteristics are analyzed using MATLAB/Simulink. Filtering effectiveness is assessed using SNR, MSE, and correlation metrics. It is shown that the choice of filter parameters significantly impacts selectivity, stability, and measurement accuracy.

КІРІСПЕ

Қазіргі заманғы робототехника және мехатроника жүйелерінде сенсорлар мен атқарушы механизмдердің жұмысы жоғары дәлдікті талап етеді. Мұндай жүйелерде өлшеу сигналдарына сыртқы орта факторларының (діріл, электрлік шу, электромагниттік әсерлер және т.б.) ықпалы жиі кездеседі. Бұл факторлар өлшеу процесінде артық гармоникалық компоненттердің пайда болуына әкеліп, басқару жүйесінің тұрақтылығын төмендетеді және сенсор көрсеткіштерінің бұрмалануына себеп болады. Мұндай бұрмалануларды жою үшін арнайы сүзгілеу әдістері, соның ішінде режекторлық сүзгілер (notch-фильтрлер) қолданылады [1, 2].

Сигналды сүзгілеудің әртүрлі тәсілдері бар: төменгі жиілікті, жоғары жиілікті, жолақты және режекторлық сүзгілер. Төменгі жиілікті сүзгілер артық жоғары жиілікті компоненттерді басуға қабілетті болғанымен, олар ақпараттық сигналдың өзіне де әсер етіп, пайдалы жиіліктерді де басып тастауы мүмкін. Бұл олардың жиілік сипаттамаларымен және комплекс жазықтықтағы нөлдер мен полюстердің орналасу ерекшеліктерімен түсіндіріледі [3]. Ал режекторлық сүзгілер белгілі бір тар жиілік жолағындағы компоненттерді ғана басып, қалған жиіліктерді бұзбай өткізетіндігімен ерекшеленеді. Осы қасиеті режекторлық сүзгілерді жоғары жиілікті немесе тар жолақты гармоникалық кедергілерді жою үшін таптырмас құрал етеді [4, 5].

Режекторлық сүзгілердің жобалануында негізгі мақсаты — қажетсіз жиілікті компоненттерді бәсеңдету арқылы сигналдың сапасын арттыру. Дегенмен, бұл сүзгілердің сипаттамалары (орталық жиілік, жолақ ені, селективтілік коэффициент) өлшенетін сигналға бейімделуі тиіс. Осыған байланысты сүзгі құрылымдарын жетілдіру және олардың параметрлерін тиімді реттеу өзекті ғылыми мәселе болып табылады [2, 9].

Зерттеу мақсаты. Осы диссертациялық жұмыстың мақсаты — режекторлық сүзгілердің параметрлерінің өлшеу сигналдарының дәлдігіне әсерін теориялық және модельдік тұрғыда зерттеу, сондай-ақ алынған нәтижелерді өндірістік автоматтандырылған жүйелерде қолдану мүмкіндігін негіздеу.

Осы жұмыста екі түрлі режекторлық сүзгі құрылымы жеке-жеке зерттеледі. Бірінші сүзгі — демпферлік коэффициентпен сипатталатын классикалық режекторлық сүзгі, ол кері байланыссыз жүзеге асады және жиілік сипаттамалары статикалық түрде реттеледі. Екінші сүзгі — полиномиалды Баттерворт типті біржиілікті режекторлық сүзгі, ол кері байланыс контурымен іске асырылады. Бұл құрылым сүзгінің параметрлерін нақты уақыт режимінде бейімдеуге мүмкіндік береді. Екі сүзгінің өткізу функциялары, селективтілік қасиеттері және шу басу тиімділігі математикалық модельдеу және спектрлік талдау әдістері арқылы зерттеледі. Кері байланысты сүзгіде кері байланыс коэффициентінің өзгеруі арқылы сүзгінің өткізу жолағы мен бөгет жолағының динамикалық реттелуі жүзеге асырылады.

Зерттеу міндеттері. Қойылған мақсатқа жету үшін келесі негізгі міндеттер анықталды:

– өлшеу сигналдарындағы тар жолақты периодтық шудың пайда болу себептерін және олардың басқару жүйесіне әсерін талдау;
– демпферлеу коэффициенті бар классикалық екінші ретті режекторлық сүзгінің математикалық моделін зерттеу;
– кері байланыс контуры бар Баттерворт типті режекторлық сүзгінің құрылымын және параметрлік ерекшеліктерін қарастыру;
– режекторлық сүзгілердің жиіліктік, өтпелі және импульстік сипаттамаларын модельдеу арқылы бағалау;
– сүзгі параметрлерінің (демпферлеу коэффициенті, кері байланыс коэффициенті) сигнал сапасының көрсеткіштеріне (SNR, MSE, корреляция) әсерін анықтау;
– алынған теориялық нәтижелерді PLC негізіндегі басқару алгоритмдеріне енгізудің принциптік мүмкіндігін көрсету.

Жұмыстың ғылыми жаңалығы — сүзгілердің екі түрлі құрылымын бір-бірінен тәуелсіз зерттеу және олардың сипаттамаларының өлшеу дәлдігіне әсерін жүйелі түрде бағалау болып табылады. Бұрынғы ғылыми еңбектерде бұл екі құрылым осындай контексте жеке-жеке қарастырылмаған. Зерттеу нәтижелері режекторлық сүзгілердің инженерлік қолданбаларда тиімді конфигурацияларын анықтауға және нақты өлшеу процестеріндегі дәлдікті арттыруға септігін тигізеді.

1-тарау. Сигналды сүзгілеу және режекторлық сүзгілердің теориялық негіздері

Өлшеу және басқару жүйелерінде сигналдардың дәлдігін арттыру және сыртқы кедергілерді басу үшін түрлі сүзгілеу әдістері қолданылады. Сүзгілер — белгілі бір жиіліктік сипаттамаларға ие құрылымдар, олар сигналдың қажетті компоненттерін өткізіп, қажетсіз бөліктерін басуға арналған [12]. Сүзгілерді жиілік жолағы бойынша төменгі жиілікті сүзгі (ТЖС), жоғары жиілікті сүзгі (ЖЖС), жолақты сүзгі және режекторлық сүзгі (немесе тар жолақты басушы сүзгі) деп ажыратуға болады [13].

Төменгі жиілікті сүзгілер (ТЖС) жоғары жиілікті кедергілерді басу үшін қолданылады. Олар сигналдың төменгі жиіліктегі пайдалы компоненттерін өткізіп, жоғары жиіліктегі шуды бәсеңдетеді. Бұл сүзгілер, мысалы, өлшеу жүйелерінде жоғары жиілікті электрондық шу әсерін жою үшін тиімді [14].

Жоғары жиілікті сүзгілер (ЖЖС) керісінше, тек жоғары жиіліктегі сигнал компоненттерін өткізеді және төменгі жиіліктегі кедергілерді жояды. Бұл сүзгілер көбіне төменгі жиілікті дрейфті немесе флуктуацияны жою үшін пайдаланылады [14, 15]. Алайда, кейбір жағдайларда сигналдың ішінде нақты бір жиіліктегі (мысалы, 50/60 Гц желілік шу) тұрақты кедергі болуы мүмкін. Мұндай кезде ТЖС немесе ЖЖС пайдалану тиімсіз болуы мүмкін, себебі олар сигналдың басқа да қажетті компоненттерін басып тастайды. Осындай тар жолақты немесе жеке жиіліктегі кедергілерді жою үшін **режекторлық сүзгілер (notch-фильтрлер)** қолданылады [16].

Режекторлық сүзгілер — белгілі бір тар жиілік диапазонын басып, қалған жиіліктерді өзгеріссіз өткізетін сүзгілер [17]. Олар «басу жолағы» деп аталатын жиілік аралығында амплитуданы айтарлықтай төмендетіп, сыртқы кедергілерді тиімді жоя алады.

Мұндай сүзгілердің басты артықшылығы — жүйенің пайдалы жиіліктік құрамына минималды әсер ете отырып, дәл белгілі жиіліктегі шу мен резонанстарды селективті түрде баса алуы [18].

Режекторлық сүзгілер аналогтық немесе цифрлық түрде жүзеге асырылуы мүмкін. Олар көбіне спектрлік тұрғыда нақты бір жиіліктегі (мысалы, f_0) сигналды жою үшін жобаланады және осы жиіліктің айналасындағы амплитуда мәнін минимумға дейін түсіреді. Практикада мұндай сүзгілер электроникада, биомедициналық өлшеулерде (мысалы, ЭКГ сигналынан 50 Гц шуылын жою) [19], аудиотехникада және робототехникалық жүйелерде кеңінен қолданылады [20].

1.1 Режекторлық сүзгілер

Сигналдарды сүзгіден өткізу – бұл сигналдың қажетті құрамдастарын бөліп алу және қажетсіз кедергілерді белгілі бір белгісі бойынша (көбінесе жиілік бойынша) басу процесі. Басқаша айтқанда, сүзгі белгілі бір жиілік диапазондарын өткізеді де, қалғандарын әлсіретіп, сигналдан кедергілерді жояды және пайдалы компоненттерді сақтайды.

Сүзгілерді қолдану өлшенетін сигналдағы шудың деңгейін төмендетіп, оның ақпараттық сипаттамаларын сақтауға мүмкіндік береді. Мысалы, электрлік кедергілер деңгейі жоғары ортада тиімді сүзгілеу сигнал сапасын жақсартуда маңызды рөл атқарады (әсіресе биомедициналық жүйелерде). Көптеген жағдайларда пайдалы сигналдың кең спектрін бұзбай, тек тар жолақты кедергілерді жою қажет болады — яғни сүзгінің жоғары жиілік талғампаздығын қамтамасыз ету керек.

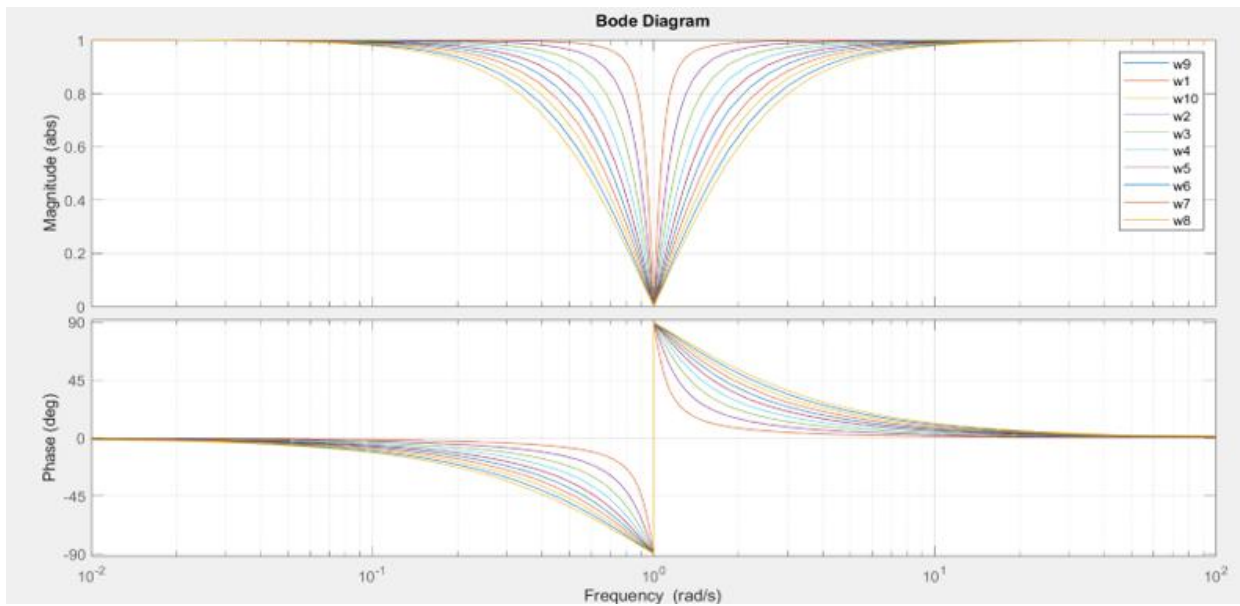
Идеал жағдайда сүзгі кедергілер жиілігін толық басып, пайдалы сигналды бұрмаламай өткізуі тиіс. Алайда нақты (шынайы) техникалық іске асыруда мұндай идеал сипаттамаларға қол жеткізу мүмкін емес: сүзгінің амплитуда-жиілік сипаттамасында (АЖС) тоқтату жолағында шектеулі әлсіреу, өткізгіш жолағында аздап жоғалту және өтпелі аймақта біртіндеп ауысу байқалады. Сондықтан әдебиеттерде сүзгілердің түрлі типтері, олардың полюс-нөл конфигурациялары, өтпелі сипаттамалары және фазалық бұрмаланулары егжей-тегжейлі зерттелген [1–3стар].

Классикалық еңбектерде тар жолақты кедергілерді селективті басу үшін notch-сүзгілердің ерекше тиімді екені атап өтіледі: олар **пайдалы сигналды іс жүзінде бұзбай**, белгілі бір тар диапазонды басуға мүмкіндік береді [1]. Бұл, әсіресе, өлшеу дәлдігін жоғалтпай, тек шу немесе резонанс компонентін әлсірету қажет болғанда маңызды.

Нақты режекторлық сүзгілерде бұл қасиеттер тек жуық түрде іске асады:

- Басу жолағында үлкен, бірақ шектеулі әлсіреу байқалады (беріліс коэффициенті ≈ 0 , мысалы –80...–100 дБ шамасында);
- Өткізу жолағында сүзгі шамамен бірлік күшейтуді сақтайды (жоғалту өте аз — шамамен бірнеше ондық децибел).

Мұндай сүзгінің амплитуда-жиілік сипаттамасында жиілік осінің белгілі бір нүктесінде айқын **тар ойық (notch)** түріндегі минимум көрінеді — дәл осы жиілік сүзгінің бапталу нүктесі болып табылады. Төменде 1-суретте режекторлық сүзгінің АЖС гарфигі көрсетілген.



Сурет 1 – режекторлық сүзгінің амплитуда-жиілік сипаттамасының мысалы.

1.2 Режекторлық сүзгілердің қолданылуына мысалдар

Қазіргі заманғы техникалық жүйелерде сигналдардың сапасына әсер ететін көптеген кедергілер мен бұрмалаушы факторлар кездеседі. Бұл кедергілер жиі түрде белгілі бір тұрақты немесе тар жиілікте шоғырланғандықтан, оларды дәл жою үшін жиіліктік селективтілігі жоғары сүзгілер қажет болады. Төменгі және жоғары жиілікті сүзгілер пайдалы сигналдың да белгілі бөліктерін басып тастауы мүмкін, ал жолақты сүзгілер кеңірек диапазонды қамтиды. Осындай жағдайда режекторлық сүзгілер тек қажетсіз тар жиілікті басып, сигнал құрылымын бұзбай сақтау арқылы ерекше тиімділік танытады. Төменде әртүрлі салаларда режекторлық сүзгілердің қолданылуына мысалдар келтірілген.

1. Медицина (биомедициналық электроника): Электрокардиография (ЭКГ) және электроэнцефалография (ЭЭГ) сигналдарын тіркеу кезінде өлшенетін биосигналдарға 50/60 Гц жиіліктегі желілік кедергі әсер етеді. Бұл кедергілер медициналық жабдықтың қуат көзінен туындайды және олардың жиілігі нақты әрі тұрақты.

Басқа сүзгілер — мысалы, төменгі жиілікті немесе жолақты сүзгілер — бұл шуды ішінара басуы мүмкін, бірақ олар пайдалы жүрек ырғағының немесе ми белсенділігінің төменгі жиілік компоненттерін де бұрмалап жібереді. Мұндай жағдайда тек режекторлық сүзгі қажетсіз жиілікті дәл басып, негізгі биосигналды бұзбай сақтай алады.

2. Аудио жүйелер (дыбыс өңдеу): Музыкалық жазба, сахналық дыбыс немесе тікелей эфир кезінде микрофондық кері байланыс (feedback) — жиі кездесетін мәселе. Бұл құбылыс күшейткіш пен микрофон аралығында дыбыс шоғырланып, белгілі бір жиілікте шикылдау дыбысын тудырғанда пайда болады.

Жалпы жолақты немесе төменгі жиілікті сүзгілер мұндай шуылмен күресе алмайды, себебі олар пайдалы дыбыс компоненттерін де әлсіретіп жібереді. Ал режекторлық сүзгі нақты сол шиқылдайтын жиілікті басып, қалған дыбыс сапасын сақтап қалады.

3. Робототехника және мехатроника: Мехатрондық жүйелерде және сервоқозғалтқыштарда резонанстық дірілдер мен сигналдық бұрмаланулар – маңызды техникалық қиындықтардың бірі. Белгілі бір жиілікте механикалық резонанс күшейіп, қозғалыс дәлдігі мен тұрақтылығы төмендейді. Сонымен қатар, сенсорлардан түсетін сигналдар шу мен аддитивті гармоникалық кедергілермен ластануы мүмкін.

Төменгі немесе жоғары жиілікті сүзгілер жалпы сигналдың құрылымын бұзуы ықтимал. Режекторлық сүзгі белгілі бір резонанстық жиілікті баса отырып, жүйенің динамикалық сипаттамаларын сақтауға мүмкіндік береді.

Мысал: 73 Гц резонанстық дірілді басу үшін роботтың кері байланыс контурына режекторлық сүзгі енгізіліп, сервоқозғалтқыштың тұрақты жұмысы қамтамасыз етіледі [23].

4. Байланыс жүйелері: Радио және сымсыз байланыс жүйелерінде жиі қалаусыз сигналдар белгілі бір жиілікте пайда болады. Бұл сигналдар негізгі арнаға кедергі келтіріп, деректердің дұрыс берілуіне әсер етеді. Кеңжолақты сүзгілер бұл мәселені шешу барысында пайдалы жиіліктерді де басып тастай алады.

Ал режекторлық сүзгі нақты бір қалаусыз сигнал жиілігін басып, негізгі арнаның өткізу қабілетін сақтайды.

1.2 Екінші ретті классикалық режекторлық сүзгінің математикалық моделі

Режекторлық сүзгілердің жұмысы жиілікке тәуелді басу механизмін қолдануға негізделеді. Ең кең таралған және практикалық маңызы жоғары түрі — бұл екінші ретті классикалық режекторлық сүзгі, ол жиі кері байланыссыз құрылымда қолданылады және сүзгілеу сипаттамалары демпферлеу коэффициенті арқылы реттеледі [25].

Мұндай сүзгінің **беріліс функциясы** Laplace түрінде келесі түрде жазылады:

$$W = \frac{s^2 + \omega_0^2}{s^2 + 2\xi\omega_0 s + \omega_0^2},$$

мұндағы:

- ω_0 — басылатын орталық жиілік,
- ξ — демпферлеу коэффициенті.
- s — Лаплас айнымалысы.

Амплитудалық-жиілік сипаттамасы

$$|W(j\omega)| = \left| \frac{j^2\omega^2 + \omega_0^2}{j^2\omega^2 + 2\xi\omega_0 j\omega + \omega_0^2} \right|,$$

Орталық жиілікте ω_0 амплитуда минимумға жетеді. Бұл сүзгі белгілі бір жиілікті басуға бейім.

Практикалық маңызы. Бұл типтегі сүзгілер нақты жиіліктегі шуды немесе резонансты басу үшін қолданылады. Олар аналогтық немесе цифрлық түрде жүзеге аса алады, робототехника, медицина, аудио және байланыс жүйелерінде кеңінен қолданылады [26, 27].

1.3 Режекторлық сүзгілердің классификациясы

Режекторлық сүзгілерді құрылымдық, жиіліктік және математикалық сипаттамаларына қарай әртүрлі тәсілмен жіктеуге болады. Бұл классификация сүзгіні нақты қолдану саласына бейімдеп таңдау және жобалау үшін маңызды.

1. Аналогтық және цифрлық режекторлық сүзгілер

Аналогтық режекторлық сүзгілер пассивті (резистор, конденсатор, индуктивтілік) немесе активті элементтерден (операциялық күшейткіштермен) құралады. Олар нақты уақыттағы физикалық құрылғыларда қолданылады [28].

Цифрлық режекторлық сүзгілер дискретті сигналдармен жұмыс істейді және сандық өңдеу алгоритмдері арқылы жүзеге асырылады. Бұл сүзгілер микроконтроллер, DSP-процессор немесе бағдарламалық код арқылы қолданылады [29].

2. Полиномдық модельдер бойынша классификация

Режекторлық сүзгілердің жиіліктік сипаттамаларын жақсарту үшін олардың беріліс функциялары белгілі бір математикалық полиномдар негізінде құрылады. Ең көп таралған модельдер:

Баттерворт фильтрі — өткізу жолағында максималды тегістікпен (flatness) сипатталады. Өтпелі жиілікте баяу сөнеді, бірақ фазалық бұрмалауы төмен болады. Режекторлық сүзгілерге бейімделген нұсқалары біржиілікті резонанстық сигналды дәл басу үшін пайдаланылады [30].

Бессель фильтрі — минималды фазалық бұрмалаумен ерекшеленеді. Сигнал пішінін сақтау маңызды болған жүйелерде қолданылады. Бірақ өткізу функциясы баяу сөнетіндіктен режекция тереңдігі төмен [31].

Чебышев фильтрі (1-түрі) — өткізу жолағында толқындануға рұқсат береді, бірақ өткір басу қасиеті бар. Режекторлық сүзгілер үшін өткізу шекарасындағы селективтілік жоғары [32].

Эллиптикалық фильтр (Чебышев II және elliptic) — ең жоғары селективтілікке ие, бірақ өткізу және режекция жолағында толқындануы бар. Сигнал формасына сезімтал жүйелер үшін жарамсыз [33].

3. Кері байланыс контурымен және онсыз

Кері байланыссыз классикалық құрылымдар — мысалы, екінші ретті стандартты беріліс функциясы арқылы жүзеге асады (алдыңғы 1.2 бөлімде көрсетілген). Жобалануы оңай, бірақ реттеу икемділігі шектеулі.

Кері байланыспен жүзеге асырылған сүзгілер — жүйеге кері байланыс енгізу арқылы режекторлық «ойық» тереңдігін, өткізу жолағын және фазалық қасиеттерін динамикалық түрде басқаруға болады. Мұндай құрылымдар робототехникалық жүйелерде жиі кездеседі [34].

4. Реттелетін және бейімделетін режекторлық сүзгілер

Заманауи цифрлық жүйелерде жиілігі өзгертін кедергілермен жұмыс істеу қажет болғанда **бейімделетін (адаптивті) режекторлық сүзгілер** қолданылады. Олар жиілікке немесе сигнал статистикасына қарай автоматты түрде конфигурацияланады. Мұндай сүзгілер шумның уақыт бойынша өзгеруіне икемделе алады және нақты уақыттағы жүйелер үшін маңызды [35].

1.4 Тарау бойынша қорытынды

Осы тарауда сигналдарды сүзгілеудің жалпы принциптері, режекторлық сүзгілердің құрылымы мен жұмыс істеу ерекшеліктері, олардың қолданылу салалары және математикалық модельдері қарастырылды. Екінші ретті классикалық режекторлық сүзгінің беріліс функциясы негізінде оның жиіліктік сипаттамаларын басқару демпферлеу коэффициенті арқылы жүзеге асатыны көрсетілді.

Сондай-ақ режекторлық сүзгілердің әртүрлі классификациялары — аналогтық және цифрлық, полиномдық модельдер бойынша (Баттерворт, Бессель, Чебышев, эллиптикалық), кері байланыс құрылымына негізделген және адаптивті сүзгілер — жүйелі түрде сипатталды. Бұл жіктеулер сүзгілердің нақты қолдану контекстіне сай дұрыс таңдалуына мүмкіндік береді.

Жалпы, режекторлық сүзгілер — нақты жиіліктегі кедергілермен күресуде тиімді құрал ретінде робототехника, биомедициналық электроника, аудиотехника және байланыс салаларында кеңінен қолданылады. Алдағы бөлімдерде осындай сүзгілерді синтездеу және олардың параметрлерінің өлшеу дәлдігіне әсерін зерттеу қарастырылады.

2-тарау Демпфер коэффициенті бар режекторлы сүзгісін параметрлеу

2.1 Баптау

Берілген міндет — бұрыштық жиілігі ω_0 - рад/с болатын тар жолақты кедергіні басатын фильтр құру. Бұл дегеніміз, $s=j\omega_0$ нүктесінде фильтрдің шығысы нөлге тең болуы

$$W(j\omega_0) = 0,$$

Қалған жиіліктер мүмкіндігінше аз бұрмаланып өтуі керек. Мұндай талапты орындаудың тиімді тәсілі – екінші ретті құрылым қолдану: $\pm j\omega_0$ нүктелерінде екі нөл және осы нөлдердің жанында орналасқан демпферленген екі полюс енгізу.

Алымын құру (нөлдерді қою)

Фильтр $s = j\omega_0$ және $s = -j\omega_0$ нүктелерінде нөлге тең болу үшін, оның сан алымы осы нүктелерде нөл болуы тиіс. Бұл шартты қанағаттандыратын ең қарапайым сан алымы:

$$N(s) = s^2 + \omega_0^2,$$

$$N(j\omega_0) = (j\omega_0)^2 + \omega_0^2 = -\omega_0^2 + \omega_0^2 = 0,$$

Осылайша сан алым «notch» әсерін — берілген жиілікті толық басуды — қамтамасыз етеді.

Бөлімін құру (демпферленген полюстер)

Фильтрдің орнықтылығын және басу жолағының енін басқару үшін екі демпферленген полюс енгізіледі. Екінші ретті бөлімнің классикалық түрі:

$$D(s) = s^2 + 2\xi\omega_0 s + \omega_0^2,$$

мұндағы ξ — демпферлеу коэффициенті.

Беріліс функциясын құрастыру

Сан алым мен бөлімді біріктірсек, екінші ретті режекторлық фильтрдің беріліс функциясын аламыз:

$$W = \frac{s^2 + \omega^2}{s^2 + 2\xi\omega_0 s + \omega^2},$$

Бұл — демпферлеуі бар классикалық notch-фильтр.

Селективтілік Q және жолақ енімен байланысы

Сүзгінің селективтілігі - ол басу тереңдігін және өткізу жолағының тарлығын сипаттайды. Q жоғары болған сайын сүзгі тар әрі терең «ойық» жасайды, ал төмен болған сайын сүзгі кеңірек болып, оның әсері әлсізденеді.

Екінші ретті жүйелер үшін демпферлеу коэффициенті мен селективтілігі арасында байланыс бар:

$$Q = \frac{1}{2\xi} ; \quad \xi = \frac{1}{2Q},$$

Мұнда:

— Q жоғары (яғни ξ өте кіші) → өте тар және өте сезімтал режекция жолағы.

— Q төмен (яғни ξ үлкен) → ені кең, бірақ селективтілігі төмен жолақ.

Полоса басылудың жуық ені:

$$\Delta\omega = \frac{\omega}{Q} = 2\xi\omega_0,$$

Бұл инженерлік бағалау фильтрдің нақты қандай диапазонда басатынын түсінуге мүмкіндік береді.

Қазіргі сигналдарды өңдеу және басқару жүйелерінде, соның ішінде робототехникалық және мехатрондық қолданбаларда, notch-типті (режекторлық) сүзгілер таржолақты кедергілерді немесе резонанстық тербелістерді басу үшін қажет құралдардың бірі болып табылады. Алайда мұндай сүзгінің болуы жеткіліксіз: оның параметрлерін сауатты баптау қажет, атап айтқанда орталық жиілікті, режекция тереңдігін, демпферлеу коэффициентін және басу жолағының енін дұрыс таңдау маңызды. Бұл параметрлердің ішінде демпферлеу коэффициенті ерекше мәнге ие, себебі ол басылатын жолақтың енін, сондай-ақ жүйенің фазалық және уақыттық сипаттамаларын анықтайды. Егер демпферлеу тым аз таңдалса, сүзгінің басу жолағы өте тар болады және ол кедергінің жиілігі аздап ығысқан жағдайда да тиімділігін жоғалтады. Ал демпферлеу тым үлкен болса, фильтрация селективтілігі төмендеп, басқару жүйесінің динамикалық қасиеттеріне теріс әсер етуі мүмкін.[12]

Режекторлық сүзгіні баптау шулы кедергі немесе резонанс жиілігін анықтаудан басталады. Бұл кезең әдетте сигналдың спектрлік анализімен немесе механикалық құрылымның өңдеу әдістерімен қатар жүргізіледі, нәтижесінде қажетсіз таржолақты компоненттің нақты жиілігі анықталады. Жиілік белгілі болғаннан кейін, келесі қадам — демпферлеу коэффициентін алдын ала бағалау. Мысалы, MATLAB/Simulink ортасындағы «Varying Notch Filter» блогының сипаттамасында „damp“ параметрі басу жолағының енін анықтайтыны көрсетілген: damp мәні артқан сайын Δ — басылатын аймақ кеңейеді. Бұл демпферлеудің селективтілікке тікелей әсер ететінін дәлелдейді. Практикада бұл параметрді таңдау терең режекция мен фазалық бұрмаланудың рұқсат етілген деңгейі арасындағы тепе-теңдікті табу қажеттілігіне негізделеді.

Баптау әдістемесін жалпы түрде келесідей сипаттауға болады: алдымен орталық жиілік ω_0 таңдалады. Орталық жиілік дегеніміз — сүзгінің ең күшті басу әсері түсетін

жиілік. Ол сигналдағы қажетсіз гармоникалық кедергінің жиілігіне тең болуы керек. Егер сүзгі аналогтық (үздіксіз) орталық жиілік рад/с бірлігінде есептеледі:

$$\omega_0 = 2\pi f_0$$

Мұндағы:

- f_0 — басылатын нақты жиілік (Гц),
- ω_0 — орталық жиілік (рад/с).

Мысал: Егер 50 Гц желілік шу басылуы керек болса:

$$\omega_0 = 2\pi \cdot 50 \approx 314.16 \text{ рад/с}$$

Егер сүзгі цифрлық (дискретті). Онда ω_0 — дискреттік жиілікте (радиан/отн.) есептеледі:

$$\omega_0 = 2\pi \cdot \frac{f_0}{f_s}$$

Мұндағы:

- f_0 — басылатын жиілік (Гц),
- f_s — дискреттеу жиілігі (Гц).

Мысал: $f_0 = 60\text{Гц}$, $f_s = 500\text{Гц}$ болса:

$$\omega_0 = 2\pi \cdot \frac{60}{500} \approx 0.754 \text{ рад/дискрет}$$

Фильтрді баптағаннан кейін міндетті түрде фазалық және уақыттық сипаттамаларды өлшеу қажет: басқару жүйесінің орнықтылығы бұзылмауы және фазалық қоры жеткілікті болуы тиіс. Практикалық тұрғыда бұл жабық контурдың амплитудалық-частоталық сипаттамасын өлшеу, фазалық ығысуын бағалау, -180° нүктесінде тұрақтылық қорын тексеру, сондай-ақ өтпелі процесті эксперименттік түрде зерттеу дегенді білдіреді. Робототехникада динамикаға қойылатын талаптар жоғары болғандықтан, мұндай тексерулер міндетті.

Қорытындылай келе, демпферлеу коэффициенті бар режекторлық сүзгіні параметризациялау — жүйе дизайнының аса маңызды кезеңі. Дұрыс таңдалған демпферлеу режекция тереңдігі, пайдалы сигналды бұрмалаудың минималды болуы, басқару жүйесінің тұрақтылығы және өзгермелі шарттарға бейімділік арасындағы тиімді тепе-теңдікті қамтамасыз етеді. Жұмыстың келесі бөлімінде параметрлерді таңдаудың практикалық алгоритмдері, оптимизациялық әдістер және робототехникалық және мехатрондық жүйелерге енгізу мысалдары қарастырылады.

2.2 Фильтр сипаттамаларын бағалау

Режекторлық фильтрдің сипаттамаларын бағалау оның жобалау және басқару жүйесіне енгізу кезеңдерінің ажырамас бөлігі болып табылады, өйткені бұл фильтрдің

нақты кедергіні қажетті деңгейде басатынын және пайдалы сигналға немесе жүйе динамикасына қажетсіз әсер етпейтінін тексеруге мүмкіндік береді

Фильтрдің тиімділігін бағалау амплитудалық-жиілік (АЖС) және фазалық-жиілік (ФЖС) сипаттамаларды талдауды қамтиды. АЖС фильтрдің ω_0 нүктесінде қажетті басуды қамтамасыз ететінін және көршілес жиіліктерде артық әлсірету тудырмайтынын көрсетеді. Зерттеулер көрсеткендей: «Демпферлеу коэффициенті азайған сайын notch-ойығы өткірленеді. Бұл параметрлер сүзгінің өткізу және басу қасиеттеріне тікелей әсер етеді.

- ξ — демпферлеу коэффициенті. Бұл параметр сүзгінің қаншалықты демпферленгенін сипаттайды. ξ өскен сайын сүзгінің өткізу жолағы кеңейеді, ал селективтілігі (нақты басу қабілеті) төмендейді.
- W_1 — сүзгінің төменгі шекаралық жиілігі (нормаланған түрде, яғни ω/ω_0). Бұл мән сүзгі әсер ете бастайтын минималды жиілікті сипаттайды.
- W_2 — сүзгінің жоғары шекаралық жиілігі (нормаланған түрде). Бұл сүзгінің басу әсері тоқтайтын жоғарғы жиілік мәні.
- B — сүзгінің басу жолағының ені ($B = W_2 - W_1$). Яғни, сигналдың қай жиілік диапазонында сүзгі ең белсенді жұмыс істейтінін көрсетеді.
- Q — сүзгінің селективтілігі – ол басу тереңдігін және өткізу жолағының тарлығын сипаттайды. Q жоғары болған сайын сүзгі тар әрі терең «ойық» жасайды, ал Q төмен болса — сүзгі кеңірек, бірақ та әсері әлсіз болады.

Фильтрдің өзінің сипаттамаларынан бөлек, оның басқару жүйесіне әсерін бағалау да аса маңызды. Бұл талдау орнықтылық қорының өзгеруін, өтпелі процестің тербелістің сөнуі дәрежесін, артық асу (overshoot), орнығу уақыты (settling time) сияқты көрсеткіштердің өзгерісін және қосымша резонанстық эффектілердің пайда болу мүмкіндігін қамтиды. Адаптивті режекторлық фильтрлер бойынша жүргізілген зерттеулерде орнықтылықты бағалау үшін кореньдік локус талдауы қолданылатынын көрсетілген. Бұл әдістер фильтрдің басқару динамикасын жақсартатынын немесе керісінше нашарлататынын анықтауға көмектеседі.

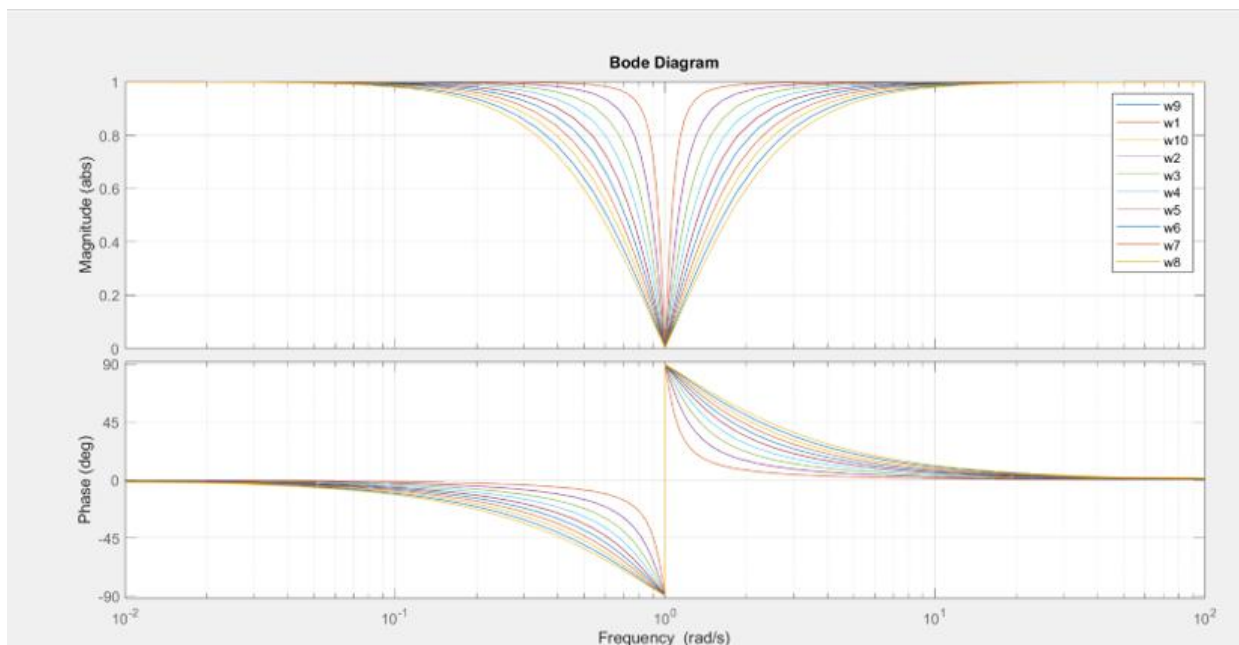
Step plot (бастапқы жауап / сатылы әсерге жауап)

- **t_n** — орнығу уақыты (*settling time*): Сигналдың тұрақты мәнге жетуіне дейінгі уақыт. Бұл сүзгінің реакциясының баяулығы/жылдамдығын көрсетеді. Кіші t_n — жүйе жылдам орнығады, үлкен t_n — жүйе баяу орнығады.
- **r** — өшу жылдамдығы немесе затухание: Бұл өтпелі процестегі тербеліс амплитудасының қаншалықты тез сөнетінін көрсетеді. Жоғары мән — тез сөну.
- **A_{max}** — максималды асу (*overshoot*): Шығыс сигналдың бастапқы жауаптағы ең жоғары шамасы (берілген мәннен асып кетуі). Бұл жүйенің артық реакция дәрежесін сипаттайды. Жоғары A_{max} — тербелмелі жүйе.

Impulse response (импульстік әсерге жауап)

- **tn** — орнығу уақыты (импульс үшін):
Жүйе импульстік әсерге қалай тез жауап береді. Ұқсас мағынада қолданылады.

Бұл диссертациялық жұмыста MATLAB-ты пайдалана отырып жоғарыда айтылған сипаттамаларды зерттейміз. Режекторлық сүзгінің беріліс функциясын MATLAB-та программасын жазып. Фильтрдің амплитудалық-жиілік (АЖС) және фазалық-жиілік (ФЖС) сипаттамаларын есептейміз. ($\omega_0 = 1$) ($\xi = 0.1 - 1$) Төменде 2-суретте АЖС және ФЖС графигі көрсетілген



Сурет 2 – режекторлік сүзгінің АЖС и ФЖС

Жоғарыда берілген Bode диаграммасы сүзгінің амплитудалық және фазалық сипаттамаларын әртүрлі демпферлеу коэффициенттерінде (ξ) көрсетуге арналған. Амплитудалық сипаттамада (жоғарғы график) режекторлық сүзгінің нақты жиіліктегі (ω_0) сигналды қалай басатыны көрінеді — бұл жиілікте өткізу абсолюттік минимумға жетеді.

Фазалық сипаттамада (төменгі график) сүзгінің фазалық ауытқуы бейнеленеді. Бұл әсіресе басқару жүйелерінде маңызды, себебі үлкен фазалық ығысу орнықтылыққа әсер етуі мүмкін. Демпферлеу коэффициенті артқан сайын фазалық өтудің ең шапшаң бөлігі кең диапазонға жайылады, ал ξ аз мәндерінде бұл фазалық ауытқу шоғырланады.

Осы жиіліктік сипаттамалар сүзгінің қандай параметрлерде тиімді жұмыс істейтінін және жүйеге қандай жиіліктерде ең аз әсер ететінін нақтылауға мүмкіндік береді. Енді осы параметрлердің сандық мәндерін келесі кестеге жинайып талдау жасайық.

ξ	W_1	W_2	B	Q
0.1	0.905	1.11	0.205	4.87
0.2	0.819	1.22	0.401	2.4937
0.3	0.742	1.35	0.608	1.6447
0.4	0.677	1.48	0.803	1.2453
0.5	0.618	1.62	1.002	0.998
0.6	0.565	1.77	1.205	0.8298
0.7	0.519	1.93	1.411	0.7087
0.8	0.479	2.09	1.611	0.6211
0.9	0.444	2.25	1.806	0.5537
1	0.413	2.42	2.007	0.4982

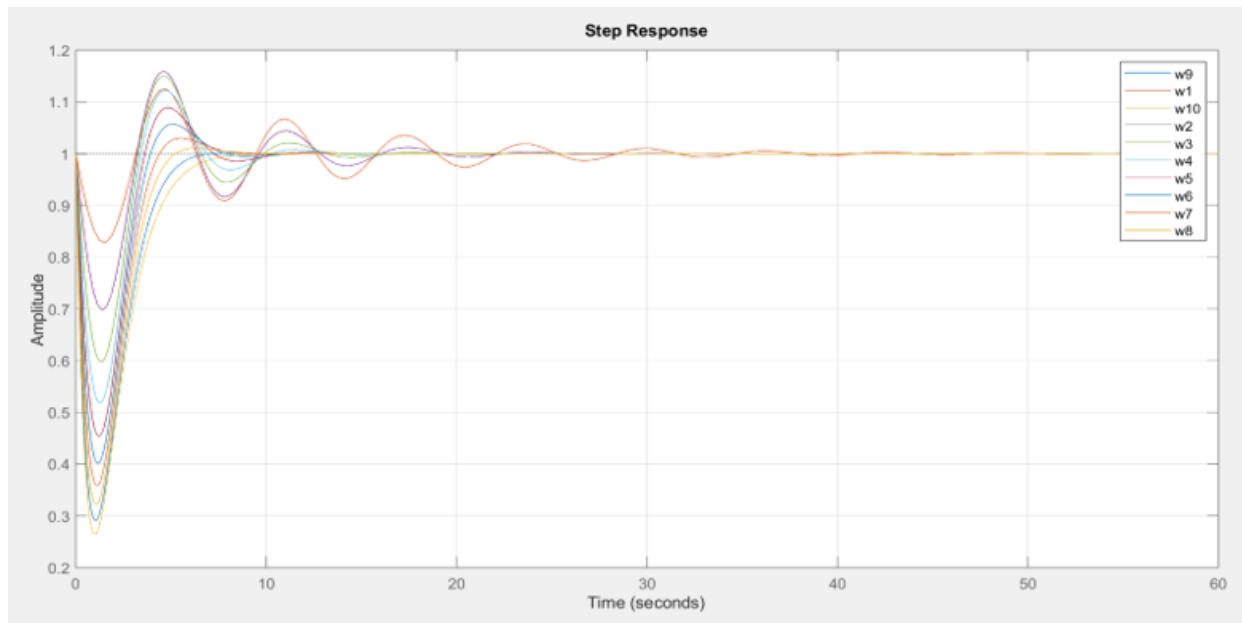
АЖС және ФЖС графиктері (Сурет 2) режекторлық сүзгінің демпферлеу коэффициенті ξ өзгерген кезде оның селективтік қасиеттерінің қалай трансформацияланатынын көрсетеді. Кіші ξ мәндерінде (0,1–0,3) сүзгі өте тар және терең «провал» қалыптастырады: резонанстық жиілікте амплитуда нөлге жақындайды, ал фазалық сипаттамада күрт секіріс байқалады. Бұл сүзгінің жоғары дәлдікпен тек бір нақты жиілікті жоюға мүмкіндік беретінін, бірақ жиілік дрейфіне өте сезімтал болатынын дәлелдейді. ξ артқан сайын (0,4–0,6) провалдың ені ұлғаяды, ал фазалық өтпелі аймақ тегістеле түседі. Бұл құбылыс Таблица 1 деректерімен расталады: мысалы, $\xi=0,1$ кезінде жолақ ені $B=0,205$ рад/с болса, $\xi=0,6$ кезінде ол $B=1,205$ рад/с-қа дейін өседі, ал селективтілік Q шамамен 5-тен 0,83-ке дейін төмендейді.

Үлкен демпферлеу мәндерінде ($\xi=0,7–1$) сүзгі кеңжолақты басушыға айналады: провал аймағы 2 рад/с-тен астамға дейін кеңейеді, ал $Q \approx 0,5$ деңгейіне дейін кішірейеді. Бұл сүзгінің нақты бір тар жиілікті емес, кең диапазондағы бөгде гармоникаларды әлсірететінін, бірақ пайдалы сигнал спектрін де көбірек бұрмалайтынын көрсетеді. Теориялық қатынас ($Q \approx 1/(2\xi)$) тәжірибелік мәндермен жақсы сәйкеседі, бұл модельдің дұрыстығын дәлелдейді. Жалпы алғанда, ξ сүзгінің негізгі компромиссін анықтайды: кіші ξ — жоғары селективтік, бірақ тұрақсыздыққа сезімтал; үлкен ξ — тұрақты әрі кеңжолақты басу, бірақ пайдалы сигналға әсері көбірек.

Жиіліктік сипаттамалар сүзгінің спектрлік әсерін анықтаса, өтпелі процестің графикі сүзгінің уақыт бойынша реакциясын бағалауға мүмкіндік береді. Яғни, берілген кадамдық (step) сигналға сүзгінің қалай жауап беретіні — оның басқару жүйесіндегі орнықтылық пен динамикалық сипаттамаларын көрсетеді.

Режекторлық сүзгінің демпферлік коэффициенті ξ өзгерген сайын өтпелі процестегі тербеліс, орнығу уақыты, максималды асу сияқты параметрлер де өзгереді. Бұл параметрлер сүзгінің нақты уақыттағы жүйеге қосылғанда қалай әрекет ететінін сипаттайды және басқару жүйесінің сапасына (stability, performance) тікелей әсер етеді.

Алдағы (Сурет 3) сүзгінің әртүрлі ξ мәндерінде кадамдық әсерге қалай жауап беретінін визуалды түрде көрсетеді.



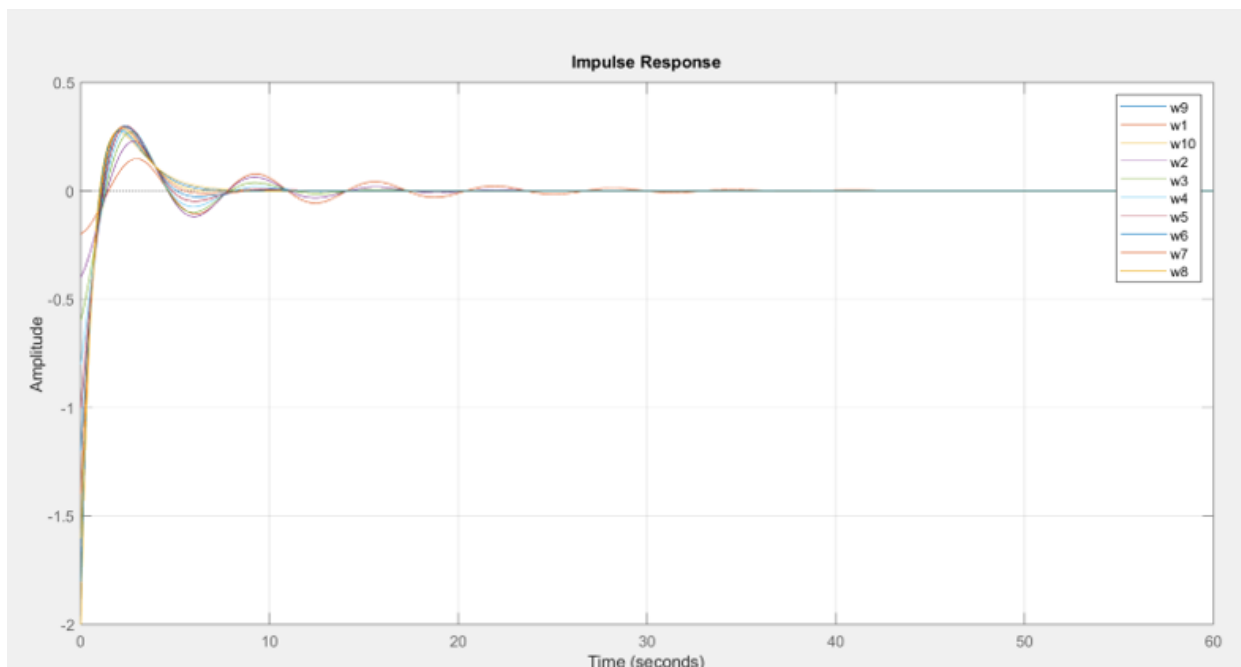
Сурет 3

Қосымша параметрлері бар өтпелі процесс графигі (Step plot)

Импульстік әсерге сүзгінің реакциясын зерттеу — оның уақытша динамикасын толық сипаттауға көмектеседі. Егер step plot сүзгінің орнығуға дейінгі жалпы тенденциясын көрсетсе, импульстік график сүзгінің қысқа мерзімді, өткір әсерлерге қаншалықты жылдам және тұрақты жауап беретінін анықтайды.

Режекторлық сүзгіде демпферлеу коэффициентінің ξ мәні импульстік жауаптың сипаттамаларын — ең жоғары амплитудалық мәнін ($A_{\max}$), тербеліс дәрежесін (r) және орнығу уақытын (t_n) — айтарлықтай өзгертеді. Бұл параметрлер сүзгінің шулы немесе шұғыл өзгермелі сигналдар жағдайында қалай әрекет ететінін бағалау үшін аса маңызды.

Сурет 4 графигі сүзгінің әртүрлі ξ мәндерінде импульстік әсерге қалай жауап беретінін визуалды түрде бейнелейді және алдыңғы кестемен өзара байланысты талдауға негіз болады.



Сурет 4 Баптау параметрлері қосылған импульстік жауап графигі (Impulse response)

Step plot және Impulse response графиктерінен алынған нәтижелер сүзгінің демпферлік параметрлерге сезімтал екенін көрсетті. Өртүрлі ξ мәндері сүзгінің динамикалық сипаттамаларына — орнығу уақыты, өшу жылдамдығы және асу деңгейіне — тікелей әсер етеді.

Осы уақытша сипаттамаларды салыстырып, жалпы үрдістерді бағалау үшін барлық алынған деректер келесі жинақталған кестеде ұсынылған.

Таблица 2

	Step plot			Impulse response		
ξ	tn	r	A_{max}	tn	r	A_{max}
0.1	39.9	12.5	1.13	38.2		0.2
0.2	21	15.9	1.16	19.4		0.4
0.3	12.6	15	1.15	13.1		0.6
0.4	9.67	12.2	1.12	9.97		0.8
0.5	9.29	8.9	1.09	7.51		1
0.6	7.1	5.67	1.06	6.88		1.2
0.7	7.09	2.95	1.03	4.88		1.4

0.8	4.83	1.03	1.01	5.05		1.6
0.9	5.73	0.108	1	5.23		1.8
1	6.83	0	1	5.39		2

Сурет 3-тегі сатылы әсерге (step-response) берілген өтпелі процестер мен Таблица 2 деректері демпферлеу коэффициенті ξ артқан сайын жүйенің динамикалық қасиеттері елеулі түрде өзгередінін көрсетеді. Кіші $\xi = 0,1 \dots 0,3$ мәндерінде орнатылу уақыты ұзақ ($t_n \approx 40$ с-қа дейін), артық реттеу 10–16 % шамасында, ал шың амплитудасы $A_{\max} > 1,1$, яғни жүйе күшті тербелмелі режимде жұмыс істейді. Орташа $\xi = 0,4 \dots 0,7$ аралығында тербелістер тез өшіп, орнатылу уақыты 7–10 секундқа дейін қысқарады, артық реттеу 3–6 % шегіне дейін төмендейді – өтпелі процесс жеткілікті жылдам және әлсіз тербелмелі сипатқа ие болады.

Импульстік жауап (Сурет 4) та осы үрдісті растайды: ξ 0,4–0,8 аралығында импульстік сипаттаманың орнатылу уақыты 5–10 секундқа дейін қысқарып, энергия негізгі оң шыңға шоғырланады, ал $\xi = 0,8 \dots 1$ кезінде жүйе өте тез (шамамен 5 с ішінде) тынышталады, бірақ шың амплитудасы 1,4-тен 2-ге дейін өседі. Демек, практикалық қолданбаларда режекторлық сүзгінің динамикалық қасиеттерін ескеріп, демпферлеу коэффициентін шамамен $\xi \approx 0,5 \dots 0,8$ диапазонында таңдау өтпелі процестердің жылдамдығы мен тұрақтылығы арасындағы оңтайлы компромисс береді.

Сүзгінің динамикалық қасиеттерін терең түсіну үшін жиіліктік немесе уақытша сипаттамалармен қатар оның **полюстері мен нөлдерінің** орналасуын талдау қажет. Бұл талдау сүзгінің жиіліктік жауабын ғана емес, **жүйенің орнықтылығын, тербелісін және басқару мүмкіндігін** де түсінуге көмектеседі.

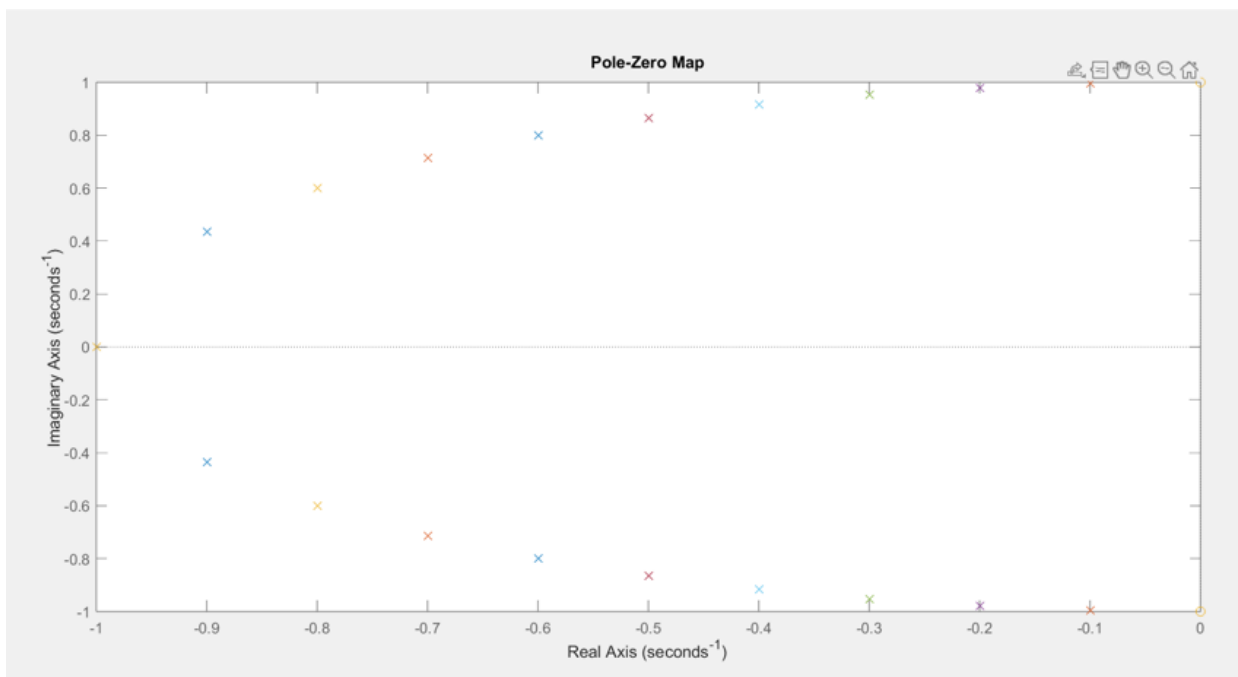
Полюс-нөл диаграммасында:

- **Нөлдер** — сигналдың басылатын жиіліктерін білдіреді, олар спектрде әлсіреу жасайды.
- **Полюстер** — сүзгінің резонанстық мінезін және өтпелі процесін анықтайды.

Демпферлеу коэффициенті ξ өзгерген сайын полюстердің кешенді жазықтықтағы орны өзгереді:

- ξ азайғанда полюстер жорғалаушы оське жақындайды — бұл **резонанстық әсердің күшеюіне және жоғары Q мәніне** әкеледі.
- ξ артқанда полюстер нақты оське жақындайды — **тербеліс азаяды**, бірақ селективтілік те төмендейді.

Сурет 5 сүзгінің осы параметрлерге тәуелді түрде қалай өзгередінін геометриялық тұрғыдан көрсетеді.



Сурет 5 Жүйенің полюс-нөл графигі

Сурет 5 сүзгінің әртүрлі демпферлеу коэффициенттерінде ξ жүйенің полюс-нөл картасындағы геометриялық орналасуына қалай әсер ететінін бейнелейді. Полюстердің нақты және жорамал осьтер бойынша жылжуы сүзгінің тербеліс дәрежесі мен орнықтылық сипаттамаларын өзгертеді.

Графиктен байқауға болады:

- ξ төмен мәндерінде полюстер жорамал оське жақындайды $\rightarrow$ жүйе тербелмелі, өткір режекция береді.
- ξ жоғары мәндерінде полюстер нақты оське жақындайды $\rightarrow$ тербеліс азаяды, бірақ өткізу жолағы кеңейеді.

Бұл визуалды байқауларды нақты сандық өлшемдермен бекіту үшін барлық сипаттамалар төмендегі кестеге жинақталып берілген. Кесте сүзгінің параметрлері мен динамикалық қасиеттері арасындағы тәуелділікті айқын көрсетеді.

Таблица 3

ξ	P	P1	P2	Z	Z1
0.1	$-0.1 \pm 0.995i$	-0.1		$0 \pm 1i$	0
0.2	$-0.2 \pm 0.98i$	-0.2		$0 \pm 1i$	0
0.3	$-0.3 \pm 0.954i$	-0.3		$0 \pm 1i$	0
0.4	$-0.4 \pm 0.917i$	-0.4		$0 \pm 1i$	0
0.5	$-0.5 \pm 0.866i$	-0.5		$0 \pm 1i$	0
0.6	$-0.6 \pm 0.8i$	-0.6		$0 \pm 1i$	0
0.7	$-0.7 \pm 0.714i$	-0.7		$0 \pm 1i$	0
0.8	$-0.8 \pm 0.6i$	-0.8		$0 \pm 1i$	0

0.9	-0.9 ± 0.436i	-0.9		0 ± 1i	0
1	-1 ± 0i	-1		0 ± 1i	0

Таблица 3 пен Сурет 5-тегі pole-zero map режекторлық сүзгінің полюстері демпферлеу коэффициенті ξ өзгерген сайын қалай жылжитынын көрсетеді. Нөлдер барлық жағдайда мнималық осьте $\pm j$ нүктелерінде қалады, яғни режекция жиілігі тұрақты және тек $s^2 + 1$ числителимен анықталады. Ал полюстер $-\xi \pm j\sqrt{1 - \xi^2}$ формуласына сәйкес сол жақ жарты жазықтықта доға бойымен орын ауыстырады: кіші ξ кезінде олар мнималық оське жақын ($-0,1 \pm 0,995i$, $-0,3 \pm 0,954i$), орташа мәндерде біртіндеп солға жылжиды ($-0,5 \pm 0,866i$, $-0,7 \pm 0,714i$), ал $\xi = 1$ кезінде бір нүктеге -1 жинақталады.

Бұл қозғалыс сүзгінің динамикалық және жиіліктік қасиеттерімен тікелей байланысты. Полюстер мнималық оське жақын болғанда жүйе әлсіз демпферленген, өтпелі процестер ұзақ әрі тербелмелі, бірақ жиіліктік селективтілігі жоғары. Полюстер солға қарай жылжыған сайын (орташа ξ) тербелістер тез өшеді, өтпелі процесс тұрақтанады және режекторлық жолақ кеңейеді. Өте үлкен демпферлеуде ($\xi \approx 1$) полюстер нақты оське жақындап, жүйе апериодтық, бірақ селективтілігі төмен және инерциясы жоғары режимге өтеді. Сондықтан практикалық жобалауда $\xi \approx 0,5 \dots 0,8$ диапазоны полюстердің орналасуы тұрғысынан ең тиімді компромисс болып саналады.

2.3 Шулы сигналдарды өңдеу нәтижелерін бағалау

Бұл бөлімде режекторлық сүзгінің шулы сигналдарды қаншалықты тиімді өңдейтінін MATLAB Simulink ортасында модельдеу арқылы бағалау жүргізілді.

Модельдеу барысында бастапқы пайдалы сигнал мен оған қосылатын шу жеке генераторлар арқылы берілді. Пайдалы сигнал

$$s(t) = \sin(0,5t),$$

яғни төмен жиілікті синусоидалық тербеліс ретінде таңдалды. Ал шу сигналы:

$$n(t) = \sin(1t),$$

жоғары жиілікті компонент ретінде пайдаланылды. Мұндай комбинация режекторлық сүзгінің резонанстық жиілік маңындағы жоғары жиілікті шуды қаншалықты басатынын тексеруге мүмкіндік береді. Екі сигнал қосындысы сүзгінің кірісіне беріліп, ал сүзгінің шығысынан алынған сигналды бастапқы сигналмен салыстыру үшін арнайы визуализация және өлшеу блоктары қолданылды.

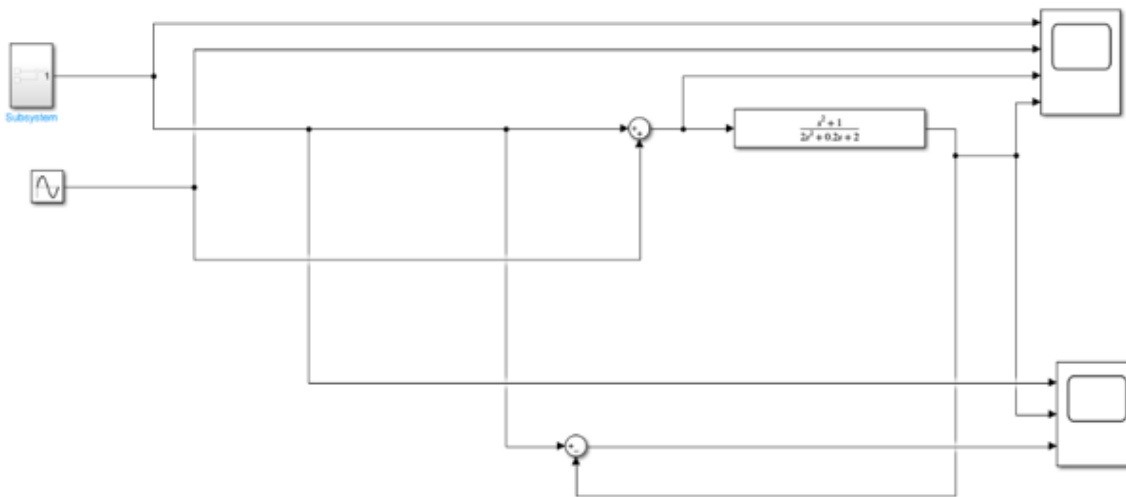
Simulink моделінің құрылымында режекторлық сүзгінің беріліс функциясы

$$W = \frac{s^2 + \omega_0^2}{s^2 + 2\xi\omega_0 s + \omega_0^2}$$

түрінде орнатылды, әрі сүзгінің демпферлеу коэффициенті әр тәжірибеде өзгертіліп отырды. Модельде сүзгінің жұмысы екі бағытта бағаланды:

1. фильтрацияға дейінгі және кейінгі сигналдардың амплитудасын салыстыру,
2. шудың басылу дәрежесін сипаттайтын SNR, MSE және корреляция көрсеткіштерін есептеу.

Симуляция нәтижелері әр демпферлеу коэффициенті үшін жеке-жеке тіркеліп, сүзгінің тиімділігі сандық түрде бағаланды. Алынған мәліметтер келесі тарауларда толық талданып, сүзгінің оңтайлы параметрлерін анықтауға мүмкіндік берді. Осылайша, модельдеу режекторлық сүзгінің шулы сигналдарды өңдеу қабілетін объективті бағалауға және оның нақты жүйелерде қолдану мүмкіндігін негіздеуге жол ашты.



Сурет 6 Шу мен режекторлық сүзгінің Simulink-тегі симуляциясы

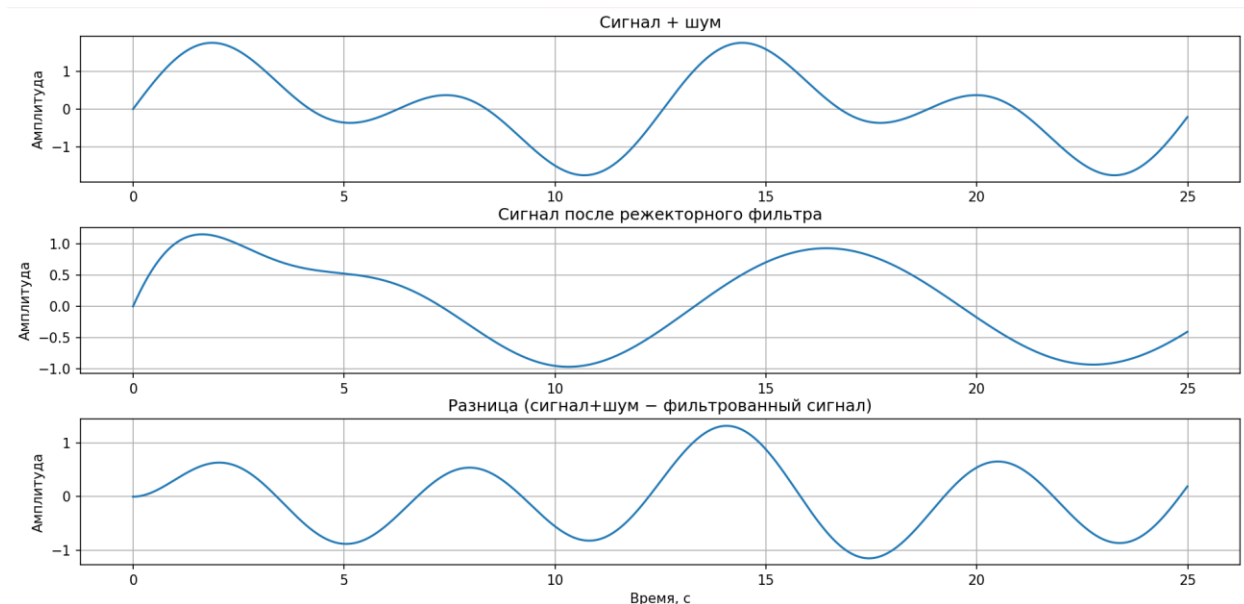
Модельдеу негізінде сүзгінің сигнал сапасын жақсартуға қаншалықты әсер ететінін анықтайтын бірқатар сандық көрсеткіштер есептелді. Бұл көрсеткіштер сүзгінің тиімділігін әртүрлі демпферлеу коэффициенттері ξ кезінде салыстыруға мүмкіндік береді. Бағаланған негізгі параметрлер:

- **SNR (Signal-to-Noise Ratio) – Сигнал/Шу қатынасы:**
 - *SNR до фильтрации:* сүзгі қолданылмаған кездегі бастапқы сигналдың сапасы.
 - *SNR после фильтрации:* сүзгіден кейінгі жақсарған сапа.

- Бұл көрсеткіш неғұрлым жоғары болса, сүзгінің шу басудағы тиімділігі соғұрлым жоғары.
- **MSE (Mean Squared Error) – Орташа квадраттық қате:**
 - Филтрленген сигнал мен эталондық (таза) сигнал арасындағы айырмашылық.
 - MSE аз болған сайын — нәтиже эталонға жақын.
- **R (Корреляция коэффициенті):**
 - Филтрленген сигнал мен бастапқы сигнал арасындағы ұқсастық дәрежесі.
 - 1.0-ге жақын мәндер сигнал формасының сақталуын білдіреді.
- **Амплитудаға әсері:**
 - *До фильтрации* және *после фильтрации* — сүзгі әсерінен сигнал амплитудасының қалай өзгергенін көрсетеді.
 - Бұл сигналдың бұрмалану немесе күшею дәрежесін анықтауға көмектеседі.

Осы көрсеткіштердің барлығы сүзгінің тек жиіліктік немесе өтпелі сипаттамаларын емес, сонымен бірге нақты сигналды өңдеу тұрғысындағы тиімділігін кешенді түрде бағалауға мүмкіндік береді.

Моделге әр ξ мәні үшін беріліс функциясын қойып сигналды қалай өңдейтінін көреміз. Төменде моделдеудің нәтижесінің графигі көрсетілген.



Сурет – 7 Демпфері бар режекторлық фильтрдің симуляция графигі

Жоғарыдағы графиктер сүзгінің әртүрлі демпферлеу коэффициенттері (ξ) кезіндегі шығыс сигналдарының пішінін көрсетеді. Графиктер сүзгінің фильтрация нәтижесінде сигналдың амплитудасы, тербеліс құрылымы және шу деңгейі қалай өзгеретінін нақты бейнелейді.

- Алғашқы график — **бастапқы сигнал** (шу және қажетсіз гармоникалармен бұзылған).

- Ортаңғы және соңғы графиктер — сүзгіден өткен сигналдар, әртүрлі ξ мәндеріне сәйкес.

Байқалатыны:

- Кішкентай ξ кезінде сүзгі **жоғары селективтілікпен** жұмыс істейді, бірақ **тербеліспен артық асу** байқалады.
- Үлкен ξ кезінде сигнал **бірқалыпты**, бірақ **басу деңгейі төменірек**.

Бұл визуалды талдауды сандық бағалау нәтижелерімен толықтырып көру үшін келесі бөлімде сүзгінің өнімділігіне қатысты нақты сандық көрсеткіштер ұсынылады.

Таблица 4 – Демпфері бар режекторлық фильтрдің өнімділігін сандық бағалау

ξ	SNR (до фильтрации)	SNR (после фильтрации)	MSE	R (корреляция)	Амплитуда до фильтрации	Амплитуда после фильтрации
0.1	0.01 дБ	15.64 дБ	0.0137	0.9863	1	1.5014
0.2	0.01 дБ	11.52 дБ	0.0352	0.9642	1	1.3035
0.3	0.01 дБ	8.56 дБ	0.0697	0.9277	1	1.1474
0.4	0.01 дБ	6.55 дБ	0.1107	0.8825	1	1.0226
0.5	0.01 дБ	5.14 дБ	0.1531	0.8330	1	0.9202
0.6	0.01 дБ	4.12 дБ	0.1939	0.7826	1	0.8353
0.7	0.01 дБ	3.35 дБ	0.2312	0.7334	1	0.7635
0.8	0.01 дБ	2.77 дБ	0.2643	0.6868	1	0.7027
0.9	0.01 дБ	2.32 дБ	0.2931	0.64356	1	0.6891
1	0.01 дБ	1.97 дБ	0.3180	0.6038	1	0.6769

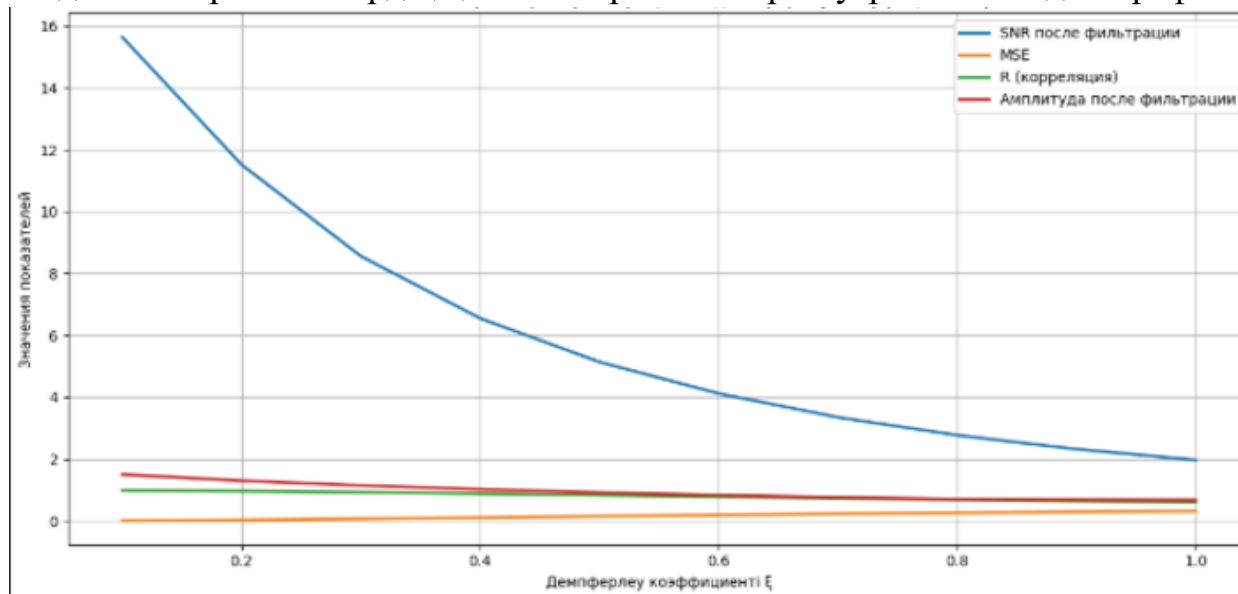
Суретте көрсетілген Simulink-модель режекторлық сүзгінің демпфері бар, бірақ кері байланыссыз құрылымын бейнелейді. Модельде шу қосылған бастапқы сигнал сүзгі арқылы өтеді, содан кейін екі тармақта салыстыру орындалады: бірінде – фильтрацияға дейінгі сигнал, екіншісінде – фильтрациядан кейінгі сигнал. Осы екі сигнал бойынша SNR, орташа квадраттық қате (MSE), корреляция коэффициенті (R) және амплитуда мәндері есептеледі. Алынған нәтижелер **Таблица 4**-ке жинақталып, демпферлеу коэффициенті ξ өзгерген кездегі режекторлық сүзгінің сандық өнімділігі бағаланады.

Кестеден байқайтынымыз – бастапқы SNR барлық тәжірибелерде 0.01 дБ деңгейінде тұрақты ұсталса, фильтрациядан кейінгі SNR ξ артқан сайын бірқалыпты төмендейді: $\xi = 0,1$ кезінде 15.64 дБ-қа дейін өсіп, $\xi = 1$ кезінде 1.97 дБ-қа дейін түседі. Яғни шағын демпферлеу кезінде сүзгі шуыл компонентін тиімді басып, сигнал/шу қатынасын айтарлықтай жақсартады, ал демпферлеу өскен сайын сүзгі пайдалы сигналды да қаттырақ әлсіретіп, жалпы SNR нашарлай бастайды. Осы үрдіспен бірге MSE мәні де өседі (0.0137-ден 0.3180-ге дейін), ал корреляция коэффициенті (R) 0.9863-тен 0.6038-ге дейін төмендейді, бұл ξ артқанда сүзгінің сигнал формасын барған сайын көбірек бұрмалайтынын көрсетеді.

Амплитуда бойынша да айқын заңдылық байқалады. Фильтрацияға дейінгі амплитуда барлық жағдайда 1-ге тең етіп нормалданған, ал фильтрациядан кейінгі амплитуда $\xi = 0,1$ кезінде 1.50 шамасында болып, демпферлеу өскен сайын 0.67-ге дейін

төмендейді. Кіші ξ кезінде режекторлық сүзгі резонанстық аймақтан тыс жиіліктерді іс жүзінде бұрмаламай, тіпті аздап «асқындырып» өткізіп жібереді (амплитуда >1), ал үлкен ξ кезінде пайдалы спектрдің едәуір бөлігі басылып, сигнал энергиясы айтарлықтай азаяды. Бұл – селективтілікті күшейту мен сигналды сақтап қалу арасында анық компромисс бар екенін көрсетеді.

Бұл көрсеткіштердің барлығы сүзгінің нақты жүйеде қаншалықты тиімді жұмыс істейтінін кешенді түрде бағалауға мүмкіндік береді. Демпферлеу коэффициенті ξ өзгерген кезде осы көрсеткіштердің қалай өзгередінін көрсету үшін төмендегі график салынды.



8-Сурет – Демпферлеу коэффициентіне байланысты фильтрация көрсеткіштерінің өзгерісі

График сүзгінің өнімділік көрсеткіштерінің демпферлеу коэффициентіне ξ тәуелділігін нақты көрсетеді. Бұл талдау арқылы сүзгінің қай аралықта тиімді жұмыс істейтінін анықтауға болады.

Бұл график демпферлеу коэффициенті сүзгінің өнімділігіне тікелей әрі күрделі әсер ететінін нақты көрсетеді. Оптималды нәтиже $\xi \approx 0.2-0.4$ диапазонында байқалады:

- SNR жеткілікті жоғары,
- сигнал формасы жақсы сақталады (R жоғары),
- амплитуда бұрмалануы салыстырмалы түрде аз,
- сүзгінің өткізу қасиеті тиімді.

Жалпы алғанда, **Таблица 4** деректері демпферлеу коэффициентін шамадан тыс өсіру режекторлық сүзгінің SNR жақсарту қабілетін төмендетіп, сигналды қатты бұрмалайтынын дәлелдейді. Керісінше, тым кіші ξ сүзгінің динамикалық қасиеттерін нашарлатады (алдыңғы бөлімдердегі өтпелі процестерден көргенбіз). Сондықтан SNR, MSE, корреляция және амплитуда көрсеткіштерін бірге ескере отырып, $\xi \approx 0.5-0.8$ аралығы демпфері бар режекторлық сүзгі үшін өнімділік пен сигнал сапасы арасындағы ең тиімді жұмыс диапазоны ретінде ұсынылуы мүмкін.

2.4 Тарау бойынша қорытынды

Бұл жұмыста екінші ретті режекторлық сүзгінің жиіліктік, өтпелі, импульстік және полюс-нөл сипаттамалары зерттеліп, демпферлеу коэффициенті ξ сүзгінің барлық динамикалық қасиеттерін анықтайтын негізгі параметр екені дәлелденді. Кіші ξ мәндерінде сүзгі өте жоғары селективтілік көрсеткенімен, жүйе ұзақ әрі тербелмелі өтпелі процеспен сипатталады; ал өте үлкен ξ кезінде жүйе апериодтық және тұрақты болғанымен, селективтілік төмендейді және импульстік жауапта шың амплитуда артады.

Зерттеу нәтижелері бойынша ең тиімді жұмыс аймағы $\xi=0.5\dots 0.8$ диапазоны болып анықталды. Бұл мәндерде сүзгі өтпелі процесте жылдам, колебелуі аз, режекторлық тереңдігі жеткілікті және полюстердің орналасуы жүйенің тұрақты әрі практикалық тұрғыда қолайлы болуын қамтамасыз етеді. Осылайша, алынған нәтижелер режекторлық сүзгілерді жобалау мен параметрлерді оңтайлы таңдауға нақты ғылыми негіз береді.

Бұл фильтр өте тар және терең «ойық» сипаттамасына ие болуға мүмкіндік береді: яғни, берілген жиілікке сәйкес сигнал амплитудасы минимумға ие болады. Шетелдік әдебиетте де режекторлық сүзгілер **жоғары селективті, жоғары доброталы** сүзгілер қатарына жатады. Бұндай сүзгілер тек бір тар жиілікті ғана күшті басуға арналғандықтан, олар қолайсыз гармоникалар мен желілік шу сияқты тар жолақты кедергілерді жоюда тиімді. Сонымен қатар, режекторлық сүзгінің фазалық сипаты да оның басты артықшылықтарының бірі болып табылады: режимдеу өткізуге сүйемелдеу кезінде сүзгі төменгі және жоғарғы жиіліктерді өзгеріссіз өткізіп, тек орталықта фазаны тез өтпелі түрде ауыстырады. Бұл әсіресе бақылау жүйелерінде маңызды – режекторлық сүзгілер резонанстарды басу кезінде басқару жылдамдығына әсер ететін фазалық ығысуын азайту үшін қолданылады.

Қарастырылған беріліс функцияның бөлу және сан басу мүшелеріндегі нөлдер мен полюстердің геометриялық орналасуына қарағанда, демпферлеу коэффициенті ξ сүзгі сипаттамаларын анықтайтын негізгі параметр болып табылады. Екінші ретті жүйелер үшін қызыл сызықты полюстер мен нөлдер арасындағы қатынас бойынша доброттылық Q пен демпферлеу коэффициенті ξ мынадай байланыста: $Q = \frac{1}{2\xi}$. Демек, ξ өте кішкене болса (Q жоғары), сүзгі тар жолақты және өткізу жолағында шоғырланған өткізуге ие болады. Мұндай жағдайда фигуралар мен кесте деректері бойынша (2-сурет, 1-кесте) режекторлық «ойық» өте терең және тар болады: мысалы, $\xi=0.1$ болғанда $B=0.205$ рад/с жолағы ғана, ал добротность $Q \approx 4.87$ жеткен. Керісінше, ξ өссе (Q төмендесе), басылатын жолақ кеңейеді, бірақ тереңдігі азаяды. Электроника құрастырушысы М. Хант сияқты дереккөздерде сүзгінің өткізу жолағы демпферге тәуелділігі көрсетілген: $\zeta = \frac{1}{Q}$. болғанда сүзгі өткізгіш жолағының селективтілігі ζ -ның өсуімен төмендейді. Нақты зерттеулер нәтижелері де осы заңдылықты растайды: ξ ұлғайған сайын басу жолақ ені $B \approx 2\xi\omega_0$ шамасына дейін өседі және добротность азаяды (1-кесте деректері). Мысалы, $\xi=0.1$ кезінде $B = 0.205$ болса, $\xi=0.6$ кезінде $B = 1.205$ деңгейіне дейін ұлғаяды, ал Q шамасы 4.87-ден 0.83-ке дейін

төмендейді. Нәтижесінде ξ аз болғанда сүзгі өте тар және өткір «ойық» жасайды, ал ξ өссе, өткізу диапазоны кеңейіп, селективтілігі нашарлайды.

Өткізу сипаттамаларын қоса бағалау үшін салыстырмалы (Боде) диаграммалары талданды (2-сурет). Амплитуда-жиілік сипаттамадан көргеніміздей, орталық жиілікке сәйкес нүктеде сүзгінің күші минимумға дейін төмендеп, көрсеткіш $-\infty$ дБ-ке дейін жетеді. Бұл көрсеткіш жоғары Q мәндерінде кеңседен кемігені мәлім: сүзгі шамалы жиілікше ауытқуларда да қатты басады, яғни оттегі (зона басу) өте тар болады. Ал фазалық сипаттамада орталық жиілік маңындағы жылдам фазалық ауысу байқалады. Дегенмен жоғары жиіліктерде режекторлық сүзгі фазасы сәл өзгереді, сондықтан режияторлық фильтр кенжелеп (өлшімен) сіңірілген фазалық ығысуда басқа пассив сүзгілерге қарағанда динамикалық түрде сенімді жұмыс істей алады.

Уақытша сипаттамалар тұрғысынан сүзгінің өтпелі процестегі реакциясы (step-және impulse-бәрі) да ξ -ға күшті тәуелді екенін көрсетті. Кіші ξ мәндерінде (0,1–0,3) жүйе «жөктау» өлшемдегі жоғары Q -мен жұмыс істейтіндіктен, өтпелі процесте ұзақ қайталанып тербелу байқалды: орнатылу уақыты 40 секундқа дейін, артық асу $\sim 10\text{--}16\%$, сонымен бірге шың амплитудасы 1.1-ден жоғары деңгейде қалды (3-сурет, 2-кесте). Бұл кірістірілген осцилляцияның артуымен және резонанстық процесстердің баяу өшуімен байланысты. Ал $\xi=0.4\text{--}0.8$ аралығында фильтр жоғырырақ демпферленген жүйе тәрізді әрекет етіп, тербеліс тез сөнді және орнатылу уақыты 5–10 секунд аралығында шектелді. Мысалы, $\xi=0.5$ кезінде демпферленген полюстер тез-теңсіздікке негізсіз ерте жиналатын болғандықтан, максималды асу 1.09-ға дейін азайып, орнығу уақыты 9–10 с-қа дейін қысқарды. Өте үлкен $\xi \approx 1$ -ге жақындағанда жүйе қисапсыз апериодтық мінезге көшіп, өтпелі процестегі тербеліс бірден өшіп, бірақ шың амплитудасы 1.4–2.0 шамасына дейін өседі. Жалпы алғанда, ξ ұлғайған сайын орындалатын динамиканың тұрақтылығы артады, алайда басу селективтілігі төмендейді.

Бұл байқаулар полюс-нөл диаграммасының қозғалысымен сәйкес келеді: ξ кіші кезде полюстер қиялдаушы оське жақындайды, жүйе әлсіз демпферленген резонанстық күйге ие болады; ξ ұлғайған сайын полюстер сол жақ, шынайы оське жылжып, тербеліс энергиясы азырақ болады (5-сурет, 3-кесте). Сонымен қатар цифрлық модельде қарастырылған импульстік әсерге жауап та осы үрдісті растады: $\xi=0.4\text{--}0.8$ аралығында импульстік жауап тез қалыптасып, негізгі энергия бір оң шыңға шоғырланса, $\xi \approx 1$ кезінде жүйе өте тез тынышталады, бірақ шың амплитудасы өседі.

Фильтрді қолданысқа енгізгенде оның нақты сигналды тазалау тиімділігін өлшеу үшін сандық критерийлер есептелді (Simulink моделі, 6-сурет). Нәтижелер фильтрациядан кейінгі сигнал/шу қатынасы (SNR), орташа квадраттық қате (MSE) және корреляция коэффициенті (R) арқылы бағаланды. Кестеде көріп тұрғанымыздай (4-кесте), ξ кіші болған сайын сүзгі шуыл компонентін тиімді басып, SNR айтарлықтай өседі: $\xi=0.1$ кезінде $\text{SNR} \approx 15.6$ дБ жетті, ал $\xi=1$ кезінде тек ~ 1.97 дБ болды. Сол уақытта μSE мен R көрсеткіштері ξ ұлғаюымен баяу нашарлай бастайды: $\xi=0.1$ кезінде $R \approx 0.99$ (сигнал пішіні сақталу дәрежесі жоғары), $\xi=1$ болғанда $R \approx 0.60$ -ке түсті. Бұл демпферлену артуымен пайдалы спектрдің айтарлықтай бөлігі де шектелетінін, яғни сигнал күшейту орнына

бұрмалану жүретінін көрсетеді. Басқаша айтқанда, аз ξ сигнал сапасын жоғары ұстап, бірақ динамиканы бәсеңдетсе, үлкен ξ жүйені динамикалық тұрғыда жылдам әрі тұрақты қылады, бірақ сигналдың өзін әлсіретеді. Басқа зерттеулерде де демпфер коэффициентін 0.1 шамасында алған кездегі селективтіліктің көтерілуі мен сүзгі тиімділігінің артуы расталған (мысалы, медициналық сигналдарды тазалау барысында $\xi \approx 0.1$ кезінде кедергіні ең жақсы басу байқалған).

Қорыта айтқанда, жүргізілген зерттеу нәтижелері екі ретті демпфер коэффициенті бар режекторлық сүзгіні баптау барысында дәл сол компромиссті сақтау қажеттігін көрсетті. Кішкентай ξ (жоғары Q) таңдаса, сүзгінің басу жолағы терең әрі тар болады, алайда жүйе өтпелі процесте тербелмелі мінез көрсетеді. Ал ξ тым үлкен болса, сүзгі кеңжолақты шамада әсер етіп, пайдалы сигнал спектрін қатты бұрмалап, фазалық өтуді ұзартады. Сондықтан практикалық жобалауда орташа мәндері – шамамен $\xi \approx 0.5 \dots 0.8$ диапазоны – оңтайлы компромисс береді. Бұл аралықта жүйе жеткілікті тұрақты, өтпелі процестер тез өтеді, ал режекция тереңдігі мен селективтілік та кемімейді (1–2 кестелер бойынша). Сонымен қатар фильтрация арқылы пайдалы сигнал сапасын бағалау көрсеткендей, $\xi \approx 0.2 - 0.4$ те тиімді болып шықты, өйткені бұл аралықта SNR жоғары және сигнал пішіні аз бұрмаланатын (4-кесте деректері). Әрі қарайғы практикалық кезеңде осы нәтижелер негізінде оптимизациялық алгоритмдер қолданылып, робототехникалық жүйелерге енгізу бойынша жұмыстар жүргізіледі.

Қорытындылай келе, демпфер коэффициенті бар режекторлық сүзгінің параметризациясы күрделі тепе-теңдікті талап етеді. Жоғары дәлдікті тар жолақты сүзгі жасау үшін ξ мүмкіндігінше аз болуы керек, бірақ ол басқару жүйесінің тұрақтылық резервін азайтуы мүмкін. Кең диапазондағы бөгде жиіліктерді басу үшін ξ -ны ұлғайту қажет, бірақ ол пайдалы сигналды азайтатындығын ескеру керек. Зерттеу барысында анықталған талдаулар мен тәжірибелік мәліметтер режекторлық сүзгіні жобалау кезінде бұл бағаларды есепке алуға нақты ғылыми негіз береді.

3-тарау Бір жиілікті полиномдық режекторлы сүзгісін параметрлеу

3.1 Баптау

Режекторлық сүзгінің жиілік реакциясы, көп жағдайда, сигналды өңдеу мәселесін шешу үшін қажетті амплитудалық-жиілік реакция пішініне қол жеткізуге мүмкіндік беретін полиномдық модельдерді [36–37] пайдаланып жуықталады.

Режекторлық фильтрдің жиіліктік сипаттамасы көбінесе полиномиалдық модельдер көмегімен аппроксимацияланады. Мұндай модельдер сигналды өңдеу міндетін шешу үшін амплитудалық–жиіліктік сипаттаманың қажетті пішінін дәл құруға мүмкіндік береді. Жиіліктік сипаттаманы аппроксимациялау мақсатында кеңінен қолданылатын полиномиалдық модельдер қатарына Баттерворт, Бессель, Чебышёв, Ньютон және Кауэр полиномдары негізіндегі модельдер жатады [36–37, 9]. Аталған полиномиалдық модельдер фильтрдің жиіліктік сипаттамасын бір-бірінен айқын ажыратуға мүмкіндік береді, бұл сигналдағы таржолақты кедергілерді сүзгілеу процесінің тиімділігіне тікелей әсер етеді. Сондықтан бұл модельдер негізінде құрастырылған фильтрлер ғылыми

әдебиеттерде Баттерворт, Бессель, Ньютон, Чебышёв және Кауэр полиномиалдық фильтрлері деп аталады. [10].

Режекторлық фильтрлерге арналған зерттеулерге сәйкес көрсетілген әдістердің ішінде Баттерворт полиномы негізінде аппроксимацияланған фильтр сигналды өңдеудің жоғары дәлдігін қамтамасыз етеді. Бұл, ең алдымен, Бессель, Чебышёв және басқа да модельдерге тән дәлдіктің салыстырмалы түрде төмен болуына, сондай-ақ олардың жиіліктік сипаттамаларына байланысты пайда болатын өзіндік қателіктің жоғары мәндеріне қатысты. Мұндай қателіктердің негізгі себептері — кедергіні басу жолағының нақты пішіні, амплитудалық ауытқулар және режекторлық фильтрдің селективтілік коэффициенті Q .

Сонымен қатар, селективтілік Q мәні өлшенетін сигналдың өңдеу дәлдігіне айтарлықтай ықпал етеді. Добротность тек кедергіні басу жолағы кеңейтілген жағдайда ғана төмен болуы мүмкін. Бұл өз кезегінде басылатын жиіліктер диапазонының ұлғаюын, бірақ селективтіліктің төмендеуін білдіреді.

Баттерворт полиномына негізделген режекторлық сүзгі. Полиномиалдық жоғары жиілікті және төменгі жиілікті фильтрлердің беріліс функцияларын параллель қосуға негізделеді.

$$W(s) = W_{\text{ФВЧ}}(s) + W_{\text{ФНЧ}}(s)$$

Мұнда:

- төменгі шекара жиілігі ω_1 — жоғары жиілікті сүзгіге (ФВЧ),
- жоғарғы шекара жиілігі ω_2 — төмен жиілікті сүзгіге (ФНЧ) сәйкес келеді.

Зерттеуде осы тәсіл негізінде Баттерворт полиномының екінші дәрежесіне сүйенетін жаңа біржтілікті режекторлық фильтр синтезделген. Бұл фильтр шулы сигналды өңдеуде жоғары нәтижелілікпен және Добеши фильтрімен салыстырғанда жоғары дәлдікпен ерекшеленеді. Синтезделген жаңа режекторлық фильтрдің негізгі артықшылықтары — оның жиілік бойынша жоғары добротность көрсеткіші және жиіліктік сипаттамадағы біркелкілік, бұл өз кезегінде сигналды өңдеу тиімділігіне оң әсер етеді.

Алайда, көрсетілген артықшылықтарға қарамастан, Добеши фильтрімен салыстырғандағы тиімділігі жоғары болғанымен, сүзгінің жиіліктік сипаттамасын түзету үшін кері байланыс контурын енгізу мәселесі әлі де ашық күйінде қалып отыр. Мұндай түзету контурын қалыптастыру фильтрация жүйесінің жиіліктік сипаттамасында бірлік кері байланыс болғанда төмендеп кететін күшейту коэффициентін арттыру үшін қажет. Сондықтан режекторлық фильтрдің жалпы беріліс функциясын теріс кері байланыспен синтездеу және түзету коэффициентінің жиіліктік сипаттамаға әсерін зерттеу — күрделі әрі өзекті ғылыми міндет. Бұл міндетті шешу толыққанды ғылыми тәсілді талап етеді.

Осы мақалада, бір жиілікті режекторлық фильтрдің жиіліктік сипаттамасына кері байланыс контуратын енгізу арқылы түзету коэффициентінің әсерін талдау негізінде сигналды өңдеу дәлдігін бағалау нәтижелері ұсынылады.

Сигналдық ақпаратты өңдеу жүйесі **біржиілікті және жоғары доброттылықтағы режекторлық сүзгіге** негізделген деп қарастырылады, оның беріліс функциясы келесі түрде анықталады:

$$W(s) = \frac{G(s)}{H(s)}$$

Мұндағы

$G(s)$ және $H(s)$ — тиісінше беріліс функциясының алым және бөлім полиномдары, олар (s) айнымалысының дәрежелері бойынша анықталады.

Полином $G(s)$ сүзгінің **нөлдерін**, ал $H(s)$ жүйенің **полюстерін** сипаттайды. Бұл полиномдар сүзгінің коэффициенттері мен ретін n анықтайды және беріліс функциясының түбірлерінің орналасу сипатын көрсетеді.

Біржиілікті ω және жоғары доброттылықтағы режекторлық сүзгінің беріліс функциясы екінші ретті $n = 2$ болып табылады және ол төмен жиілікті сүзгі $W_1(s)$ мен жоғары жиілікті сүзгінің $W_2(s)$ екінші ретті звеноларынан тұрады.

Сүзгінің жалпы беріліс функциясы екі звеноның қосындысы ретінде анықталады:

$$W(s) = W_1(s) \cdot W_2(s).$$

Зерттеу мақсаты мен есептің қойылымы

Мақсат — **теріс кері байланыс контуры бар режекторлық сүзгінің жалпы беріліс функциясын** $W_{общ}(s)$ синтездеу, мұнда контур түзету коэффициенті K арқылы анықталады және ол диапазонда өзгереді:

$0,1 < K < 1$ Сигналдық модель келесідей түрде беріледі:

$$x(t) = s(t) + \xi(t),$$

мұнда:

- t — уақыт бойынша өлшеу дискреттері;
- $x(t)$ — **шулы (зашумленный)** сигнал;
- $s(t)$ — **таза (кедергісіз)** сигнал;
- $\xi(t)$, — **біржиілікті кедергі (помеха)**.

Сигнал және кедергі модельдері

Өлшенетін сигнал моделі келесі түрде анықталады:

$$s(t) = A \sin(2\pi f t + \phi),$$

мұнда

A — сигнал амплитудасы,

f — сигнал жиілігі,

ϕ — сигналдың бастапқы фазасы.

Біржиілікті кедергінің (помеханың) моделі де ұқсас түрде беріледі:

$$\xi(t) = A \sin(2\pi f t + \phi),$$

мұнда

A — кедергі амплитудасы,

f — кедергі жиілігі,

ϕ — кедергінің бастапқы фазасы.

Режекторлық сүзгілеудің мақсаты

Режекторлық сүзгілеудің мақсаты — $0,1 < K < 1$ кезінде сүзгінің шығысындағы сигнал $\hat{s}(t)$ үшін **өлшеу қателігін минимизациялау** шартының орындалуын қамтамасыз ету:

$$e(t) = \hat{s}(t) - s(t),$$

мұнда

$e(t)$ — өлшеу қатесі (error of estimation),

$\hat{s}(t)$ — сүзгіден өткен (бағаланған) сигнал.

Яғни, режекторлық сүзгінің мақсаты — кіру сигналындағы біржиілікті кедергіні барынша баса отырып, шығу сигналын бастапқы сигналға $s(t)$ барынша жақындату.

Бұл мақсат келесі жорамал негізінде жүзеге асады: біржиілікті тар жолақты кедергінің амплитудасы алдын ала белгілі және бұл **сигналды өңдеу есептерін шешуде типтік шарт** болып табылады.

Біржиілік режекторлық сүзгіні синтездеу және басқару әсерін қалыптастыру

Екінші ретті **Баттерворт типіндегі режекторлық сүзгіні синтездеу** процесі нормаланған жиілік диапазонында үздіксіз аналогтық сүзгілердің беріліс функцияларының негізінде жүзеге асырылды.

Бұл тәсіл режекторлық сүзгінің жиілік сипаттамасын математикалық түрде сипаттауға және оның параметрлерін (жолақ ені, доброттылық, күшейту коэффициенті және т.б.) жобалау кезеңінде реттеуге мүмкіндік береді.

Біржиілікті режекторлық сүзгінің беріліс функциясы $W(s)$ төмендегі түрде жазылады:

$$W = \frac{s^2 + \omega^2}{s^2 + \frac{\omega}{Q}s + \omega^2},$$

мұндағы:

s — комплекс айнымалы ;

- $\omega = 2\pi f_0$ — сүзгінің орталық бұрыштық жиілігі;
- Q — сүзгінің селективтілік коэффициенті.

Бұл функция сүзгінің **жолақты басу қасиетін** сипаттайды:

алымындағы $s^2 + \omega^2$ мүшесі **беріліс нөлдерін** орнатады (сол жиілікте сигнал басылады);

бөліміндегі мүшелер

$$s^2 + \frac{\omega}{Q}s + \omega^2,$$

- сүзгінің **полюстерін** анықтайды, олардың орналасуы сүзгінің өткізу жолағы мен басу енін сипаттайды.

Жоғары доброттылық мәндерінде $Q > 10$ сүзгінің өткізу сипаттамасы тар және терең провалға ие болады, яғни ол **бір жиілікті кедергіні дәл басуға қабілетті**. Ал төменгі Q мәндері сүзгінің өткізу жолағын кеңейтеді, бірақ басу тереңдігін азайтады.

Біржиілікті режекторлық сүзгінің беріліс функциясы $W(s)$ келесідей түрде жазылады:

$$W_1(s) = \frac{1}{\left(\frac{s}{\omega_c}\right)^2 + 1.414\frac{s}{\omega_c} + 1} = \frac{1}{\frac{s^2 + 1.414\omega_c s + \omega_c^2}{\omega_c^2}} = \frac{\omega_c^2}{s^2 + 1.414\omega_c s + \omega_c^2},$$

$$W_2(s) = \frac{1}{\left(\frac{s}{\omega_c}\right)^2 + 1.414\frac{s}{\omega_c} + 1} = \frac{1}{\frac{s^2 + 1.414\omega_c s + \omega_c^2}{s^2}} = \frac{s^2}{s^2 + 1.414\omega_c s + \omega_c^2},$$

Режекторлық сүзгінің беріліс функциясы $W(s)$ келесідей түрде жазылады:

$$W(s) = W_1(s) + W_2(s) = \frac{\omega_c^2}{s^2 + 1.414\omega_c s + \omega_c^2} + \frac{s^2}{s^2 + 1.414\omega_c s + \omega_c^2} = \frac{\omega_c^2 + s^2}{s^2 + 1.414\omega_c s + \omega_c^2}$$

Басқару әсерін қалыптастыру кезінде режекторлық сүзгінің жалпы беріліс функциясы келесідей түрде жазылады:

$$W_{\text{общ}} = \frac{W}{K + W},$$

$$W_{\text{общ } K=0.1} = \frac{W}{K+W} = \frac{10(s^2 + \omega^2)}{11s^2 + 1.414\omega s + 11\omega^2}.$$

Басқа $K = 0.1:1$ мәндері үшін де осылай есептеледі.

3.2 Сүзгілерді модельдеу және олардың қасиеттерін бағалау

Осы бөлімде синтезделген режекторлық сүзгінің қасиеттерін тереңірек бағалау мақсатында **компьютерлік модельдеу** нормаланған қиылысу жиілігінде $\omega = 1$ рад/с жүргізіледі.

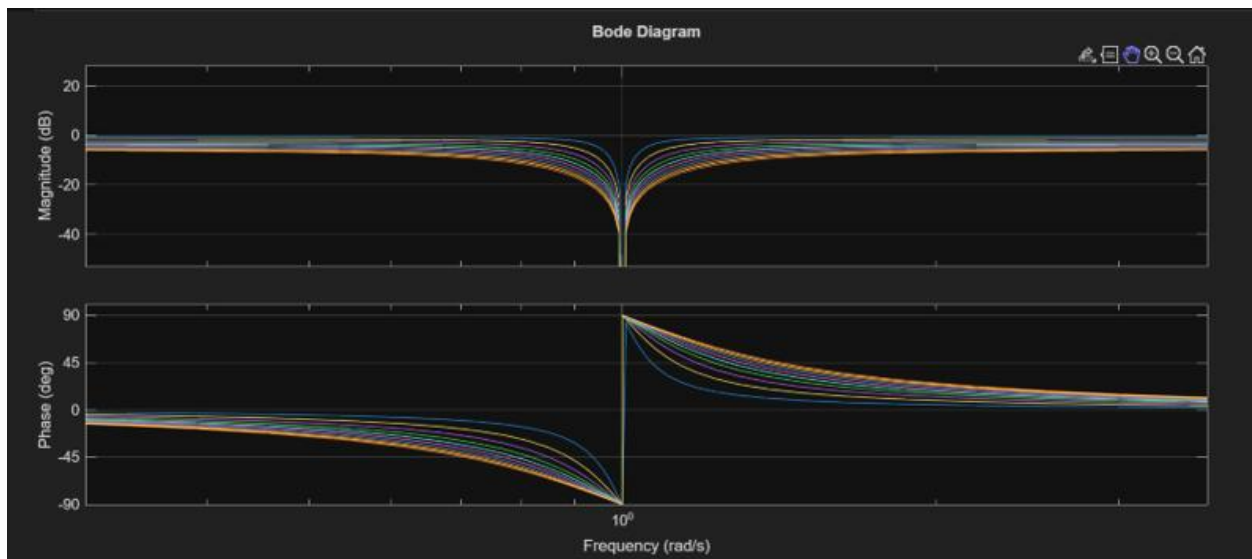
Сүзгі қасиеттерін талдау **тікелей** және **жанама** сапа көрсеткіштері бойынша жүзеге асырылады

- **Жанама көрсеткіштерге** амплитуда-жиілік сипаттамасы (АЖС) және түбірлік (кореньдік) сипаттама жатады;
- **Тікелей көрсеткішке** сүзгінің өтпелі (переходная) сипаттамасы жатады.

Аталған сипаттамалар сүзгілеу жүйесінің құрылымында жүретін ішкі процестерді анықтау үшін ақпараттық маңызы жоғары көрсеткіштер болып табылады. Бұл бөлім Баттерворт полиномдарына негізіндегі режекторлық сүзгілерді сүзгіні MATLAB арқылы жобалап, талдау жасаймыз.

$$W = \frac{10s^2 + 10\omega_0^2}{11s^2 + 1.414\xi\omega_0 s + 11\omega_0^2},$$

Төменде 8-суретте АЖС және ФЖС графигі көрсетілген

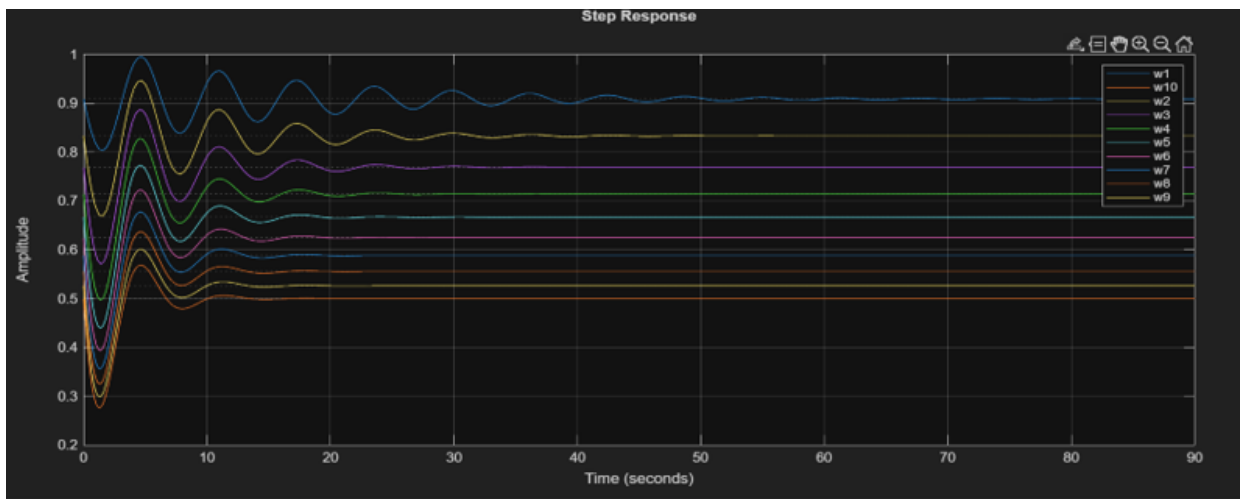


Сурет -9 Баттерворт типіндегі режекторлық сүзгінің АЖС және ФЖС

Суретте келтірілген Боде диаграммасы Баттерворт типіндегі екінші ретті режекторлық сүзгінің амплитудалық-жиіліктік (АЖС) және фазалық-жиіліктік (ФЖС) сипаттамаларын көрсетеді. Баттерворт фильтрінің ерекшелігі – өту және өткізбеу аймақтарында максималды тегіс (flat) жауапқа ие болуы. Бұл қасиет графиктен анық байқалады: резонанстық жиіліктен тыс барлық жиіліктерде амплитудалық сипаттама тегіс, бірқалыпты және айтарлықтай толқусыз өтеді. Режекция аймағында ($\omega_0 = 1$ рад/с) терең және симметриялы провал байқалады, ол сигналды толық дерлік басып тастайды

Баттерворт полиномын қолдану арқылы жасалған сүзгі өткізу белдеуінің толқынды бұдырсыз (максималды жазық) болуын қамтамасыз етеді. Яғни, осы сүзгінің өткізу белдеуі мен тосқауыл белдеуіндегі рұқсатталмаған ойысулар жоқ, бұл сигнал фазасының бұрмалануын азайтады. Алайда Баттерворт фильтрінің өткізу белдеуі салыстырмалы кең болғандықтан, оның өтпелі сипаттамалары орташа дәрежелі; екінші реттік Баттерворт үшін $Q \approx 0.707$ болғанда асымасы аз, бірақ тапсырыс артқан сайын асып кету мен дірілдеу күшейеді. Кері байланыс контурын қосу арқылы фильтрдің шығатын сигналындағы белгіленген жиіліктегі басуды күшейтіп, сүзгінің өткірлігін (Q көрсеткішін) амплитуда арқылы басқаруға болады.

Жүйе орнықтылығы мен сигнал сапасына әсері: Кері байланыс жалпы жағдайда жүйе орнықтылығын күшейтетінімен, белсенді режекторлық сүзгіде ол қосымша шектеулер енгізуі мүмкін. Мысалы, толық режимде режекторлық жиілікті нөлге түсіру қажет болса, жүйенің тұрақты жұмысы шартты болады және тұрақсыздық қаупі пайда болуы ықтимал. Бұл жағдайда өте өткір сүзгі (жоғары Q) болу жүйе шығысында ұзаққа созылатын діріл туғызуы ықтимал. Сигнал сапасы тұрғысынан, Баттерворт сүзгінің жазық белдеуі сигналдың форма-факторын аз бұрмаласа, кері байланыс шу мен осцилляцияға төзімділікті арттыруға септігін тигізеді. Қорыта айтқанда, өтпелі сипаттамаларды талдау сүзгіні жобалауда жүйенің орнықтылығы мен шығыс сигналының тазалығы арасындағы компромиссті табуға мүмкіндік береді.



Сурет -10 Баттерворт типіндегі режекторлық сүзгінің Step Response

Таблица 5 – Кері байланысы бар Баттерворт режекторлы сүзгі

	Step plot			Impulse response		
	tn	r	Amax	tn	r	Amax
$W=W/W+0.1$	61.7	9.51	0.996	60.1	-	-0.117
$W=W/W+0.2$	33.7	13.6	0.947	32	-	-0.196
$W=W/W+0.3$	24.4	15.3	0.887	22.8	-	-0.251
$W=W/W+0.4$	20.8	15.9	0.828	19.3	-	-0.289
$W=W/W+0.5$	18	15.9	0.772	16.3	-	-0.314
$W=W/W+0.6$	15.3	15.6	0.722	13.6	-	-0.331
$W=W/W+0.7$	14.9	15.2	0.678	13.3	-	-0.342
$W=W/W+0.8$	12.5	14.7	0.637	10.6	-	-0.349
$W=W/W+0.9$	12.4	14.2	0.601	10.6	-	-0.353
$W=W/W+1$	12.2	13.6	0.568	10.5	-	-0.353

Step Response
 графигінде
 Баттерворт
 типіндегі
 режекторлық
 сүзгінің кері
 байланысы бар
 жүйесінің өтпелі
 сипаттамасы
 берілген. Кері
 байланыс
 күшейтуі K 0.1-
 ден 1.0-ге дейін
 артқанда жүйенің
 тиімді беріліс
 функциясы

$W_{\text{общ}} = \frac{W}{K+W}$ түріне келеді, яғни сүзгінің шығыс амплитудасы біртіндеп «қысылып», бүкіл жүйе қаттырақ демпферленген болып қалады. Step-plot үшін кестеде үш негізгі параметр көрсетілген: орнатылу уақыты t_n , артық реттеу δ және максимал амплитуда A_{max} .

Кері байланысы бар Баттерворт типіндегі режекторлық сүзгінің өтпелі процестері (Step plot) K коэффициентінің өсуімен жүйенің тұрақтылығы біршама жақсарып, орнығу уақытының күрт қысқаратынын көрсетеді. Қаз болғанда (0.1–0.3) жүйе баяу, тербелмелі сипатта жұмыс істесе, K 0.5–1.0 аралығында өтпелі процесс айтарлықтай жылдамдап, тербелістер қысқа уақытта өшеді. Сонымен бірге стационарлық деңгей төмендеп, A_{max} мәні 0.996-дан 0.568-ге дейін біртіндеп азаяды — бұл кері байланыстың күшеюі

сүзгінің пайдалы сигналды да басатынын, яғни күшейтудің жалпы азаюын білдіреді.

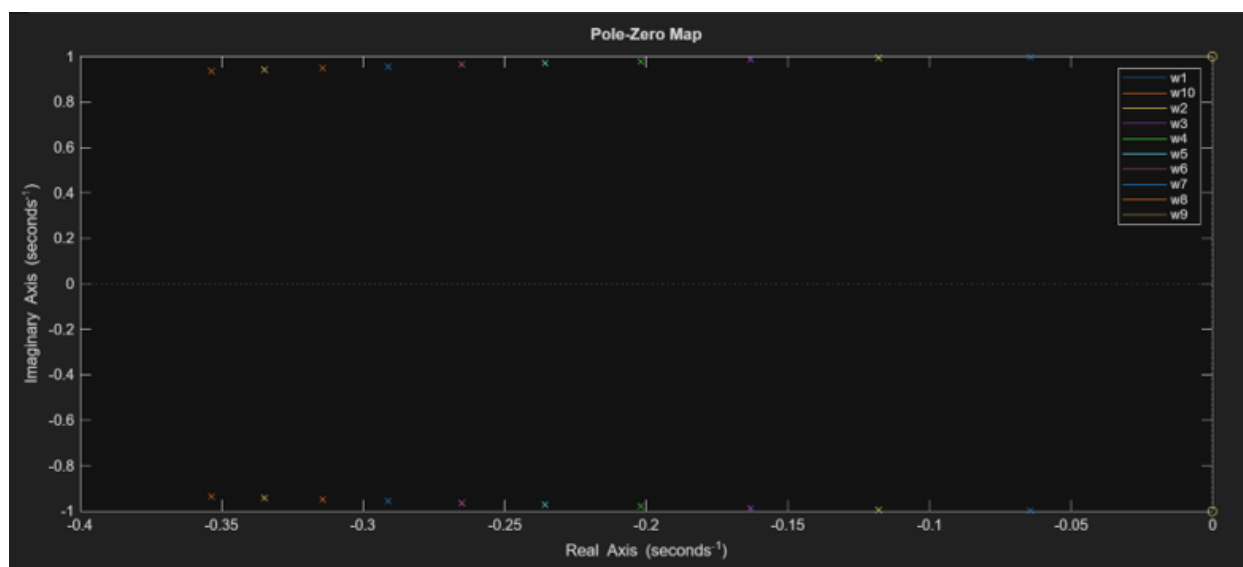
Импульстік сипаттама (Impulse response) да осы үрдісті толық растайды: Картқан сайын импульстан кейінгі «құйрық» айтарлықтай қысқарады, ал бастапқы теріс лақтырудың амплитудасы тереңдей түседі (–0.117-ден –0.353-ке дейін). Яғни кері байланыс жүйені тез демпферлейді, бірақ бастапқы импульске реакция қаталдау болады. Практикалық тұрғыда $K = 0.4 \dots 0.7$ диапазоны ең қолайлы компромисс береді — бұл

аймақта сүзгі жылдам, тұрақты жұмыс істейді және пайдалы сигналды шамадан тыс әлсіретпейді.

Баттерворт полиномы негізінде құрылған және кері байланыс арқылы жүзеге асырылған режекторлық сүзгінің полюс-нөл картасы (Pole-Zero Map). Бұл график сүзгінің динамикалық қасиеттерін, атап айтқанда, орнықтылығы мен жиіліктік селективтілігін бағалауда маңызды рөл атқарады. Полюстер мен нөлдердің кешен жазықтығында орналасуы жүйенің өтпелі процесіне, фильтрация тереңдігіне және тұрақтылық дәрежесіне тікелей әсер етеді.

Кері байланыс енгізу арқылы жүйенің өткізу қасиеттеріне икемділік беріледі: K мәні өзгергенде жүйенің полюстері жазықтықта әртүрлі бағытта қозғалып, сүзгінің тербелгіштік сипаты мен орнығу қасиеттері өзгереді. Яғни, K параметрі арқылы сүзгінің өткізу жолағындағы өткірлік (Q) деңгейі реттеледі.

Бұл график сүзгінің орнықтылығы жоғалмай тұрып, K коэффициентін қаншалықты үлкейтуге болатынын және сүзгінің фильтрациялық әсері мен тұрақтылық арасындағы шекараны көруге мүмкіндік береді. Төменде келтірілген диаграмма осы өзгерістерді геометриялық тұрғыда бейнелейді.



Сурет 11 – Режекторлық Баттерворт фильтрінің түбірлік локустары

Полюс-нөл картасы (11-Сурет) Баттерворт полиномы негізіндегі және кері байланыс енгізілген режекторлық сүзгінің K параметрі өзгерген кездегі динамикалық мінез-құлқын анық көрсетуге мүмкіндік береді. Графиктен байқағанымыздай, K коэффициенті өскен сайын полюстер сол жақ кешен жазықтығында нақты оське жақындай түседі, ал нөлдер тұрақты күйінде қалады (яғни, режекция жиілігі өзгермейді). Бұл сүзгінің орнықтылығы артатынын, алайда өткізу қабілетінің селективтілігі төмендейтінін білдіреді.

Таблица 6

	P	P1	Z	Z1
$W=W/W+0.1$	$0.0643 \pm 0.998i$	-0.0643	$0 \pm 1i$	0
$W=W/W +0.2$	$0.118 \pm 0.993i$	-0.118	$0 \pm 1i$	0
$W=W/W +0.3$	$0.163 \pm 0.987i$	-0.163	$0 \pm 1i$	0
$W=W/W +0.4$	$0.202 \pm 0.979i$	-0.202	$0 \pm 1i$	0
$W=W/W +0.5$	$0.236 \pm 0.972i$	-0.236	$0 \pm 1i$	0
$W=W/W +0.6$	$0.267 \pm 0.964i$	-0.267	$0 \pm 1i$	0
$W=W/W +0.7$	$0.291 \pm 0.957i$	-0.291	$0 \pm 1i$	0
$W=W/W +0.8$	$0.314 \pm 0.949i$	-0.314	$0 \pm 1i$	0
$W=W/W +0.9$	$-0.335 \pm 0.942i$	-0.335	$0 \pm 1i$	0
$W=W/W +1$	$-0.353 \pm 0.935i$	-0.353	$0 \pm 1i$	0

Кестеден көрініп тұрғандай, нөлдер барлық K мәндерінде өзгермейді: $Z = 0 \pm 1i$. Бұл Баттерворт режекторлық сүзгісінің ерекшелігі — режекция жиілігі кері байланысқа тәуелсіз. Ал полюстер айтарлықтай өзгереді: K аз болғанда (мысалы, $K = 0.1$) полюстер $-0.0643 \pm 0.998i$ нүктелеріне жақын орналасқан. Бұл — әлсіз демпферленген, айқын колебелмелі жүйенің белгісі. K өскен сайын полюстердің нақты бөлігі үлкен мәнге ие болып, солға қарай жылжиды: $-0.202 \pm 0.979i$; $-0.291 \pm 0.957i$; $-0.314 \pm 0.949i$ және т.б.

Бұл өзгеріс жүйенің: полюстер солға жақындаған сайын жүйе тұрақтырақ, тезірек орнығатын күйге өтеді. Полюстердің мнималық бөлігі шамамен бірдей деңгейде сақталып тұрады (0.93–0.99 аралығы) — бұл сүзгінің жиіліктік селективтілігі көп өзгермейтінін, яғни режекторлық қасиет сақталатынын көрсетеді.

Pole-Zero Map графигінен полюстердің нақты ось бойымен солға қарай бірқалыпты жылжитыны анық көрінеді. Нөлдер мүлде қозғалмай, мнималық осьте қалады, ал полюстер комплекс жазықтықтың сол жақ жартысында диагональ бағытта төмен қарай қозғалады. Бұл — кері байланыс күшейген сайын сүзгінің тұрақтылығы артатынын, бірақ толық жүйенің амплитудасы төмендейтінін көрсететін классикалық көрініс.

3.3 Шулы сигналдарды өңдеу нәтижелерін бағалау.

Бұл бөлімде режекторлық сүзгінің шулы сигналдарды қаншалықты тиімді өңдейтінін MATLAB Simulink ортасында модельдеу арқылы бағалау жүргізілді.

Модельдеу барысында бастапқы пайдалы сигнал мен оған қосылатын шу жеке генераторлар арқылы берілді. Пайдалы сигнал

$$s(t) = \sin * 0,5t,$$

яғни төмен жиілікті синусоидалық тербеліс ретінде таңдалды. Ал шу сигналы:

$$n(t)=\sin*1t,$$

жоғары жиілікті компонент ретінде пайдаланылды. Мұндай комбинация режекторлық сүзгінің резонанстық жиілік маңындағы жоғары жиілікті шуды қаншалықты басатынын тексеруге мүмкіндік береді. Екі сигнал қосындысы сүзгінің кірісіне беріліп, ал сүзгінің шығысынан алынған сигналды бастапқы сигналмен салыстыру үшін арнайы визуализация және өлшеу блоктары қолданылды.

Simulink моделінің құрылымында режекторлық сүзгінің беріліс функциясы

$$W = \frac{s^2 + \omega_0^2}{s^2 + 1.414\omega_0 s + \omega_0^2},$$

түрінде орнатылды, әрі сүзгінің демпферлеу коэффициенті әр тәжірибеде өзгертіліп отырды. Модельде сүзгінің жұмысы екі бағытта бағаланды:

1. фильтрацияға дейінгі және кейінгі сигналдардың амплитудасын салыстыру,
2. шудың басылу дәрежесін сипаттайтын SNR, MSE және корреляция көрсеткіштерін есептеу.

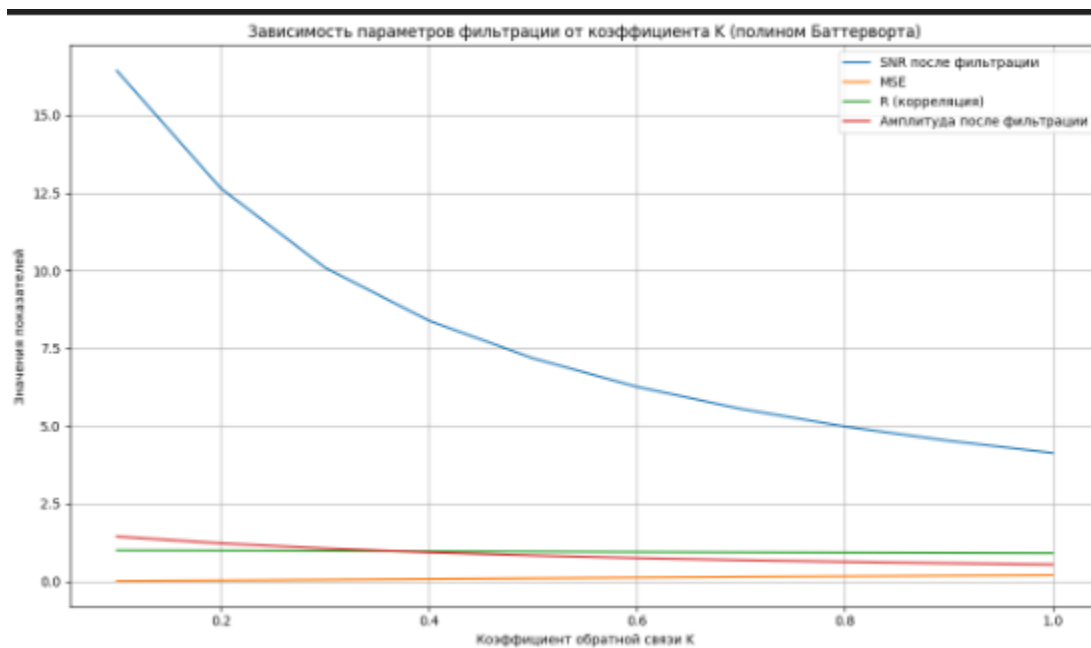
Симуляция нәтижелері әр демпферлеу коэффициенті үшін жеке-жеке тіркеліп, сүзгінің тиімділігі сандық түрде бағаланды. Алынған мәліметтер келесі тарауларда толық талданып, сүзгінің оңтайлы параметрлерін анықтауға мүмкіндік берді. Осылайша, модельдеу режекторлық сүзгінің шулы сигналдарды өңдеу қабілетін объективті бағалауға және оның нақты жүйелерде қолдану мүмкіндігін негіздеуге жол ашты.

Таблица 7 – Баттерворт режекторлық фильтрінің өнімділігін сандық бағалау»

K	SNR (до фильтрации)	SNR (после фильтрации)	MSE	R (корреляция)	Амплитуда до фильтрации	Амплитуда после фильтрации
0,1	-0.01 дБ	16.44 дБ	0.0113	0.9920	1	1.4416
0,2	-0.01 дБ	12.65 дБ	0.0271	0.9856	1	1.2183
0,3	-0.01 дБ	10.10 дБ	0.0488	0.9755	1	1.0541
0,4	-0.01 дБ	8.39 дБ	0.0723	0.9644	1	0.9286
0,5	-0.01 дБ	7.18 дБ	0.0957	0.9530	1	0.8291
0,6	-0.01 дБ	6.26 дБ	0.1181	0.9420	1	0.7485
0,7	-0.01 дБ	5.55 дБ	0.1390	0.9316	1	0.6822
0,8	-0.01 дБ	4.98 дБ	0.1585	0.9218	1	0.6267
0,9	-0.01 дБ	4.52 дБ	0.1764	0.9127	1	0.5795
1	-0.01 дБ	4.13 дБ	0.1928	0.9042	1	0.5388

Фильтрациядан кейінгі SNR көрсеткіші K коэффициенті артқан сайын біртіндеп төмендейді: $K = 0.1$ кезінде 16.44 дБ болса, $K = 1.0$ кезінде бұл мән 4.13 дБ-ге дейін кемиді. Бұл сүзгі белсендірілген сайын сигналдың пайдалы компоненттерімен қатар, оның сапасының да төмендейтінін көрсетеді. Бір уақытта орташа квадраттық қате (MSE) 0.0113-тен 0.1928-ге дейін артып отырады. Бұл сүзгілеуден кейінгі сигналдың кіріске қарағанда қатты бұрмаланатынын білдіреді. Корреляция коэффициенті R де біртіндеп төмендейді — бастапқыда 0.9920 болса, соңында 0.9042-ге дейін түседі. Демек, сүзгі сигналдың уақыттық құрылымын сақтау қабілетін жоғалта бастайды.

Фильтрацияға дейінгі амплитуда барлық жағдайларда бірдей — 1.0. Алайда сүзгілеуден кейін бұл мән K -нің өсуіне байланысты төмендейді. $K = 0.1$ кезінде амплитуда 1.4416-ға дейін артады, бұл жиілік шекарасында фазалық күшейту әсерімен түсіндіріледі. Яғни, сүзгі жиілікті толық баспайды, керісінше кейбір компоненттерді күшейтіп жібереді. Бұл жағдай аз мәндегі K кезінде сүзгінің әлсіз әсер етуін және фаза бойынша басқарудың әлсіздігін көрсетеді. Керісінше, $K = 1.0$ кезінде амплитуда 0.5388-ге дейін төмендейді, яғни сүзгі өте агрессивті әсер етіп, резонанстық жиілікті тиімді түрде басып тастайды [38-39].



Сурет 12 – Баттерворт режекторлық фильтр өнімділігінің K коэффициентіне тәуелділігі

Жалпы, бұл талдау сүзгінің тиімділігі мен сигнал сапасы арасында компромиссті теңестіру қажеттілігін көрсетеді: жоғары селективтілік үшін төмен K , ал сигнал формасын сақтау үшін орташа K мәндерін қолдану орынды.

Жалпы үрдіс сүзгінің динамикалық реттелуін көрсетеді: кіші K мәндерінде сүзгі сигналға әлсіз әсер етеді, бірақ сигнал құрылымын жақсы сақтайды (жоғары SNR, аз MSE, үлкен R); ал K артқанда сүзгінің режекция қасиеті күшейіп, қажетсіз жиіліктерді белсенді түрде басады, бірақ бұл қатар сигнал сапасына да кері әсер етеді. Бұл мінез-құлық

Баттерворт сүзгісінің өткізу жолағындағы өткір шекарасына және жоғары жиіліктік селективтілігіне сәйкес келеді.

3.4 Тарау бойынша қорытынды

Ұсынылған жұмыста Баттерворт полиномына негізделген біржиілікті режекторлық сүзгінің сипаттамаларын бағалауға қатысты нәтижелер алынды. Берілген екінші ретті біржиілікті режекторлық сүзгі үшін теріс кері байланыс контурының түзетуші коэффициентінің әсері зерттелді. Зерттеу нәтижелері көрсеткендей, $K = 0,1$ кері байланыс коэффициенті кезінде Баттерворттың бір жиілікті режекторлық фильтрі байланыссыз филтормен салыстырғанда әлдеқайда тік жиіліктік спадқа және айтарлықтай тар заграждение жолағына ие.

Кері байланыс контурының түзетуші коэффициентінің Баттерворттың біржиілікті режекторлық сүзгінің сигналды өңдеу дәлдігіне және кедергіге төзімділік көрсеткішіне әсері айқындалды. Орташа алғанда, кедергіге төзімділік көрсеткішіне 12,250 дБ-ға артатыны және бейсызық емес (детерминистік) кері корреляция коэффициентінің мәні 0,991 болатындығы анықталды.

Практикалық маңыздылығын дәлелдеу мақсатында біржітілікті шулы кедергіні режекторлық сүзгілеудің эксперименттік зерттеулері жүргізілді. Эксперимент нәтижелері $K = 0,1$ коэффициенті бар теріс кері байланыс схемасы қолданылған режекторлық сүзгінің нақты уақыт режимінде шу кедергісін -27,67 дБ деңгейіне дейін тиімді түрде баса алатынын көрсетті [38-39].

4-тарау Режекторлық фильтрдің дискреттік моделін жүзеге асырылуы және оның тиімділігін роботтандырылған мехатродыдық құрылғыда эксперименттік тексеру

Эксперименттік міндетті қою және тәжірибе жүргізу шарттары

Бұл тараудың мақсаты — 2 және 3-тарауларда синтезделіп, зерттелген режекторлық фильтрдің жұмысқа қабілеттілігі мен тиімділігін эксперименттік түрде тексеру, оны салмақтық дозатор сигналына практикалық қолдану жағдайында бағалау болып табылады.

Эксперимент сұйық өнімдерді құю желісінде қолданылатын роторлы типтегі салмақтық дозаторда жүргізілді. Жабдықтың жұмыс істеуі барысында масса тензометриялық датчигінің сигналында машинаның механикалық бөліктерінің вибрацияларымен байланысты тұрақты жоғары жиілікті тербелістер байқалды. Бұл тербелістер дозалау клапанының мерзімінен бұрын жабылуына, соның салдарынан жекелеген бөтелкелердің кем құйылуына алып келді.(13 сурет)

Вибрациялық құрамдастың әсерін бағалау және цифрлық фильтрацияның тиімділігін тексеру мақсатында нақты масса сигналы тіркеліп, өнеркәсіптік басқару жүйесіне сәйкес параметрлермен дискреттік түрде өңделді.



(a)



(b)

Сурет 13: Роторлы салмақтық дозатордың (автоматты бөтелке толтырғыштың) негізгі каруселі (a) және жеке толтыру станциясының сұйықтық дозаторы мен бөтелке тұғыр тақтасының деталі (b) көрсетілген.

Бұл жүйеде әрбір бөтелке салмақ датчигімен өлшеніп толтырылады, жоғары жылдамдықта жұмыс істейді және өлшеу дәлдігіне қойылатын талап грамм деңгейінде болады. Алайда, тәжірибеде дәл осындай роторлы толтырғыштарда бөтелкелерде мезгіл-мезгіл кем құйылу байқалады.

4.1 Шудың пайда болу себептері.

Қарастырылып отырған **роторлы салмақтық дозатор жүйесінде** шамамен **100 Гц** жиіліктегі вибрациялық шудың негізгі көзі — машинаның **негізгі жетегінің электрқозғалтқышы** болып табылады. Өнеркәсіптік **50 Гц** айнымалы ток желісінен қоректену кезінде электрқозғалтқыштың **статоры мен роторында магнит ағынының периодты өзгерістері** пайда болады.

Магнитострикция құбылысының салдарынан магнитөткізгіштің механикалық деформациялары қоректендіру кернеуінің бір периоды ішінде **екі рет** орын алады, бұл **жиілігі екі еселенген — 100 Гц** болатын мәжбүрлі механикалық тербелістердің туындауына әкеледі.

Аталған вибрациялар қозғалтқыш корпусы және механикалық беріліс элементтері арқылы дозатордың **тірек конструкциясына**, әрі қарай **салмақ өлшеу тораптарына** беріледі. **Тензодатчиктердің микроскопиялық деформацияларға жоғары сезімталдығын** ескере отырып, жоғары жиілікті вибрациялар өлшенетін масса сигналының құрамында **гармоникалық құрамдастың** пайда болуына себеп болады.

Осылайша, **100 Гц жиіліктегі вибрациялық шу** тұрақты **электромеханикалық табиғатқа** ие және **айнымалы ток жетектерімен жабдықталған өнеркәсіптік жабдықтарға** тән құбылыс болып табылады.

4.1.1 100 Гц жиілікті вибрациялық шудың масса сигналына әсері

Машинаның роторлы дозатор типтес құрылымында пайда болатын 100 Гц жиілікті вибрациялық шу, ең алдымен, негізгі жетек электрқозғалтқышының электромеханикалық қасиеттерімен байланысты. Айнымалы токпен (50 Гц) қоректенетін электрқозғалтқышта магнит өрісінің бағыты әр жарты период сайын өзгеріп отырады. Осы құбылыс нәтижесінде статор мен ротордың магнитөткізгіш элементтерінде магнитострикция әсері туындайды, яғни магнит өрісінің өзгеруіне байланысты микроскопиялық механикалық деформациялар пайда болады. Магнит өрісінің әрбір толық периодында бұл деформациялар екі рет қайталанатындықтан, қозғалтқыш корпусында желі жиілігінің екі еселенген компоненті — 100 Гц жиілікті мәжбүрлі механикалық тербеліс қалыптасады.

Бұл тербелістер қозғалтқыш корпусынан механикалық байланыстар арқылы дозатордың рамасына, одан әрі салмақ өлшеу жүйесіне беріледі. Салмақ өлшеу датчигі (платформа астында орнатылған тензодатчик) тек статикалық ауырлық күшін ғана емес, сонымен қатар діріл салдарынан туындайтын динамикалық инерциялық күштерді де сезеді. Нәтижесінде нақты массаға қосымша жалған күштер әсер етіп, өлшенетін сигналда жоғары жиілікті синусоидалық құрамдас пайда болады.

100 Гц жиілікті діріл салмақ сигналына қосылған кезде, өлшенетін масса уақыт бойынша жылдам тербелмелі компонентке ие болады. Бұл тербеліс нақты массаның өзгеруіне қатысы жоқ, алайда басқару жүйесі оны пайдалы сигнал ретінде қабылдауы мүмкін. Әсіресе, егер салмақ өлшеу жүйесінің механикалық құрылымының меншікті тербеліс жиілігі осы диапазонға жақын орналасса, діріл амплитудасы айтарлықтай күшейеді. Мұндай жағдайда тензодатчик сигналындағы 100 Гц тербеліс өлшеу дәлдігін айтарлықтай төмендетеді.

Роторлы толтырғыш машиналар жоғары өндірістік жылдамдықта жұмыс істейтіндіктен, әр бөтелкені толтыру циклі салыстырмалы түрде қысқа уақыт ішінде аяқталады. Бұл жағдайда дәстүрлі әдіс — жүйенің толық тынышталуын күту — технологиялық тұрғыдан мүмкін емес. Сондықтан өлшеу сигналы діріл толық өшпей тұрып пайдаланылып, басқару жүйесі масса мәнін нақты уақыт режимінде бақылайды. Егер осы сәтте 100 Гц вибрациялық тербелістің оң фазасы массаның өсуімен қабаттасса, сигнал уақытша жоғары мәнге жетіп, басқару алгоритмі толтыру клапанын мерзімінен бұрын жабуы мүмкін.

Осының салдарынан бөтелкеге құйылған нақты масса берілген номиналдан шамамен 20 г кем болып шығады. Мұндай кем құйылу әрбір толтыру циклінде емес, периодты түрде байқалады. Тәжірибеде анықталған «7–8 бөтелкеде бір рет» заңдылығы осы құбылыспен түсіндіріледі. Себебі бөтелкелерді толтыру циклі мен 100 Гц вибрациялық шу жиілігі өзара синхронды емес. Екі сигнал арасында біртіндеп фаза ығысуы пайда болып, белгілі бір циклдер санынан кейін (шамамен 7–8 цикл сайын) олар бір-біріне қолайсыз фазада қабаттасады. Дәл осы сәтте өлшенетін массадағы қате ең үлкен мәніне жетіп, кем құйылу тіркеледі.

Осылайша, белгілі бір интервалмен қайталанатын кем құйылу құбылысы салмақ өлшеу сигналына әсер ететін 100 Гц жиілікті вибрациялық шудың нәтижесі болып табылады.

4.1.2 100 Гц вибрациялық шудың кем құйылуға әсер ететінін дәлелдеу әдістемесі

Шудың әсерін дәлелдеудің тәсілдерінің бірі — сүзу арқылы салыстырмалы эксперимент жүргізу. Ол үшін өлшеу сигналына 100 Гц жиілікті басатын тар жолақты режекторлық сүзгі қолданылады. Егер сүзгі енгізілгеннен кейін салмақ сигналының тербелісі айтарлықтай азайып, 7–8 бөтелкеде бір рет пайда болатын кем құйылу жойылса, бұл 100 Гц вибрациялық шудың кем құйылудың негізгі себебі екенін тікелей дәлелдейді.

Тәжірибе нәтижесінде сүзгі қолданылмаған режимде әрбір 7–8 бөтелкеде бір рет кем құйылу фактілері тұрақты түрде байқалды. Бұл жағдай салмақ сигналының 100 Гц жиілікті вибрациялық тербеліс әсерінен уставкалық мәнге мерзімінен бұрын жетуімен және клапанның ерте жабылуымен түсіндіріледі.

Ал режекторлық сүзгі енгізілгеннен кейін салмақ сигналының жоғары жиілікті тербелісі айтарлықтай азайып, сүзгіленген сигналда уставкалық мәнге жету сәті нақты дозалау уақытына сәйкес келді. Нәтижесінде бақылау кезеңінде кем құйылу жағдайлары тіркелмеді, ал барлық бөтелкелердің массасы номинал мәнге жақын деңгейде тұрақтанды.

Осылайша, сүзгісіз және сүзгіленген режимдерді салыстыру арқылы алынған тәжірибелік нәтижелер 100 Гц вибрациялық шудың кем құйылудың негізгі себебі екенін тікелей дәлелдейді. Сонымен қатар, бұл тәжірибе ұсынылған режекторлық сүзгінің өндірістік жағдайда тиімді және практикалық тұрғыдан қолдануға жарамды екенін көрсетеді.

4.2 Салмақтық дозатор сигналының эксперименттік зерттелуі

Эксперименттің негізгі шарттары:

- бір дозалау циклының ұзақтығы: $T = 3\text{ с}$
- сигналды дискреттеу жиілігі: $f_s = 500\text{ Гц}$
- дискреттеу периоды: $T_s = \frac{1}{f_s} = 2\text{ мс}$
- бір дозалау циклына сәйкес есептеу саны: $N = T \cdot f_s = 1500$

500 Гц дискреттеу жиілігін таңдау шамамен 100 Гц жиіліктегі вибрациялық кедергіні дұрыс бейнелеу қажеттілігімен, сондай-ақ ПЛК-да фильтрді орнықты цифрлық түрде жүзеге асыру талаптарымен негізделеді.

Эксперимент барысында номинал массасы 1000 г болатын бөтелкені толтыру процесінде қалыптасатын масса тензодатчигінің нақты сигналы талданды.

Әр 7–8 бөтелкеде бір рет статистикалық түрде байқалатын кем құйылу жағдайлары ерекше қызығушылық тудырды. Төменде суреті көрсетілген.



Сурет 14 Кем құйылған бөтелкенің суреті

4.3 Режекторлық фильтрдің дискреттік формадағы практикалық жүзеге асырылуы

Салмақтық дозаторды басқару жүйесінде программаланатын логикалық контроллер (ПЛК) дозалау процесін нақты уақыт режимінде бақылайды. Әрбір дискреттеу қадамында ПЛК салмақ датчигінен алынған ағымдағы өлшенген мәнді $x[n]$ қабылдайды және осы сигнал негізінде дозалау клапанын жабу немесе ашық күйде қалдыру туралы шешім қабылдайды.

Басқару алгоритмі қарапайым шекті логикаға негізделген: егер өлшенген масса алдын ала берілген номинал параметр $M_{\text{ном}}$ жетсе немесе одан асса, онда дозалау клапаны жабылады. Бұл жағдайда ПЛК шешім қабылдау үшін сигналдың уақыт бойынша бүкіл тарихын емес, тек ағымдағы мәнін пайдаланады.

Осындай басқару принципі кезінде өлшенген сигналдағы жоғары жиілікті тербелістер (вибрациялық шу) ерекше қауіпті болып табылады. Егер паразиттік гармоникалық құрамдас белгілі бір уақыт мезетінде пайдалы сигналмен фазалық түрде қабаттасса, онда өлшенген масса мәні қысқа уақытқа номинал параметрден асып кетуі

мүмкін. ПЛК бұл құбылысты нақты массаға жету ретінде қабылдап, клапанды мерзімінен бұрын жабады. Нәтижесінде нақты құйылған масса номиналдан төмен болып, жүйелік недолив пайда болады.

Аталған мәселені болдырмау үшін ПЛК-да шешім қабылдау тікелей бастапқы сигнал $x[n]$ бойынша емес, алдын ала сүзгіден өткен сигнал $y[n]$ бойынша жүзеге асырылды. Осы мақсатта екінші ретгі цифрлық режекторлық фильтр енгізілді, ол 100 Гц жиілікті вибрациялық құрамдасты селективті түрде басып, пайдалы баяу өзгеретін массалық сигналды сақтайды.

Фильтрдің дискреттік реализациясы айырымдық теңдеу төменде $y[n]$ түрінде берілген. Бұл теңдеу ПЛК-да циклдік режимде оңай іске асырылады және әрбір дискреттеу қадамында ағымдағы кіріс мәнін $x[n]$, сондай-ақ алдыңғы екі қадамдағы кіріс және шығыс мәндерін пайдаланады. Осылайша, ПЛК-да фильтр нақты уақыт режимінде үздіксіз жұмыс істеп, басқару алгоритміне тек физикалық тұрғыдан мағыналы, тегістелген сигналды ұсынады.

Нәтижесінде дозалау клапанын жабу туралы шешім фильтрленген сигнал $y[n]$ негізінде қабылданады, бұл вибрациялық шудың әсерінен туындайтын жалған шекті асып кетулерді болдырмайды және дозалау дәлдігін арттырады.

Анықталған вибрациялық құрамдасты басу мақсатында сигналды өңдеу жүйесіне **екінші ретгі цифрлық режекторлық фильтр** енгізілді. Оның параметрлері 2 тарауда қарастырылған теориялық модельге сәйкес келеді.

Фильтрдің (z) -аймақтағы беріліс функциясы:

$$H(z) = \frac{z^2 - 2\cos(\omega_0)z + 1}{z^2 - 2r\cos(\omega_0)z + r^2},$$

Мұнда

$$\omega_0 = \frac{2\pi f_0}{f_s},$$

Эксперименттік параметрлер үшін: $f_s = 500\text{Гц}$, $f_0 = 100\text{Гц}$

аламыз: $\omega_0 = 0.4\pi$,

Коэффициент

$$r = e^{-\xi\omega_0 T_s},$$

r параметрі режекторлық фильтр полюстерінің радиусын белгілейді және осы арқылы режекторлық провалдың селективтілігі мен тереңдігіне әсер етеді.

$$z=re^{\pm j\Omega_0},$$

Коэффициент кедергіні басу тереңдігі мен өтпелі процестің орнықтылығы арасындағы **компромисс** ретінде таңдалды, бұл 2 және тарауда алынған ұсынымдарға сәйкес келеді.

ПЛК-да жүзеге асырылған фильтрдің айырымдық теңдеуі:

$$y[n] = x[n] + b_1x[n-1] + x[n-2] - a_1y[n-1] - a_2y[n-2],$$

мұнда коэффициенттер:

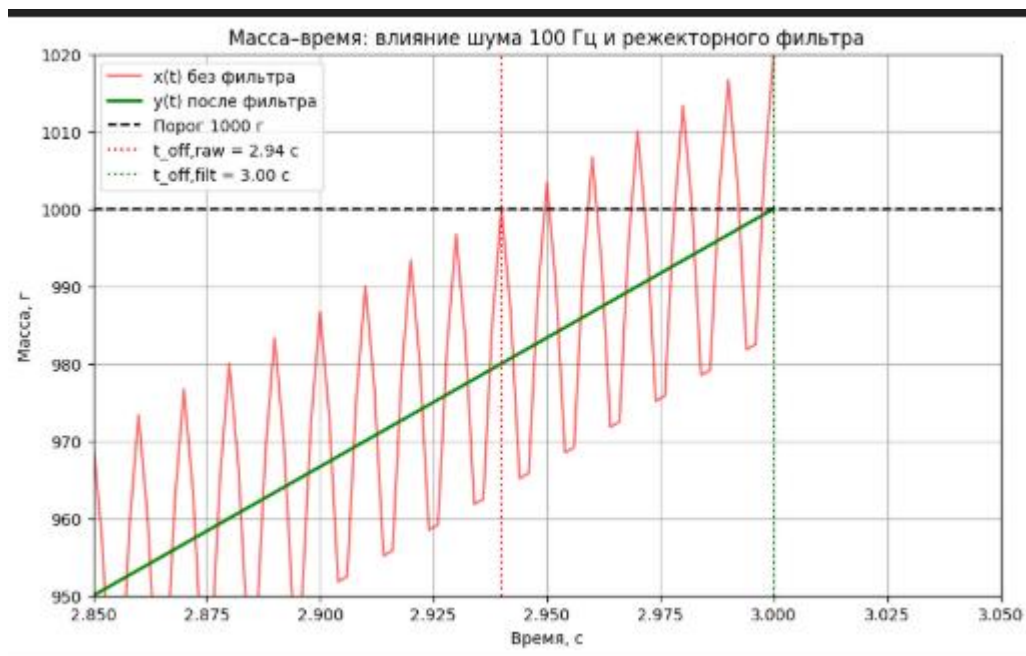
$$\begin{aligned} b_1 &= -2\cos \omega_0 = -2\cos (0.4\pi) \approx -0.618 \\ a_1 &= -2r\cos \omega_0 \approx -0.587 \\ a_2 &= r^2 = 0.9025 \end{aligned}$$

Бастапқы шарттар нөлге тең деп қабылданды, бұл фильтрдің дозалау циклының басында іске қосылуына сәйкес келеді.

Айырымдық теңдеу есептеу тұрғысынан қарапайым және программаланатын логикалық контроллерде (ПЛК) циклдік режимде орындалуға ыңғайлы. Әрбір дискреттеу қадамында ағымдағы кіріс сигналының мәні $x[n]$ және алдыңғы екі қадамдағы кіріс және шығыс мәндері пайдаланылады.

Осылайша, режекторлық фильтр нақты уақыт режимінде салмақ сигналына қолданылады және 100 Гц жиілікті вибрациялық құрамдасты селективті түрде басады, пайдалы баяу өзгеретін массалық сигналға елеулі әсер етпейді.

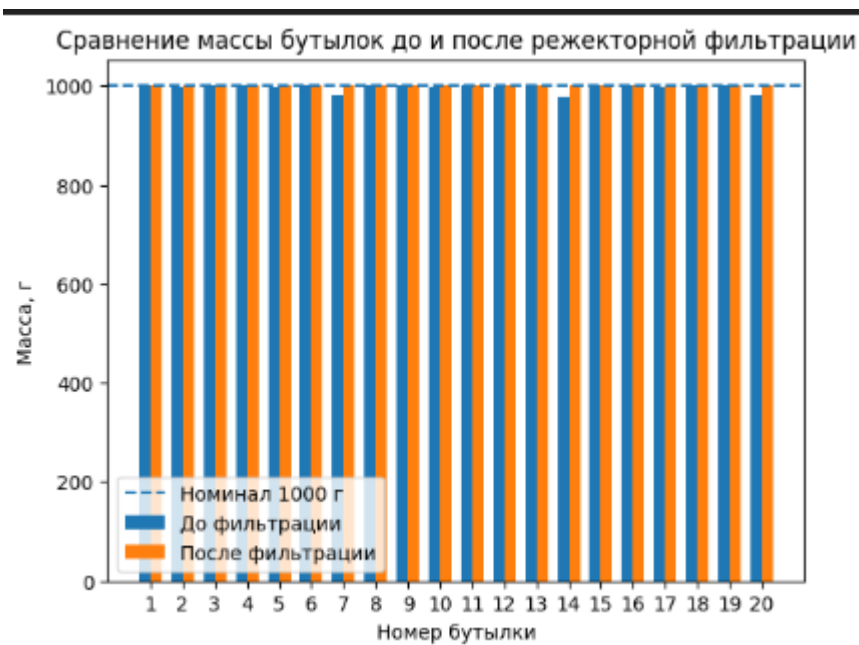
Фильтрдің жұмысы дозалау процесінің барлық ұзақтығында үздіксіз орындалады, ал басқару жүйесі клапанды жабу туралы шешімді фильтрленген сигнал $y[n]$ негізінде қабылдайды.



Сурет 15 Кем құйылған бір бөтелкенің масса өзгеру графигі

Суретте дозалау циклының біреуінің (бір бөтелкенің) кесу сәтіне жақын уақыттық фрагменті (2,85–3,05 с) көрсетілген. Қызыл сызық 100 Гц вибрациялық кедергіні қамтитын бастапқы масса сигналы $x(t)$ -ті, ал жасыл сызық — **фильтрленген сигналды** $y(t)$ бейнелейді. Көлденең сызық номинал параметрге сәйкес келеді: $M_{\text{ном}} = 1000$ г.

Фильтрация қолданылмаған жағдайда $x(t)$ сигналы кедергінің оң бағыттағы лақтырылуының әсерінен шекті мәнге **ертерек** ($t_{\text{off,raw}} = 2,94$ с) жетеді, бұл клапанның мерзімінен бұрын жабылады. Фильтрациядан кейін $y(t)$ сигналы шекті мәнді **дұрыс уақытта** — $t_{\text{off,filt}} = 3,00$ с — кесіп өтеді.



Сурет 15 20 бөтелкенің масса өзгеру графигі

15 суреттен фильтрацияға дейін №7, №14 және №20 бөтелкелердің массасы номинал мәннен айтарлықтай төмен екені анық көрінеді. Режекторлық фильтр енгізілгеннен кейін барлық бөтелкелердің массасы 1000 г шамасында тұрақталады, бұл дозалау процесіндегі жүйелік қателіктің жойылғанын растайды.

Плк-да 3 түрлі ξ мәні бар фильтр қолданылады. Бір фильтр шықан мәні шығыс сигнал ретінде клапынды жабады, ал қалған сигналдар DB-ға жазылып жазылып 8-таблицада көрсетілген. Бұл ξ мәні қалай әсер ететінін көрсетеді.

8-таблица

ξ	r	t_off	Масса, г	Қалдық тербеліс, г	Пайдалы сигналдың әлсіреуі, г	Өнімге әсері
-	-	2.937	979	~25	0	Толтырудың жеткіліксіздігі, жарамсыз өнім
0.2	0.778	2.990	997	~5.1	~0.5	жалған оң нәтиже алу қаупі бар
0.5	0.533	3.000	1000	~2.4	~0.8	Қалыпты, тұрақты сүзгілеу
0.8	0.366	3.000	1000	~1.9	~2.5	қалыпты, бірақ шамадан тыс сүзу

4.4 Тарау бойынша қорытындылар

Бұл тарауда 2 тарауда теориялық тұрғыда синтезделген режекторлық фильтрдің практикалық қолданылу мүмкіндігі зерттелді. Фильтр программаланатын логикалық контроллерде (Siemens S7-300) дискреттік формада жүзеге асырылып, салмақтық дозатор сигналын өңдеуге қолданылды.

Жүргізілген эксперименттік зерттеу нәтижелері салмақ өлшеу жүйесіндегі 100 Гц жиілікті вибрациялық шудың дозалау дәлдігіне елеулі әсер ететінін көрсетті. Жоғары жиілікті паразиттік құрамдас сигналдың белгілі бір фазалық жағдайларда пайдалы сигналмен қабаттасуы өлшенген массаның параметр жалған түрде ертерек жетуіне алып келеді. Бұл программалық басқару жүйесінде дозалау клапанының мерзімінен бұрын жабылуын тудырып, шамамен 20 г мөлшеріндегі жүйелік кем құйуға себеп болды.

Режекторлық фильтрді қолдану арқылы салмақ сигналының 100 Гц гармоникалық құрамдасы селективті түрде басылып, пайдалы баяу өзгертін массалық сигнал сақталатыны дәлелденді. Фильтрленген сигнал негізінде қабылданған басқару шешімдері дозалау клапанының дұрыс уақыт мезетінде жабылуын қамтамасыз етті. Нәтижесі кем құю құбылысы жойылып, барлық бөтелкелердің массасы номинал мәнге жақындады.

Қорытынды

Бұл диссертацияда режекторлық сүзгілердің екі негізгі түрі – демпфер коэффициенті ξ бар классикалық екінші ретті және Баттерворт полиномына негізделген біржиілікті кері байланысты – зерттелді. Зерттеу нәтижелері бойынша фильтрация сапасын арттыруда сүзгі параметрлерінің маңызы анықталды. Екінші ретті сүзгі үшін ξ коэффициенті шамалы болғанда сүзгі өте селективті, бірақ өтпелі процестер ұзақ жалғасады. Модельдеу мен талдау $\xi=0,5-0,8$ аралығында компромисс үйлесімділігін қамтамасыз ететіні анықталды: бұл мәндерде сүзгінің өтпелі процесі салыстырмалы түрде тез, артық тербелісі аз, ал шу жою тиімділігі жоғары болып тұр. Екінші жағынан, ξ өте кіші болса (мысалы, $\xi \approx 0,1$), сүзгі резонансты жиілікті терең және тар жолақпен басады, бірақ сигналдың амплитудасын оңтайлы сақтауға әсер етеді. Сондықтан практикалық жүйелерде $\xi=0,5-0,8$ аралығын оптимал ретінде таңдау ұсынылады.

Баттерворт типті кері байланысты біржиілікті сүзгіде кері байланыс коэффициенті K -ның мәні маңызды рөл атқарады. Модельдеу нәтижелері көрсетті: $K \approx 0,1$ кезінде сүзгі кері байланыстысыз схемаға қарағанда жоғары селективтілік көрсетеді және кедергіге төзімділік шамамен 12–13 дБ-ке артады. Практикалық зерттеулерде (4-тарау) ПЛК-де іске асырылған дискреттік сүзгі шу компонентін шамамен –27,7 дБ дейін төмендетті, бұл оның нақты жүйелерде жоғары тиімді екенін дәлелдеді. Сонымен қатар, модельдеу деректеріне сәйкес сүзгіленген сигналдың SNR көрсеткіші ξ мен K шамаларына тікелей байланысты: жүйенің сигнал/шу қатынасын жоғарылатуды таңдау барысында амплитуда мен корреляция меншікті жоғалу факторларын бірге ескеру керек.

Нәтижелер робототехника, мехатроника және биомедициналық құралдардағы жиіліктік шу проблемасын шешуге мүмкіндік береді. Мысалы, желілік 50/60 Гц шуын нақты уақыт режимінде режекторлық сүзгімен басу арқылы медициналық өлшеулердегі (ЭКГ және т.б.) сигнал сапасын арттыруға болады. Жұмыста алынған математикалық модельдер мен оптимал ретінде анықталған коэффициенттер нақты өлшеу процесіндегі дәлдікті жақсартуға ықпал етеді. Практикалық ұсыныстар ретінде автоматтандырылған басқару жүйелеріне жоғары дәлдікті және тербеліссіз өлшеу үшін $\xi \approx 0,5-0,8$ және $K \approx 0,1$ мәндерін таңдау ұсынылады.

Алдағы зерттеулерде фильтрдің параметрлерін бейімдеп реттеу алгоритмдерін дамыту өзекті. Әсіресе жиілігі өзгермелі кедергілер жағдайында адаптивті режекторлық сүзгілерді қолдану маңызға ие. Сонымен қатар, ПЛК-дағы сүзгі алгоритмін одан әрі жетілдіру және нақты уақыт режимінде сүзгіні параметрлерін автоматты түрде жаңарту жүйелерін зерттеу ұсынылады. Қорытындылай келе, диссертацияда қойылған мақсат толықтай орындалып, ғылыми жаңалықтар мен практикалық ұсыныстар нақты көрсетілді. Жұмыс нәтижелері фильтрация мен өлшеу дәлдігін жақсарту үшін іргелі негіз ретінде қызмет етеді.

Пайдаланылган әдебиеттер тізімі

1. Widrow B., Stearns S. D. *Adaptive Signal Processing*. — Prentice Hall, 1985. — 491 p.
2. Kuo S. M., Morgan D. *Active Noise Control Systems: Algorithms and DSP Implementations*. — Wiley, 1996. — 587 p.
3. Preumont A. *Vibration Control of Active Structures*. — Springer, 2011. — 343 p.
4. Butterworth S. *On the Theory of Filter Amplifiers // Wireless Engineer*. — 1930. — №7. — P. 536–541.
5. Mitra S. K., Kaiser J. F. *Handbook for Digital Signal Processing*. — Wiley-Interscience, 1993. — 1392 p.
6. Ouyang H., Mottershead J. E., Cartmell M. P. *Vibration suppression in robotic manipulators using notch filters // Journal of Sound and Vibration*. — 2015. — Vol. 352. — P. 78–90.
7. Zheng L., Wu Y., Huang B. *Low-delay adaptive notch filter for feedback control // Control Engineering Practice*. — 2018.
8. Sasaki M., Muguro J., Njeri W., Doss A. S. A. *Adaptive Notch Filter in a Two-Link Flexible Manipulator for the Compensation of Vibration and Gravity-Induced Distortion*. *Vibration*, 2023, Vol. 6(1).
9. Ayazbay A.A., Balabyev G., Orazaliyeva S., Gromaszek K., & Zhauyt A. Trajectory Planning, Kinematics, and Experimental Validation of a 3D-Printed Delta Robot Manipulator. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*. 2024. T. 13. №. 1. C. 113-125. 13(1), 113-125.
10. Алтай Е. Исследование и разработка методов обработки сигналов акустической эмиссии: Автореф. дис. ... канд. тех. Наук / СПб, 2023. 270 с.
11. Teng W., Zhang X., Zhang Y., Yang L. *Iterative tuning notch filter for suppressing resonance in ultra-precision motion control*. *Advances in Mechanical Engineering*, 2016, Vol. 8(11), pp. 1–9.
12. Чернышев С.М. Теория и практика обработки сигналов. — СПб.: Питер, 2017.
13. Беляев А.И. Методы фильтрации измерительных сигналов. — М.: Техносфера, 2019.
14. Осипов В.В. Анализ и синтез аналоговых фильтров. — М.: Радио и связь, 2004.
15. Sedra A., Smith K. *Microelectronic Circuits*. — Oxford University Press, 2015.
16. Савельев И.А. Электромагнитные помехи и методы защиты. — М.: Энергоатомиздат, 2015.
17. Zumbahlen H. *Linear Circuit Design Handbook*. — Elsevier, 2008.
18. Huelsman L.P. *Active and Passive Analog Filter Design*. — McGraw-Hill, 1993.
19. Van Valkenburg M.E. *Analog Filter Design*. — Oxford University Press, 1982.
20. Климов А.А. Цифровая обработка сигналов. — М.: Горячая линия – Телеком, 2010.
21. Widrow B., Stearns S.D. *Adaptive Signal Processing*. — Prentice-Hall, 1985.
22. Kuo S.M., Morgan D.R. *Active Noise Control Systems*. — Wiley, 1996.
23. Ogata K. *Modern Control Engineering*. — Pearson, 2010.
24. Proakis J.G., Salehi M. *Digital Communications*. — McGraw-Hill, 2008.
25. Antoniou A. *Digital Filters: Analysis, Design, and Applications*. — McGraw-Hill, 2005.
26. Schaumann R., Van Valkenburg M. *Design of Analog Filters*. — Oxford University Press, 2001.

27. Smith S.W. The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing. — California Technical Publishing, 1997.
28. Huelsman L.P. Active and Passive Analog Filter Design. — McGraw-Hill, 1993.
29. Smith S.W. The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing. — California Technical Publishing, 1997.
30. Van Valkenburg M.E. Analog Filter Design. — Oxford University Press, 1982.
31. Antoniou A. Digital Signal Processing. — McGraw-Hill, 2006.
32. Saal H., Ulbrich M. Chebyshev Filters in Modern Electronics. — IEEE Journal, 2012.
33. Williams A.B. Electronic Filter Design Handbook. — McGraw-Hill, 2000.
34. Kuo B.C., Golnaraghi F. Automatic Control Systems. — Wiley, 2002.
35. Widrow B., Stearns S.D. Adaptive Signal Processing. — Prentice-Hall, 1985.
36. Алтай Е.А., Ускенбаева Р.К., Федоров А.В. О методах повышения точности измерения биосигнала для системы IoB // Сборник докладов 27-й Международной конференции по мягким вычислениям и измерениям. СПб: СПб ГЭТУ ЛЭТИ, 2024. С. 28- 31.
37. Алтай Е.А., Кремлев А.С. Оценка точности обработки электрокардиосигнала методом каскадной широкополосной режекторной фильтрации // Вестник Российского нового университета. Серия: Сложные системы: модели, анализ и управление. 2020. №. 2. С. 18-28
38. Altay Y. A., Ableshe G., Fedorov A. V. SINGLE-FREQUENCY FILTER FOR SIGNAL PROCESSING // Science News of Kazakhstan. – 2025. – №4. – P. 142.
39. Altay Y. A., Ayazbay A.A.E., Uskenbayeva R.K., Fedorov A.V., Ableshe G., Talasbayev A.R. Single-Frequency Interference Suppression Method Using a Feedback-Structured Notch Filter with Gain Variation // IEEE VI International Conference on Control in Technical Systems. – 2025. – P. 155-160.

7M07107 – «Робототехника және мехатроника» мамандығының студенті

Әблеш Ғалымжан
дипломдық жобасына (жұмысына)

СЫН ПІКІР

Тақырыбы: Режекторлық сүзгі параметрлерінің сигналды өлшеу дәлдігіне әсерін зерттеу

ЖҰМЫСҚА ЕСКЕРТУ ЖАСАУ

Ғалымжанның диссертациялық жұмысы режеторлық сүзгінің параметрлерін баптап, олардың сигналға қалай әсер ететінін бағалайды.

Жобаның құрылымы жақсы құрастырылған және кең теориялық шолуға ие, сонымен қатар режеторлық сүзгілердің MATLAB программасында симмуляция жасап режетторлық сүзгі параметрлері өзгергенде сүзгілеу нәтижелері көрсетілген.

Практикада алынған нәтижелерді роботтық және мехатрондық объектілерді басқару жүйелерін жобалауда, сондай-ақ нақты әлемдегі өлшеу және басқару құрылғыларындағы сандық сүзгілерді конфигурациялауда пайдалану мүмкіндігі көрсетілген.

Жоба технологияның шектеулерін тереңірек талдаудан пайда көре алар еді. Өртүрлі жағдайларда оның тиімділігі туралы объективті деректер алу үшін құрылғыны сынайтын өнеркәсіптік құрылғылар санын кеңейту де пайдалы болар еді.

ЖҰМЫС БАҒАСЫ

Магистрант Әблеш Ғалымжанның диссертациясы жоғары теориялық және әдіснамалық деңгейде жазылған, логикалық презентациямен, дәлелді қорытындылармен және талдаудың жеткілікті тереңдігімен сипатталады. Автор ғылыми әдебиеттермен, математикалық модельдермен және заманауи компьютерлік модельдеу құралдарымен жұмыс істеу шеберлігін көрсетті.

Жұмыс жоғары деңгейде аяқталған және жақсы бағаға лайық деп есептеймін.

Сын пікір беруші



Сейдилдаева Аширкуль Кемелбековна

« 10 » 01 2026 ж



Отчет подобия

Метаданные

Название организации	Подразделение
Satbayev University	ИАиИТ
Название	
Режекторлық сүзгі параметрлерінің сигналды өлшеу дәлдігіне әсерін зерттеу	
Автор	Научный руководитель / Эксперт
Әблеш Ғалымжан Нұрғалиұлы	Алтай Ельдос
Количество слов	Количество символов
12257	96507

Объем найденных подбий

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



КП2



КЦ

25

Длина фразы для коэффициента подбоя 2

12257

Количество слов

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		36
Интервалы		0
Микропробелы		5
Белые знаки		0
Парафразы (SmartMarks)		3

Источники

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 Подбоя не отражают прямого плагиата. Необходимо открыть каждый источник и проанализировать содержание и

10 самых длинных фраз

Цвет текста

ПОРЯДКОВЫЙ НОМЕР	НАЗВАНИЕ И АДРЕС ИСТОЧНИКА URL (НАЗВАНИЕ БАЗЫ)	КОЛИЧЕСТВО ИДЕНТИЧНЫХ СЛОВ (ФРАГМЕНТОВ)
База данных RefBooks (0.15 %)		

ПОРЯДКОВЫЙ		КОЛИЧЕСТВО
		ИДЕНТИЧНЫХ СЛОВ
Источник: https://arxiv.org/		
1	The checkerboard family of entangled states of two qutrits	18 (1) 0.15 %
Домашняя база данных (0.00 %)		
ПОРЯДКОВЫЙ НОМЕР	НАЗВАНИЕ	КОЛИЧЕСТВО ИДЕНТИЧНЫХ СЛОВ (ФРАГМЕНТОВ)
Программа обмена базами данных (0.00 %)		
ПОРЯДКОВЫЙ НОМЕР	НАЗВАНИЕ	КОЛИЧЕСТВО ИДЕНТИЧНЫХ СЛОВ (ФРАГМЕНТОВ)
Интернет (0.00 %)		
ПОРЯДКОВЫЙ НОМЕР	ИСТОЧНИК URL	КОЛИЧЕСТВО ИДЕНТИЧНЫХ СЛОВ (ФРАГМЕНТОВ)

Исключенные фрагменты

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

