

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра "Автоматизації виробничих процесів"

"Допущено до захисту"

Зав.кафедрою АВП

к.т.н., доцент

_____ Дідик О.К.

" ____ " _____ 2025р.

**ВИПУСКНА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за другим (магістерським) рівнем вищої освіти**

на тему

**" Розробка і дослідження системи автоматизації процесу
оцінки цукристості буряка "**

**" Development and research of an automation system for
assessing beet sugar content "**

Виконав здобувач вищої освіти ІІ курсу
групи АК-24 М (1,4)

174 «Автоматизація, комп'ютерно-
інтегровані технології та робототехніка»

_____ Саранчук І.І.

« ____ » _____ 2025 р.

Керівник роботи

к.т.н, професор

_____ Каліч В.М.

« ____ » _____ 2025 р.

Рецензент

« ____ » _____ 2025 р.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	
1 Аналіз пристроїв визначення цукристості буряка.....	
1.1 Технологічний процес визначення цукристості.....	
1.2 Сировинна лабораторія.....	
1.3 Фізико-хімічні методи і прилади кількісного аналізу.....	
1.3.1 Круговий поляриметр СМ.....	
1.3.2 Автоматичний спектрополяриметр.....	
1.3.3 Аналіз існуючих методів.....	
2 Принцип роботи і будова поляриметра при визначенні цукристості буряка.....	
2.1 Призначення поляриметра ПЕА.....	
2.1.1 Технічні вимоги.....	
2.2 Будова поляриметра.....	
2.2.1 Фазочутливий випрямляч (ФЧВ).....	
2.2.2 Фотоелектронний помножувач (ФЕП).....	
2.3 Принцип роботи поляриметра.....	
2.4 Аналіз і побудова структурної схеми.....	
2.5 Моделювання процесу поляризації.....	
3 Синтез системи оптимальної корекції поляриметра.....	
3.1 Визначення динамічних характеристик шумів ДКЦ.....	
3.2 Обґрунтування вибору метода синтезу фільтра.....	
3.3 Розрахунок структури і параметрів фільтра.....	
4 Аналіз якості та моделювання запропонованого пристрою.....	
4.1 Аналіз якісних показників фільтра.....	
4.2 Розробка імітаційної моделі запропонованого пристрою.....	
4.3 Моделювання процесу вимірювання.....	
5 Розробка схеми реалізації пристрою.....	
5.1 Інтерфейс зв'язку з ДКЦ.....	
5.2 Структура мікроконтролера MCS-51.....	

5.3 Організація пам'яті і програмно доступні ресурси.....

5.4 Алгоритм реалізації передаточної функції.....

Висновок.....

Література.....

Додаток А. Охорона праці.....

ВСТУП

Цукор є необхідним елементом у харчуванні людини та відіграє важливу роль у підтриманні енергетичного балансу організму. Зниження рівня глюкози в крові негативно впливає на самопочуття, водночас її надмірне споживання може спричиняти розвиток серйозних захворювань, зокрема цукрового діабету. Тому вартість цукру має залишатися доступною для населення, що зумовлює потребу державної підтримки вирощування цукрових буряків. Ринкова ціна цукру визначається не лише попиту і пропозицією, а й, значною мірою, його якісними показниками. Оцінювання якості здійснюється за сукупністю характеристик, які доцільно поділити на дві основні групи:

- показники зовнішнього стану продукції;
- результати аналізу цукристості.

Переробка цукрових буряків є стратегічно важливою галуззю економіки України, оскільки природні та агрокліматичні умови країни створюють передумови для зайняття провідних позицій на світовому ринку. Проте на сьогодні аграрні підприємства часто не зацікавлені у збільшенні обсягів вирощування цієї культури, оскільки витрати на її виробництво практично дорівнюють доходам, отриманим від реалізації буряків переробним заводам.

Одним із початкових і водночас ключових етапів технологічного процесу на цукрових заводах є визначення цукристості сировини. Значення цього показника характеризує кількість цукру, яку можна отримати з одиниці буряків, і безпосередньо впливає на закупівельну ціну та економічні результати виробництва. На рівень цукристості впливають ступінь забруднення коренеплодів, вміст вологи, а також температурний стан сировини під час зберігання і переробки.

Величина цукристості визначається не лише фізико-хімічними властивостями буряка, але й точністю застосованих методів вимірювання. Сьогодні використовується низка способів визначення цього параметра,

однак найбільш поширеним і базовим залишається оптичний метод, який ґрунтується на застосуванні поляриметрів для аналізу вмісту цукру.

У процесі впровадження автоматизації виробничих операцій зменшується частка фізично важкої праці та зростає продуктивність, що свідчить про перехід до нового етапу машинного виробництва – автоматизованого. За таких умов людина поступово усувається від безпосереднього виконання технологічних операцій, а функції контролю та керування передаються автоматичним системам. Це сприяє покращенню техніко-економічних показників, підвищенню ефективності виробництва та зниженню собівартості готової продукції.

На більшості підприємств України для визначення цукристості цукрових буряків застосовується автоматизована лінія УЛЦ, до складу якої входить поляриметр ПЕА. Принцип роботи лінії полягає в подачі на вхід проби масою близько 3-4 кг буряків і отриманні на виході значення їх цукристості, що дозволяє мінімізувати вплив людського фактора та зменшити похибку вимірювань. Разом з тим результати, отримані за допомогою поляриметра, мають певну нестабільність, що зумовлює необхідність додаткового контролю з боку оператора та аналізу вимірювальних даних.

Зменшення втрат і підвищення результативності аграрного виробництва значною мірою залежать від точності визначення вмісту цукру в буряках. Навіть незначна систематична похибка може призвести до викривлення інформації щодо обсягу та якості врожаю, вирощеного й зібраного в державі. Так, відхилення у вимірюванні цукристості на рівні 0,1% здатне спричинити невизначеність у розрахунках фактичної кількості цукру, що в грошовому вираженні еквівалентно втратам у сотні тисяч гривень.

З огляду на те, що в минулі роки вміст цукру в буряках становив у середньому 16–18 %, тоді як нині цей показник знизився до 11–14 %, питання точного визначення цукристості набуває особливої актуальності.

Похибку, що виникає під час такого вимірювання, доцільно розглядати як динамічну. Її величина визначається обраним методом контролю цукристості та алгоритмами обробки вимірювальних даних. У зв'язку з цим роль достовірного визначення цукристості є надзвичайно важливою для вдосконалення технологій виробництва та підвищення ефективності переробки цукрових буряків у масштабах країни.

Мета і завдання випускної кваліфікаційної роботи полягають у встановленні граничних точнісних характеристик поляриметра типу ПЕА, які можуть бути досягнуті шляхом статистичної обробки результатів вимірювань із використанням мікропроцесорної системи.

Об'єктом дослідження є технологічний процес визначення вмісту цукру в коренеплодах буряка.

Предметом дослідження виступає мікропроцесорна система, призначена для вимірювання та оцінювання цукристості буряка.

Для досягнення поставленої мети в роботі застосовано методи оптимізації, математичного моделювання об'єктів автоматизації та операційного обчислення, а також підходи до підвищення точності вимірювальних засобів, що дозволяють обґрунтовано обирати оптимальні датчики й вимірювальні пристрої.

Розрахункові дослідження виконувалися з використанням сучасних персональних комп'ютерів із залученням пакетів прикладного програмного забезпечення для обробки та аналізу результатів.

1 Аналіз пристроїв визначення цукристості буряка

1.1. Технологічний процес визначення цукристості

Виготовлення цукру-піску та рафінованого цукру з цукрового буряка або тростини є багатостадійним процесом, що поєднує низку взаємопов'язаних фізичних і хімічних перетворень вихідної сировини. В умовах України ключовим джерелом сировини для цукрової промисловості виступає цукровий буряк, що зумовлено природно-кліматичними особливостями та сформованою аграрною базою.

Цукровий буряк належить до родини маревих і характеризується складною внутрішньою будовою та змінним хімічним складом, який значною мірою залежить від якості посівного матеріалу, агротехнічних заходів і кліматичних умов вирощування. Сукупність основних компонентів коренеплоду, включно з сахарозою, водою, органічними та мінеральними речовинами, може бути узагальнено подана у вигляді структурної схеми рис.1.1.

У цілому технологічний цикл виробництва цукру з цукрового буряка складається з кількох послідовних стадій: приймання та підготовка сировини, її попередня й теплова обробка, а також пакування готової продукції й подальше зберігання.

Під час надходження цукрового буряка на підприємство сировинна лабораторія здійснює комплексний контроль якості отриманої сировини. Технологічна придатність коренеплодів визначається сукупністю показників, серед яких ключовими є цукристість і чистота бурякового соку. Ці параметри перебувають у тісному взаємозв'язку, оскільки зі зростанням вмісту цукру, як правило, підвищується й рівень його чистоти.

Операції з приймання буряка, відбору проб, визначення ступеня забрудненості та встановлення цукристості виконуються відповідно до вимог ДСТУ 17421–92 «Цукровий буряк для промислової переробки. Вимоги при

заготівлі», а також згідно з умовами договорів, контрактів і чинних інструкцій з приймання, зберігання та обліку сировини.

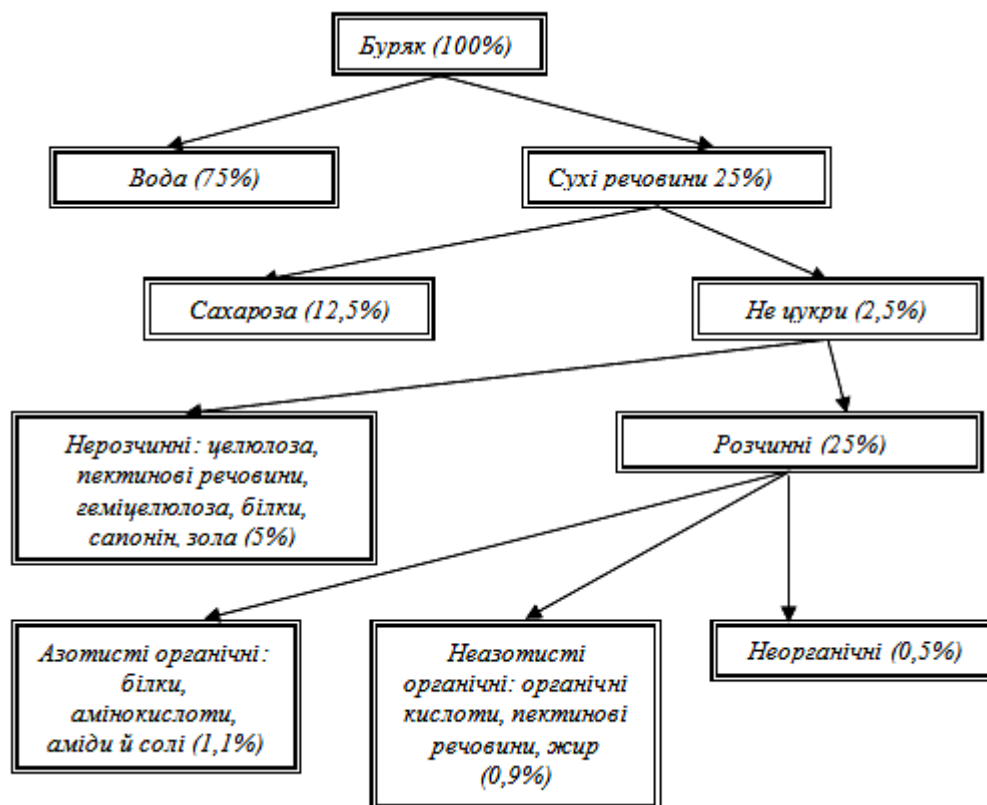


Рисунок 1.1 – Хімічний склад цукрового буряка

Коренеплоди цукрового буряка, що допускаються до переробки, мають відповідати встановленим нормативним вимогам щодо зовнішнього вигляду, фізико-хімічних показників і ступеня забрудненості, що забезпечує стабільність технологічного процесу та високу якість готового цукру:

- фізичний стан не втратили тургор;
- цвітушні коренеплоди не більше 1 %;
- підв'ялені коренеплоди не більше 5 %;
- коренеплоди з сильними механічними пошкодженнями не більше 12 %;
- зелена маса не більше 3 %;
- вміст муміфікованих, підморожених, загнивших коренеплодів не допускається.

Партії цукрових буряків проходять первинний огляд, після чого здійснюється їх класифікація за встановленими категоріями та визначення маси разом із транспортним засобом. Далі виконується оцінка загального рівня забрудненості сировини, а показник цукристості визначається на напівавтоматичній установці типу УЛС-1.

1.2 Сировинна лабораторія

Основним засобом для вимірювання цукристості цукрових буряків є автоматизований комплекс типу УЛЦ-1 (рис. 1.2), який забезпечує виконання до 40 аналізів за годину та характеризується базовою похибкою вимірювань на рівні $\pm 0,2$ °S [1].

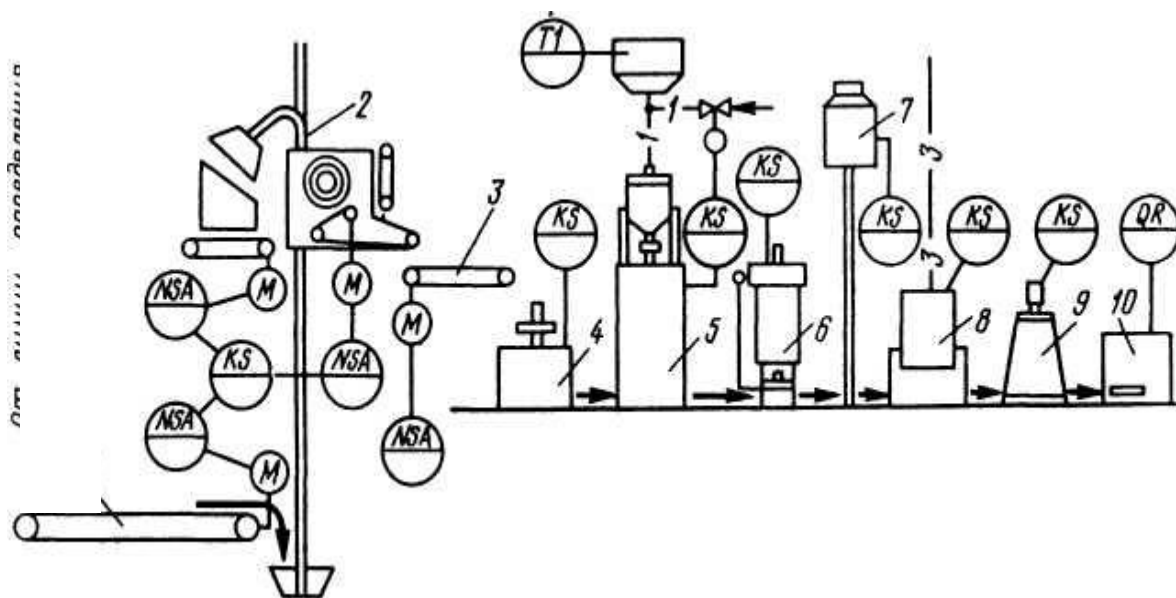


Рисунок 1.2 – Лінія визначення цукристості буряка:

1,3 – конвеєри; 2 – скіповий підйомник; 4 5,7 – дозатори мезги, води і свинцевого оцту; 6 – подрібнювач мезги; 8 – фільтраційний пристрій; 9 – проточна кювета; 10 – поляриметр; Т1 – термометр; КS – пристрій керування електроприводами устаткування; NСА – пускова апаратура; QP – цифродрукуючий пристрій; М – електродвигун.

За допомогою пристроїв КS здійснюється керування конвеєрними лініями 1 і 3, скіповим підйомником 2, дозувальними вузлами мезги 4, води 5 та свинцевого оцту 7, подрібнювачем мезги 6, а також фільтраційним блоком

8 і проточною кюветою 9. Контроль температури води виконується за показами термометра. Пускова апаратура електроприводів типу NSA взаємно блокується відповідно до потоково-транспортної логіки роботи обладнання. Для підвищення надійності експлуатації передбачено світлову та звукову сигналізацію несправностей транспортної системи.

Підготовка дигерату для подальших вимірювань у поляриметрі 10 реалізується за часовою програмою, яка формується релейним блоком фільтраційного пристрою. Процес відбувається по двох паралельних каналах із фазовим зсувом між циклами їх роботи, що становить близько 50 с. Тривалість одного робочого циклу кожної гілки дорівнює приблизно 100 с. Така організація процесу забезпечує виконання всіх необхідних операцій підготовки проб та дозволяє автоматичному поляриметру визначати цукристість відібраного буряка. Отримані результати вимірювань виводяться у вигляді друківаних даних за допомогою цифродрукувального пристрою QR.

Технічні дані

- продуктивність аналізів в годину, не менш 40;
- межа основної абсолютної похибки, що допускається, лінії - $\pm 0,2\%$;
- поляриметра - $\pm 0,05$ °S;
- дозатора свинцевого оцту - $\pm 0,1$ мол;
- межа основної похибки дозатора вагового для води - $\pm 1\%$;
- безперервна робота лінії, годин, не більш - 8;
- перерви між періодами безперервної роботи не менше - 0,5 ч;
- площа, що займає лінія м² не більш - 13;
- споживана потужність, кВт, не більш - 15;
- по стійкості до кліматичних впливів лінія відноситься до групи I за ДСТ 9763-67 - 1;
- по стійкості до механічних впливів і захищеності від впливу навколишнього середовища виконання лінії звичайне за ДСТ 12997-67.

1.3 Фізико-хімічні методи і прилади кількісного аналізу

Фізико-хімічні методи широко використовують у кількісному аналізі для розв'язання двох основних груп аналітичних задач [2].

Перший напрям передбачає визначення вмісту речовини на основі фізико-хімічних характеристик розчину. У певних інтервалах концентрація компонента пов'язана з окремими фізико-хімічними параметрами прямою пропорційною залежністю. Зокрема, зі зростанням концентрації змінюються показник заломлення, оптична густина, кут обертання площини поляризації світла, електропровідність середовища, а також значення електричного струму, що протікає через розчин за заданої різниці потенціалів. Це дає змогу кількісно оцінювати склад розчину без безпосереднього виділення аналізованої речовини.

У загальному виді така залежність виражається формулою

$$C=Kf \quad (1.1)$$

де C – концентрація речовини; K – коефіцієнт пропорційності; f – фізико-хімічні властивості розчину.

Цю закономірність широко застосовують для кількісного визначення вмісту речовин за допомогою методів, що базуються на вимірюванні відповідних фізико-хімічних характеристик розчинів, зокрема рефрактометрії, фотометрії, поляриметрії, кондуктометрії, потенціометрії та полярографії. Зазначені підходи об'єднують у групу методів прямого, або безпосереднього, фізико-хімічного аналізу.

У об'ємних методах аналітичної хімії точку еквівалентності визначають за зміною фізико-хімічних властивостей досліджуваного розчину. Фізико-хімічні способи встановлення моменту еквівалентності отримали назву методів фізико-хімічного титрування. Найбільш поширеними серед них є потенціометричне, кондуктометричне, фотометричне та амперометричне титрування.

До фізико-хімічних методів аналізу належить широка група оптичних способів, таких як рефрактометрія, поляриметрія, фотометрія,

спектрофотометрія, колориметрія й нефелометрія, а також електрохімічні методи – кондуктометрія, потенціометрія та полярографія. Окреме місце займають хроматографічні методи, серед яких іонообмінна, паперова, тонкошарова та газова хроматографія, що забезпечують високу чутливість і селективність аналізу.

Оптичні методи.

Рефрактометрія ґрунтується на визначенні кута заломлення світлового променя під час переходу між двома різними середовищами. Для проведення вимірювань застосовують спеціальні оптичні прилади – рефрактометри, у яких одне середовище представлено скляною призмою, а друге – досліджуванним розчином. Оскільки показник заломлення змінюється залежно від кількості розчинених у воді речовин, такий метод дає змогу визначати їх концентрацію, зокрема вміст сухих речовин у розчині.

Поляриметрія є методом визначення оптичного обертання, тобто зміни орієнтації площини поляризації поляризованого світла під дією оптично активних сполук. Оптична активність властива переважно органічним речовинам, молекули яких містять асиметричні атоми вуглецю. Такі сполуки здатні обертати площину поляризації світла за годинниковою стрілкою – правообертання (+) або у протилежному напрямку – лівообертання (–). До оптично активних речовин належать усі моносахариди. Кількісною характеристикою оптичної активності є питома обертальна здатність $[\alpha]^{20D}$, що визначається як кут повороту площини поляризації під час проходження світла крізь шар розчину завтовшки 0,1 м з концентрацією речовини 1 г у 1 мл.

Для деяких цукрів $[\alpha]^{20D}$ значно залежить від їх концентрації (табл.1.1).

Отже, значення кута обертання площини поляризації, яке визначається вмістом цукру в розчині, його питомою оптичною активністю та довжиною шляху світла крізь шар рідини, дає можливість обчислити концентрацію цукру, виражену в г на 100 мл розчину

$$C = \alpha * 100 / [\alpha] * 1 \quad (1.2)$$

Таблиця 1.1 – Значення $[\alpha]_{D}^{20}$ з урахуванням залежності від концентрації

Вуглевод	$[\alpha]_{D}^{20}$
Сахароза	+66,5
Глюкоза	$+52,5+0,0227C+0,00022C^2$
Фруктоза	$-(91,33+0,164C-0,00086C^2)-20$
Інвертний цукор	-20
Рафіноза (ангідрид)	+123,1
Мелібіоза	+145
Крохмаль	+196,4

Визначення кута повороту площини поляризації здійснюють за допомогою спеціальних приладів, які називають поляриметрами.

Фотометричні методи аналізу ґрунтуються на кількісному визначенні інтенсивності світлового випромінювання, що проходить крізь речовину, її розчин або суспензію, а також на вимірюванні світла, розсіяного чи відбитого дисперсною системою. Залежно від довжини хвилі випромінювання, способу реєстрації сигналу та ширини спектральної смуги розрізняють кілька різновидів фотометрії. До них належить колориметрія, яка передбачає візуальне оцінювання світлового потоку після проходження через зразок, та фотоколориметрія, де інтенсивність світла фіксується за допомогою фотоелектричних перетворювачів.

Окрему групу складають методи, що базуються на реєстрації розсіяного випромінювання: нефелометрія, у якій використовується візуальне спостереження, і фотонфелометрія, де застосовуються електронні засоби вимірювання. Спектрофотометрія передбачає визначення інтенсивності монохроматичного світла з точно заданою довжиною хвилі, що пройшло через досліджувану речовину. За спектральною областю розрізняють ультрафіолетову, видиму та інфрачервону спектрофотометрію, кожна з яких використовується для аналізу різних властивостей і складу речовин.

Кожна хімічна речовина має здатність вибірково поглинати електромагнітне випромінювання певної довжини хвилі. Залежно від природи сполуки поглинання може відбуватися в ультрафіолетовому,

видимому або інфрачервоному діапазонах спектра. Речовини, для яких характерне поглинання випромінювання у межах видимої області, сприймаються оком як забарвлені. Ступінь ослаблення світлового потоку визначається індивідуальними фізико-хімічними властивостями речовини, її концентрацією у розчині та оптичною довжиною шару, через який проходить світло. Кількісний зв'язок між цими параметрами описується фундаментальним законом фотометрії – законом Бугера–Ламберта–Бера, який лежить в основі спектрофотометричних методів аналізу.

$$\lg(I_0/I) = KCB; D = KCB \quad (1.3)$$

де I_0 – інтенсивність падаючого світла; I – інтенсивність світла, що пройшов через речовину; K – специфічна константа речовини; C – концентрація речовини (в розчині); B – товщина шару речовини [3].

Колориметрія та нефелометрія належать до оптичних методів аналізу, що базуються на вимірюванні інтенсивності світлового потоку після проходження через досліджувану речовину. У колориметричному аналізі оцінка інтенсивності забарвлення здійснюється за допомогою трьох візуальних підходів: зіставлення кольорів, використання стандартних шкал та методу послідовного розведення.

Метод зіставлення забарвлень реалізується за допомогою спеціалізованих приладів – колориметрів. Його принцип ґрунтується на залежності між насиченістю кольору розчину та товщиною шару, через який проходить світло. Зміна товщини шару дозволяє досягти візуальної рівності інтенсивності забарвлення порівнюваних зразків.

У системі хіміко-технологічного контролю цукрового виробництва раніше широко застосовувався метод вирівнювання кольору для оцінювання кольоровості проміжних і кінцевих продуктів. Для цього використовували колориметр типу КСМ, у якому забарвлення досліджуваного розчину порівнювали з еталонними скельцями, пофарбованими у жовто-бурі відтінки.

Еталонні скельця випускалися з різною інтенсивністю забарвлення, зокрема нормальні, половинні, чвертьнормальні та восьминормальні. У

деяких випадках замість одного нормального еталона застосовували комбінацію двох чвертьнормальних скелець, розміщених одне над одним, що дозволяло досягти необхідної оптичної густини для порівняння.

Візуальний метод оцінювання інтенсивності світлового потоку широко застосовується у фотометричних приладах. У фотометрах зрівнювання світлових потоків здійснюється не шляхом зміни концентрації або товщини шару розчину, а за рахунок часткового обмеження потоку світла, що реалізується за допомогою діафрагми чи оптичного клина. Саме на принципі регулювання світлового потоку діафрагмою ґрунтується робота візуальних фотометрів типу ФМ-56 та ФМС-56.

Під час вимірювань використовують дві кювети або склянки: в одну поміщають досліджуваний розчин, у другу – еталонний зразок. Розчин порівняння зазвичай являє собою чистий розчинник або суміш реактивів без наявності визначуваної речовини. Урівноваження інтенсивностей світлових потоків досягається шляхом регулювання положення діафрагми, механічно пов'язаної з відліковим барабаном приладу. За кількістю поділок на шкалі барабана визначають концентрацію аналізованого розчину, а для підвищення точності результатів розрахунки виконують з використанням попередньо побудованих калібрувальних графіків.

Нефелометричний метод ґрунтується на визначенні інтенсивності світлового потоку, який розсіюється частинками, що перебувають у зваженому стані в рідині. Величина розсіяного випромінювання прямо залежить від кількості дисперсних часток, маси речовини, зосередженої в них, а також їхніх геометричних розмірів. За допомогою нефелометрії визначають вміст компонентів, які не розчиняються у водному середовищі, проте здатні утворювати стабільні суспензії.

За конструктивними та функціональними особливостями нефелометри подібні до колориметрів, однак принцип вимірювання відрізняється: реєструється не світло, що проходить крізь зразок, а випромінювання, розсіяне під певним кутом, зазвичай перпендикулярно до падаючого пучка.

Кількісне визначення концентрації речовини здійснюють шляхом використання калібрувальних залежностей, побудованих на основі стандартних суспензій або контрольних мутних розчинів.

Нефелометричний метод, подібно до колориметричного аналізу, використовують переважно для дослідження розчинів із малою концентрацією визначуваного компонента, оскільки за таких умов забезпечується достатня чутливість і точність вимірювань [4].

Фотоколориметрія і спектрофотометрія.

У фотоколориметричних методах визначення інтенсивність світлового випромінювання реєструють із застосуванням фотоелементів – пристроїв, які перетворюють енергію світла на електричний сигнал. Зміна світлового потоку призводить до відповідної зміни сили електричного струму, що генерується фотоелементом.

Конструкція фотоколориметра передбачає таку побудову оптичної схеми, за якої варіації інтенсивності світла після проходження через досліджуваний розчин фіксуються у вигляді значення його оптичної густини. Найбільшого поширення набули фотоколориметри з диференціальною схемою роботи. Світловий потік від лампи розжарювання за допомогою системи дзеркал розділяється на два паралельні пучки з однаковими початковими характеристиками. Кожен із них проходить через світлофільтр, далі через кювету з досліджуванним розчином або з еталонним зразком і спрямовується на відповідний фотоелемент.

Сигнали, сформовані фотоелементами, подаються на вимірювальний пристрій, який реєструє різницю між ними. Вирівнювання інтенсивностей здійснюють за допомогою оптичних клинів, механічно пов'язаних з відліковим барабаном, оснащеним шкалою. У момент, коли світлові потоки стають рівними, покази приладу дорівнюють нулю, а за шкалою барабана визначають значення оптичної щільності аналізованого розчину.

Полум'яна фотометрія є аналітичним методом, який ґрунтується на реєстрації яскравості світлового випромінювання атомів досліджуваної

речовини, збуджених унаслідок нагрівання в полум'ї. Інтенсивність цього випромінювання залежить від концентрації відповідних елементів, що дозволяє використовувати метод для кількісного визначення хімічного складу зразків.

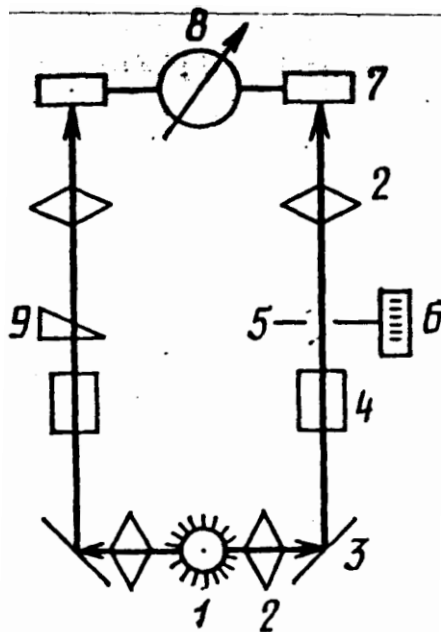


Рисунок 1.3 - Схема фотометричного приладу:

1 – лампа; 2 – конденсор; 3 – дзеркало; 4 – кювети, 5 – діафрагма; 6 – відліковий барабан; 7 – фотоелемент; 8 – гальванометр; 9 – оптичний клин

Зазвичай аналізований розчин розпилюють за допомогою струменя стисненого повітря або кисню та у формі дрібнодисперсної суспензії подають у безбарвне полум'я газового пальника, що функціонує на ацетилені чи водні. За наявності в розчині іонів елементів, які легко збуджуються, у полум'ї спостерігається характерне для відповідного елемента забарвлення, зумовлене переходами збуджених атомів у нижчі енергетичні стани та випромінюванням світла певної довжини хвилі. Під час введення зразка в полум'я атоми відповідного елемента збуджуються, унаслідок чого саме полум'я набуває характерного забарвлення. Рівень випромінювання зазвичай прямо залежить від вмісту визначуваного компонента в розчині в межах робочого діапазону концентрацій. Виділення спектральної лінії, притаманної

конкретному елементу, та подальшу реєстрацію інтенсивності світлового потоку здійснюють за допомогою полум'яного фотометра (рис. 1.4), який налаштований на сприйняття випромінювання з фіксованою довжиною хвилі. Один вимірювальний цикл дає можливість визначити кількісний вміст лише одного елемента в досліджуваній речовині.

Електрохімічні методи аналізу ґрунтуються на використанні електрохімічних явищ, які відбуваються в розчинах під час взаємодії електродів із досліджуванним середовищем та дії електричного струму. Такі методи дають змогу визначати кількісний склад речовин за параметрами електрохімічних процесів, що супроводжують перенесення заряду та перебіг окисно-відновних реакцій.

Потенціометричний метод базується на вимірюванні різниці електричних потенціалів між електродами, зануреними в розчин аналізованої сполуки. Величина потенціалу формується в результаті електродних окисно-відновних процесів і залежить від концентрації визначуваного компонента, що дозволяє використовувати потенціометрію для аналітичних вимірювань.

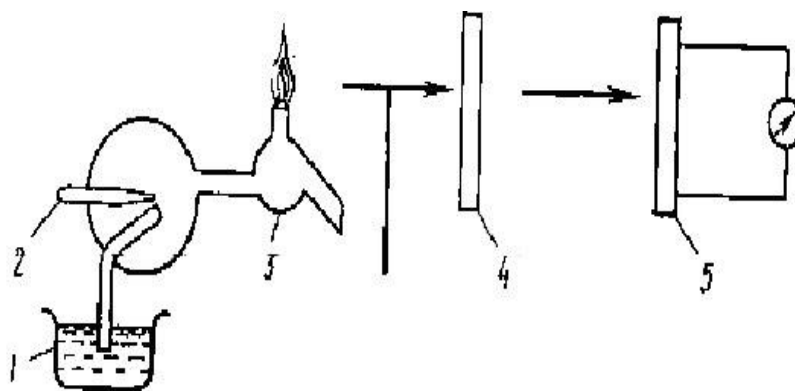


Рисунок 1.4 - Принципова схема полум'яного фотометра

1 - кювета з випробуваним розчином; 2 - розпилувач; 3 - паяльник; 4 - світлофільтр; 5 - фотоелемент

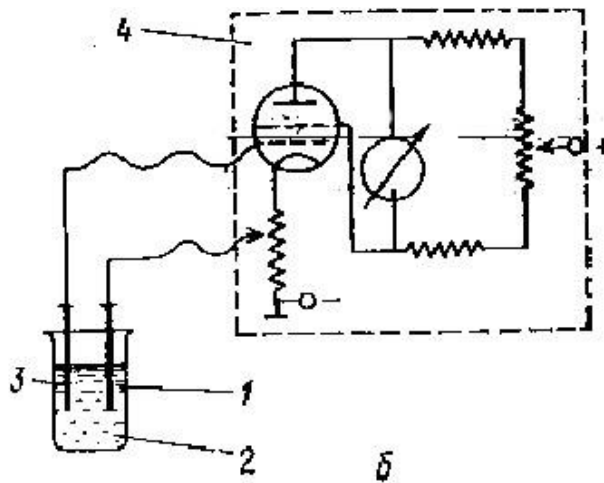


Рисунок 1.5 - Схема потенціометра:

1 - електрод порівняння; 2 – аналізований розчин; 3 - робочий електрод; 4 –
потенціометр

У потенціометричному методі аналізу застосовують скляні електроди, електродний потенціал яких визначається активністю та концентрацією водневих іонів у розчині.

Під час виконання потенціометричних вимірювань у досліджуваній розчин занурюють два електроди: індикаторний, чутливий до іонного складу середовища, та електрод порівняння зі стабільним і незмінним потенціалом. Обидва електроди з'єднують з вимірювальним приладом – потенціометром, після чого проводять реєстрацію різниці потенціалів. Визначення електродного потенціалу здійснюється за допомогою спеціалізованих потенціометричних приладів, що забезпечують високу точність і відтворюваність результатів вимірювань.

1.3.1 Круговий поляриметр СМ

Круговий поляриметр типу СМ (рис. 1.6) використовується для вимірювання величини обертання площини поляризованого світла під час проходження крізь рідкі оптично активні середовища, що дозволяє визначати їхні оптичні властивості та концентраційні характеристики [7].

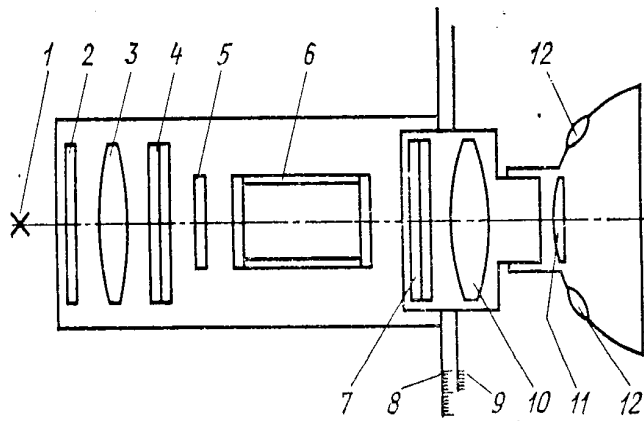


Рисунок 1.6 - Схема кругового поляриметра СМ

1 - освітлювач; 2 – світлофільтр; 3 – оптична система; 4 – поляризатор; 5 – кварцова пластинка; 6 – кварцова кювета; 7 – аналізатор; 8 – градусна шкала; 9 – ноніус; 10 – об’єктив; 11 – окуляр; 12 - лупа.

Освітлювальний елемент 1, у ролі якого використовується лампа розжарювання або натрієва лампа типу ДНаО-140, розміщується у фокальній площині оптичної системи 3. Конструкція вузла освітлення передбачає можливість регулювання положення лампи для суміщення нитки розжарення з оптичною віссю приладу. Під час роботи з лампою розжарювання перед оптичною системою 3 встановлюється жовтий світлофільтр 2.

Паралельний монохроматичний світловий пучок, сформований оптичною системою 3, проходить крізь поляризатор 4, виконаний у вигляді поляроїда, закріпленого між двома скляними пластинами. Далі випромінювання потрапляє на кварцову пластинку 5, яка спільно з поляризатором формує напівтіньове зображення з потрійним полем зору, після чого проходить через кварцову кювету 6 з досліджуванним розчином. Довжину кювети зазвичай підбирають так, щоб при концентрації розчину 10^{-3} кг/дм³ кут обертання площини поляризації становив $\psi = 1^\circ$.

За кюветою встановлено аналізатор 7, конструктивно подібний до поляризатора 4, а також телескопічний вузол, що включає об’єктив 10 та окуляр 11, через який здійснюється спостереження під час вирівнювання яскравості окремих ділянок поля зору.

Зчитування результатів проводиться за градусною шкалою 8 нерухомого лімба з розміткою від 0° до 360°. Відлік уточнюється за допомогою двох ноніусів 9, розташованих діаметрально протилежно, кожен з яких має 20 поділок з ціною поділки 0,1°. Для зменшення впливу ексцентриситету лімба визначають середнє значення показів обох ноніусів. Спостереження шкали лімба та ноніусів здійснюється через збільшувальні лупи 12.

Таблиця 1.2 - Технічні показники кругового поляриметра СМ

Діапазон показань кута обертання площини поляризації	0-360°
Основна погрішність поляриметра, не більш	±0,1°
Чутливість поляриметра	0,1°
Обсяг кювет, мол, не більш	5; 8; 10; 20
Джерело світла	лампа натрієва ДНАС-18
Живлення від мережі змінного струму	220В - 50Гц
Габаритні розміри, мм	590x168x405
Маса, кг	8

1.3.2 Автоматичний спектрополяриметр

Автоматичний спектрополяриметр (рис. 1.7) використовується для визначення кута обертання площини поляризації світлового випромінювання в спектральному інтервалі довжин хвиль від 0,24 до 0,60 мкм.

Світлове джерело 1 є змінним: для досліджень у видимому діапазоні застосовується лампа розжарювання, а для вимірювань в ультрафіолетовій зоні – ртутна лампа надвисокого тиску. Світловий потік, сформований джерелом 1, проходить через подвійний монохроматор 2, оснащений дзеркальною оптичною системою та кварцовими призмами, що забезпечує виділення необхідної довжини хвилі. Далі випромінювання надходить на електромеханічний поляризатор-модулятор 4, після чого проходить через досліджуваний зразок 5 та аналізатор 6. Зареєстрований світловий сигнал

фіксується фотопомножувачем 7, який перетворює оптичну інформацію в електричний сигнал для подальшої обробки.

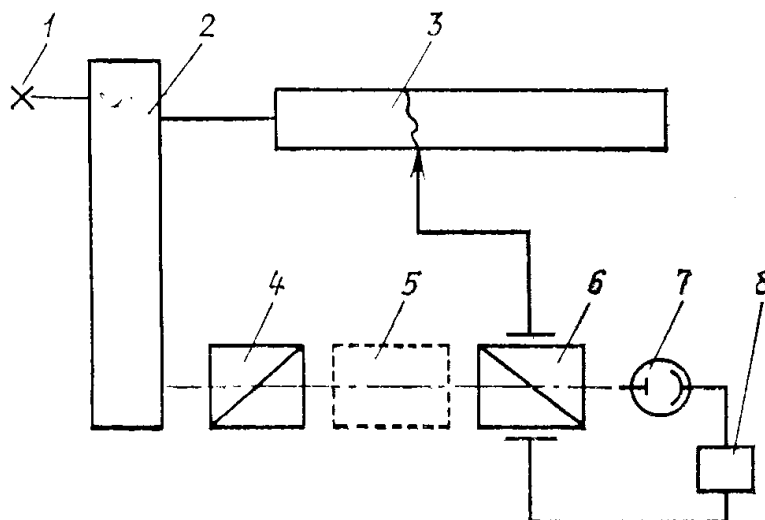


Рисунок 1.7 - Схема автоматичного спектрополяриметра

1 - лампа; 2 – монохроматор; 3 - самописець; 4 – поляризатор-модулятор; 5 – дослідний зразок; 6 – аналізатор; 7 – фото помножувач; 8 - підсилювач

Зміна кута між напрямками коливань світла, які пропускаються поляризатором та аналізатором, призводить до відповідної зміни частоти змінної складової світлового потоку, що надходить на фотопомножувач.

Оптичний сигнал перетворюється на електричний, підсилюється в підсилювачі 8 і подається на керуючу обмотку реверсивного електродвигуна. Через редуктор двигун здійснює поворот аналізатора 6 до моменту, коли в сигналі повністю зникає перша гармоніка. Процес обертання аналізатора фіксується самописцем 3, який з'єднаний із передавальним механізмом, пов'язаним зі шкалою довжин хвиль монохроматора.

Застосування даного приладу дає змогу визначати обертальну дисперсію зразків із коефіцієнтом поглинання до 80 %. Діапазон вимірювання кутів оптичного обертання становить $\pm 2^\circ$.

Таблиця 1.3 - Технічні показники кругового поляриметра СМ

Діапазон виміру концентрації, %	0...20
Чутливість	0,1%
Точність виміру	0,15%
Обсяг кювети, мол	25
Споживана потужність, ВА	10
Розміри, мм	150x82x262
Маса, кг	1,8

1.3.3 Аналіз існуючих методів

У цьому розділі проаналізовано кілька поширених способів і технічних засобів визначення цукристості. Розглянуті прилади характеризуються як певними перевагами, так і істотними обмеженнями. Їх основною перевагою порівняно з автоматичними поляриметрами є простота експлуатації в умовах лабораторій. Такі засоби доцільно застосовувати на малих виробництвах або під час досліджень, де не вимагається висока точність вимірювань.

Водночас зазначена простота обумовлює й недоліки цих приладів. На достовірність результатів істотно впливають різноманітні чинники, зокрема зниження прозорості оптичних елементів у процесі тривалої експлуатації, зміщення лінз відносно оптичної осі, особливості фокусування світлового потоку, а також людський фактор, пов'язаний із втомою оператора.

Сукупність перелічених впливів призводить до зростання похибок вимірювання, що безпосередньо відбивається на фінансових результатах бурякосдатчиків, які можуть недоотримувати кошти за фактичну цукристість сировини.

Більшість зазначених недоліків усувається при використанні автоматичних спектрополяриметрів, однак і ці прилади не забезпечують абсолютної точності. Найбільш стабільні та надійні показники, за результатами експлуатаційного досвіду, демонструє поляриметр типу ПЕА, який широко застосовується на цукрових заводах нашого регіону та по всій території країни.

2 Принцип роботи і будова поляриметра при визначенні цукристості буряка

2.1 Призначення поляриметра ПЕА.

Пристрій використовується для визначення масової частки сахарози в коренеплодах цукрових буряків шляхом водної дигестії під час лабораторних досліджень на лінії УЛЦ. Поляриметр забезпечує виконання до 40 аналізів за одну годину, працює в діапазоні вимірювань від 0 до 22,4 °S та характеризується допустимою основною похибкою не більше $\pm 0,05$ °S, що гарантує достатню точність результатів.

Поляриметр ПЕА забезпечує стабільну роботу лінії УЛЦ протягом 16 годин на добу з технологічною перервою тривалістю 0,5 години після кожних 8 годин безперервного функціонування, що необхідно для охолодження елементів приладу та проведення профілактичних заходів. До складу поляриметра ПЕА входять датчик контролю цукристості (ДКЦ), електронний блок поляриметра (БЕП) та пристрій цифрової реєстрації (ПЦР).

Датчик ДКЦ виконаний у вигляді вертикального вимірювального каналу, всередині якого розміщені освітлювальний елемент, поляризатор, модулятор, компенсуючий вузол, аналізатор і фотопомножувач, що забезпечують формування та обробку оптичного сигналу. Електронний блок поляриметра реалізовано як настільний переносний прилад у міцному металевому корпусі, при цьому всі елементи керування та індикації зосереджені на передній панелі для зручності експлуатації та обслуговування.

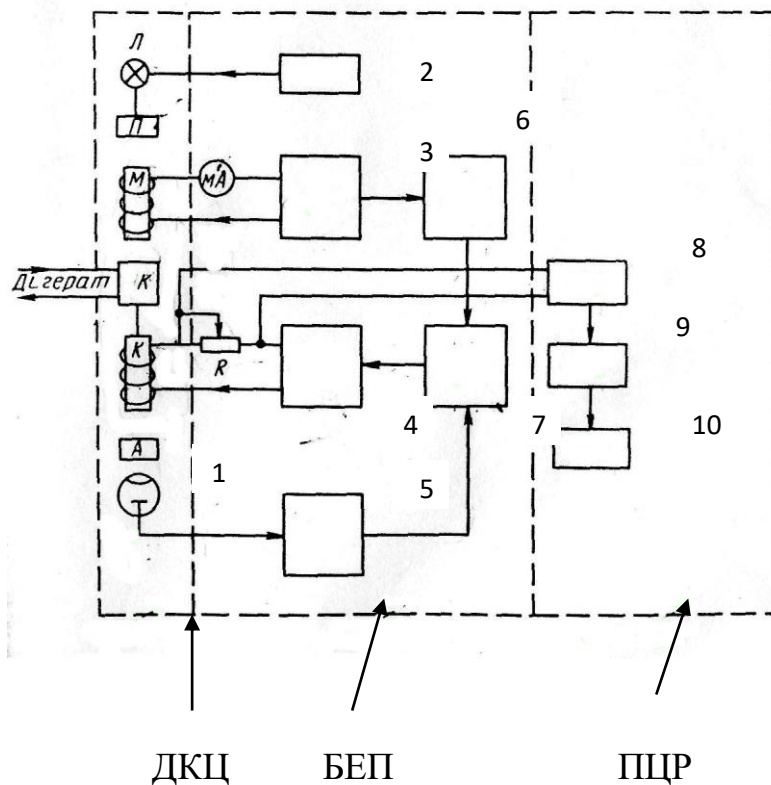


Рисунок 2.1 – Блок-схема поляриметра ПЕА:
 Л- лампа; П- поляризатор; СТ – стабілізатор струму; К – вимірювальна кювету; А- аналізатор. М- модулятор; К- компенсатор; 1- фотоелектронний помножувач; мА – міліамперметр; R – резистор; 3 – генератор; 5 – підсилювач змінного струму; 4- підсилювач постійного струму; 7- випрямляч; 9- блок узгодження; 10- електрокерований пристрій; 6- блок опорної напруги; 8- цифровий вольтметр.

2.1.1 Технічні вимоги

Граничне значення основної похибки ПЕА встановлюється не вище $\pm 0,05^{\circ}S$. Додаткова похибка поляриметра, що виникає внаслідок відхилення температури навколишнього середовища від номінального значення $+20 \pm 2^{\circ}C$ до крайніх робочих меж ($+10^{\circ}C$ та $+35^{\circ}C$), не повинна перевищувати 50 % допустимої основної похибки на кожен інтервал зміни температури у $10^{\circ}C$.

Час блокування ПЕА заходяться в межах від 20 до 50 сек.

Межа вимірювань не менше $+ 22,4^{\circ}S$.

Продуктивність ПЕА - не менш 40 вимірювань в год.

Електроживлення ПЕА здійснюється від однофазної мережі змінного

струму напругою $220\text{В} \pm 10\%$ частотою $50 \pm 1\text{Гц}$ через стабілізатор лінії УЛС-1.

Споживана потужність ПЕА від мережі не більш 500 ВА.

Під час експлуатації поляриметра слід здійснювати контроль нульового показу не рідше одного разу на годину. У разі виявлення відхилень необхідно виконати коригування нульової установки приладу. Допустима похибка нульового значення не повинна перевищувати меж $\pm 0,05 \text{ }^\circ\text{S}$ відповідно до нормативних вимог [11].

2.2 Будова поляриметра

2.2.1 Фазочутливий випрямляч (ФЧВ)

На рис. 2.2 наведено структурну схему безконтактного фазочутливого однонапівперіодного випрямляча, у якій u^* відповідає випрямленій вихідній напрузі, а u_γ^* є сигналом керування або комутації, що визначає режим роботи пристрою.

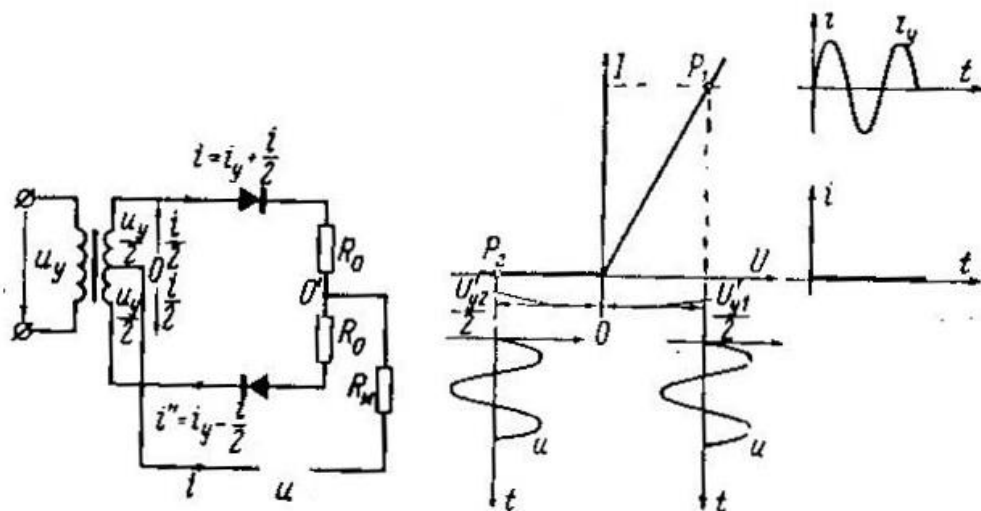


Рисунок 2.2 - Схема безконтактного фазочутливого однонапівперіодного випрямляча

Робота схеми розглядається для випадку, коли U_y перевищує U , де U_y та U є діючими значеннями відповідних напруг. У такому режимі напруга U_y виконує функцію керуючого сигналу, який визначає електричний стан нелінійних елементів схеми – діодів.

Механізм функціонування можна пояснити на основі спрощеної вольт-амперної характеристики вентиля. За умови, коли значення $U_y/2$ є додатним і перевищує U , наприклад $U_y/2$, випрямлячі перебувають у прямому зміщенні (робоча точка P1), унаслідок чого струм через опір R_m може протікати в обох напрямках залежно від прикладеної напруги u . За своїм принципом така ситуація еквівалентна стану замкненого вимикача.

Якщо ж напруга $U_y/2$ набуває від'ємного значення і за модулем також перевищує u (робоча точка P2), діоди переходять у режим зворотного зміщення, і прикладена напруга u не здатна викликати струм у навантаженні. У цьому випадку схема працює аналогічно розімкненому вимикачеві.

При відсутності напруги i по діодах проходять прямі струми

$$i_s = \frac{\sqrt{2}U'y}{2(R_o + R_{np})} \cos \omega t, \quad (2.1)$$

де R_{np} – опір діода в прямому напрямку; R_o – додатковий опір, що обмежує струм у ланцюзі.

З появою напруги u струм через верхній діод збільшиться

$$i' = i_y + i/2, \quad (2.2)$$

а через нижній діод відповідно зменшиться

$$i'' = i_y - i/2. \quad (2.3)$$

Очевидно, в навантажувальній лінії (R_m) струм буде

$$i' - i'' = \frac{u}{R_m + R_o/2} = \frac{u}{R}, \quad (2.4)$$

Оскільки діоди відносно напруги U з'єднані паралельно, у ті напівперіоди, коли вони перебувають у закритому стані, струм у колі навантаження не протікає. Сукупність діодів разом із джерелом напруги U_y функціонально еквівалентна електричному ключу: за додатної напівхвилі керувальної напруги U_s він знаходиться у ввімкненому стані, а за від'ємної – переходить у вимкнений режим.

Передаточна функція ФЧВ

$$W_{\text{фчв}}=1. \quad (2.5)$$

2.2.2 Фотоелектронний помножувач (ФЕП)

Фотоелектронний помножувач (ФЕП) є електровакуумним приладом, у якому фоточутливий електронний елемент поєднано з системою підсилення фотоструму, що працює на основі явища вторинної електронної емісії. Така конструкція дозволяє значно збільшити слабкі світлові сигнали та перетворити їх у вимірюваний електричний струм.

Принцип дії ФЕП наведено на рис. 2.3. Падаючий світловий потік Φ спричиняє емісію електронів з поверхні фотокатода ФК. Утворені фотоелектрони під впливом прискорювального електричного поля рухаються до першого електрода D_1 – дінода. Відносно фотокатода він виконує функцію анода і водночас слугує джерелом вторинної електронної емісії, забезпечуючи початковий етап підсилення сигналу.

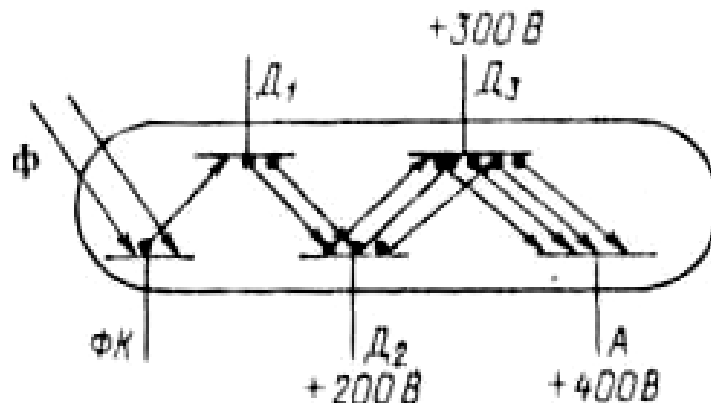


Рисунок 2.3 - Принцип пристрою і роботи ФЕП

Дінод виготовляють із металевого матеріалу, що характеризується високою та стабільною здатністю до вторинної електронної емісії. У результаті первинні електрони фотоструму $I_{\text{ф}}$, які вилітають із фотокатода, потрапляючи на перший дінод D_1 , вибивають із його поверхні вторинні електрони. Їх кількість перевищує число первинних частинок у σ разів, де σ – коефіцієнт вторинної емісії дінода D_1 , що зазвичай має значення кількох одиниць. Таким чином, електронний струм після першого дінода дорівнює $I_1 = \sigma * I_{\text{ф}}$.

Сформований струм I_1 спрямовується до другого дінода D_2 , який перебуває під більшим додатним потенціалом. Унаслідок вторинної емісії з поверхні D_2 виникає електронний потік I_2 , інтенсивність якого у σ разів перевищує струм I_1 . Для спрощення вважатимемо, що всі діоди мають однаковий коефіцієнт вторинної емісії, тому $I_2 = \sigma * I_1 = \sigma^2 * I_\phi$.

Далі електронний потік I_2 надходить на третій діод D_3 , потенціал якого ще вищий. У результаті чергового акту вторинної емісії формується струм $I_3 = \sigma * I_2 = \sigma^3 * I_\phi$. Аналогічний процес багаторазово повторюється на наступних діодах, що забезпечує каскадне підсилення електронного струму.

Із останнього, n -го, дінода D_n електронний струм I_n спрямовується на анод A , унаслідок чого анодний струм дорівнює $I_A = I_n = \sigma^n * I_\phi$. Отже, коефіцієнт підсилення за струмом визначається співвідношенням $k_i = \sigma^n$. Найпростіша однокаскадна схема фотопомножувача включає фотокатод, один діод і анод. У багатокаскадних фотопомножувачах значення підсилення струму може сягати кількох мільйонів, тоді як інтегральна чутливість досягає десятків ампер на люмен. Зазвичай такі прилади функціонують за умов малих анодних струмів і незначних світлових потоків: анодний струм, як правило, не перевищує десятків міліамперів, а вхідний світловий потік може становити 10^{-3} лм і менше.

Оскільки напруга на кожному наступному діоді більша, ніж на попередньому, для роботи фотопомножувача необхідне підвищене анодне живлення, що зазвичай знаходиться в межах 1-2 кВ, і це є одним із його основних недоліків. Живлення фотопомножувачів зазвичай реалізується через резистивний дільник напруги, на який подається повне анодне напруження. У анодне коло вмикається навантажувальний резистор R_H , з якого знімається вихідний електричний сигнал.

Передаточна функція нашого ФЕП

$$W_{\text{ФЕП}} = \frac{k_{\text{ФЕП}}}{T_{\text{ФЕП}} * p + 1}, \quad (2.6)$$

де $k_{\text{ФЕП}}$ – коефіцієнт підсилення $=30$; $T_{\text{ФЕП}}$ – стала часу ФЕП $=3,6 * 10^{-8}$ сек.

Звідси $W_{ФЕП}=30$.

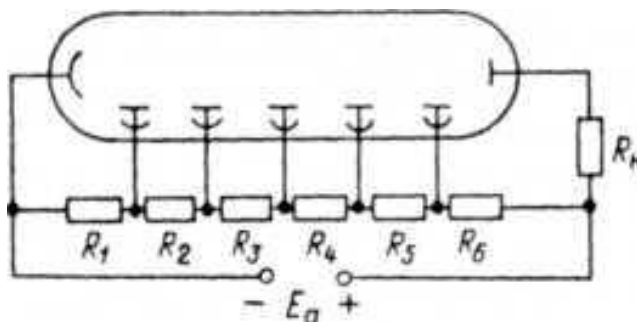


Рисунок 2.4 - Схема включення ФЕП

2.3 Принцип роботи поляриметра

Принцип дії поляриметра заснований на законі Біо

$$\alpha = [\alpha] * d * C / 100 \quad (2.6)$$

де α – кут обертання площини поляризації, град; $[\alpha]$ – питоме обертання, що залежить від довжини хвилі і температури, град/мм; C – концентрація активної речовини в розчині, %; d – товщина шару, мм.

Водний розчин цукру належить до оптично активних середовищ і спричиняє правобічне обертання площини поляризації світла. Значення кута повороту, що залежить від концентрації розчину, визначають за міжнародною цукровою шкалою, відповідно до якої відмітка $100^\circ S$ відповідає куту обертання $\alpha = 40,764 \pm 0,001^\circ$.

Вимірювальний вузол поляриметра реалізований у датчику контролю цукристості ДКЦ. Світловий потік формується лампою розжарювання Л, яка живиться від стабілізатора струму СС з напругою 6В та струмом 1А. У спектрі випромінювання переважає ділянка з довжиною хвилі 546 ± 10 нм, що відбирається за допомогою інтерференційного фільтра. Далі світло проходить через систему оптичних елементів – діафрагму, конденсор і коригувальну діафрагму – після чого надходить на поляризатор П.

Поляризатор перетворює природне світло на лінійно поляризоване, коливання якого відбуваються в одній площині, орієнтація якої визначається кутом між напрямком коливань та горизонтальною віссю. Досліджуваний

цукровий розчин, розміщений у вимірювальній кюветі К, змінює положення площини поляризації на певний кут, значення якого визначається за допомогою аналізатора А. Світловий потік, що виходить з аналізатора, характеризується інтенсивністю Φ (лм) і описується законом Малюса

$$\Phi = \Phi_0 \cdot \cos^2 \theta, \quad (2.7)$$

де Φ_0 – потік світла після поляризатора, лм; θ – кут між напрямком коливань світла, що виходить з поляризатора, і напрямком коливань світла після аналізатора [14].

У поляриметри ПЕА застосовується магнітооптичний модулятор, принцип дії якого ґрунтується на ефекті Фарадея. Сутність цього явища полягає в обертанні площини поляризації плоскополяризованого світлового променя під час його проходження крізь магнітоактивне скло, розміщене в зовнішньому магнітному полі. Величина кута повороту поляризації, що вимірюється в градусах, є прямо пропорційною довжині оптичного шляху світла в матеріалі та напруженості прикладеного магнітного поля, що дозволяє використовувати даний ефект для точних оптичних вимірювань

$$\varphi = p \cdot l \cdot H \cdot \cos \varepsilon, \quad (2.8)$$

де p – постійна Верде, що залежить від природи речовини, довжини хвилі і температури, град/А; l – довжина шляху світла в речовині, м; H – напруженість магнітного поля, А/м; ε – кут між напрямком магнітного поля і напрямком поширення світла, град [11].

Модулятор поляриметра формує гармонічні коливання поляризованого світлового променя з частотою близько 380 Гц, які створюються сигналами генератора Г блока БЕП. Стан та коректність роботи модулятора М контролюються за допомогою міліамперметра mA.

Під час наявності в кюветі К цукрового розчину та визначення його концентрації аналізатор необхідно переміщувати до моменту досягнення мінімальної інтенсивності світлового потоку після нього. Аналогічний результат досягається шляхом повороту поляризованого випромінювання після проходження кювети відносно фіксованого аналізатора в напрямку,

протилежному обертанню площини поляризації оптично активної речовини в кюветі.

Для реалізації такого коригування застосовується компенсатор К, виконаний у вигляді магнітооптичної комірки Фарадея, яка забезпечує точне та кероване обертання площини поляризації світлового променя.

Регулювання сили струму в котушці компенсатора здійснюється за допомогою блока БЕП. Струм, що формується на виході фотопомножувача ФЕП, підсилюється вибіркоким підсилювачем ПС. За відсутності досліджуваної речовини в кюветі та надходженні з фотопомножувача сигналу з частотою 760 Гц прилад фіксує нульове показання. Для встановлення нульового рівня поляриметра компенсатор обладнаний окремою спеціалізованою обмоткою.

У разі наявності цукрового розчину в кюветі сигнал змінного струму з виходу підсилювача ПС подається на фазочутливий випрямляч ФЧВ, де відбувається його випрямлення та визначення знака сигналу. Напрямок обертання площини поляризації встановлюється шляхом порівняння отриманого сигналу з опорною напругою, що формується генератором Г і надходить через блок опорної напруги БОН.

Випрямлений електричний сигнал підсилюється підсилювачем постійного струму та подається на котушку компенсації, яка забезпечує обертання поляризованого світлового потоку до стану мінімального фотоструму фотоелектронного помножувача. Значення компенсаційного струму створює падіння напруги на резисторі R, яке вимірюється цифровим вольтметром і відображається в одиницях цукрової шкали ($^{\circ}S$), що відповідає концентрації цукру в досліджуваному розчині.

Фотоелектронний помножувач, підсилювач змінного струму, фазочутливий випрямляч і компенсаційна котушка формують замкнену систему, у якій ФЕП виконує функцію вимірювального елемента, а компенсатор слугує виконавчим механізмом. Часова стала системи становить близько 40 с і визначається параметрами підсилювача постійного струму.

Напруга, знята з резистора R, подається на вхід каліброваного дільника, розміщеного в блоці узгодження, та використовується для налаштування і градування цифрового вольтметра.

Міжнародна цукрова шкала ($^{\circ}\text{S}$) використовується для кількісної оцінки вмісту сахарози: значення $100\ ^{\circ}\text{S}$ еквівалентне $34,62$ кутовим градусам оптичного обертання. Показник $100\ ^{\circ}\text{S}$ на сахариметрі фіксується у разі, якщо за температури $20\ ^{\circ}\text{C}$ у кюветі довжиною 200 мм міститься водний розчин, що у $100\ \text{cm}^3$ включає 26 г хімічно чистої сухої сахарози [11].

Блок узгодження складається з п'ятирозрядного лічильника порядкового номера зразка та елементів керування пристроями ПЦР. Під час автоматичного режиму роботи поляриметра ПЕА пусковий сигнал надходить на блок узгодження БУ в момент завершення заповнення кювети К датчика ДКЦ дигератом. У блоці керування цей сигнал затримується на $20\text{-}50$ с, що відповідає часу встановлення слідкуючої системи поляриметра. Після закінчення затримки активується цифровий вольтметр ЦВ, виконується одноразове вимірювання, а отримане значення відображається на його індикаторі. Одночасно лічильник номера проби збільшується на одиницю, після чого результат вимірювання з відповідним порядковим номером виводиться на друк за допомогою електрокерованого пристрою ЄУМ-23П [15].

2.4 Аналіз і побудова структурної схеми

З аналізу блок-схеми поляриметра (рис. 2.5) випливає, що пристрій має два вхідні сигнали: перший формується кюветою з соком і відповідає концентрації цукру, другий надходить від генератора та характеризується рівнем напруги. На виході системи визначається значення цукристості буряка. Таким чином, поляриметр розглядається як об'єкт керування з двома вхідними параметрами та однією вихідною величиною. Основним завданням є встановлення функціональної залежності вихідного сигналу від обох

вхідних впливів, результатом чого є визначення передаточної функції поляриметра.

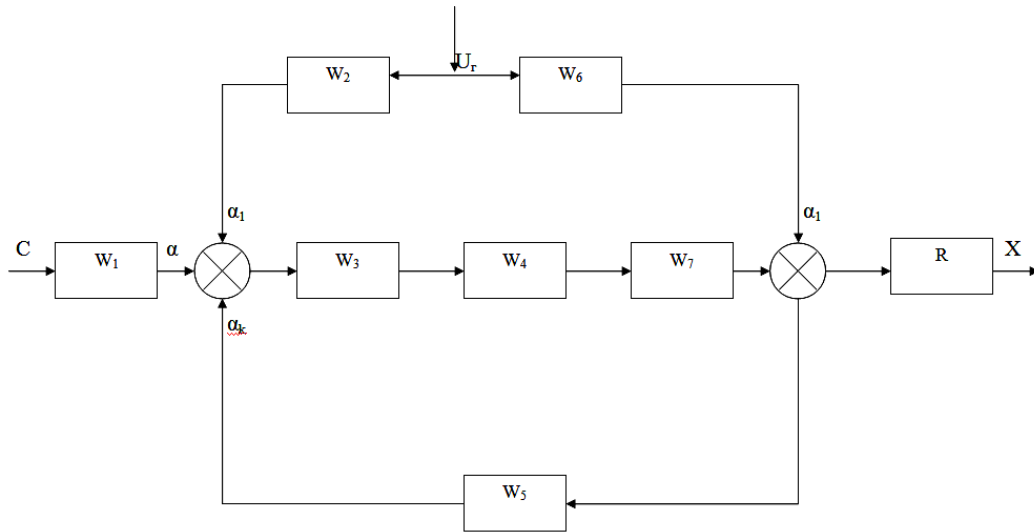


Рисунок 2.5 – Структурна схема поляриметра

В цій схемі використовуються такі позначення:

$W_1 = [\alpha] \cdot d$ – кювета з розчином, де $[\alpha]$ – питоме обертання, що залежить від довжини хвилі і температури, град%/мм $\alpha = 66,43$ град*%/мм, d – товщина шару, мм.

$$W_1 = 66,43 \cdot 20 / 100 = 13$$

W_2 – передаточна функція модулятора (котушки),

$$W_2 = \frac{k_2}{T_2 \cdot p + 1},$$

де $k_2 = 0.123$,

$$T_2 = 12 \text{ с.}$$

W_3 – передаточна функція ФЕП,

$$W_3 = k_3 = 30.$$

W_4 – передаточна функція ПЗС

$$W_4 = \frac{k_4}{T_4 \cdot p + 1},$$

де $k_4 = 5$,

$$T_4 = 0,02 \text{ с.}$$

W_5 – передаточна функція компенсатора (котушки),

$$W_5 = \frac{k_5}{T_5 * p + 1},$$

де $k_5=0.123$,

$$T_5=12 \text{ с.}$$

W_6 – передаточна функція блока опорної напруги

$$W_6=k_6=18.45.$$

W_7 – передаточна функція ФЧВ,

$$W_7= k_7=1.$$

R – змінний опір, Ом, $R= 0.3189$ Ом.

На основі наведеної структурної схеми, з урахуванням раніше визначених параметрів, можна отримати передаточну характеристику поляриметра. Дана функція формується як добуток двох взаємопов'язаних складових, кожна з яких описує окрему ланку перетворення сигналу. W_c – передаточна функція від цукристості, де C – вхідна величина, а X – вихідна, і W_u – передаточна функція від напруги, де U_e – вхідна величина, а X – вихідна

$$W_n = W_c * C + W_u * U_e \quad (2.8)$$

Знайдемо передаточну функцію W_c

$$W_c = \frac{W_3 * W_4 * W_7}{1 + W_5 * W_3 * W_4 * W_7} * R * W_1 = \frac{k_3 * \frac{k_4}{T_4 * p + 1} * R * [\alpha] * d * k_7}{1 + k_3 * \frac{k_4}{T_4 * p + 1} * k_7 * \frac{k_5}{T_5 * p + 1}} =$$

$$\frac{k_3 * k_4 * R * [\alpha] * d * k_7}{T_4 * p + 1} = \frac{k_3 * k_4 * R * [\alpha] * d * k_7 * (T_4 * p + 1)}{(T_4 * p + 1) * (T_5 * p + 1) + k_3 * k_4 * k_7 * k_5} =$$

$$\frac{k_3 * k_4 * R * [\alpha] * d * k_7}{(T_4 * p + 1) * (T_5 * p + 1)}$$

$$\frac{T_4 * p * k_3 * k_4 * R * [\alpha] * d * k_7 + k_3 * k_4 * R * [\alpha] * d * k_7}{T_4 * T_5 * p^2 + (T_4 + T_5) * p + 1 + k_3 * k_4 * k_7 * k_5} = \frac{7462.3 * p + 621.8}{0.24 * p^2 + 12.02 * p + 19.49} \quad (2.9)$$

Знаходимо W_u

$$W_u = \frac{W_3 * W_4 * W_7 * W_2 - W_6 * R}{1 + W_5 * W_3 * W_4 * W_7} = \frac{\left(k_3 * \frac{k_4}{T_4 * p + 1} * k_7 * \frac{k_2}{T_2 * p + 1} - k_6 \right) * R}{1 + k_3 * \frac{k_4}{T_4 * p + 1} * k_7 * \frac{k_5}{T_5 * p + 1}}$$

$$\begin{aligned}
& \frac{\frac{k_3 * k_4 * k_7 * k_2 * R}{(T_4 * p + 1) * (T_2 * p + 1)} - \frac{(T_4 * p + 1) * (T_2 * p + 1) * k_6 * R}{(T_4 * p + 1) * (T_2 * p + 1)}}{(T_4 * p + 1) * (T_5 * p + 1) + k_3 * k_4 * k_7 * k_5} = \\
& \frac{k_3 * k_4 * k_7 * k_2 * R - (T_4 * p + 1) * (T_2 * p + 1) * k_6 * R}{(T_4 * p + 1) * (T_5 * p + 1) + k_3 * k_4 * k_7 * k_5} = \\
& \frac{k_3 * k_4 * k_7 * k_2 * R - T_4 * T_2 * k_6 * R * p^2 - (T_4 + T_2) * k_6 * R * p - k_6 * R}{T_4 * T_5 * p^2 + (T_4 + T_5) * p + 1 + k_3 * k_4 * k_7 * k_5} = \\
& \frac{-1.41 * p^2 - 70.7 * p + 4.89}{0.24 * p^2 + 12.02 * p + 19.49} \tag{2.10}
\end{aligned}$$

Підставивши співвідношення (2.9) та (2.10) у вираз (2.8) і прийнявши припущення, що генератор формує незмінний вихідний сигнал, тобто ($U_{\Gamma} = \text{const}$), після виконання відповідних алгебраїчних перетворень отримуємо передаточну функцію поляриметра

$$W_n = \frac{119396.8 * p + 9948.8}{0.24 * p^2 + 12.02 * p + 19.49} \tag{2.11}$$

2.5 Моделювання процесу поляризації

Метою моделювання процесу поляризації є відтворення процесу вимірювання цукристості, побудова графіка зміни вихідного сигналу (цукристості) у часі та аналіз отриманих результатів. Для цього використано структурну схему та конструкцію поляриметра. Відомі передаточні функції всіх складових блоків поляриметра, що дозволяє визначити їхні математичні прототиби у середовищі Simulink [16, 17].

Після вибору та налаштування всіх блоків здійснюється складання моделі поляриметра в Simulink і проведення комп'ютерного моделювання його роботи (рис. 2.17, рис. 2.18), що дає змогу оцінити динаміку вихідного сигналу та перевірити правильність побудови системи.

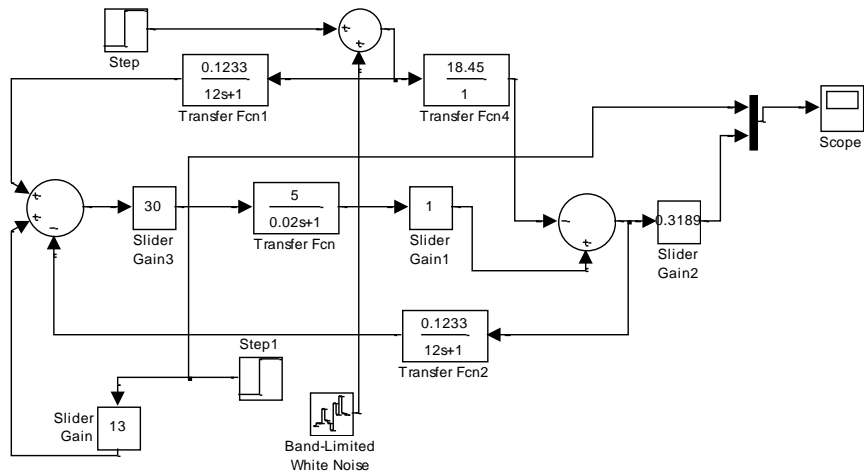


Рисунок 2.17 - Модель поляриметра в Matlab

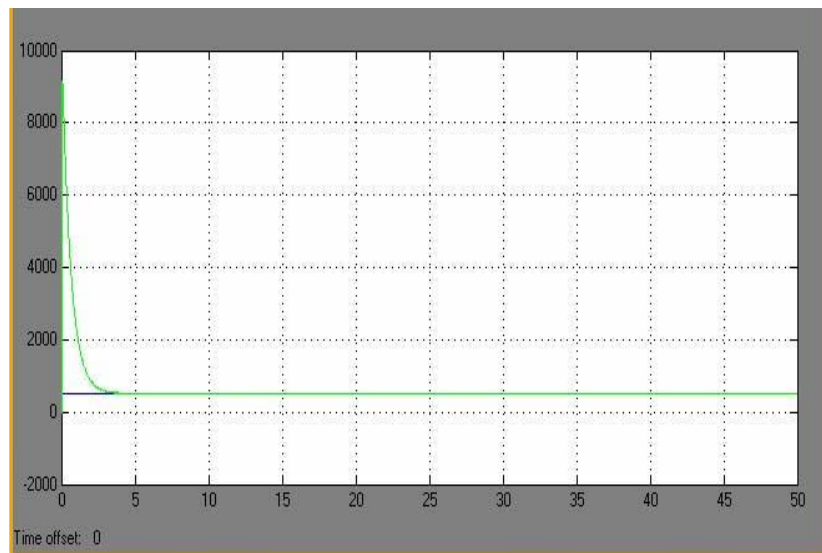


Рисунок 2.18 - Перехідний процес роботи поляриметра.

З аналізу перехідного процесу визначено момент, коли поляриметр починає фіксувати значення цукристості. Початковий етап цього режиму настає приблизно через 20 секунд від початку вимірювань.

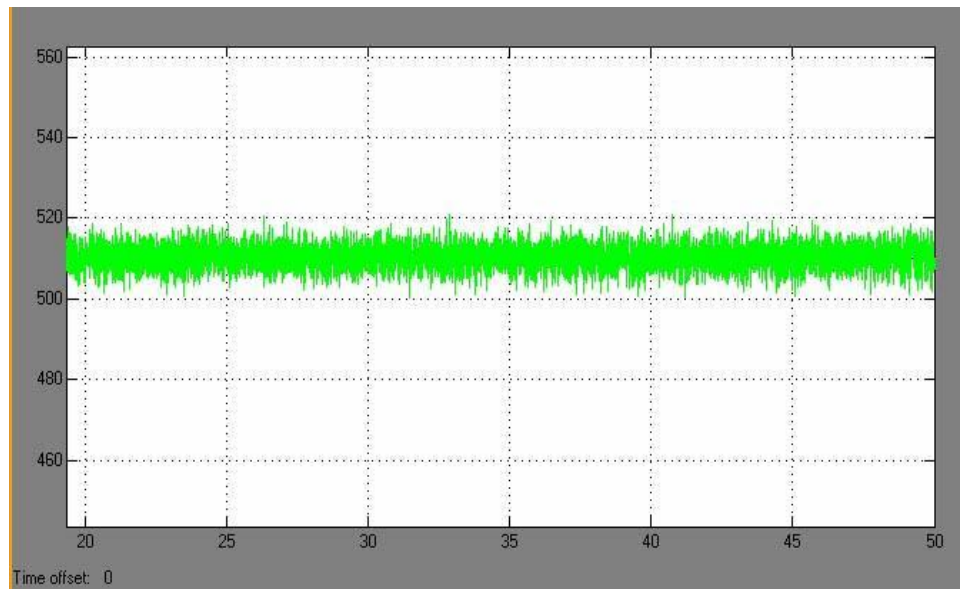


Рисунок 2.19 - Сталий режим роботи.

Як показано на рис. 2.19, результати вимірювання мають випадковий характер, при цьому їхнє середнє значення відображає фактичну цукристість розчину.

У цьому розділі побудовано структурну схему системи вимірювання та визначено передаточну функцію поляриметра. Моделювання процесу оцінки цукристості показало, що вихідний сигнал поляриметра є випадковою величиною, тоді як концентрація цукру в кюветі залишається стабільною. Оцінка середнього квадратичного відхилення цукристості становить 0,77, а математичне очікування отриманих результатів майже збігається з фактичним значенням концентрації цукру.

Таким чином, проведене моделювання підтверджує надійність використання поляриметра для визначення цукристості, враховуючи випадкові коливання вимірюваного сигналу, і дозволяє оцінювати точність вимірювань.

3 Синтез системи оптимальної корекції поляриметра

Задача синтезу полягає в тому, що припустимо на вході об'єкта з передаточною функцією $W(s)$ діють випадковий корисний сигнал C та шум φ з відомими спектральними щільностями S_{cc} та $S_{\varphi\varphi}$ відповідно та взаємними спектральними щільностями $S_{\varphi c}$ та $S_{c\varphi}$. Необхідно знайти таку передаточну функцію $G(s)$, щоб дисперсія похибки $\langle \varepsilon(s)^2 \rangle$ була мінімальна [21].

3.1 Визначення динамічних характеристик шумів ДКЦ

Як показано на рис. 2.19, результати вимірювань демонструють випадкову змінність. Щоб визначити динамічні параметри шумів датчика контролю цукристості, необхідно побудувати графіки спектральної щільності похибки. На початковому етапі використовується передаточна функція поляриметра, що дорівнює k . За допомогою пакета Matlab проводиться побудова логарифмічних частотних характеристик (ЛФЧХ), на основі яких виводиться передаточна функція системи $W_n = \frac{119396.8 * p + 9948.8}{0.24 * p^2 + 12.02 * p + 19.49}$. Після цього її апроксимують у середовищі Matlab, і результат описується відповідним аналітичним рівнянням, що відображає залежність між вхідним сигналом і вихідною похибкою

$$S = \frac{1}{2 * \pi} * \int_{-\infty}^{\infty} k(t) * e^{-s * t} dt \quad (3.1)$$

і буде спектральною щільністю шумів.

Після проведення експериментальних досліджень зафіксовано залежність показів поляриметра від часу з кроком вимірювання 0,06 с. На основі отриманих результатів, оброблених у середовищі Matlab, побудовано амплітудну характеристику роботи поляриметра та визначено його динамічні параметри.

Графік спектральної щільності S_x (рис. 3.1) $t_{10}=0.77$ – середнє квадратичне відхилення. Визначається як $t_{10}=\text{std}(\frac{t^3-t^2}{2})$.

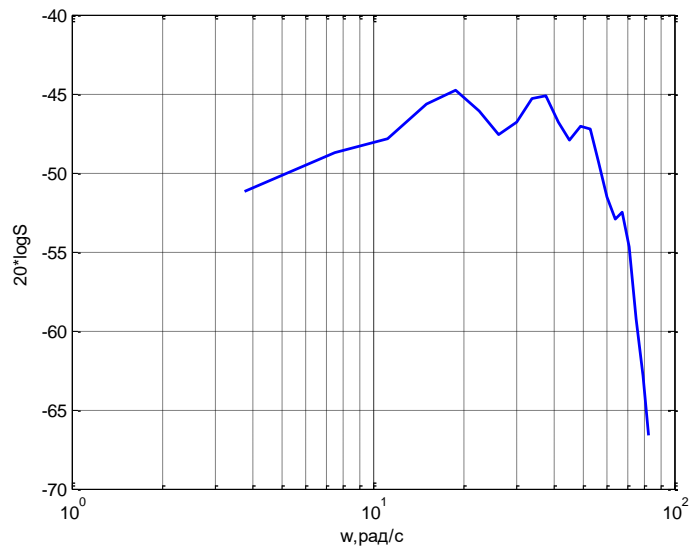


Рисунок 3.1 - Спектральна щільність коливання оцінки цукристості

З цього зображення можна отримати передаточну функцію, що характеризує спектральну щільність коливань оцінки вмісту цукру

$$S_1 = \frac{(t_{10})^2 / (2 * \pi i) * (s * w_1 + 1)}{(s^2 * w_2 + 2 * d_1 * s * w_1 + 1) * (s^2 * w_3 + 2 * d_3 * s * w_3 + 1) * (s^2 * w_4 + 2 * d_4 * s * w_4 + 1)} \quad (3.2)$$

$$T_1=1/w_1=7.7; T_2=1/w_2=17; T_3=1/w_3=52; T_4=1/w_4=80; d_1=0.8, d_2=0.4, d_3=0.3.$$

Виконавши множення S_1 на її спряжену S_1' та здійснивши необхідні підстановки, отримано повну передаточну функцію S

$$S=S_1*S_1'.$$

$$S = \frac{-3.987e016(s + 7.7) * (s - 7.7)}{(s^2 + 27.2 * s + 289) * (s^2 - 27.2 * s + 289) * (s^2 + 41.6 * s + 2704) * (s^2 - 41.6 * s + 2704) * (s^2 + 48 * s + 6400) * (s^2 - 48 * s + 6400)} \quad (3.3)$$

s – оператор Лапласа.

Підставляючи значення в Matlab проведемо апроксимацію (рис. 3.2).

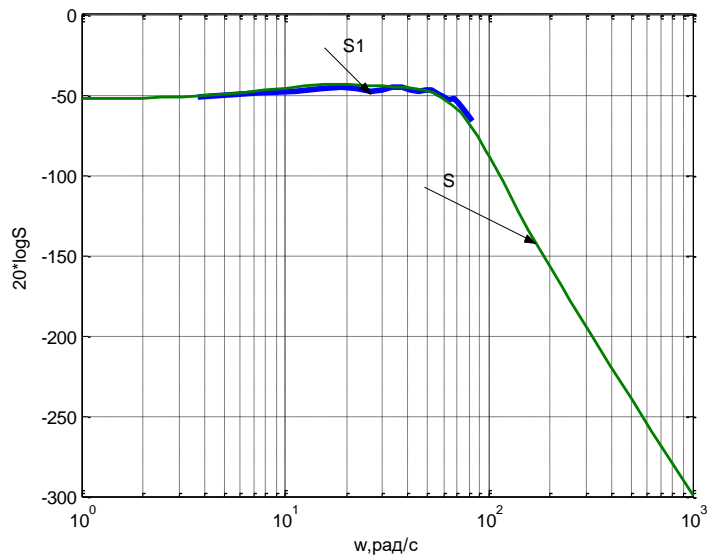


Рисунок 3.2 - Результат апроксимації

Таким чином було визначено передаточну функцію спектральної щільності похибки (3.3), після чого можна приступати до підбору фільтру з метою мінімізації зазначеної похибки.

3.2 Обґрунтування вибору метода синтезу фільтра.

Під час розробки системи автоматичного керування постає задача мінімізації впливу похибок вимірювання φ та динамічних характеристик датчика k на точність визначення величини x .

Рішення цієї проблеми ґрунтується на побудові передаточної функції фільтру G . Якщо корисний сигнал C і похибка вимірювання φ розглядаються як стаціонарні випадкові процеси з нульовими математичними очікуваннями та дробно-раціональними спектральними щільностями S_{cc} , $S_{c\varphi}$, $S_{\varphi c}$ і $S_{\varphi\varphi}$, а вимірювання здійснюється лінійним датчиком з передаточною функцією $k(s)$, то існує можливість спроектувати систему з передаточною функцією G , яка забезпечує мінімізацію дисперсії похибки ε .

Такий підхід дозволяє зменшити вплив шумів і похибок датчика на результати вимірювань і підвищує точність та стабільність роботи системи автоматичного керування

$$\varepsilon = x - i = x - f^*c \quad (3.4)$$

f – бажане перетворення вхідного сигналу.

$$x = G * k * c + G * \varphi. \quad (3.5)$$

Підставляючи (3.5) в (3.4), отримаємо

$$\varepsilon = (G * k - f) * c + G * \varphi. \quad (3.6)$$

Дисперсія похибки

$$e = \langle \varepsilon^2(t) \rangle = \frac{1}{j} * \int_{-j\infty}^{j\infty} S_{\varepsilon\varepsilon}(s) ds \quad (3.7)$$

Спектральна щільність похибки за т. Вінера-Хінчіна

$$S_{\varepsilon\varepsilon}(s) = (G * k - f) * S_{cc} * (k' * G' - f') + G * S_{c\varphi} (c' * G' - f') + (G * k - f) * S_{\varphi c} * G' + G * S_{\varphi\varphi} * G' \quad (3.8)$$

З цієї формули видно, що спектральна щільність похибки та її дисперсія залежать від передаточної функції фільтру (G) і від вихідних сигналів. Оскільки (G) визначає значення дисперсії похибки, показник (e) має вигляд квадратичного функціоналу. Для визначення оптимальної структури та параметрів передаточної функції (G) необхідно обчислити першу варіацію функціоналу δ_e і знайти таке значення ($G(s)$), при якому ця варіація дорівнює нулю. Це дозволяє встановити умови оптимізації та забезпечити мінімізацію похибок системи

$$E = f(G, G')$$

$$\delta_e = \frac{\partial f(G * G')}{\partial G} * \delta G + \frac{\partial f(G * G')}{\partial G'} * \delta G' \quad (3.9)$$

Процедура пошуку значень функції $G(\varphi)$ отримала назву процедури Вінера-Колмогорова.

$$\text{Позначимо } G_0 = \Gamma * G * D \quad (3.10)$$

$$\Gamma * \Gamma' = 1; \quad (3.11)$$

$$D * D' = k * S_{cc} + k * S_{c\varphi} + S_{c\varphi} * k' + S_{\varphi\varphi} \quad (3.12)$$

Визначення коефіцієнта D здійснюється шляхом представлення правої частини рівняння (3.12) у формі добутку двох передаточних функцій, кожна з яких характеризується специфічним розташуванням полюсів у лівій та правій напівплощині комплексної змінної s .

Цю процедуру прийнято називати Вінеровською факторизацією. З урахуванням введених позначень варіація набуває вигляду

$$\delta e = \frac{1}{j} \int_{-\infty}^{j\infty} \{ [G_0 - \Gamma * f * (S_{rr} * k' + S_{\phi r}) * D^{-1}] * \delta * G_0' + \delta * G_0 * [G_0' - D^{-1} * (k * S_{rr} + S_{r\phi}) * f * \Gamma'] \} * ds \quad (3.13)$$

Для визначення фізично реалізованої передатної функції (G_0) слід подати добуток у формі еквівалентної суми

$$T = T_0 + T_+ + T_- = \Gamma * f * (S_{cc} * k' + S_{\phi c}) * D^{-1} \quad (3.14)$$

В цій формулі T_0 – результат ділення чисельника з формули (3.14) на її знаменник; T_+ - передаточна функція яка має стійкі корені знаменника; T_- - передаточна функція корені знаменника якої нестійкі.

Таке перетворення називається Вінеровською сепарацією

$$G_0 = T_0 + T_+ \quad (3.15)$$

Підставляючи (3.12), (3.13) в (3.15) отримуємо

$$\begin{aligned} \Gamma * D * G &= T_0 + T_+ \\ G &= \Gamma^{-1} * (T_0 + T_+) * D^{-1} \end{aligned} \quad (3.16)$$

Для визначення дисперсії похибки в оптимізованій системі достатньо обчислити значення критерію якості e , використовуючи отриману передаточну функцію G [22, 23].

3.3 Розрахунок структури і параметрів фільтра

Спираючись на наведені дані, можна замінити існуючу систему визначення цукристості схемою, представленою на рис.3.3, де

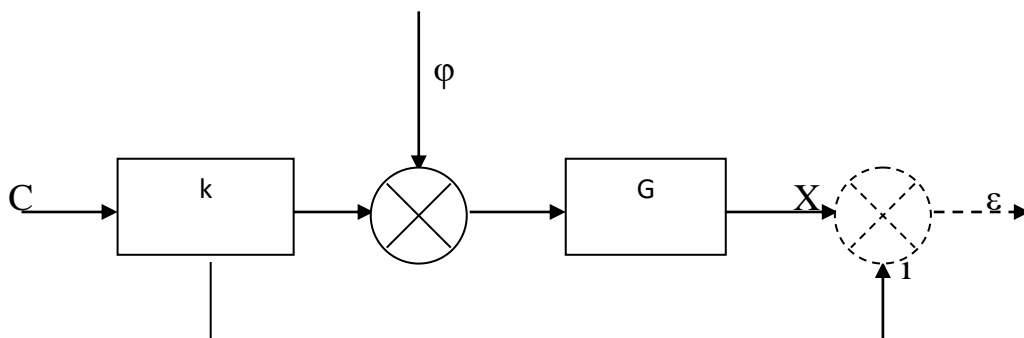


Рисунок 3.3 - Модель вимірювання цукристості

C – вхідний корисний сигнал; φ – похибка вхідного сигналу; k – передаточна функція поляриметра; G – передаточна функція фільтру (3.16); X – вихідний сигнал

Спектральна щільність корисного сигналу має вигляд

$$S_{cc} = \frac{\sigma_c^2}{\pi} \cdot \frac{\alpha}{\alpha^2 - s^2} = \frac{0.03}{-s^2 + 100} \quad (3.17)$$

$$\alpha = 10$$

$\sigma_c = 0,333\%$ – середнє квадратичне відхилення (СКВ) корисного сигналу

$$k = \frac{119396.8 \cdot s + 9948.8}{0.24 \cdot s^2 + 12.02 \cdot s + 19.49}$$

Спектральна щільність похибки можна знайти з (3.3)

$$S_{\varphi\varphi} = S/A; \quad A = 2,1 \cdot 10^{17}$$

$$S_{\varphi\varphi} = \frac{(\sigma_\varphi^2 / \pi) \cdot (s + 7.7) \cdot (s - 7.7)}{(s^2 + 27.2 \cdot s + 289) \cdot (s^2 - 27.2 \cdot s + 289) \cdot (s^2 + 41.6 \cdot s + 2704) \cdot (s^2 - 41.6 \cdot s + 2704) \cdot (s^2 + 48 \cdot s + 6400) \cdot (s^2 - 48 \cdot s + 6400)}$$

$\sigma_\varphi = 0.77$ - середнє квадратичне відхилення похибки.

$$S_{\varphi\varphi} = \frac{0,1888 \cdot (s + 7.7) \cdot (s - 7.7)}{(s^2 + 27.2 \cdot s + 289) \cdot (s^2 - 27.2 \cdot s + 289) \cdot (s^2 + 41.6 \cdot s + 2704) \cdot (s^2 - 41.6 \cdot s + 2704) \cdot (s^2 + 48 \cdot s + 6400) \cdot (s^2 - 48 \cdot s + 6400)} \quad (3.18)$$

Виходячи зі значень спектральних щільностей, розпочнемо визначення оптимального фільтра за алгоритмом Вінера–Колмогорова при $\Gamma=1$, забезпечуючи максимально точне відтворення вхідного сигналу (C), тобто ($f(s)=1$). Для цього підставимо вирази (3.17) та (3.18) у формулу (3.12)

$$D \cdot D' = k \cdot S_{cc} \cdot k' + S_{\varphi\varphi} = \frac{119396.8 \cdot s + 9948.8}{0.24 \cdot s^2 + 12.02 \cdot s + 19.49} \cdot \frac{0.03}{-s^2 + 100} + \frac{119396.8 \cdot s - 9948.8}{0.24 \cdot s^2 - 12.02 \cdot s + 19.49} + \frac{0.1888 \cdot (s + 7.7) \cdot (s - 7.7)}{(s^2 + 27.2 \cdot s + 289) \cdot (s^2 - 27.2 \cdot s + 289) \cdot (s^2 + 41.6 \cdot s + 2704) \cdot (s^2 - 41.6 \cdot s + 2704) \cdot (s^2 + 48 \cdot s + 6400) \cdot (s^2 - 48 \cdot s + 6400)}$$

$$D = \frac{119396.8 * s + 9948.8}{0.24 * s^2 + 12.02 * s + 19.49} * \frac{0.03}{s + 10} + \frac{0.1888 * (s + 7.7)}{(s^2 + 27.2 * s + 289) * (s^2 + 41.6 * s + 2704) * (s^2 + 48 * s + 6400)} = \frac{1573190.9722 (s + 0.08165)}{(s + 48.49) (s + 10) (s + 1.589)} \quad (3.19)$$

$$D' = \frac{119396.8 * s - 9948.8}{0.24 * s^2 - 12.02 * s + 19.49} * \frac{0.03}{-s + 10} + \frac{0.1888 * (s - 7.7)}{(s^2 - 27.2 * s + 289) * (s^2 - 41.6 * s + 2704) * (s^2 - 48 * s + 6400)} = \frac{1573190.9722 (s - 0.08165)}{(s - 48.49) (s - 10) (s - 1.589)} \quad (3.20)$$

Введемо заміну

$$S_{cc} = \frac{\sigma_c^2}{\pi} * S_{c1}; \quad S_{\varphi\varphi} = \frac{\sigma_\varphi^2}{\pi} * S_{\varphi1}$$

$$D * D' = \frac{\sigma_c^2}{\pi} * k * S_{11} * k + \frac{\sigma_\varphi^2}{\pi} * S_{22} = \frac{\sigma_c^2}{\pi} * [k * S_{11} * k' + \frac{\sigma_\varphi^2}{\sigma_c^2} * S_{22}]$$

$$\frac{\sigma_c^2}{\sigma_\varphi^2} = \gamma$$

- відношення сигнал-шум.

$$\gamma = \frac{1}{0.77^2} = 0.433$$

В даній роботі будемо розраховувати чотири фільтри для γ , $0,1 * \gamma$, $10 * \gamma$, $100 * \gamma$.

Підставимо (3.17) і (3.18) в (3.14)

$$T = f * \Gamma * S_{cc} * k' * D'^{-1} = \frac{0.03}{-s^2 + 100} * \frac{119396.8 * s - 9948.8}{0.24 * s^2 - 12.02 * s + 19.49} * \left[\frac{1573190.9722 (s - 0.08165)}{(s - 10) * (s - 48.49) * (s - 1.589)} \right]^{-1} =$$

$$\frac{3.1623 (s - 0.08333)}{(s + 10) * (s - 0.08165)} = T_+ + T_0 + T_-$$

$$T_+ = \frac{3.1628}{(s + 10)} \quad (3.21)$$

$$T_- = \frac{-0.00052553 * (s - 0.08333)}{(s - 0.08165)} \quad (3.22)$$

Оскільки порядок чисельника менший за кількість s у знаменнику, то $T_0=0$.

Підставимо (3.19), (3.21) в (3ю16) отримаємо передаточну функцію фільтра

$$G=\Gamma^{-1}*(T_0+T_+)*D^{-1}=\frac{2.0104e-006(s+48.49)*(s+1.589)}{(s+0.08165)} - \text{передаточна функція фільтру при } \gamma=0,433.$$

Підставивши значення γ послідовно як $\gamma \cdot 0,1$, потім $\gamma \cdot 10$ і $\gamma \cdot 100$, можна визначити передаточні функції відповідних фільтрів для кожного випадку

$$G1=\frac{2.0101e-006(s+48.49)*(s+1.589)}{(s+0.08316)}$$

$$G2=\frac{2.0101e-006(s+48.49)*(s+1.589)}{(s+0.08211)}$$

$$G3=\frac{2.0101e-006(s+48.49)*(s+1.589)}{(s+0.08332)}$$

Як видно, передатні функції фільтрів практично збігаються, відмінність полягає лише у значеннях знаменників. Для наочності побудовано графік залежності знаменника передаточної функції ($a3$) від параметра γ (рис. 3.4).

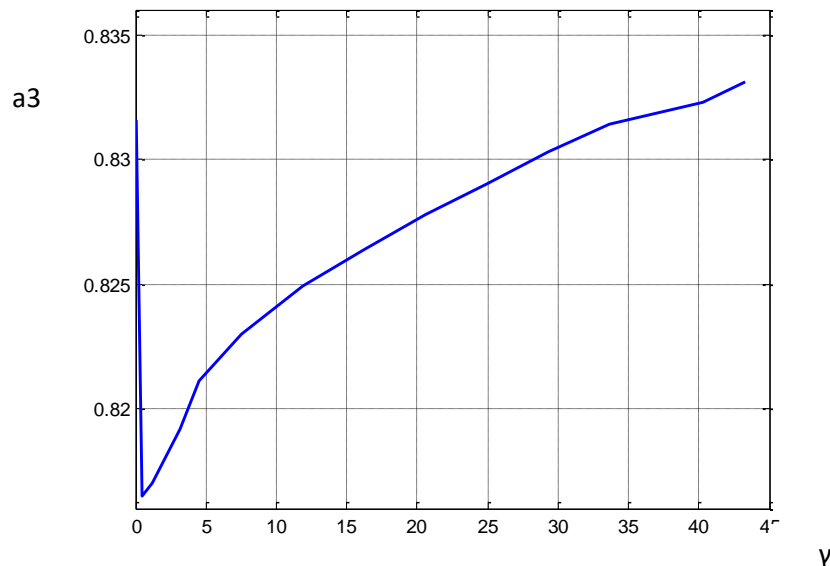


Рисунок 3.4 Графік залежності ($a3$) від γ

$$a3=[0.8316 \ 0.8165 \ 0.8211 \ 0.8332]$$

У цьому розділі на основі змодельованих даних та аналізу вихідного сигналу побудовано графік зміни спектральної щільності коливань оцінки

цукристості. Визначено спектральні щільності похибки $S_{\varphi\varphi}$ та корисного сигналу S_{cc} . За допомогою перетворень Вінера отримано передавальні функції фільтрів, які мінімізують вихідну похибку системи. У наступному розділі планується оцінити ефективність запропонованої системи та провести моделювання на основі виконаних розрахунків, зокрема перевірити якість її роботи та точність оцінки цукристості.

4 Аналіз якості та моделювання запропонованого пристрою

4.1 Аналіз якісних показників фільтра

Обчислимо дисперсії похибок застосованих фільтрів. Спершу виведемо вираз для визначення загальної дисперсії похибки конкретного фільтру

$$\sigma_{\varepsilon}^2 = \frac{1}{j} * \int_{-\infty}^{\infty} S_{\varepsilon\varepsilon}(s) ds = \frac{1}{j} * \int_{-\infty}^{\infty} (G * k - f) * S_{cc} * (k' * G' - f') ds + \frac{1}{j} * \int_{-\infty}^{\infty} G * S_{\varphi\varphi} * G' ds \quad (4.1)$$

Цю дисперсію похибки можна розложити на дві величини σ_e – дисперсія похибки корисного сигналу і σ_i - дисперсія похибки шуму.

$$\sigma_{\varepsilon}^2 = \sigma_e^2 + \sigma_i^2 \quad (4.2)$$

Тоді

$$\sigma_e^2 = \frac{1}{j} * \int_{-\infty}^{\infty} (G * k - f) * S_{cc} * (k' * G' - f') ds \quad (4.3)$$

$$\sigma_i^2 = \frac{1}{j} * \int_{-\infty}^{\infty} G * S_{\varphi\varphi} * G' ds \quad (4.4)$$

Спектральну щільність похибки $S_{\varphi\varphi}$ та спектральну щільність сигналу S_{cc} можна подати як добуток двох функцій

$$f1 * f1' = S_{cc} = \frac{\sigma_c^2}{\pi} * S11 \quad (4.5)$$

$$f1 = \frac{\sigma_c}{\sqrt{\pi}} * f3, \text{ де } f3 * f3' = S11 \quad (4.6)$$

таким же чином замінимо $S_{\varphi\varphi}$

$$f2 * f2' = S_{\varphi\varphi} = \frac{\sigma_{\varphi}^2}{\pi} * S22 \quad (4.7)$$

$$f2 = \frac{\sigma_{\varphi}}{\sqrt{\pi}} * f4, \text{ де } f4 * f4' = S22 \quad (4.8)$$

Враховуючи ці заміни запишемо

$$\sigma_e^2 = \frac{1}{j} * \int_{-\infty}^{\infty} \left(\frac{\sigma_c}{\sqrt{\pi}} * f3 * (G * k - f) \right)^2 ds = \frac{\sigma_c^2}{\pi} * \frac{1}{j} * \int_{-\infty}^{\infty} (f3 * (G * k - f))^2 ds \quad (4.9)$$

$$\sigma_i^2 = \frac{1}{j} * \int_{-\infty}^{\infty} \left(\frac{\sigma_\varphi}{\sqrt{\pi}} * f4 * G \right)^2 ds = \frac{\sigma_\varphi^2}{\pi} * \frac{1}{j} * \int_{-\infty}^{\infty} (f4 * G)^2 ds \quad (4.10)$$

Підставивши вирази (4.9) та (4.10) у формулу (4.2), отримуємо повну дисперсію похибки роботи фільтра

$$\begin{aligned} \sigma_e^2 &= \frac{\sigma_c^2}{\pi} * \frac{1}{j} * \int_{-\infty}^{\infty} (f3 * (G * k - f))^2 ds + \frac{\sigma_\varphi^2}{\pi} * \frac{1}{j} * \int_{-\infty}^{\infty} (f * G)^2 ds = \\ &= \frac{\sigma_c^2}{\pi} * \left(\frac{1}{j} * \int_{-\infty}^{\infty} (f3 * (G * k - f))^2 ds + \frac{1}{\gamma^2} * \frac{1}{j} * \int_{-\infty}^{\infty} (f * G)^2 ds \right) \end{aligned} \quad (4.11)$$

Застосовуючи формули (4.9), (4.10) та (4.11), обчислимо дисперсію похибки, що відповідає роботі фільтру G

$$S11 = \frac{-10}{s^2 - 100}$$

$$f3 = \frac{\sqrt{10}}{s + 10}$$

$$f3' = \frac{-\sqrt{10}}{s - 10}$$

$$\begin{aligned} \sigma_e^2 &= \frac{1}{j} * \int_{-\infty}^{\infty} \left(\frac{\sigma_c}{\sqrt{\pi}} * f3 * (G * k - f) \right)^2 ds = \frac{\sigma_c^2}{\pi} * \frac{1}{j} * \int_{-\infty}^{\infty} (f3 * (G * k - f))^2 ds = \frac{(0,003)^2}{\pi} * \frac{1}{j} * \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \left(\frac{\sqrt{10}}{s + 10} * \left(\frac{2.0104e - 006 (s + 48.49) * (s + 1.589)}{(s + 0.08165)} * \frac{119396.8 * p + 9948.8}{0.24 * p^2 + 12.02 * p + 19.49} - 1 \right) \right)^2 ds = \end{aligned} \quad (4.12)$$

2.3045e - 005

S22 =

$$\frac{0.1888 * (s + 7.7) * (s - 7.7)}{(s^2 + 27.2 * s + 289) * (s^2 - 27.2 * s + 289) * (s^2 + 41.6 * s + 2704) * (s^2 - 41.6 * s + 2704) * (s^2 + 48 * s + 6400) * (s^2 - 48 * s + 6400)}$$

$$f4 = \frac{(s + 7.7)}{(s^2 + 27.2 * s + 289) * (s^2 + 41.6 * s + 2704) * (s^2 + 48 * s + 6400)}$$

$$f4' = \frac{(s - 7.7)}{(s^2 - 27.2 * s + 289) * (s^2 - 41.6 * s + 2704) * (s^2 - 48 * s + 6400)}$$

f4' =

$$\sigma_i^2 = \frac{1}{j} * \int_{-\infty}^{\infty} \left(\frac{\sigma_{\varphi}}{\sqrt{\pi}} * f 4 * G \right)^2 ds = \frac{(0,77)^2}{\pi} * \frac{1}{j} * \int_{-\infty}^{\infty} \frac{(s + 7.7)}{(s^2 + 27.2 * s + 289) * (s^2 + 41.6 * s + 2704) * (s^2 + 48 * s + 6400)} * \frac{119396.8 * p + 9948.8}{0.24 * p^2 + 12.02 * p + 19.49} ds = 9.4203e - 013 \quad (4.13)$$

В результаті отримаємо числовий вираз дисперсії похибки для фільтра G.

$$\sigma_{\varepsilon} = \sqrt{\sigma_e^2 + \sigma_i^2} = \sqrt{(2.3045e - 005)^2 + (9.4203e - 013)^2} = 2.3e - 5$$

Аналогічним способом можна визначити дисперсію похибки і для інших типів фільтрів. Для фільтра G1 її значення становитиме

$$\sigma_{1e}^2 = 2.26e - 06$$

$$\sigma_{1i}^2 = 2.95e - 12$$

$$\sigma_{1\varepsilon} = 2.27e - 06$$

Для G2 дорівнюватиме

$$\sigma_{2e}^2 = 2.25e - 07$$

$$\sigma_{2i}^2 = 9.34e - 12$$

$$\sigma_{2\varepsilon} = 2.26e - 07$$

Для G3 дорівнюватиме

$$\sigma_{3e}^2 = 2.25e - 08$$

$$\sigma_{3i}^2 = 2.95e - 11$$

$$\sigma_{3\varepsilon} = 2.28e - 08$$

На основі отриманих даних виконано побудову серії графічних залежностей, представлених на рис. 4.1, 4.2 та 4.3.

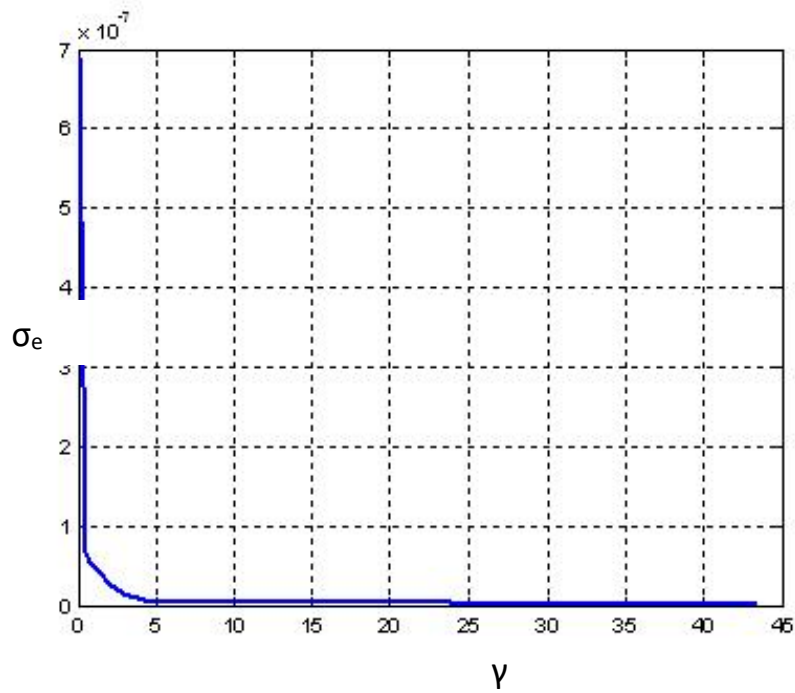


Рисунок 4.1 - Графік залежності σ_e від γ

Проаналізувавши залежність, встановлено, що зі зростанням відношення сигнал/шум значення σ_e зменшується.

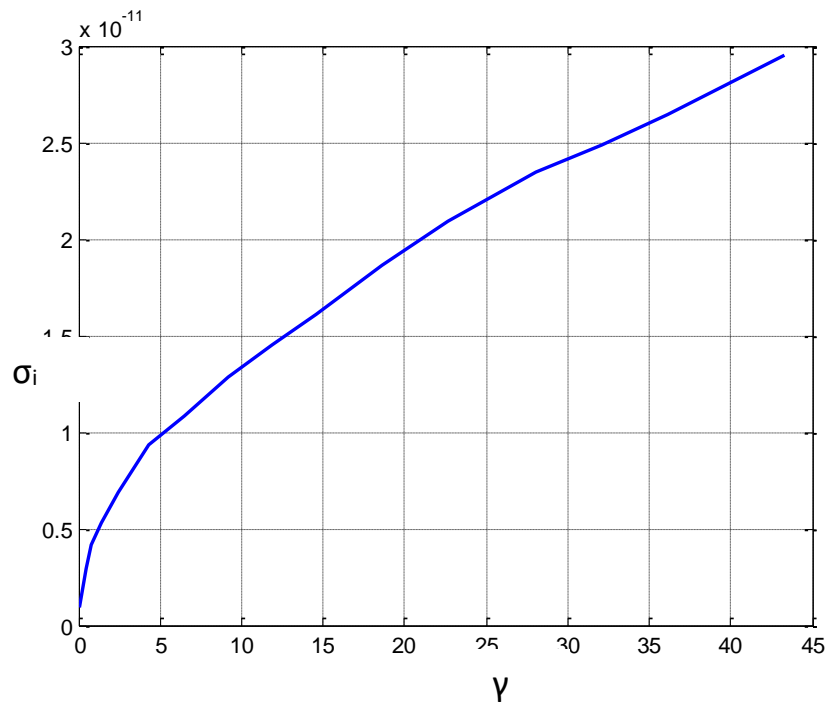


Рисунок 4.2 - Графік залежності σ_i від γ

Зі спостережень на графіку видно, що при зростанні відношення сигнал-шум σ_i значення σ_i теж збільшуються, проте їх величина залишається

дуже малою – близько 10^{-11} , тому вплив на загальну дисперсію похибок буде незначним.

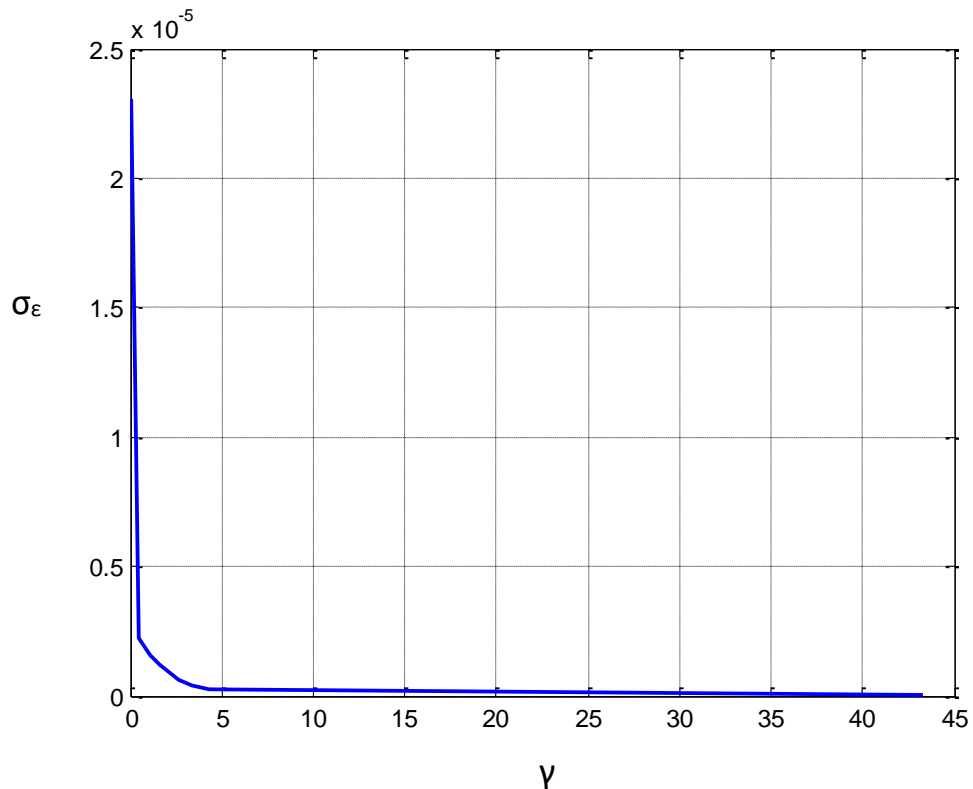


Рисунок 4.3 - Графік залежності σ_ϵ від γ

Аналіз графіка показує, що зі зростанням співвідношення сигнал-шум величина дисперсії похибки зменшується.

Або трохи розширено:

Зі спостережень на графіку видно, що при збільшенні відношення сигнал-шум спостерігається зменшення дисперсії похибки, що свідчить про підвищення точності вимірювань.

4.2 Розробка імітаційної моделі запропонованого пристрою

Беручи до уваги попередні висновки, спроектуємо модель поляриметра з фільтром у середовищі Simulink. Спершу необхідно виконати певні перетворення передаточної функції фільтра, оскільки порядок чисельника перевищує порядок знаменника, а Simulink не містить блоків для прямого відображення таких функцій.

$$G = \frac{2.0104e - 006 * (s + 48.49) * (s + 1.589)}{(s + 0.08165)} = 2.0104e - 006 * \frac{s^2 + 50.079 * s + 77.05}{(s + 0.08165)}$$

Розділимо чисельник на знаменник

$$\begin{array}{r} s^2 + 50.079 * s + 77.05 \\ \underline{s^2 + 0.008165 * s} \\ 49.997 * s + 77.05 \\ \underline{49.997 * s + 4.0823} \\ 72.9677 \end{array} \quad \begin{array}{l} s + 0.08165 \\ \hline s + 49.997 \end{array}$$

$$G = 2.0104e - 006 * (s + 49.997) + 2.0104e - 0.06 * \frac{72.9677}{s + 0.08165} = 2.0104e - 0.06 * s +$$

$$1e - 004 + \frac{1.5e - 004}{s + 0.08165}$$

Оскільки передаточна функція відповідає всім встановленим вимогам моделювання, можна переходити до наступного етапу – безпосередньої реалізації моделі.

4.3 Моделювання процесу вимірювання

На основі оновленої передаточної функції фільтра та моделі поляриметра, розробленої в Simulink у розділі 2.1, побудовано нову імітаційну модель поляриметра. Результатом моделювання стали осцилограми вихідного сигналу, представлені на рис. 4.4 та 4.5.

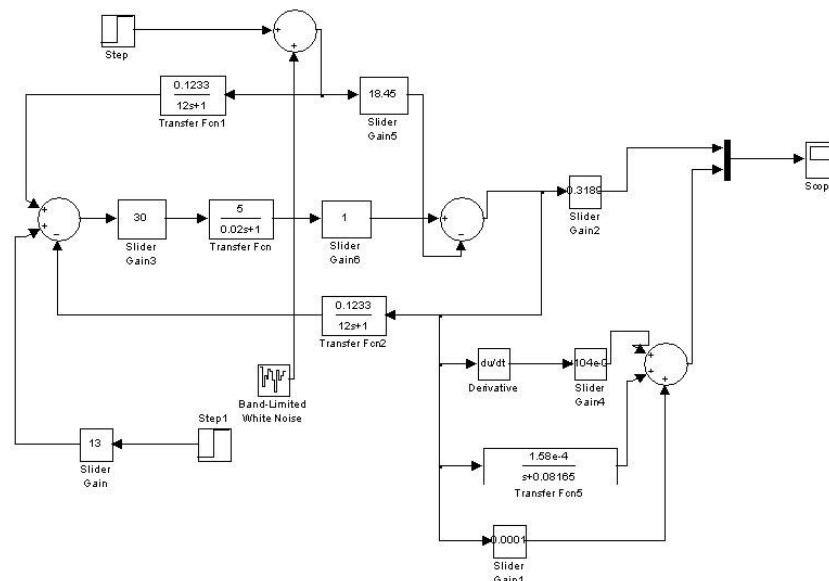


Рисунок 4.4 - Модель системи для вимірювання цукристості

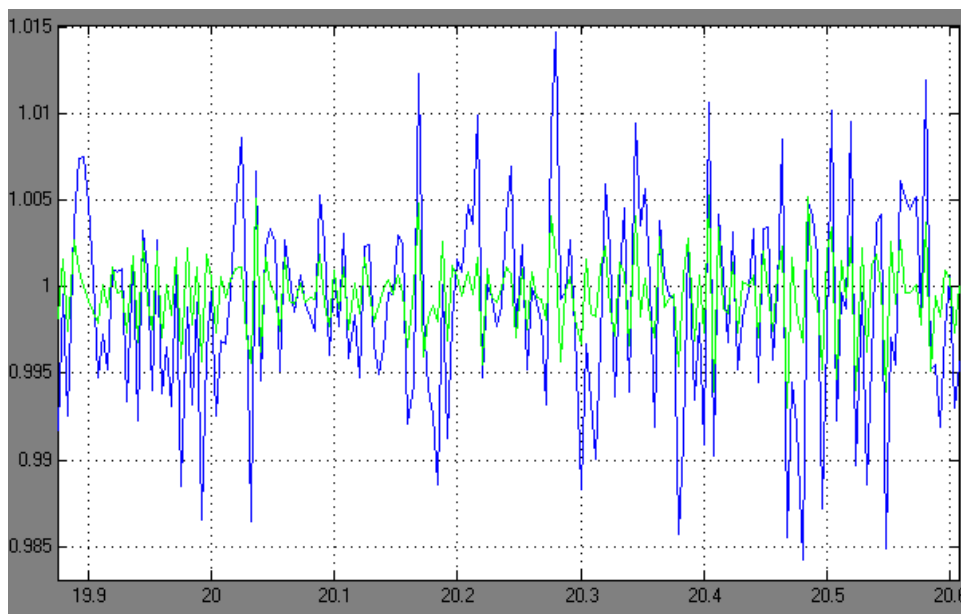


Рисунок 4.5 - Вихідний сигнал

У даному розділі запропоновано методику оцінки точності визначення цукристості за даними поляриметра ПЕА в скоректованій мікропроцесорній системі. Проведений аналіз показав, що середньоквадратичне відхилення похибки вимірювань цукристості в запропонованій системі зменшилось у 82 рази порівняно з базовим варіантом. Встановлено, що при збільшенні відношення сигнал/шум дисперсія похибки зменшується, що підвищує надійність результатів. Для оцінки роботи пристрою в умовах, максимально наближених до реальної експлуатації, була розроблена математична модель системи вимірювання цукристості, яка дозволяє прогнозувати точність та стабільність вимірювань у практичних умовах.

5 Розробка схеми реалізації пристрою

5.1 Інтерфейс зв'язку з ДКЦ

Після визначення передаточної функції фільтра та моделювання роботи поляриметра з фільтром у середовищі Simulink виникла потреба у розробці схеми практичної реалізації пристрою. На першому етапі необхідно визначити оптимальний період дискретизації системи. Вибір цього параметра проводиться на основі теореми Котельникова. Для її застосування спершу визначають максимальну частоту ω_{\max} у спектрі вихідного сигналу $\beta(j\omega)$. Обчислення цього значення здійснюється з використанням критерію Джурі, що дозволяє врахувати характеристики сигналу та забезпечити правильне відтворення його динаміки в дискретній системі.

$$|\beta(j\omega)| = \left| \frac{W_o(j\omega)W_p(j\omega)}{1+W_o(j\omega)W_p(j\omega)} \right| = \Theta_{om} \quad (5.1)$$

де Θ_{om} – точність, яку треба забезпечити на виході.

Скориставшись даним виразом матимемо [24]

$$W(p) = \frac{\frac{2.0104e-006 * (p+48.49) * (p+1.589)}{(p+0.08165)} * \frac{119396.8 * p + 9948.8}{0.24 * p^2 + 12.02 * p + 19.49}}{1 + \frac{2.0104e-006 * (p+48.49) * (p+1.589)}{(p+0.08165)} * \frac{119396.8 * p + 9948.8}{0.24 * p^2 + 12.02 * p + 19.49}} =$$

$$= \frac{0.24 * p^3 + 11.96 * p^2 + 18.895 * p + 1.49}{0.48 * p^3 + 23.99 * p^2 + 39.36 * p + 3.08} = \frac{(11.96 * w^2 - 1.49) + j * (0.24 * w^3 - 18.895 * w)}{(23.99 * w^2 - 3.08) + j * (0.48 * w^3 - 39.36 * w)}$$

$$\frac{\text{Re} + \text{Im}}{(A^2 + B^2)}$$

$$\text{Re} = 286.9 * w^4 - 72.58 * w^2 + 4.59$$

$$\text{Im} = [-0.115w^6 + 18.516 * w^4 - 743.7w]j$$

$$A = (23.99 * w^2 - 3.08)$$

$$B = (0.48 * w^3 - 39.36 * w^3)$$

$$|\beta(jw)| = \sqrt{\frac{R^2}{(A^2 + B^2)^2} + \frac{\text{Im}^2}{(A^2 + B^2)^2}} = \theta_{om}$$

$$\text{Re}^2 + \text{Im}^2 - \theta_{om}^2 (A^2 + B^2)^2 = 0$$

Для подальшого розв'язання останнього рівняння потрібно визначити допустиму точність підтримки вихідної координати, яку приймаємо рівною $\Theta_{om} = 0,05$. Далі, застосовуючи математичний пакет, отримаємо необхідні розрахунки

$w_m = 3269 \Rightarrow T = \frac{\pi}{w_{max}} = 0,00095c$. Для чисельного інтегрування обираємо крок часу $T = 0,001 c$.

Раніше було отримано модель фільтра у частотній області, тому для подальшої реалізації даного типу фільтра на мікропроцесорному комплекті виникає потреба у визначенні різницевого рівняння, необхідного для цифрової реалізації на мікроконтролері. Маючи передавальну функцію фільтра, необхідно виконати її z -перетворення для переходу від аналогової до дискретної форми

$$G(s) = \frac{2.0104e - 0.06 * s + 1e - 004 + \frac{1.5e - 004}{s + 0.08165}}$$

Використовуючи таблиці z -перетворення отримаємо

$$G(z) = \frac{1e - 004 + 2.0104e - 6 * \frac{z - 1}{T * z} + \frac{1.5e - 4z}{z - e^{-0.08165 * T}}}{\frac{1e - 004 * 0.001 * z(z - 1) + 2.01e - 006 * (z - 1) * (z - 1) + 1.5e - 004 * z * 0.001 * z}{0.001 * z(z - 1)}} = \frac{22.5e - 007 * z^2 - 1e - 007 * z - 2.01e - 006}{1e - 003 * z^2 - 1e - 003 * z} = \frac{22.5e - 004 - 1e - 004 * z^{-1} - 2.01e - 003 * z^{-2}}{1 - z^{-1}} = \frac{X(z)}{Q(z)}$$

$$X_{[n]} = 22.5e - 004 * Q_{[n]} - 1e - 004 * Q_{[n-1]} - 2e - 003 * Q_{[n-2]} + X_{[n-1]}$$

Отже, впровадження розробленого типу фільтра полягає у практичній реалізації отриманого різницевого рівняння на основі мікроконтролерної системи.

5.2 Структура мікроконтролера MCS-51

Наступним етапом роботи є визначення типу мікроконтролера, на базі якого буде реалізовано розроблений алгоритм цифрової фільтрації. Основними вихідними даними для цього вибору є попередньо отримані характеристики системи: період дискретизації та різницеве рівняння, що описує обчислення $X_{вих}[i]$. У даному випадку слід враховувати суттєве обмеження на час

виконання формування вихідних значень та наявність у різницевому рівнянні операцій множення.

Тому до мікроконтролера висувуються такі вимоги: по-перше, наявність апаратної підтримки операцій множення для мінімізації витрат часу при виконанні користувацьких процедур; по-друге, висока швидкодія, що забезпечує швидке виконання операцій у мінімальній кількості тактів процесора; по-третє, інтегрований аналогово-цифровий перетворювач (АЦП) для безпосередньої роботи з вхідними аналоговими сигналами.

З урахуванням цих критеріїв обрано мікроконвертер AD μ C812 [25]. Він базується на мікроконтролерному ядрі з модернізованою архітектурою MCS-51 і поєднує необхідну апаратну підтримку множення, достатню продуктивність та вбудований АЦП. Структурна схема цього контролера наведена на рис.5.1.

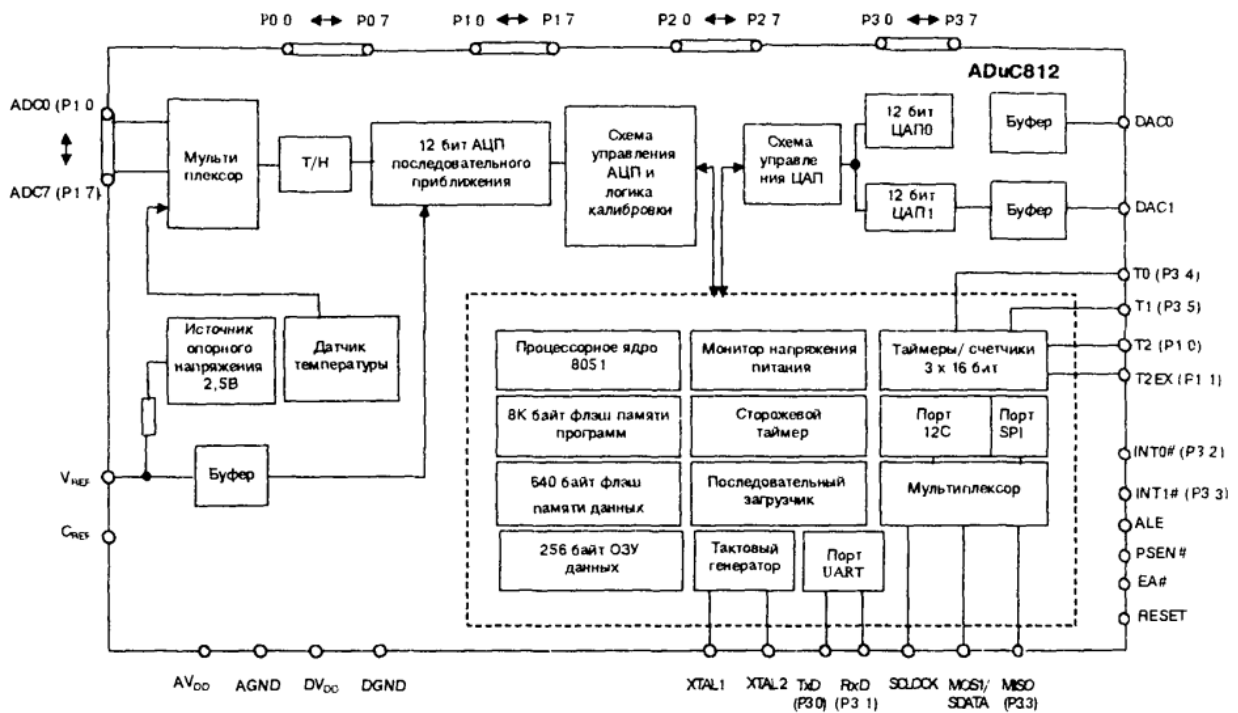


Рисунок 5.1 - Структура мікроконвертера AD μ C812.

Мікроконвертер має наступні основні характеристики:

- 12-розрядний 8-канальний АЦП зі швидкістю вибірки 200 kSPS і каналом прямого доступу до пам'яті;
- два 12-розрядних ЦАП з потенційними виходами;
- 8-розрядне ядро мікроконтролера з архітектурою MCS-51 ($F_{max} = 16$ МГц);

- 8 Кбайт внутрішньої flash-пам'яті програм;
- 640 байт внутрішньої flash-пам'яті даних типу ЕРІЗУ;
- послідовні порти: UART, I²C, SPI;
- монітор напруги живлення, сторожовий таймер, вбудоване джерело опорної напруги.

Мікросхема виконана у корпусі PQFP з 52 виводами та розрахована на роботу при напругах живлення +5В або +3В у межах індустриального температурного діапазону. Візуальне зображення пристрою наведено на рис.5.2.

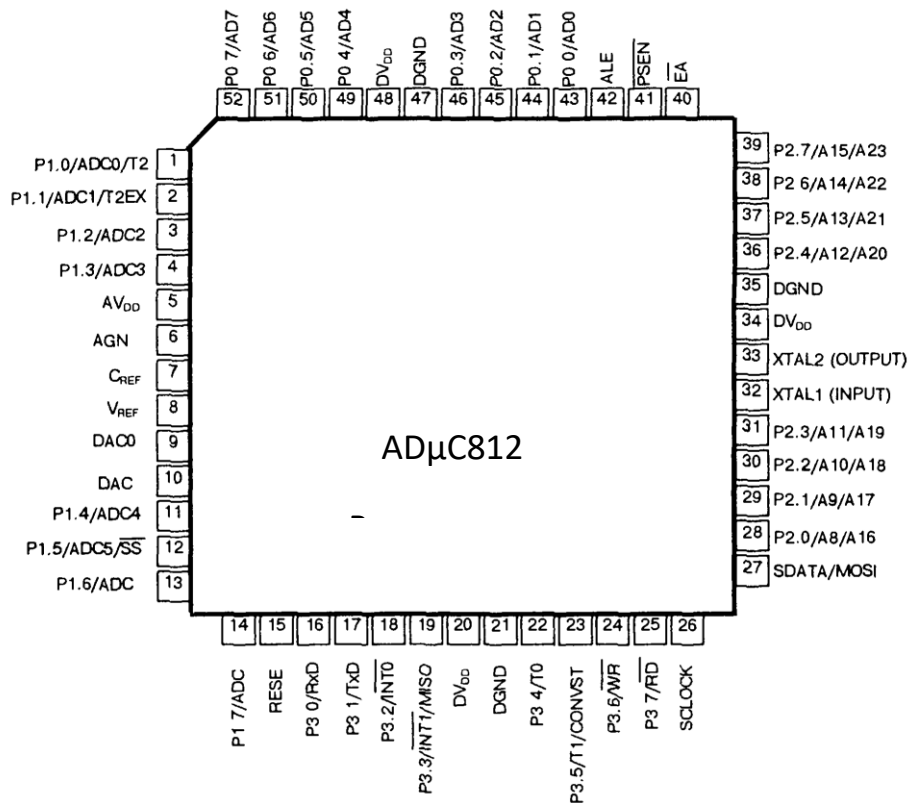


Рисунок 5.2 - Мікроконвертер ADμC812 в 52 - вивідному корпусі і функції виводів.

Даний мікроконвертер реалізовано із застосуванням режимів зниженого енергоспоживання, керованих регістром PCON.

У режимі мінімального енергоспоживання (мікроспоживання) припиняється виконання всіх функцій мікроконтролера через зупинку синхронного генератора. При цьому стан внутрішньої оперативної пам'яті зберігається, тоді як вміст

регістрів спеціальних функцій втрачається. Потужність споживання у цьому режимі становить приблизно 20% від номінальної.

У режимі холостого ходу центральний процесор тимчасово відключається, але система переривань, лічильники/таймери та інші периферійні блоки вводу/виводу продовжують роботу. Споживана потужність при цьому знижується до приблизно 50% від номінального рівня.

Застосування цих режимів дозволяє оптимізувати енергоспоживання мікроконвертера без втрати функціональності критично важливих блоків керування та обробки даних.

5.3 Організація пам'яті і програмно доступні ресурси

В архітектурі мікроконтролера MCS-51 застосовано роздільне зберігання програм та даних, що відповідає принципам гарвардської архітектури. Обидва типи пам'яті мають обсяг 64 Кбайти, а доступ до відповідної матриці забезпечується сигналами PSEN, RD# та WR#. Структура організації пам'яті мікроконтролерів сімейства 8051 наведена на рис. 5.3.

Для підвищення ефективності роботи мікроконтролера передбачено одночасне читання команд з пам'яті програм і обробку даних у пам'яті даних, що зменшує затримки при виконанні інструкцій. Така архітектура дозволяє оптимізувати використання внутрішніх ресурсів і забезпечує високу швидкодію при виконанні циклічних та паралельних операцій.

Пам'ять програм може бути повністю зовнішньою (сигнал EA = 0), або при доступі до молодших 4 Кбайт адрес код зчитується з внутрішньої пам'яті мікроконтролера, тоді як старші 60 Кбайт беруться із зовнішньої пам'яті системи (сигнал EA = 1).

Можна помітити, що всі регістри мають як символічні позначення, так і конкретні адреси внутрішніх комірок пам'яті. Деякі регістри містять біти, які можна адресувати безпосередньо. Адреси таких бітів розташовані в діапазоні 80H – F7H. Додатково, використання комбінованої пам'яті дозволяє оптимізувати роботу мікроконтролера, забезпечуючи швидкий доступ до часто

використовуваних команд у внутрішній пам'яті, одночасно збільшуючи обсяг адресованого коду за рахунок зовнішньої пам'яті. Це сприяє підвищенню продуктивності та ефективності виконання програм на системному рівні.

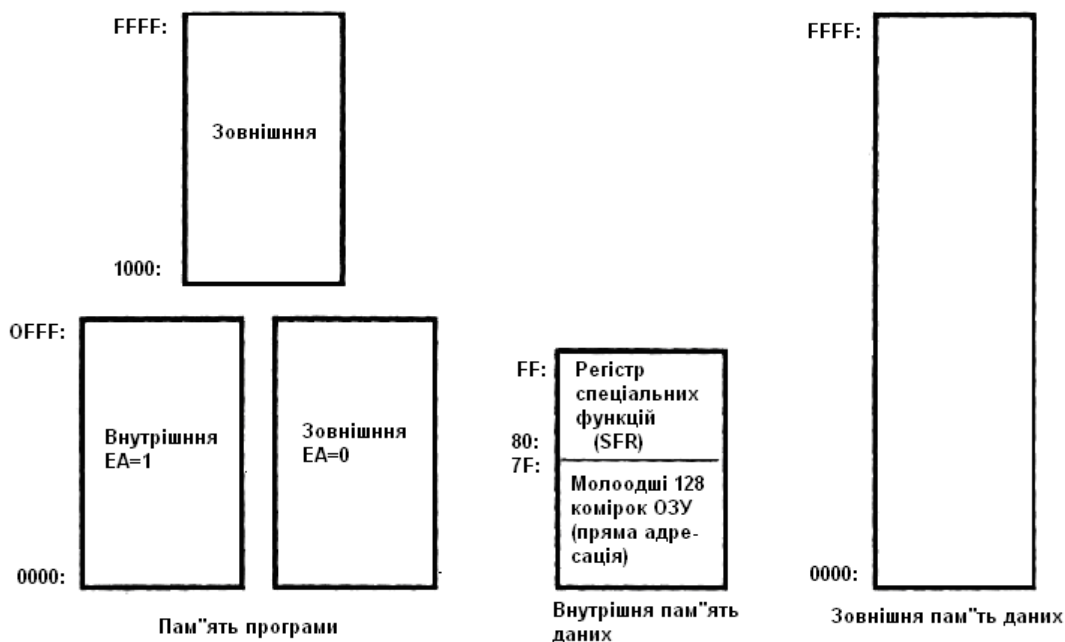


Рисунок 5.3 -Організація пам'яті в архітектурі MCS-51

5.4 Алгоритм реалізації передаточної функції

Перед безпосереднім розробленням алгоритму регулятора виникає потреба у визначенні внутрішньої структури подання даних у мікропроцесорній системі. Йдеться про спосіб представлення складових елементів, які входять до регуляторного рівняння, та можуть бути поділені на дві категорії: X і K. Такий формат подання можна зобразити у наступній формі (рис. 5.10), що дозволяє забезпечити коректну обробку інформації всередині системи та спрощує подальше програмування алгоритму керування.

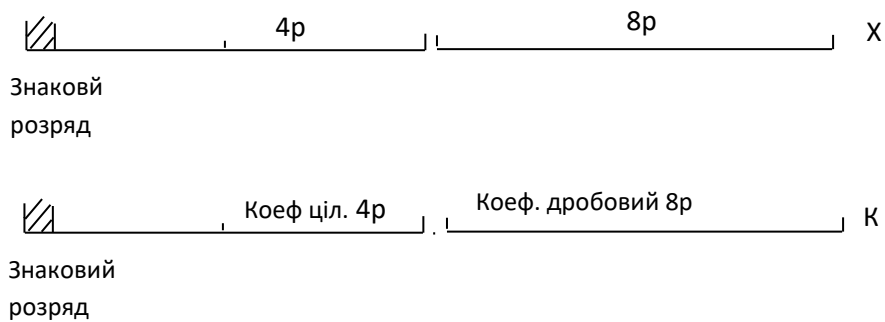


Рисунок 5.10 - Формат даних в системі

Формат подання даних зумовлений, по-перше, розрядністю модуля АЦП ЦМК, а по-друге, необхідністю застосування додаткової лінії порта для зчитування знаку вихідного сигналу датчика. На цьому етапі можна перейти до опису алгоритму роботи ЦМК щодо формування керуючого алгоритму регулятора. Перед безпосередньою розробкою програмного забезпечення важливо визначити розподіл пам'яті для збереження елементів різницевого рівняння, а також окремо передбачити область пам'яті для тимчасових обчислень частин суми цього рівняння.

Додатково варто зазначити, що такий підхід дозволяє оптимізувати використання ресурсів ЦМК, забезпечує коректне опрацювання сигналів датчиків і спрощує подальшу реалізацію керуючого алгоритму у вигляді програмного коду для ПЛК або мікропроцесорної системи.

На цьому етапі виконано побудову математичної моделі оптимального регулятора у вигляді різницевого рівняння, визначено ключові принципи програмної реалізації регулятора та розроблено алгоритми для формування керуючого закону, що забезпечують точне регулювання процесу.

ВИСНОВОК

У випускній кваліфікаційній роботі запропоновано метод підвищення точності роботи поляриметра при визначенні цукристості буряка в складі автоматизованої системи.

Застосування оптимальної Вінеровської факторизації сигналу на виході поляриметра типу ПЕА показало, що найменші значення математичного очікування та середньоквадратичного відхилення похибки вимірювання цукристості досягаються при співвідношенні сигнал-шум близько 0,433 і становлять 0,065 та 0,0094 відповідно. Ці показники перевищують точність існуючих поляриметрів на кілька порядків.

Аналіз оптимального фільтра, який забезпечує зазначені результати, свідчить про можливість його легкої реалізації засобами мікропроцесорної техніки. У роботі також побудовано номограму для налаштування параметрів фільтрів залежно від зміни експлуатаційних умов, що дозволяє забезпечити стабільність роботи поляриметра в різних режимах.

У рамках охорони праці виконано розрахунок системи штучного виробничого освітлення для лабораторії, де відбувається процес автоматизованої оцінки цукристості буряка.