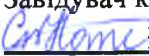


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
приладобудівний факультет
кафедра комп'ютерно-інтегрованих технологій виробництва приладів

До захисту допущено
Завідувач кафедри
 Наталія Стельмах
«16 червня» 2024 р.

Магістерська дисертація
на здобуття ступеня магістра
за освітньо-професійною програмою «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології
в приладобудуванні»
зі спеціальності 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка»
на тему: «Система керування технологічним процесом виготовлення
кабельної продукції»

Виконав:
Студент II курсу, групи ПБ-31мп
Тижук Денис Юрійович



Керівник:
к.т.н., доцент
Філіппова Марина В'ячеславівна



Консультант з розробки стартап-проекту:
завідувач кафедри економічної кібернетики, д.е.н., проф.
Бояринова Катерина Олександрівна



Рецензент:
Доцент кафедри автоматизації та систем
неруйнівного контролю, к.т.н., доцент
Петрик Валентин Федорович



Засвідчую, що у цій магістерській дисертації
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент 

Київ – 2024 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
приладобудівний факультет
кафедра комп'ютерно-інтегрованих технологій виробництва приладів


Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 174 - Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

Освітньо-професійна програма «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

 Наталія СТЕЛЬМАХ

«16» вересня 2024 р.



ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту
Тижучу Денису Юрійовичу

1. Тема дисертації «Система керування технологічним процесом виготовлення кабельної продукції», науковий керівник дисертації Філіппова Марина В'ячеславівна, канд. техн. наук, доцент, затверджені наказом по університету від «07» листопада 2024 р. № 4987-с
2. Термін подання студентом завершеної дисертації 20 грудня 2024 року
3. Об'єкт дослідження: процес виробництва кабельної продукції
4. Вихідні дані: технологічні параметри екструзійної обробки кабельного дроту
5. Перелік завдань, які потрібно розробити: 1. Провести аналіз параметрів, які впливають на якість виготовлення кабельної продукції та існуючі напрацювання в цій галузі. 2. Розглянути методи керування процесом виготовлення ізоляції для кабелів. 3. Розробити структурну схему автоматизованої системи виробництва кабельної продукції. 4. Розробити алгоритм роботи системи керування процесом нанесення ізоляції. 5. Розробити програмне забезпечення для реалізації системи керування. 6. Розробити стартап проєкт. 7. Оформити пояснювальну записку і презентації.

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: презентація за результатами проведених досліджень


7. Орієнтовний перелік обов'язкових публікацій: тези доповідей на науково-технічних, наукових конференціях, стаття у фаховому виданні категорії Б.

8. Консультанти розділів дисертації^{1*}

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Стартап-проекти	Завідувач кафедрою економічної кібернетики, д.е.н., проф. Бояринова К.О.		

9. Дата видачі завдання 16 вересня 2024 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1.	Аналіз параметрів, які впливають на якість виготовлення кабельної продукції та існуючі напрацювання в цій галузі	27.09.2024	
2.	Методи керування процесом виготовлення ізоляції для кабелів	11.10.2024	
3.	Розробка структурної схеми автоматизованої системи	25.10.2024	
4.	Розробка алгоритму роботи системи керування	08.11.2024	
5.	Розробка програмного забезпечення	22.11.2024	
6.	Розробка стартап проекту	06.12.2024	
7.	Оформлення пояснювальної записки і презентації	09.12.2024	

Студент

Науковий керівник



Денис ТИЖУК

Марина ФІЛІПОВА

РЕФЕРАТ

Обсяг роботи: 107

Кількість ілюстрацій: 23

Кількість таблиць: 29

Кількість джерел з переліком посилань: 37

Актуальність теми.

Автоматизація технологічних процесів у виробництві кабельної продукції є актуальним завданням, зумовленим необхідністю підвищення ефективності, зниження витрат та забезпечення високої якості продукції. Виробництво кабелів потребує точного контролю параметрів, таких як натяг дроту, якість ізоляції та стабільність технологічних умов. Удосконалення автоматизованих систем управління сприяє вирішенню цих завдань, забезпечуючи стабільність процесу та відповідність продукції сучасним стандартам.

Зв'язок дослідження з науковими програмами, планами, темами.

Дослідження виконано у межах науково-дослідної роботи кафедри, спрямованої на розробку інноваційних рішень для управління технологічними процесами у виробництві. Результати роботи узгоджуються з державними програмами модернізації промисловості та впровадження новітніх технологій у виробництво.

Мета і задачі дослідження.

Мета роботи — розробка автоматизованої системи управління технологічним процесом виготовлення кабельної продукції з підвищенням якості та ефективності виробництва. Для досягнення мети були поставлені такі задачі:

1. Аналіз факторів, що впливають на якість виробництва кабелів.
2. Розробка математичної моделі технологічного процесу.
3. Вибір оптимальних методів управління параметрами процесу.

4. Розробка та тестування автоматизованої системи контролю виробництва.

5. Оцінка економічної ефективності впровадження розробленої системи.

Об'єкт дослідження.

Технологічний процес виготовлення кабельної продукції, включно з основними технологічними етапами: волочінням, нанесенням ізоляції та контролем якості продукції.

Предмет дослідження.

Параметри процесу виготовлення кабелів, що визначають якість продукції та ефективність їх виробництва

Методи дослідження.

Для виконання роботи використовувались аналітичні методи, математичне моделювання, експериментальні дослідження та програмне забезпечення для симуляції автоматизованих систем.

Наукова новизна одержаних результатів.

Запропоновано новий підхід до автоматизації контролю технологічного процесу виробництва кабельної продукції, що включає інтеграцію сучасних методів управління натягом дроту та моніторингу параметрів ізоляції. Розроблено математичну модель, яка враховує нелінійності технологічного процесу та забезпечує високу точність контролю.

Практичне значення одержаних результатів.

Розроблено систему контролю технологічного процесу виробництва кабельної продукції, що включає інтеграцію сучасних методів управління натягом дроту та моніторингу параметрів ізоляції, яка може бути впроваджена у виробничих лініях для підвищення якості продукції та зменшення браку. Результати можуть бути використані для створення нових технологічних ліній або модернізації існуючих.

Апробація результатів дисертації.

Основні результати дослідження доповідалися на наукових конференціях і семінарах, зокрема:

- Контроль і управління в складних системах (КУСС 2024), ВНТУ, Вінниця;
- VII Міжнародна науково-практична конференція «Наука, технології, інновації: світові тенденції та регіональний аспект». 27-28 вересня 2024 р. Інститут інноваційної освіти. Одеса
- XX Науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Ефективність та автоматизація інженерних рішень у приладобудуванні», 4 - 5 грудня 2024 р, м. Київ, Україна

Публікації.

Результати дослідження опубліковано у статті:

Філіппова М.В., Тижук Д.Ю Система контролю швидкості нанесення ізоляції в кабельному виробництві // Науково виробничий журнал «Електромеханічні і енергозберігаючі системи» м. Кременчук (прийнято до друку),

а також у тезах доповідей на науково-практичних конференціях:

- Тижук Д. Аналіз параметрів системи автоматизованого контролю керування процесом виробництва кабельної продукції // Контроль і управління в складних системах (КУСС 2024), ВНТУ, Вінниця;
- Тижук Д.Ю., Філіппова М.В. Методи керування лінійною швидкістю екструзії при виробництві кабельної продукції. Матеріали VII Міжнародної науково-практичної конференції «Наука, технології, інновації: світові тенденції та регіональний аспект». 27-28 вересня 2024 р. Інститут інноваційної освіти. Одеса. с. 67-69
- D.Yu. Tyzhuk, M.V. Filippova. Control system of the technological process for cable production. XX Науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Ефективність та автоматизація

інженерних рішень у приладобудуванні», 4-5 грудня 2024 р, м. Київ,
Україна

Ключові слова.

Автоматизація, кабельна продукція, натяг дроту, ізоляція, система керування, ефективність, якість, технологічний процес, екструдер, контроль.

ABSTRACT

Scope of work: 107

Number of illustrations: 23

Number of tables: 29

Number of references listed: 37

Relevance of the Topic.

The automation of technological processes in cable production is an urgent task due to the need to improve efficiency, reduce costs, and ensure high product quality. Cable production requires precise control of parameters such as wire tension, insulation quality, and stability of technological conditions. Improving automated control systems helps address these challenges by ensuring process stability and compliance with modern product standards.

Connection of the Research with Scientific Programs, Plans, and Topics.

The research is part of the scientific work of the department aimed at developing innovative solutions for process control in manufacturing. The results align with state programs focused on modernizing the industry and implementing cutting-edge technologies in production.

Purpose and Tasks of the Research.

The purpose of the study is to develop an automated system for controlling the technological process of cable production with improved product quality and production efficiency. The following tasks were set to achieve this goal:

1. Analysis of factors affecting cable production quality.
2. Development of a mathematical model of the technological process.
3. Selection of optimal methods for controlling process parameters.
4. Development and testing of an automated control system for production.
5. Assessment of the economic efficiency of implementing the developed system.

Object of the Research.

The cable production process, including key technological stages such as wire drawing, insulation application, and quality control of the product.

Subject of the Research.

The parameters of the cable production process that determine product quality and production efficiency, as well as methods of their automated control.

Research Methods.

Analytical methods, mathematical modeling, experimental research, and software simulation of automated systems were used for the work.

Scientific Novelty of the Results.

A new approach to the automation of controlling the technological process of cable production is proposed, integrating modern methods of tension control and insulation monitoring. A mathematical model has been developed that takes into account the nonlinearity of the technological process and ensures high control accuracy.

Practical Significance of the Results.

The developed system can be implemented in production lines to improve product quality and reduce defects. The results can be used to create new technological lines or modernize existing ones.

Approval of the Dissertation Results.

The main results of the research were presented at scientific conferences and seminars, including:

- Control and Management in Complex Systems (CMS 2024), VNTU, Vinnytsia.
- VII International Scientific and Practical Conference "Science, Technology, Innovations: Global Trends and Regional Aspects", September 27-28, 2024, Institute of Innovative Education, Odesa.
- XX Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates, and Young Scientists "Efficiency and Automation of Engineering Solutions in Instrumentation", December 4-5, 2024, Kyiv, Ukraine.

Publications.

The results of the research have been published in the article: Filippova M.V., Tyzhuk D.Yu. "Control System of Insulation Coating Speed in Cable Production" // Scientific and Production Journal "Electromechanical and Energy-saving Systems", Kremenchuk (accepted for publication), and in three abstracts:

- Tyzhuk D. "Analysis of the Parameters of the Automated Control System for the Cable Production Process" // Control and Management in Complex Systems (CMS 2024), VNTU, Vinnytsia.
- Tyzhuk D.Yu., Filippova M.V. "Methods of Controlling the Linear Speed of Extrusion in Cable Production". Proceedings of the VII International Scientific and Practical Conference "Science, Technology, Innovations: Global Trends and Regional Aspects", September 27-28, 2024, Institute of Innovative Education, Odesa. pp. 67-69.
- D.Yu. Tyzhuk, M.V. Filippova. "Control System of the Technological Process for Cable Production". XX Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates, and Young Scientists "Efficiency and Automation of Engineering Solutions in Instrumentation", December 4-5, 2024, Kyiv, Ukraine.

Keywords.

Automation, cable production, wire tension, insulation, control system, efficiency, quality, technological process, extruder, control.

ЗМІСТ

ЗМІСТ	8
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	10
ВСТУП	11
1. АНАЛІЗ ФАКТОРІВ, ЯКІ ВПЛИВАЮТЬ НА ЯКІСТЬ ВИРОБНИЦТВА КАБЕЛЬНОЇ ПРОДУКЦІЇ	12
1.1. Аналіз виробничих факторів, які призводять до браку кабелів.	12
1.2. Системна модель процесу виготовлення дроту.	17
1.3. Методи керування в системах контролю натягу	20
1.4. Фактори, які впливають на якість ізоляції при виробництві кабелів та аналіз напрацювань щодо покращення якості виробництва кабельної продукції	28
Висновки до розділу 1	35
2. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ РОБОТИ ЕКСТРУДЕРА ТА РОБОТИ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ НАТЯГУ ДРОТУ	36
2.1. Моделювання роботи екструдера	40
2.2. Моделювання нагрітої частини труби.	47
2.3. Моделювання охолоджуваної водою частини труби.	51
2.4. Моделювання частини виробничої лінії з повітряним охолодженням.	53
Висновки до розділу 2	55
3. РОЗРОБКА АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА КАБЕЛЮ	56
3.1 Аналіз процесу з точки зору розробки системи керування	56
3.2. Вибір елементної бази та загальної структури системи керування.	60
3.3. Налаштування регуляторів та моделювання роботи автоматизованої системи керування технологічним процесом виробництва кабелю	66
Висновки до розділу 3	77
4. РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЄКТУ «СИСТЕМА КЕРУВАННЯ	

ТЕХНОЛОГІЧНИМ ПРОЦЕСОМ ВИГОТОВЛЕННЯ КАБЕЛЬНОЇ ПРОДУКЦІЇ»	78
4.1 Опис та технологічний аудит ідеї стартап-проекту	78
4.2 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап проекту	80
4.3. Розроблення ринкової та маркетингової програми стратегії проекту	86
4.4 Економічна ефективність стартап проекту	93
Висновки до розділу 4	98
ВИСНОВКИ	99
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	100

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ПВХ – полівінілхлорид;

ПЕ – поліетилен;

ЗШП - зшитий поліетилен;

ВСТУП

Сучасне життя є невід'ємним від застосування електрики та електромагнітних хвиль, вони використовуються всюди де є виробництво, транспорт та господарська діяльність, де проводяться інноваційні дослідження та розробляються нові технологічні пристрої. Генерація, застосування та передача електрики та електромагнітних хвиль невіддільні від дроту та кабелю, з'єднання та передачі основних компонентів або матеріалів обмотки, виступають у ролі інформаційних систем.

Кабелі виготовляють з вогнетривких матеріалів, стійких до ураження електричним струмом, термічного впливу, масла, води та інших факторів. По суті, провідник - це широкий термін для дроту, який не розділений покриттям або ізоляцією, тоді як дріт - це один провідник, який зазвичай виготовляється з міді або алюмінію. Подібно до проводів, кабелі представляють собою сукупність двох або більше провідників, суцільних або багатожильних, скручених, обгорнутих або іншим чином зв'язаних разом з ізоляцією або без неї, які використовуються для передачі електричних або телекомунікаційних сигналів. Електричні кабелі важливі, тому що вони є серцем світу; вони використовуються для передачі електричних сигналів і забезпечують основу, на якій електричні пристрої можуть виконувати будь-які роботи. Доступ до електроенергії буде марним без електричних кабелів, і життя буде неприємним для людей. Щоб виробляти довговічні, ефективні та високоякісні електричні кабелі, необхідні різноманітні технології виробництва. Для отримання кабельної продукції високої якості необхідно належним чином контролювати параметри виробництва.

В даній магістерській дисертації розглянута автоматизована система керування технологічним процесом виготовлення кабельної продукції

1. АНАЛІЗ ФАКТОРІВ, ЯКІ ВПЛИВАЮТЬ НА ЯКІСТЬ ВИРОБНИЦТВА КАБЕЛЬНОЇ ПРОДУКЦІЇ

1.1. Аналіз виробничих факторів, які призводять до браку кабелів.

Процес виготовлення кабельної продукції складається з декількох ключових етапів.

Перший етап - це первинна обробка катанки, яка є вихідним матеріалом для провідникової основи кабелю.

Другий етап - створення жил з катанки. Для цього використовують волочильні машини, а сам процес називається волочінням. Багатожильні мідні жили виробляються на крутильних машинах, де пасьма (набір тонких дротів) скручується в стренгу (заготовку для кабелю). Скрутка стренги може бути як лівою, так і правою.

Третій етап - накладення ізоляційної оболонки на струмопровідні жили за допомогою екструзійної лінії. Основною сировиною є гранульований полівінілхлоридний пластикат, що складається з полівінілхлориду та різних присадок (пластифікаторів, наповнювачів, стабілізаторів). Під час екструзії пластикат плавиться і видавлюється через кільцевий зазор, утворюючи оболонку на жилі. Потім жила проходить через охолоджуючу ванну, щоб температура ізоляції знизилася до 60-70 °С, запобігаючи деформації.

При виготовленні багатожильних кабелів ізольовані жили скручуються на крутильних машинах дискового типу. Якщо потрібно додати загальну оболонку, заготовка знову проходить через екструзійну лінію для накладання цієї оболонки.

Останній етап: готовий кабель подається на розбухтовку, проходить перевірку ВТК, пакується і відправляється на реалізацію.

Одним із цих важливих етапів виробництва є процес витягування, який передбачає протягування мідного чи алюмінієвого стрижня через серію поступово менших синтетичних алмазних або карбідних вольфрамових матриць, розміщених у корпусі з м'якої сталі, щоб надати матрицям додаткову міцність і міцність. Волочіння виконується для зменшення стрижня до дроту бажаного

діаметру, який має необхідну якість поверхні, чітко контрольовані розміри та покращені механічні властивості, такі як міцність і твердість.

Процес виготовлення типової мідної катанки складається з чотирьох основних етапів. До них відносяться розмотування, витягування, відпал і перемотування. На стадії розмотування товстий мідний стрижень розмотується на виїзному приводі до камери витягування. У камері витягування товстий мідний дріт пропускають під високим тиском через серію поступово менших матриць для отримання остаточного діаметру дроту. У камері витягування циркулює мастило, для зменшення тертя та розриву дроту. Для спрямування руху дроту з камери витягування до камери відпалу встановлені ролики.

У камері відпалу тягнутий мідний дріт піддається певній термічній обробці для пом'якшення дроту і підвищення його пластичності, оскільки дріт витягується до необхідного діаметру. Необхідно дотримуватись температурного режиму процесу відпалу, для уникнення зайвого розтягування дроту та зменшення його діаметру, що призводить до браку виробництва.

Під час процесу волочіння дроту діаметр дроту на розвантажувальному валі зменшується в розмірі. У результаті, щоб підтримувати стабільну швидкість лінії, привід прискорюється, коли радіус стає меншим. У тому ж випадку радіус котушки намотувального рулону збільшується, змінюючи швидкість і натяг приводу намотувального ролика. Для подолання цієї проблеми використовується система «дансера» для виявлення та корекції небажаного відхилення натягу [1]. За допомогою траверси витягнутий дріт рівномірно намотується на бобіну прийому. Відомості про довжину дроту в бухті на бобіні подається лічильником, встановленим на рухомій мережі біля «дансера». Принципова схема процесу волочіння мідного дроту показана на рис. 1.1

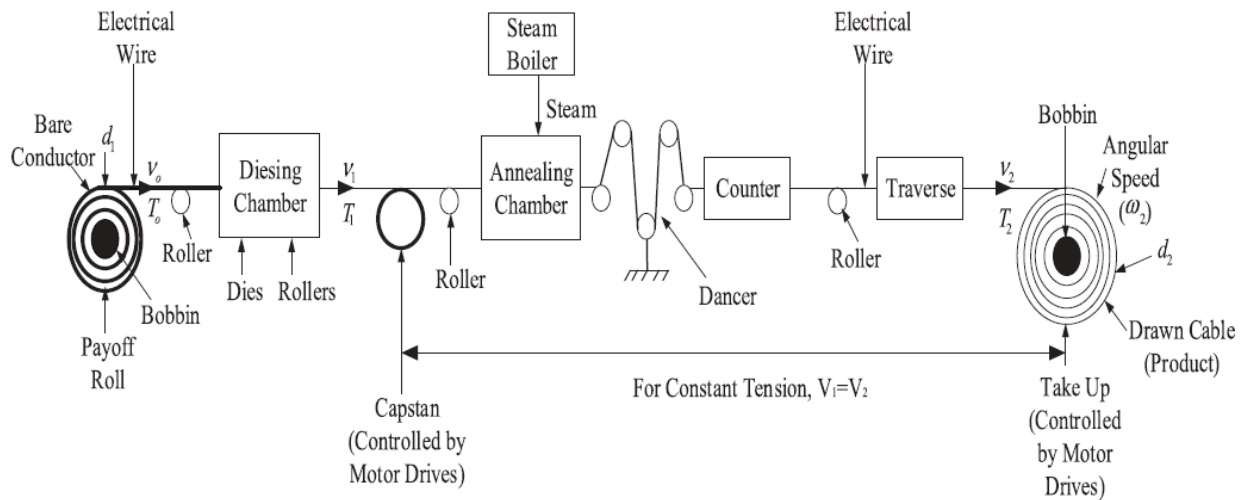


Рисунок – 1.1. Принципова схема процесу волочіння мідного дроту [1].

d_1 - початковий діаметр дроту до волочіння; d_2 - фактичний діаметр дроту після волочіння; $V_0 = V_1$ лінійна швидкість відводу; V_2 лінійна швидкість прийому $T_0 = T_1$ - крутний момент відводу; T_2 - крутний момент; ω_2 кутова швидкість приводу прийому.

Після етапу волочіння дроти з'єднуються разом, щоб утворити кабель, який потім екструджується з ізоляційними полімерами, такими як зшитий поліетилен, поліетилен і полівінілхлорид. Екструзія є вирішальним етапом у виробничому процесі, оскільки вона запобігає втратам міді в кабелях і захищає провідник від фізичних пошкоджень і небезпеки для навколишнього середовища. Після екструзії кінцевий продукт після проходження перевірок якості готується до ринку для споживання.

У кабельній промисловості одним із найважливіших факторів, який слід враховувати, є кінцевий опір або діаметр дроту, значення якого не повинно суттєво відхилитися від норми після виробництва. Тобто натяг дроту повинен підтримуватися постійним під час етапів розмотування та намотування в процесі виробництва кабелю, щоб відбулася мінімальна зміна діаметра або площі поперечного перерізу дроту. Це пояснюється тим, що зміна кінцевого опору тягнутого дроту в результаті збільшення довжини призводить до відповідного зменшення діаметра або площі поперечного перерізу дроту, як показано на в рівнянні 1.1.

$$R = \frac{l}{A} \quad (1.1)$$

де R - опір при $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Ω); ρ - опір провідника, об'ємний питомий опір ($\Omega\text{мм}^2/\text{м}$); l – провідник довжина (м); A – площа поперечного перерізу (мм^2).

Це спричиняє виділення тепла при оцінці через виготовлений кабель протікає струм. Наслідком цього явища є руйнування ізоляції та, як наслідок, коротке замикання.

Дослідження показали [2], що основним фактором, який змінює кінцевий опір під час процесу витягування в процесі виробництва кабелю, є неправильний контроль натягу в результаті зміни крутного моменту або швидкості через зміни діаметра ролика між приводом витягування та намотуванням і зміна швидкості лінії на стадії витягування процесу виробництва кабелю.

Це пов'язано з тим, що більшість виробників кабелів використовують примітивні засоби контролю напруги під час процесу виробництва кабелю, наприклад, механічні пружинні стрічкові гальма або дешеві застарілі програмовані логічні контролери (ПЛК). Однак через коливальну реакцію, перерегулювання, великі значення часу наростання та встановлення та труднощі за наявності нелінійностей, ПЛК мають труднощі з утриманням напруги в допустимих межах. Знову ж таки, підсилення ПД-регулятора необхідно регулювати щоразу, коли відбувається зміна реакції напруги.

Явище неправильного контролю натягу призводить до розриву дроту та нерівномірної товщини через розтягнення дроту, яке перевищує його міцність на розрив, що призводить до зупинки виробництва та виготовлення браку, й це є серйозною проблемою для більшості виробництв електричних кабелів, оскільки вони втрачають величезну кількість грошей або прибутку в результаті матеріальних втрат. Для підвищення якості процесу виготовлення кабелів, необхідно контролювати процес натягу.

Щоб подолати цю проблему, контур контролю натягу з тензодатчиком або контур керування положенням із системою «дансерів» (група роликів, через які проходить дріт) використовується для виявлення та коригування небажаного відхилення натягу шляхом надсилання змін натягу від полотна матеріалу до контролера натягу, який контролює вихід швидкості або крутного моменту приводу, гальма або зчеплення для підтримки необхідного рівня натягу на

постійній основі. Це гарантує постійність натягу протягом усього виробничого процесу.

На практиці методи керування «дансерами» часто застосовуються у виробництві кабелю для регулювання натягу кабелю, особливо під час фаз розмотування та намотування в процесі протягування кабелю. Потенціометр застосовується до «дансера» для досягнення регулювання швидкості двигуна. Потенціометр вимірює його зміщення та порівнює з еталонним або заданим натягом. Отже, постійне положення «дансера» та постійна напруга зберігаються при варіаціях швидкості лінії, навантаження двигуна та діаметру рулону.

«Дансерні» системи можна умовно розділити на активні і пасивні, які можна відрізнити за допомогою зовнішнього приводу. У той час як пасивний «дансер» складається з ролика, пружини та демпфера без зовнішнього приводу, активний - використовує потенціометр для визначення положення ролика та зовнішній актуатор, щоб примусово рухатися з метою керування порушення натягу. Однак гібридний «дансер», який поєднує пасивні та активні елементи, також використовується для опосередкованого контролю розладів напруги. Його характеристики відрізняють його від пасивного або активного варіантів виконання. Ролики в таких пристроях вільно коливаються в одному напрямку незалежно від навантаження, і за ступенем свободи вони поділяються на поступальні та обертальні. Залежно від ситуації, для визначення типу «дансера» для конкретного застосування може використовуватися процес або обмеження простору [2].

Також можливе використання тензодатчиків для визначення тягової сили, що діє на натяжний ролик в результаті натягу, що дозволяє впроваджувати коригувальні заходи контролю.

Кілька факторів можуть вимагати вибору певного типу «дансера» або тензодатчика для вимірювання натягу. Завдяки обмеженому діапазону обертання танцювальної руки та здатності справлятися з невеликими коливаннями, пасивна танцювальна пластина забезпечує ефективне регулювання натягу для низькошвидкісних ниток. Активні «дансери», з іншого боку, пропонують точний контроль натягу в широкому діапазоні частот збурень. Однак динаміка приводу

для перекату обмежує продуктивність активного «дансера». Активні системи такого типу зазвичай погано функціонують у динамічних умовах через затримку реакції приводу. Крім того, це дорожче та складніше в розгортанні. Отже, активний «дансер» використовується не часто.

Крім того, встановлення тензодатчиків або датчиків призводить до збільшення економічних витрат на проектування машини. Крім того, ці датчики натягу чутливі до відповідного вирівнювання та балансування, що знижує надійність системи та збільшує складність веб-систем. Вони також займають простір і вимагають частого обслуговування та калібрування. Крім того, для тензодатчика потрібен великий фільтр для згладжування фактичного сигналу, щоб усунути шумовий сигнал, який, як наслідок, призводить до повільної реакції датчика. Знову ж таки, схема керування «дансером» також має повільну реакцію, оскільки існує властива затримка часу в сигналі положення, оскільки схема керування положенням може реагувати лише після його руху.

Як результат, поширеною технікою для оцінки натягу нитки є використання спостерігачів або оцінювачів, що залежить від моделі системи. Спостерігач за натягом пропонує надійний безконтактний спосіб вимірювання. Оскільки це залежить від динамічної моделі, важливо створити точну динамічну модель, щоб отримати хорошу продуктивність спостерігача. Алгоритми спостерігача зазвичай виконуються за допомогою керуючого коду, що робить їх більш надійними, ніж датчики, і легко адаптуються до інших матеріалів або систем контролю натягу полотна [3].

1.2. Системна модель процесу виготовлення дроту.

Система контролю натягу на стадіях розмотування та намотування типового процесу волочіння дроту складається з механізму розтягування дроту, диска, механізму приймання та механізму приводу в поєднанні з механізмом центрального приводу [4]. Концептуальна схема процесу волочіння дроту зображена на рис. 1.2.

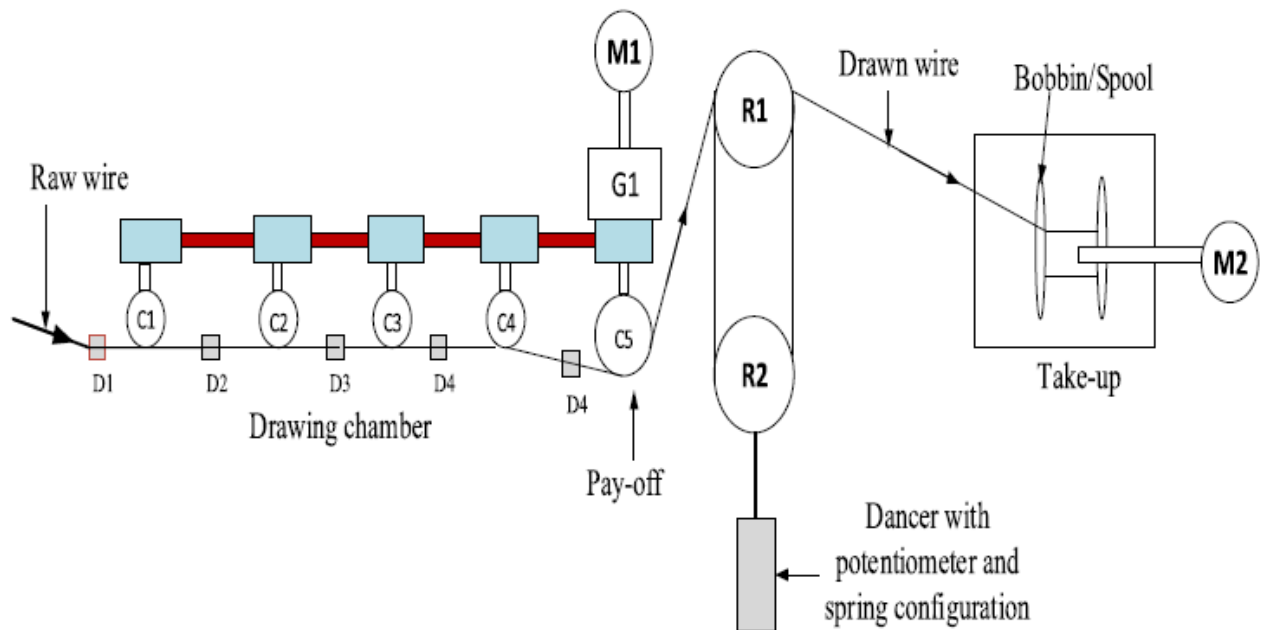


Рисунок – 1.2. Принципова схема процесу волочіння дроту з механізмом витягування, натягу та диска намотування: M1 - двигун витягування; M2 - двигун прийому; C1-C5 - шпильки; G1 - коробка передач; D1-D5 - волочильні штампи; R1, R2 – валки «дансера».

На стаціонарну та динамічну поведінку полотна в поздовжньому або машинному напрямку впливають фізичні властивості дроту та динамічні характеристики механічних частин. Зубчаста система передачі з'єднана з натяжними роликami, які служать входами. Завдяки належному контролюванню швидкості приводу натягу та відводу підтримується стабільний натяг дроту. Для вимірювання натягу дроту використовується диск з пружиною та демпфером, з'єднаний з потенціометром, який служить вихідним сигналом. По суті, матеріал, трансмісія та «дансер» — це три категорії, на які можна розділити математичну модель системи керування натягом дроту. Тангенціальні швидкості натяжних роликів і диска пов'язані між собою через матеріал або дріт. Три закони контролюють цю взаємодію. До них відносяться закон Гука, який моделює пружність дроту; Закон Кулона, який визначає зміну натягу через тертя та контактну силу між дротом і роликami; і закон збереження маси, який виражає перехресний зв'язок між швидкістю дроту та деформацією або визначає положення «дансера» та зміну швидкості через натяг дроту.

Передавальна функція матеріалу, який є дротом, показана в рівнянні нижче.

$$H_{wire} = \frac{T}{-V_1 + V_2 - 2V_d} = \frac{\frac{EA}{L_N} + \frac{CA_s}{L_N}}{S + \frac{V_1}{L_N}} \quad (1.2)$$

де T – натяг дроту (Н); V – швидкість натяжного валка (м/с); V_2 – швидкість натяжного валка (м/с); V_d – швидкість вимірювального ролика (м/с); E – модуль Юнга дроту (Н/м); A – площа поперечного перерізу полотна (м²); L_N – номінальна довжина дроту (м); C – коефіцієнт демпфування дроту (Па/с).

Двигун і редуктор, які перетворюють кутове обертання ротора двигуна на швидкість дроту, складають модель трансмісії. Вона створює зв'язок між вхідним крутним моментом двигуна та вихідною кутовою швидкістю, як показано в рівнянні (1.3).

$$\frac{\omega_m}{\tau_m - \tau_e} = \frac{1}{J_m s + B_m} \quad (1.3)$$

де ω_m – кутова швидкість двигуна (рад/с); τ_m – механічний момент двигуна (Нм); τ_e – електромагнітний момент двигуна (Нм); J_m – момент інерції двигуна (Нм²); B_m – константа в'язкого тертя двигуна (Нм*с/рад).

Тангенціальна швидкість рулону або дроту створюється кутовою швидкістю двигуна, зображеною в рівнянні (1.4). На швидкість дроту впливають радіус рулону, швидкість обертання двигуна та передавальне число.

$$V_2 = \frac{R\omega_m}{N_g} \quad (1.4)$$

де R – радіус крену; N_g – передавальне число двигуна.

Використано другий закон руху Ньютона для опису механік «дансера» та сил, які застосовуються, такі як тертя та пов'язана пружина, яка моделюється як

ідеальна пружина, що працює паралельно в'язкому демпферу. Рівняння руху «дансера» відповідає рівнянню (1.5).

$$2T - F_w - F_L = (M_d s^2 + B_d s + K_d) d \quad (1.5)$$

де F_w - зусилля, яке докладає «дансер»; F_L - навантаження пружини; M_d - маса «дансера»; B_d - коефіцієнт тертя; K_d - постійна пружини; d - положення «дансера».

Блокове представлення динамічного моделювання системи з використанням рівнянь (1.2)–(1.5) показано на рис.1.3 [1].

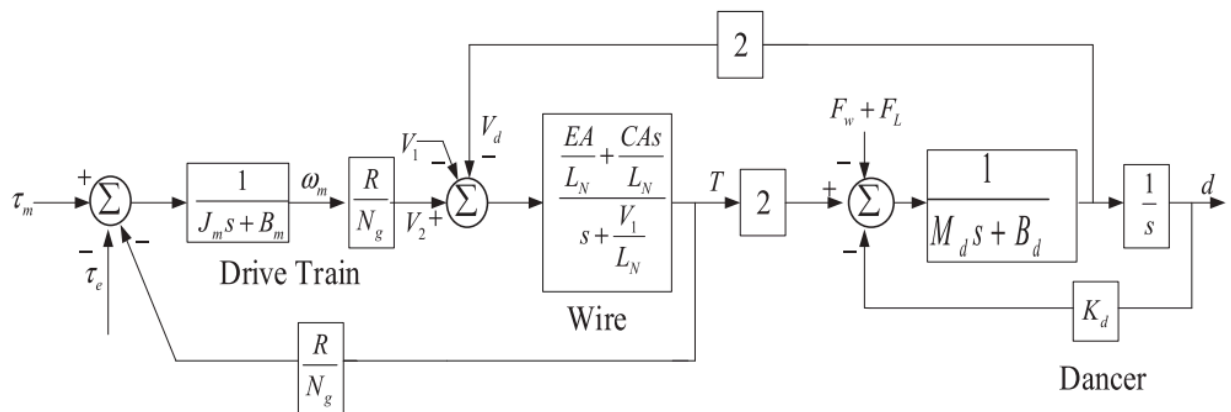


Рисунок – 1.3. Повна модель системи натягу дроту з «дансерною» динамікою

1.3. Методи керування в системах контролю натягу

У зв'язку з потребою підвищити продуктивність і ефективність у виробництві кабелів, необхідна ефективна конструкція контролера для передачі дроту з заданою швидкістю, зберігаючи його натяг в допустимих межах у широкому діапазоні динамічних ситуацій, таких як відхилення в діаметрі рулону, властивості полотна та аномалії швидкості. В основному, алгоритм управління можна класифікувати як відкритий цикл, замкнутий цикл або ручне керування. У більшості випадків замкнутий цикл керування, хоча й дорогий, є кращим методом, оскільки він забезпечує надзвичайно точний і чіткий контроль натягу як під час перехідних, так і в стаціонарних умовах виробничого процесу.

Як наслідок, дизайн керування натягом дроту отримав великий інтерес від керування з відкритим контуром, такого як механічне чи ручне керування, до систем керування із замкнутим контуром, таких як звичайне ПІД-регулювання, розширене керування, керування на основі спостерігача, керування за допомогою штучного інтелекту та гібридні методи контролю, як показано на рис. 1.4 [5]. Реалізація кожного з цих алгоритмів керування базується на централізованій, децентралізованій та перекриваючій архітектурі керування. Як правило, централізоване керування використовується для веб-систем із трьома або меншою кількістю двигунів. Однак тому, що системи керування часто включають декілька приводних роликів зазвичай розглядаються як великомасштабні системи, для яких централізоване керування незручне.

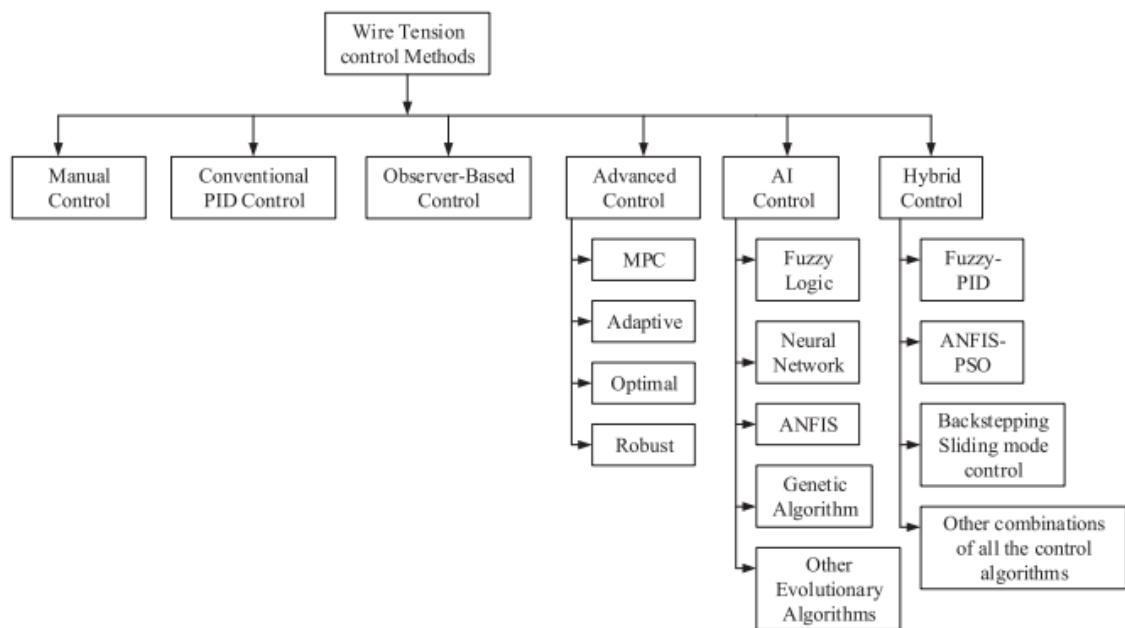


Рисунок – 1.4. Принципова схема алгоритмів керування, що застосовуються в системах керування натягом

Децентралізований метод контролю забезпечує простий підхід до керування всією системою шляхом створення контролера для кожної підсистеми без необхідності зв'язку між ними. Однак ігнорування взаємозв'язків підсистем зменшує здатність децентралізованого управління відкидати збурення, створювані сусідніми підсистемами. Як наслідок, методи контролю, що перекриваються, використовуються для покращення можливостей системи проти перешкод шляхом використання підсистемних взаємозв'язків.

Механічний контроль натягу.

Переважає більшість дротів натягується механічними засобами, такими як механічне стрічкове гальмо з пружинним приводом, магнітно-порошкове гальмо та електромагнітне гальмо. Ці пристрої здебільшого складаються з механічних частин, таких як шків, ролик та диски, без активних датчиків для вимірювання натягу, але з пасивними елементами, такими як щупи та пружини. Проста конструкція та легкість у використанні характеризують механічний контроль натягу. Однак точність керування низька, і значення натягу не можна автоматично регулювати через те, що контроль натягу за допомогою механічної системи базується на суб'єктивності оператора. Це призводить до втрат виробництва та нижчої якості. Його також характеризують високі витрати на обслуговування, низька швидкість і низька ефективність.

Традиційне ПІД-регулювання

Щоб усунути недоліки, пов'язані з механічним або ручним методом керування, лінійні методи керування, такі як звичайні ПІД-регулятори, були широко застосовані для регулювання натягу рухомого дроту завдяки їхнім притаманним перевагам, таким як простота, зменшене обчислювальне навантаження, легкість впровадження та вартість ефективність контролю натягу порівняно з ручним методом. Як правило, це каскадний контур ПІД-регулювання зазвичай використовується для регулювання натягу полотна, у якому внутрішній контур використовується для контролю швидкості, а зовнішній контур використовується для контролю натягу, як показано на рис. 1.5.

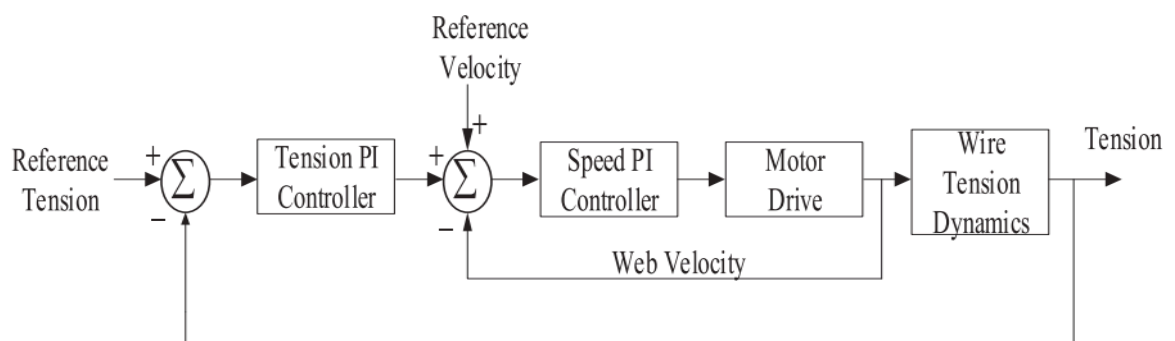


Рисунок – 1.5. Контроль натягу за допомогою ПІД-регулятора.

ПІД-регулювання по суті використовує модель системи як метод керування зворотним зв'язком. Воно розраховує похибку, яка є відхиленням бажаного

заданого значення від вимірної змінної процесу, і модифікує сигнал керування відповідно до величини сигналу похибки. Алгоритм ПД-регулювання використовує три різні методи керування. До них входять пропорційний член, який стосується поточного зміщення; інтегральний термін, який залежить від накопичення попередніх помилок; і похідний термін, який прогнозує майбутні зміщення на основі поточної швидкості зміни процесу. Керуючий сигнал генерується на основі зваженої сукупності цих трьох дій, описаних законом керування, як показано в рівнянні 1.6. Незважаючи на численні досягнення ПД-регулятора у методології проектування звичайні підходи Циглера-Ніколса все ще широко використовуються для контролю натягу рухомих полотен.

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int_{-\infty}^t e(\tau) d\tau + k_d \frac{de}{dx}(t) \quad (1.6)$$

де $u(t)$ - контролюючий сигнал; $e(t)$ - сигнал помилки; k_p , k_i , k_d - відповідно пропорційна, інтегральна та диференціальна складові відповідно.

Методи ПД-регулювання застосовувалися кілька разів для контролю натягу полотна. Зважаючи на це, запропоновано систему моделювання та контролю натягу з кількома входами та кількома виходами для машини глибокого друку [6]. Спочатку була створена нелінійна модель натягу полотна вдосконаленої машини глибокого друку, причому довжина проміжку змінювалася з часом, а не була фіксованою. Довжина відрізка полотна змінювалася з часом через рух башточки машин, що використовуються для розмотування та перемотування, а також зміщення «дансера». Потім, використовуючи програмне забезпечення MATLAB/Simulink, була реалізована система керування зі зворотним зв'язком, заснована на пропорційно-інтегральному регулюванні, і продуктивність керування натягом перетинки була досліджена в стаціонарних і перехідних умовах. Відповідно до результатів моделювання, система керування мала резонанс при заданому налаштуванні параметра на рівні близько 4 м/с. Також досліджено точний контроль натягу машини для намотування та розміщення волокна з використанням замкнутої системи контролю натягу, побудованої з MCU PIC16F877A, цифрового серводвигуна змінного струму як приводу та датчика

натягу для зворотного зв'язку [7]. Моделювання MATLAB/Simulink було використано для оцінки ефективності системи з ПД-регулюванням. Результати показали, що статичне ковзання та нестабільність системи за постійної швидкості та постійного натягу відповідають вимогам контролю натягу. Запропоновано гібридний регулятор натягу на основі маятникового «дансера» для системи друку з рулону на рулон. Цей новий гібридний маятниковий «дансер» був створений для подолання проблем активних і пасивних «дансера». Спочатку була створена модель «дансера»-маятника. Для вимірювання кута руки «дансера» використовувався потенціометр, який фільтрувався за допомогою фільтра низьких частот першого порядку. Використовуючи пропорційно-інтегральний контролер для опосередкованого регулювання натягу, положення руки «дансера» контролювалося шляхом регулювання швидкості подаючого ролика. Надійності та стабільності запропонованого гібридного маятника «дансера» в послабленні розривів напруги були продемонстровані за допомогою моделювання та експериментальних результатів [8]. Змодельовано та контрольовано натяг полотна за допомогою маятникового «дансера» та порівняно його продуктивність із роботою датчика навантаження. Для перевірки ефективності розробленої моделі для визначення резонансних частот використовувався аналіз часових і частотних характеристик для двох схем керування. Перший був контролер натягу зовнішнього контуру, який ґрунтувався на зворотному зв'язку з положенням «дансера», тоді як другий був зроблений за допомогою встановленого на ролик тензодатчика з зворотним зв'язком натягу. Випробування в частотній області проводилися шляхом введення завад, які є синусоїдально до S-подібного валика, тоді як аналіз у часовій області проводився з використанням ступінчастої зміни швидкості. Зворотний зв'язок тензодатчика та «дансера» контролювався за допомогою нормалізуючого підсилення, розробленого з ПІ-регулятором натягу.

Результати моделювання та експерименту показали, що завдяки здатності «дансера» фільтрувати низькочастотні збурення, зміни напруги з «дансером» були значно меншими, ніж з тензодатчиком у діапазоні низьких частот від 0 Гц до 3 Гц. Розробивши точну динамічну модель для характеристики натягу та

запропоновано стратегію контролю натягу для безвальної друкарської рулонної машини. Повна модель моделювання натягу обмотки, що складається з кількох підмодулів, таких як модуль серводвигуна, модуль натягу обмотки, модуль еталонного значення натягу конуса та модуль розрахунку діаметра в реальному часі, була змодельована за допомогою програмного забезпечення MATLAB/Simulink. Для контролю напруги використовувався подвійний каскадний ПІД-регулятор замкнутого циклу. Змодельовані результати були показані шляхом зміни параметрів підлеглого контуру керування та головного контуру керування. Результати показали, що контролер міг ефективно відстежувати опорні значення швидкості та натягу. Однак продуктивність керування можна покращити за допомогою адаптивного контролера.

Також у системі відліку dq змодельований виконавчий механізм, що складається з асинхронного двигуна змінного струму з векторним керуванням у програмному середовищі MATLAB/Simulink для волочильної машини. Натяг дроту вимірювали за допомогою руки «дансера» як датчика. Щоб підтримувати натяг дроту постійним, використовувалися ПІД-регулятор і регулятор змінної частоти для керування приводом щоразу, коли помилка сигналу «дансера» змінювалася відносно попередньо встановленого натягу. Виходячи з результатів моделювання, система могла точно контролювати натяг.

Розроблено математичну модель механізму волочіння та намотування дроту, що використовує систему приводу асинхронного двигуна з векторним керуванням на основі лінійної швидкості та моменту інерції дроту [9]. Пневматичний циліндр, що подає потік повітря під тиском через регулятор тиску, регулював силу натягу волочильної машини. Перетворювач частоти з використанням ПІД-регулювання використовувався для керування контуром швидкості волочильної машини. Отримані результати показали, що запропонована стратегія продемонструвала оптимальну ефективність і стабільність контролю натягу дроту в широкому діапазоні робочих швидкостей, уникаючи при цьому механічних ударів, які можуть спричинити розриви дроту.

Покращено контрольну реакцію системи веб-обробки шляхом автоматичного налаштування значень параметра ПІД у кожному діапазоні.

Використовуючи декомпозицію, що перекривається, всю систему керування було сформульовано як децентралізовану систему, що складається з чотирьох систем приводу. Експериментальні результати показали, що завдяки застосуванню профілю рампи заданого значення запропонована методика забезпечила ефективне керування швидкістю полотна від зупинки до високої швидкості 2 м/с. Це також гарантувало, що сили натягу добре контролюються і що небезпечні значення натягу ніколи не створюються.

Динамічну модель помилки та контрольний вхід використовували, щоб забезпечити стійку техніку децентралізованого контролю для систем обробки дроту [10]. Необхідна умова існування децентралізованого контролера була сформульована за допомогою лінійних матричних нерівностей (LMI). Потім техніку керування було застосовано до системи намотування полотна з трьома двигунами. Контролер продемонстрував свою ефективність у придушенні коливань напруги в моделюванні та експериментальних випробуваннях з використанням ПД-регулятора. Контролер, однак, не зміг адекватно обмежити збурення, викликані зміною контрольного значення. Також створено механізм натягу дроту для високошвидкісної електророзрядної машини. Система керування була математично змодельована з використанням датчика натягу, платформи лінійного руху та серводвигуна постійного струму. Параметри ПД потім були розраховані за допомогою імітаційної моделі, яка включала передатну функцію системи. Ефективність системи контролю натягу дроту було перевірено за допомогою перевірки на основі моделювання та експериментів. Результати показали, що зміна значення натягу дроту зменшилася майже вдвічі. Крім того, шорсткість поверхні заготовки з системою контролю натягу дроту була на 0,6 Нм нижчою, ніж заготовки без будь-якого контролю.

Також використовувався блок мікроконтролера з алгоритмом ПД-регулювання для керування натягом обмотки надтонкого емальованого дроту. Для розрахунку підсилення ПД використовувався метод Циглера та Ніколса. Використаним датчиком кута був інкрементний фотоелектричний кодер, а приводом був серводвигун змінного струму. Щоб перевести зміни в натягу в варіації кута повороту стрижня, механізм стрижня-пружини використовувався як

«дансер». Життєздатність системи була перевірена шляхом моделювання за допомогою програмного забезпечення MATLAB/Simulink. Прототип також був виготовлений і випробуваний на емальованих дротах, які були надтонкими і мали діаметр 0,08 мм. Висновки показали, що контролер ефективно працював як у перехідному, так і в усталеному станах, а також мав хорошу анти-здатність до перешкод. Однак підсилення ПД-регулятора потрібно було встановлювати вручну, що було величезною проблемою.

Незважаючи на те, що звичайні ПД-регулятори широко використовуються для регулювання натягу рухомих полотен, їхнім головним недоліком є те, що вони непридатні для складних, нелінійних, багатопараметричних зв'язаних систем, невизначених і змінних у часі систем, таких як динамічна природа контролю натягу дроту. Це пояснюється тим, що підсилення ПД залишається постійним протягом усього процесу, що робить його нездатним досягти високої динамічної продуктивності в різноманітних робочих ситуаціях. Вони також мляві, зі значними викидами та подовженим часом встановлення. Крім того, звичайний ПД-регулятор використовує систему з одним входом і одним виходом, що призводить до небажаних відхилень при використанні в системах з кількома входами та кількома виходами, такими як керування натягом дроту.

Тому останні дослідження зосереджені на сучасних стратегіях керування, таких як розширене керування, керування на основі спостерігачів, керування штучним інтелектом та гібридне керування, щоб покращити продуктивність ПД-регуляторів або забезпечити кращу альтернативу контролю натягу полотна. Деякі з цих сучасних стратегій керування включають генетичний алгоритм, штучну нейронну мережу, нечітку логіку, оптимізацію частинок на основі рою, ковзаючий режим керування, адаптивний алгоритм зворотного кроку, контролер активного усунення завад з оцінювачами стану та спостерігачами. Ці системи керування продемонстрували чудову реакцію керування в регулюванні натягу на рухомих полотнах, включаючи більшу чутливість, зменшене обчислювальне навантаження та покращену продуктивність у змінній у часі та нелінійній природі полотна під час перехідних і стаціонарних станів операції. Отже,

підтримання стабільності системи за різних еталонних натягів і транспортних швидкостей.

1.4. Фактори, які впливають на якість ізоляції при виробництві кабелів та аналіз напрацювань щодо покращення якості виробництва кабельної продукції

Процес екструзії — це техніка виробництва, за якої матеріали переміщуються вздовж шнека та виштовхуються через фільтру при певній температурі та тиску. Одним із найпоширеніших місць, де використовується процес екструзії, є виробництво кабелів. Це дуже корисно при екструзії термопластичного матеріалу (ПВХ, ПЕ або зшитого поліетилену) в ізоляції електричних кабелів. Один з найпоширеніших є термопластичний ПВХ. Сьогодні виробництво кабелю стикається з деякими проблемами, які можуть вплинути на якість кабелів. Проблеми часто пов'язані зі складними процесами, які беруть участь у процесі виробництва кабелів. У кабельній промисловості існує величезна кількість параметрів (відомих як параметри процесу), які впливають на вихідний продукт, отриманий після процесу екструзії. Параметри процесу включають температуру розплаву, швидкість, налаштування тиску, швидкість шнека, тип використовуваної матриці та охолоджуюче середовище в екструзійній машині. Температура та тиск розплаву є одними з найважливіших параметрів у процесі екструзії [11]. Ці параметри вказують на якість роботи екструдера. Зміни температури розплаву в екструдері також важливі для визначення стабільності процесу екструзії. Температура, тиск, коливання параметрів процесу в екструдері є важливими для визначення якості результату самої екструзії. Ці параметри процесу дуже схильні до коливань, тому спричиняють проблеми у виробництві кабелю. Деякі з цих проблем включають виробництво кабелів низької якості, збільшення витрат і часу на виробництво, а також відходи матеріалів у виробничих галузях.

Складність і велика кількість технологічних параметрів, які беруть участь у виробництві цих кабелів, ускладнюють контроль і моніторинг усього процесу.

Неправильна робота в процесі виробництва часто призводить до дефектів виготовлених кабелів. Ці дефекти можуть бути у вигляді нашарувань, тріщин, повітряних порожнин і пористості в ізоляції кабелю на рис. 1.6 показано схематичне зображення електричного кабелю з дефектами.



Рисунок – 1.6. Ізоляція електричного кабелю з дефектами

Дефекти можуть призвести до руйнування ізоляції, що може призвести до втрати властивостей самого кабелю.

Неналежна робота у виробництві електричних кабелів також може призвести до збільшення виробничих витрат, простоїв і марних витрат матеріалу.

Аналіз факторів, які впливають на дефекти кабелів та можливості їх усунення вимагають додаткового аналізу [12]. Розглянута компанія середнього розміру, яка виготовляє кабелі різних розмірів і кольорів. Організація протягом багатьох років була перевантажена декількома виробничими проблемами у вигляді високого відсотка браку кабелю після екструзії через дефекти поверхні ізоляції, неправильну товщину ізоляції, малий діаметр провідника та невідповідність розмірів кабелю тощо.

Аналіз основних причин розриву між поточною продуктивністю та цілями, визначеними на першому етапі, було виконано авторами з використанням даних, отриманих на етапі вимірювання. Отримані результати були впорядковані в раціональні категорії, як показано на рис. 1.7 після сеансу мозкового штурму, і під час сеансу була підготовлена діаграма причин і наслідків, яка точно відображає зв'язки всіх даних у кожній категорії.

Після визначення основних причин на етапі аналізу. Фаза «Поліпшення» була спрямована на визначення рішень для зменшення та усунення причин. План перевірки причин, який було складено на етапі аналізу, допоміг у визначенні основних причин цих дефектів. Рішення щодо виявлених причин дефектів було

виділено та задокументовано, як показано в таблиці 1.1. Завдяки якісній оцінці, були запропоновані рішення щодо виявлених причин дефектів були запропоновані на основі попереднього досвіду щодо процесів екструзії.

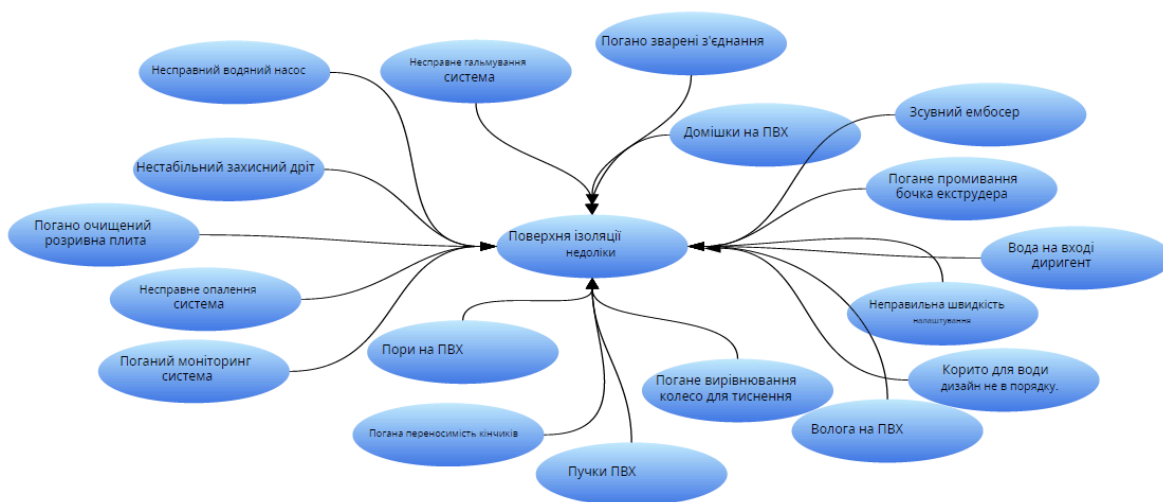


Рисунок – 1.7. Діаграма причин браку при виготовленні кабелів на екструдованих лініях.

Таблиця 1.1 Причини дефектів ізоляції кабелю при виробництві

№ п/п	Причини появи браку при виробництві кабелів	Рішення для зниження частоти поломок кабелю через дефекти поверхні ізоляції.
1	Несправна система опалення	Використання якісних обігрівачів. Під час перерви оператори повинні знизити температуру.
2	Наявність води на ввідному провіднику	Використання полум'я оксиацетиленового газу на кожному вхідному провіднику перед екструзією та з інтервалами під час екструзії.
3	Пори в ПВХ	Компромісну якість не можна використовувати.
4	Погана система моніторингу	Перегляньте стратегію моніторингу, переконавшись, що під час екструзії для покращення продукту використовується моніторинг як на основі процесу, так і на основі продукту.
5	Неправильне налаштування швидкості	Оптимальні налаштування параметрів за допомогою експериментальних проєктів.
6	Погана промивка екструзійного ствола	Належне промивання та адекватний моніторинг.
7	Неправильна конструкція лотка для води.	Переробка направляючої водопроводу, перевірка інтервалів на направляючій кабелю.
8	Погане вирівнювання колеса для тиснення або зсув	Періодична перевірка та належне затягування колеса.

	тиснення.	
Продовження таблиці 1.1		
9	Погана переносимість кінчиків	Не використовувати.
10	Несправна гальмівна система	Технічне обслуговування/Капітальний ремонт гальмівної системи.
11	Недостатня кваліфікація/недбалість	Адекватне навчання, моніторинг, а також переконайтеся, що оператори завжди дотримуються стандартної робочої процедури.
12	Погано зварений дріт.	Ретельне запилювання зварного з'єднання (виміряйте зварну точку після зварювання)
13	Управління проблеми/брак мотивації	Перегляньте існуючу програму заохочення, створіть адекватну систему планування ресурсів, яка забезпечить доступність необхідних частин і матеріалів.

Як видно з таблиці до причин браку відносяться як технологічні, так і управлінські.

Якість виробництва кабелю в більшій частині залежить від операції нанесення ізоляції [13]. Автори створили математичну модель, формальною частиною якої є матеріальний баланс, що описує кінетику реакцій зшивання полімеру навколо провідника. Тепловий і молярний баланс пов'язані зі швидкістю реакції та математично представляють систему рівнянь у частинних похідних, які були чисельно розв'язані для обраних граничних умов, як для реакційної частини, так і для охолоджувальної частини процесу. На основі реальних параметрів процесу та представленої математичної моделі було проведено моделювання процесу, що дозволило прогнозувати та оцінити оптимальні параметри процесу, такі як температура процесу, лінійна швидкість кабелю та властивості охолодження ізоляції. Однак в роботі не розглядаються інші технологічні процеси, які також впливають на якість продукції.

Також для зменшення витрат на виробництво кабельної продукції може застосовуватися мобільна лінія, яка виготовляє кабель безпосередньо перед тунелем, де укладають кабель [14]. Праця присвячена дослідженню виробництва довгих кабелів в тунелях, описано всі етапи організації такого виробництва. Запропоновано використання мобільної лінії, яка безпосередньо виготовлятиме

продукцію на місці прокладання кабелів, що зменшить затрати на виробництво. Проте автори мало уваги приділяють засобам контролю та оптимізації самого виробництва, що також може знизити вартість продукції.

При аналізі процесів, які відбуваються на стадії екструзії використовують моделі на основі нейромереж [12]. Автори розробили модель штучної нейронної мережі для прогнозування параметрів процесу екструзії, яка змогла точно передбачити параметри процесу для різних марок кабелю. Використання таких мереж може скоротити терміни налаштування екструзійних ліній. Це дозволить знизити вартість та покращити якість продукції. Проте додатковим методом оптимізації такого виробництва є більш якісний активний контроль самого процесу в режимі реального часу, що також покращить показники виробництва.

Також для покращення процесу виробництва кабелів проводять оптимізацію самої конструкції екструдера [16]. При цьому такі дослідження проводяться за допомогою моделювання потоку полімерних гранул вздовж твердого конвеєрного шнека з використанням чисельної моделі на основі методу кінцевого об'єму. Основні параметри, такі як температура, профілі швидкості та тиск, демонструють високу ступінь подібності до практичних результатів. Однак в роботі недостатньо розглянуті аспекти практичного застосування отриманих даних.

Для виробництва певних видів кабелів представлено нову концепцію процесу виробництва з використанням методології наукових досліджень дизайну [17]. Проект починається з аналізу попередньої концепції виробництва, визначення можливих проблем і вдосконалень, а також визначення цілей/вимог для можливої нової концепції/обладнання. Ця інформація була використана для розробки нового автоматизованого обладнання для виробництва кабелю Боудена, впроваджуючи кілька змін до старої концепції. Розроблена система впроваджена та протестована. Було зареєстровано значне скорочення тривалості циклу на 25%, що призвело до підвищення продуктивності процесу на 30%. Недоліком такої концепції є вузьке налаштування лише на одну номенклатуру кабелів.

При аналізі процесу виробництва кабельної продукції важливо ідентифікувати параметри процесу регулювання [18]. Одним з найбільш

проблемних місць у виробництві є наявність в контурах регулювання товщини шарів ізоляції шумів вимірювання швидкостей черв'яків екструдерів і діаметрів шарів ізоляції, а також затримка часу. Зашумленість корисних сигналів і затримка часу негативно впливають на точність контролю товщини шару і швидкість регулювання і можуть призвести до втрати стабільності системи. Для вирішення цієї проблеми авторами запропоновано метод параметричної ідентифікації, який в реальних умовах зашумлених вимірювань змінних об'єкта керування дає оцінку, близьку до точних значень параметрів. Хоча метод є ефективним, необхідно провести аналіз методів його реалізації у практичному виробництві.

Також важливим аспектом покращення процесі виробництва є використання більш якісних приводів [20]. Автори розробили конструкцію централізованого нелінійного контролера, заснованого на швидкому інтегральному терміналі керування ковзним режимом для гібридної мікромережі змінного/постійного струму. У режимі реального часу проведено циклічні тести обладнання для перевірки ефективності запропонованої структури.

Щоб виконати завдання намотування дроту якнайшвидше, швидкість виробництва повинна бути відрегульована під час цієї операції [21]. Для вирішення проблеми контролю натягу для систем намотування автори пропонують надійну стратегію керування для зменшення коливань натягу. Побудовано варіаційну динамічну модель для фази прискорення за допомогою розширення Тейлора та проведено моделювання процесу. Хоча досягнуто позитивного ефекту, на нашу думку ефективно реалізувати таку стратегію досить складно.

Також важливим аспектом досліджень є методи знаходження пошкоджених ділянок ізоляції [22]. Автори навели алгоритм, що використовує значення амплітуди вектора початкового нульового струму приєднання з пошкодженням і кута між цим вектором і вектором міжфазної напруги для відомого режиму розподільної мережі. Він дозволяє однозначно визначати відстань до місця пошкодження ізоляції і значення опору цього пошкодження. Для ефективного впровадження систем керування необхідно проводити розв'язок

диференціальних рівнянь, що описують процес [23]. Авторами застосовано узагальнений підхід методу зворотного кроку для стабілізації та розв'язання системи диференціальних рівнянь для систем із кратним запізненням.

Перспективним методом оптимізації ефективності керування технологічним процесом виготовлення кабельної продукції також є використання ПД регуляторів та контролерів нечіткої логіки [24-26].

Не дивлячись на велику кількість робіт оптимізація процесу виготовлення кабельної продукції є актуальною на сьогоднішній час. В роботі побудовано систему контролю швидкості подачу кабелю на ділянках відводу та прийому дроту при нанесенні ізоляції екструзійним методом.

Висновки до розділу 1

В розділі було розглянуто системи керування натягом дроту при виробництві кабелів як основного фактора, який впливає на якість продукції.

Описано фактори, які впливають на появу браку при виробництві кабелів та методи їх усунення.

Проведено огляд літературних джерел щодо напрацювань в галузі покращення контролю над процесом виробництва кабелів з метою підвищення продуктивності процесу та покращення якості продукції.

2. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ РОБОТИ ЕКСТРУДЕРА ТА РОБОТИ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ НАТЯГУ ДРОТУ

У сучасному світі кабелі формують енергетичні лінії, що з'єднують наші пристрої, будинки та промисловість. Виробництво цих кабелів передбачає ретельний і складний процес, відомий як екструзія кабелю. Ця технологія має вирішальне значення для виробництва різних типів кабелів, на які ми покладаємося щодня, від простих електричних проводів у наших будинках до складних волоконно-оптичних кабелів, що забезпечують глобальне підключення до Інтернету. Розуміння процесу екструзії кабелю не тільки проливає світло на тонкощі виробництва кабелю, але й підкреслює інноваційну техніку, яка виконує операцію нанесення ізоляції.

Екструзія кабелю — це виробничий процес, який використовується для виготовлення безперервних відрізків кабелю та дроту шляхом пропускання сировини, як правило, пластику або металу, через фасонну головку для створення певного профілю поперечного перерізу. Процес схожий на видавлювання зубної пасти з тюрбика, хоча з набагато більшою точністю та складністю. Матеріал виходить із матриці безперервним потоком, утворюючи потрібну форму під час охолодження та твердіння.

Неможливо переоцінити значення екструзії кабелю в сучасному виробництві. Цей процес гарантує, що кабелі відповідають суворим стандартам якості щодо електричних характеристик, довговічності та безпеки. Для телекомунікацій, розподілу електроенергії чи передачі даних екструзія кабелю дозволяє постійно виготовляти високоякісні кабелі, необхідні для надійної роботи в різних сферах застосування.

Підготовка сировини: процес починається з відбору та підготовки сировини. Звичайні матеріали включають мідь для електропровідності та полімери, такі як ПВХ (полівінілхлорид), ПЕ (поліетилен) або ЗШП (зшитий

поліетилен) для ізоляції. Ці матеріали повинні мати високу чистоту та специфічні рецептури, щоб відповідати необхідним стандартам.

Система подачі: підготовлена сировина подається в бункер екструзійної машини. Бункер контролює потік матеріалу в екструдер, забезпечуючи послідовну та безперервну подачу, що є критичним для підтримки якості екструдованого кабелю.

Екструдер: Серцем процесу екструзії є екструдер. Ця машина складається з кількох основних частин:

Гвинт: обертовий гвинт всередині нагрітої бочки, який проштовхує матеріал.

Стовбур із підігрівом: стовбур нагріває матеріал до точки плавлення, роблячи його достатньо гнучким для екструзії.

Штамп: спеціально розроблений інструмент, який формує матеріал під час його продавлювання. Конструкція матриці визначає кінцеву форму поперечного перерізу кабелю.

Система охолодження: як тільки матеріал виходить із матриці, він негайно охолоджується, щоб затвердіти його форма. Зазвичай це робиться за допомогою водяних бань або систем повітряного охолодження, залежно від матеріалу та бажаних властивостей готового кабелю.

Витягування та намотування: потім екструдований кабель протягується через систему охолодження за допомогою кабестана або приймального пристрою, щоб він зберіг свою форму та консистенцію. Нарешті, охолоджений і затверділий кабель намотується на бобіну або катушки для зберігання і транспортування.

Етапи процесу екструзії кабелю:

Завантаження матеріалу: процес починається із завантаження сировини в бункер. Цей матеріал, як правило, у формі гранул або порошку, і його необхідно ретельно відміряти, щоб забезпечити консистенцію.

Плавлення та змішування: коли матеріал потрапляє в стовбур екструдера, він нагрівається та змішується обертовим шнеком. Необхідно ретельно контролювати температуру та швидкість для досягнення бажаної в'язкості та однорідності.

Екструзія через матрицю: розплавлений матеріал потім продавлюється через матрицю, надаючи йому бажаної форми кабелю. Матриця має бути точно розроблена для виробництва кабелів із точними розмірами та характеристиками.

Охолодження та затвердіння: щойно екструдований кабель проходить через систему охолодження, яка швидко заохолоджує матеріал, щоб зберегти форму, надану матрицею. Процес охолодження необхідно ретельно контролювати, щоб уникнути внутрішніх напружень і дефектів.

Витягування та перевірка: затверділий кабель безперервно протягується через систему охолодження, щоб підтримувати постійну швидкість і діаметр екструзії. На цьому етапі кабель проходить сувору перевірку на наявність будь-яких поверхневих дефектів або невідповідності розмірів.

Намотування та пакування: нарешті, готовий кабель намотується на бобіни або котушки, готовий до перевірки якості, пакування та відправлення.

Типи процесів екструзії кабелю

Одинарна екструзія: Цей процес передбачає екструдкування одного шару матеріалу навколо провідника. Він зазвичай використовується для простих кабелів, які потребують базової ізоляції.

Коекструзія: коекструзія передбачає одночасне екструдкування кількох шарів різних матеріалів. Ця технологія використовується для виробництва кабелів із покращеними властивостями, такими як покращена ізоляція, екранування та міцність.

Потрійна екструзія: при потрійній екструзії три шари екструдуються одночасно, часто залучаючи провідник, ізоляцію та захисну зовнішню

оболонку. Цей процес типовий для високопродуктивних кабелів, таких як ті, що використовуються в суворих умовах навколишнього середовища.

Переваги кабельної екструзії

Налаштування: екструзія кабелю дозволяє точно контролювати розміри, матеріали та властивості кабелю, дозволяючи виготовляти спеціальні кабелі, адаптовані до конкретних застосувань.

Ефективність: безперервний характер процесу екструзії робить його високоефективним, здатним виробляти велику кількість кабелю з мінімальними відходами.

Контроль якості: вдосконалена система моніторингу та контролю забезпечує постійну якість протягом усього процесу екструзії, в результаті чого отримують надійні та високоефективні кабелі.

Універсальність: екструзія кабелю може використовуватися для широкого діапазону матеріалів і конфігурацій, що робить його придатним для різноманітних галузей промисловості, включаючи телекомунікації, автомобільну, аерокосмічну та енергетику.

Проблеми при екструзії кабелю

Вибір матеріалу: Вибір правильних матеріалів для конкретних застосувань може бути складним завданням, що потребує глибокого розуміння властивостей матеріалу та вимог до продуктивності.

Конструкція матриці: розробка екструзійної матриці вимагає точного проектування та ретельного тестування, щоб забезпечити досягнення бажаних характеристик кабелю.

Контроль процесу: Підтримка постійної температури, тиску та швидкості протягом усього процесу екструзії має вирішальне значення для виробництва бездефектних кабелів. Це вимагає складних систем контролю та регулярного обслуговування.

Фактори навколишнього середовища: Зовнішні фактори, такі як температура та вологість навколишнього середовища, можуть впливати на процес екструзії, вимагаючи ретельного моніторингу та налаштування.

Індустрія кабельної екструзії продовжує розвиватися разом із вдосконаленням матеріалів, технологій і процесів. Ключові тенденції:

Екологічні матеріали: посилення уваги до екологічності сприяє розробці екологічно чистих матеріалів і процесів, що зменшує вплив виробництва кабелю на навколишнє середовище.

Розумне виробництво: інтеграція технологій Industry 4.0, таких як IoT (Інтернет речей) і AI (штучний інтелект), покращує контроль процесів, ефективність і якість при екструзії кабелю.

Високопродуктивні кабелі: оскільки попит на високошвидкісну передачу даних і відновлювану енергію зростає, виникає відповідна потреба в передових конструкціях кабелів, здатних витримувати вищі напруги, температури та навантаження на навколишнє середовище.

Мініатюризація: Тенденція до менших, компактніших пристроїв сприяє розробці мініатюрних кабелів із покращеними характеристиками продуктивності.

2.1. Моделювання роботи екструдера

Найпоширенішим методом затвердіння ізоляційних матеріалів є зшивання поліетилену (ПЕ) органічними пероксидами. Пероксиди (наприклад, дикумілпероксид) розкладаються при підвищених температурах з утворенням вільних радикалів. Радикали відривають атоми водню від полімерних ланцюгів, утворюючи реакційноздатні центри [27]. Два реакційноздатні центри в різних ланцюгах можуть рекомбінувати та утворювати хімічний зв'язок, і реакція призводить до мережевої структури.

Хімічний процес зшивання ПЕ за допомогою пероксиду у присутності антиоксиданту проілюстровано на рис. 2.1.

Ця мережа поєднує хороші електричні властивості з покращеною характеристикою теплової деформації порівняно зі стандартним ізоляційним матеріалом, необхідним для кабелів із ізоляцією середньої/високої напруги.

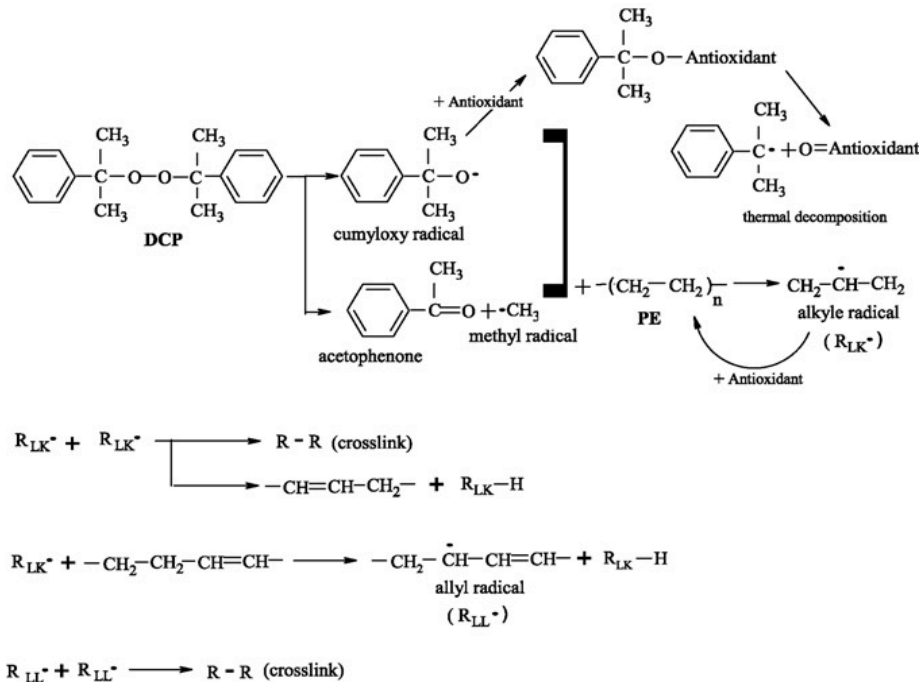


Рисунок – 2.1. Схема реакції зшивання поліетилену з пероксидом та антиоксидантом

Поперечне зшивання поліетилену, ініційоване органічним пероксидом, складається з великої кількості хімічних реакцій, деякі з них призводять до з'єднання макромолекул, але деякі з реакцій мають побічні ефекти (антиоксидант може реагувати з алкільним радикалом і зменшити концентрацію алкільних радикалів). Оскільки всі реакції відбуваються одночасно, важко дослідити кінетику конкретної реакції.

Як реакція з обмеженою швидкістю розкладання пероксиду відіграє домінуючу роль у всьому механізмі зшивання. Його кінетика першого порядку визначається формулою

$$r_i = k_i c_i \quad (2.1)$$

де r_i - швидкість ініціатора розкладання;

k_i - константа швидкості розкладання ініціатора;

c_i - концентрація ініціатора.

На цій основі зазвичай описують реакцію зшивання як реакцію n -го порядку зі ступенем зшивання P як змінну:

$$r_p = k(1 - P)^n \quad (2.2)$$

де r_p - швидкість зшивання;

P - теоретичний ступінь зшивання.

Константа швидкості k визначається рівнянням Арреніуса [27]:

$$k = A_r \exp\left(-\frac{E_a}{R_g T}\right) \quad (2.3)$$

де A_r - число Арреніуса;

E_a - енергія активації;

R_g - газова стала.

T – температура.

Типовий силовий кабель складається з наступних елементів (рис.2.2):

Кабелі середньої напруги з ізоляцією з зшитого поліетилену виготовляються за новітньою технологією ізоляції потрійною екструзією з одночасним нанесенням напівпровідникових шарів поверх провідника та ізоляції (триплексна екструзія).

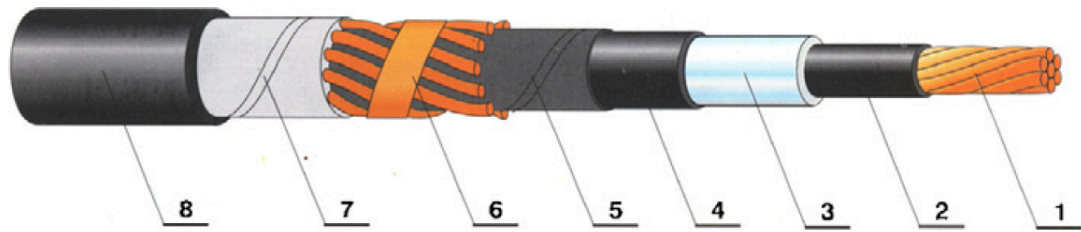


Рисунок – 2.2. Конструкція силового кабелю середньої напруги

1. Провідник. Мідна або алюмінієва жила, ущільнена. 2. Екран провідника. Напівпровідниковий шар поверх провідника, сажа додається як провідна сполука до матриці ПЕ. 3. Ізоляція. Зшитий поліетилен ЗШП. 4. Ізоляційний екран. Напівпровідниковий шар поверх ізоляції - той самий матеріал, що використовується в екрані провідника. 5. Роздільник. Стрічка, яка вбирає воду захищаючи місце всередині кабелю. 6. Електричний захисний екран. З мідного дроту. 7. Роздільник. Набухаюча стрічка. 8. Зовнішня оболонка. Поліетилен, ПЕ.

Зшивання полімеру здійснюється шляхом сухого затвердіння під високим тиском у трубці, заповненій азотом. В результаті виходить якісне і щільне з'єднання ізоляції з жилою без можливості їх роз'єднання під час циклів нагріву і охолодження кабелю. Поперечне зшивання в атмосфері азоту підвищує стійкість ізоляції до появи та розповсюдження «дерева», а отже, до часткового розряду. Кращі ізоляційні властивості значно покращують ступінь діелектричної міцності ізоляції та подовжують термін служби кабелів. Схема виробничої лінії представлена на рис. 2.3.

З точки зору якості продукції, деякі вимоги під час циклів нагрівання та затвердіння в трубці повинні бути забезпечені. По-перше, наприкінці процесу ступінь зшивання через ізоляційний шар має становити від 0,9 до 0,95.

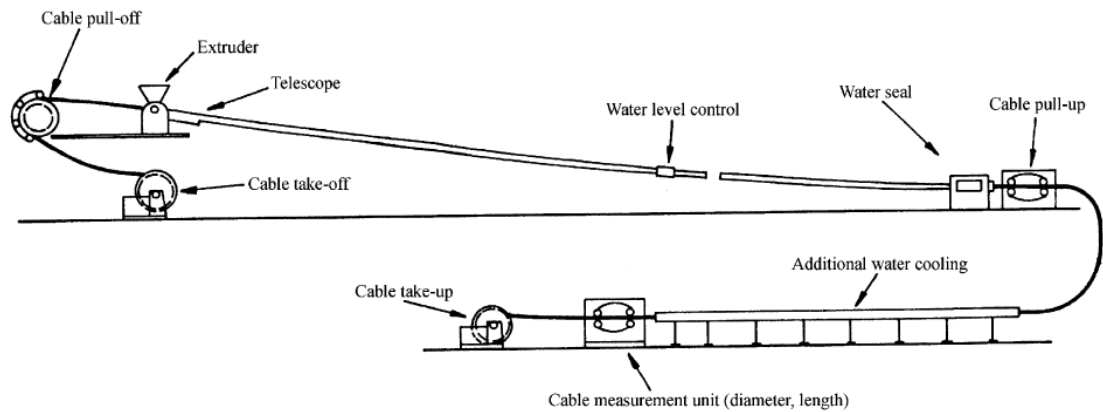
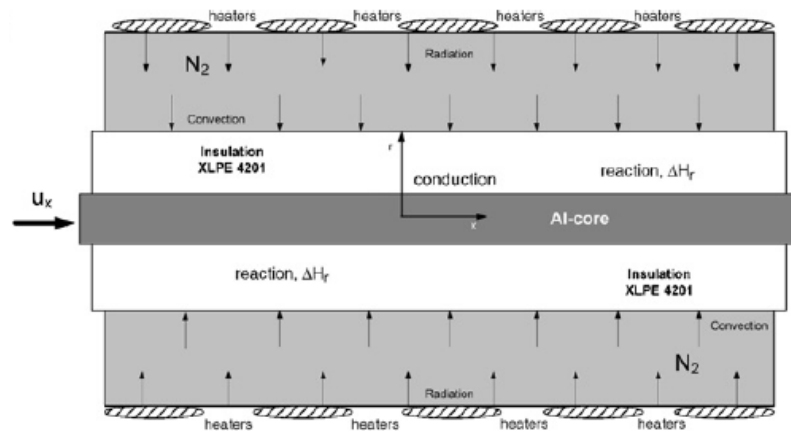


Рисунок – 2.3. Схема лінії виробництва кабелю середньої напруги [27].

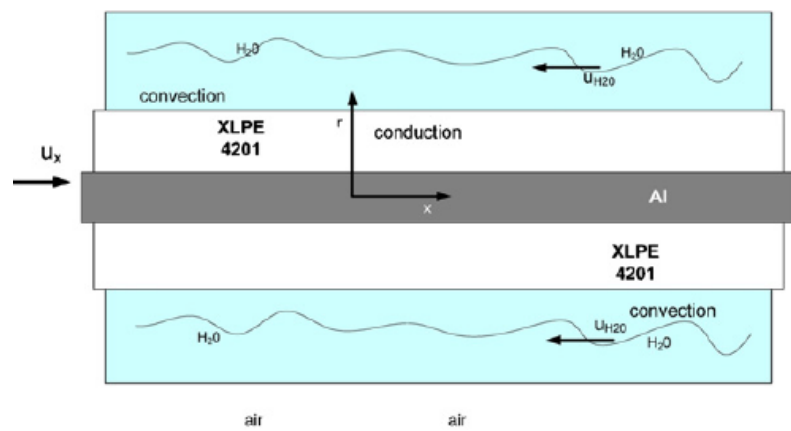
Крім того, температура на кінці трубки (після охолодження водою) повинна бути максимум 90°C . Нарешті температура поперек всього кабелю в кінці процесу не повинна перевищувати 40°C . Ці вимоги мають важливе значення для якості використання кабелю, і їх слід контролювати під час виробничого процесу відповідно до міжнародних стандартів випробування кабелів середньої напруги.

Процес реакції зшивання залежить від типу полімеру (ізоляції), концентрації ініціатора, а також від температури процесу. Основне занепокоєння полягає в описі впливу температури на реакцію зшивання, яка є екзотермічною та може спричинити температурні градієнти через кабель. Ці градієнти температури можуть знизити якість кабелю через деградацію полімерних ланцюгів. Кабель має бути нагрітий при високій температурі (близько 170°C), як вимога для реакції зшивання.

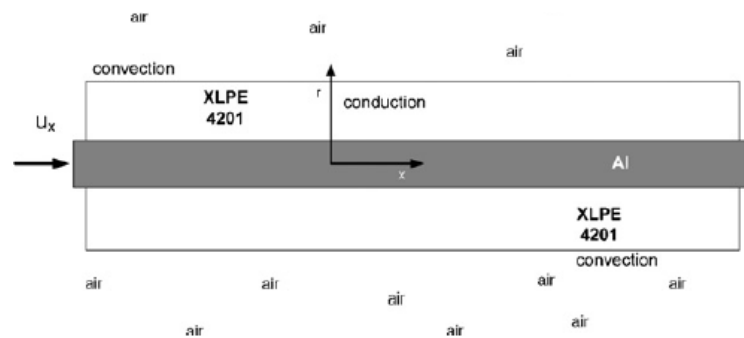
Під час безперервного процесу в трубі для затвердіння тепло передається випромінюванням і конвекцією від стінки труби через азот до поверхні кабелю. При цьому тепло передається через кабель (ізоляцію та провідник) шляхом провідності (рис. 2.4 а).



a)



б)



в)

Рисунок – 2.4. Схема розподілу тепла при зшиванні полімеру в екструдері [27]: а) теплообмін в нагрітій (реакційній) частині вулканізаційної труби; б) теплопередача в охолоджуваній водою частині вулканізаційної труби; в) теплопередача в охолоджуваній повітрям частині процесу.

Завдяки екзотермічній реакції зшивання всередині ізоляції деяка реакційна теплота, ΔH_r , виділяється під час процесу.

Після нагрітої частини трубки кабель входить в охолоджувану водою частину трубки з тією ж швидкістю u_x . У цій частині трубчастий кабель охолоджується у воді силовою конвекцією з протитечією води між кабелем і внутрішньою стінкою трубки (рис. 2.4 б). Нарешті, після виходу кабелю з трубки вулканізації, кабель охолоджується природною конвекцією в навколишньому повітрі (рис. 2.4 в).

Одночасно з конвекційним охолодженням кабелю тепло передається всередині кабелю шляхом теплопровідності через ізоляцію та серцевину. Правильно підібране нагрівання та охолодження кабелю є основною експериментальною проблемою для виконання, контролю та оптимізації процесу в цілому.

Процес безперервного виробництва силових кабелів представлений на рис. 2.5 [27].

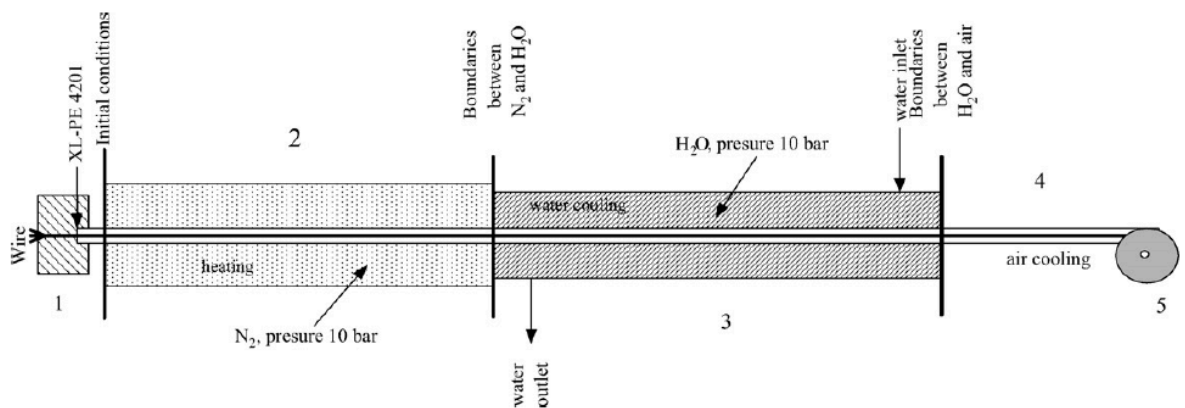


Рисунок – 2.5. Схема безперервного зшивання та процесу охолодження кабелю.

Процес починається в екструдері 1, де провідник (Cu або Al) покривається екструдованим полімером (ізоляція ЗШП). Після цього кабель потрапляє в нагріту частину труби 2, заповнену азотом під високим тиском 10 бар, де відбувається реакція зшивання за рахунок тепла, що передається від стінки труби випромінюванням і конвекцією. Ця частина труби розділена на

шість незалежних теплових зон, а також перед охолоджуваною водою частиною є одна зона труби, заповнена азотом, який не нагрівається. Після цього кабель охолоджують до температури навколишнього середовища в два етапи. Спочатку в частині труби 3, охолодженої холодною водою, також під тиском 10 бар і, нарешті, після виходу з труби кабель охолоджується в навколишньому повітрі за допомогою вільної конвекції 4 до кінця процесу на колесі намотування 5.

Для правильного проведення процесу необхідно ретельно вибирати багато параметрів виробничої лінії, а саме: швидкість лінії (регулює час перебування в трубі), температуру в нагрітій частині труби, заповненої азотом, температуру і швидкість потоку охолоджуючої води. Усі ці вимоги та обмеження є частиною комплексного виробництва силових кабелів, і виробники самостійно обирають ці значення.

Представлена математична модель містить основні частини:

1. Реакція та нагрівання кабелю.
2. Водяне охолодження кабелю.
3. Повітряне охолодження кабелю.

У всіх випадках математична модель представлена набором диференціальних рівнянь у частинних похідних і розв'язаних чисельним методом ліній для обраних граничних умов [27].

2.2. Моделювання нагрітої частини труби.

Можна розглянути вулканізаційну трубу з рухомим кабелем у ній як трубчастий реактор, де «реакційною сумішшю» є сам кабель для якого діють такі припущення:

- Потік кабелю ідеальний.
- Реакція зшивання відбулася всередині ізоляції, покритої провідником.

- Ступінь зшивання через ізоляцію, а також температура всередині кабелю є функцією як осьової, так і радіальної координати.

- Тепло передається від внутрішньої стінки труби, нагрітої зовнішніми спіральними нагрівачами при 350–400°C, до поверхні кабелю. Кабель входить в трубку з рівномірною температурою 130°C по всьому сердечнику і полімерному шару (початковий стан). Тепло частково передається випромінюванням, але також і конвекцією між нагрітим азотом всередині трубки та поверхнею кабелю.

- Передбачається ламінарний потік азоту навколо поверхні кабелю.
- Передбачається тільки радіальна теплопровідність через кабель.
- Конвекція та радіаційний теплообмін об'єднані в один термін $h + h_r$ і застосовані в рівнянні.

- Термодинамічні параметри (ρ , λ , c_p) вважаються постійними в діапазоні експериментальних температур.
- Завдяки стаціонарному процесу температура азоту в трубці постійна і дорівнює температурі стінки трубки (350–400 °C).

Базуючись на наведених вище припущеннях, математична модель для цієї частини процесу задається набором диференціальних рівнянь:

1. Матеріальний баланс на полімерну частину (ізоляція):

$$u\rho_p \frac{\partial P}{\partial z} - r_p = 0 \quad (2.4)$$

2. Кінетична модель реакції зшивання, що відбулася в полімері:

$$r_p = A_r \exp\left(-\frac{E_a}{R_g T}\right) P^n (1 - P)^m \quad (2.5)$$

3. Тепловий баланс жили кабелю (провідника):

$$u\rho_j c_{pj} \frac{\partial T_j}{\partial z} - \lambda_j \left[\frac{\partial^2 T_j}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_j}{\partial r} \right] = 0 \quad (2.6)$$

4. Тепловий баланс для полімеру (утеплювача):

$$u\rho_P c_{pP} \frac{\partial T_P}{\partial z} - \lambda_P \left[\frac{\partial^2 T_P}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_P}{\partial r} \right] + \Delta H_r r_p = 0 \quad (2.7)$$

5а. Граничний стан на вході кабелю в трубу, положення

$z=0$:

$$P(0, r - d) = 0 \quad (2.8)$$

$$T_j(0, d) = T_j^0 \quad (2.9)$$

$$T_p(0, R - d) = T_p^0 \quad (2.10)$$

5б. Граничні умови по радіальному положенню:

• $r = R$, поверхня кабелю, для всіх z :

$$h(T_{z,R} - T_N) + q_{rad} = -\lambda_p \frac{\partial T}{\partial r} \quad (2.11)$$

• $r = d$, розділ ізоляції та провідника, для всіх z :

$$\lambda_p \frac{\partial T}{\partial r} = \lambda_j \frac{\partial T_j}{\partial r} \quad (2.12)$$

• $r = 0$, кабельний центр:

$$\frac{\partial T_j}{\partial r} = 0 \quad (2.13)$$

6. Радіаційний теплообмін:

$$q_{rad} = \frac{\sigma(T_1^2 + T_2^2)(T_1 + T_2)}{\left(\frac{1}{\varepsilon_1}\right) + \left(\frac{A_1}{A_2}\right)\left(\left(\frac{1}{\varepsilon_2}\right) - 1\right)} \quad (2.14)$$

Загальна теплопередача від стінки труби до поверхні кабелю передбачається, що це спільний механізм випромінювання та конвекції.

Виходячи з цього припущення, рівняння (2.11) стає наступним,

$$\frac{\partial T}{\partial r} = \frac{h+h_r}{\lambda_p} (T_{z,R} - T_N) \quad (2.15)$$

Основною проблемою під час розрахунку є нестабільність через значну різницю теплопровідності провідника та ізоляції. Це призводить до крутого градієнта температури між самим внутрішнім шаром ізоляції та поверхнею сердечника. Щоб уникнути цієї проблеми, було обрано нижче значення теплопровідності алюмінію (Al) ($40 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$), і за цього припущення температура сердечника кабелю є майже постійною по всьому діаметру через швидке нагрівання передачею через провідник.

Тепловий баланс для провідника у рівнянні 2.6 можна спростити та замінити граничною умовою між поверхнею сердечника та самим внутрішнім шаром ізоляції. Отже, це рівняння

$$\lambda_p \frac{\partial T}{\partial r} = -h_u (T_{i,NB} - T_{i,j}) \quad (2.16)$$

де $(T_{i, NB} - T_{i,j})$ - градієнт температури між самим внутрішнім шаром ізоляції та температурою серцевини, а h_u - коефіцієнт опору в шарі між серцевиною та ізоляцією.

Після нагрітої частини трубки є перехідна частина між нагріванням і охолодженням водою в неізольованій частині трубки, яка заповнена азотом під тиском, але не нагрівається. У цій частині труби відсутні зовнішні нагрівачі. Кабель починає остигати, і в цій роботі передбачається, що ніякої реакції більше не відбувається. На основі цього складено теплові баланси для провідника та ізоляції:

Провідник:

$$u\rho_j c_{pj} \frac{\partial T_j}{\partial z} - \lambda_j \left[\frac{\partial^2 T_j}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_j}{\partial r} \right] = 0$$

Ізоляція

$$u\rho_P c_{pP} \frac{\partial T_P}{\partial z} - \lambda_P \left[\frac{\partial^2 T_P}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_P}{\partial r} \right] = 0 \quad (2.17)$$

Окрім раніше згаданих припущень щодо стану в трубці, у цій частині переходу також є деякі інші:

- Азот є статичним у трубці, тому він передбачає стаціонарну провідність через азот у радіальному напрямку від поверхні кабелю до внутрішньої стінки трубки, задану виразом

$$\left[\frac{\partial^2 T_N}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_N}{\partial r} \right] = 0$$

(2.18)

- Крім того, трубка охолоджується за рахунок вільної конвекції з навколишнім повітрям. Гранична умова на стінці труби

$$\frac{\partial T_N}{\partial r} = - \frac{h_{air}}{\lambda_N} (T_N - T_{air})$$

(2.19)

2.3. Моделювання охолоджуваної водою частини труби.

Профіль температури існує в точці виходу кабелю (кінець зони нагріву) з максимальною температурою на поверхні кабелю близько 170 °С. Температури повинні бути вирівняні в радіальному напрямку кабелю до кінця процесу. Охолодження складається з двох частин: у частині трубки, що охолоджується водою і у навколишньому повітрі після виходу кабелю з трубки. Наприкінці охолоджуваної водою частини процесу температура на

кабелі повинна знизитися приблизно до 90 °С. Якщо кабель виходить із труби з вищою температурою (>90 °С), може виникнути механічне пошкодження ізоляції, коли кабель потрапляє у гідрозатвор і стикається з іншими сталевими елементами виробничої лінії. Охолоджуюча вода тече всередині труби протитечією, і з розрахованих чисел Re можна припустити турбулентний режим потоку. Враховуючи це, основним припущенням є те, що температура холодної води в трубі постійна в радіальному напрямку і змінюється лише в осьовому напрямку. Інші припущення:

- Початкова температура охолоджувальної води відома (20–25 °С).
- Реакція зшивання завершується в попередній частині процесу.
- Поверхня кабелю охолоджується силовою конвекцією внаслідок турбулентності потік води.
- Стінка труби охолоджується навколишнім повітрям шляхом вільної конвекції.
- Температура води на вході кабелю у водяному охолодженні частина трубки повинна бути відома (це фактично вихід води температура) як початкова умова для розрахунку.

Математична модель для цієї частини процесу містить попередні та деякі нові рівняння:

1. Тепловий баланс жили кабелю (провідника):

$$u\rho_j c_{pj} \frac{\partial T_j}{\partial z} - \lambda_j \left[\frac{\partial^2 T_j}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_{jP}}{\partial r} \right] = 0$$

2. Тепловий баланс для полімеру (утеплювача):

$$u\rho_P c_{pP} \frac{\partial T_P}{\partial z} - \lambda_P \left[\frac{\partial^2 T_P}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_P}{\partial r} \right] = 0$$

3. Граничні умови для межі поверхня–вода кабелю:

$$\frac{\partial T_P}{\partial r} = - \frac{h_{H_2O}}{\lambda_P} (T_P - T_{H_2O}) \quad (2.20)$$

4. Тепловий баланс води, що тече в трубі:

$$- u_{H_2O} \rho_{H_2O} c_{pH_2O} \frac{\partial T_{H_2O}}{\partial z} + \frac{h_{H_2O}}{\lambda_p} (T_p - T_{H_2O}) + \frac{h_{air}}{\lambda_{H_2O}} (T_{H_2O} - T_{air}) \quad (2.21)$$

5. Граничні умови для межі розділу стінка–повітря:

$$\frac{\partial T_w}{\partial r} = - \frac{h_{air}}{\lambda_w} (T_w - T_{air}) \quad (2.22)$$

2.4. Моделювання частини виробничої лінії з повітряним охолодженням.

В останній частині процесу кабель охолоджується повітрям до кінця лінії, коли продукт намотується на колеса. Кабель виходить із труби на гідрозатворі і на останніх ста метрах температура повинна зрівнятися з температурою навколишнього середовища в радіальному напрямку кабелю. Наприкінці процесу всередині кабелю не повинно бути ніяких перепадів температури. Кабель можна розглядати як теплообмінник з радіальною теплопровідністю поперек кабелю (радіальний напрямок) і вільною конвекцією від поверхні кабелю до навколишнього повітря. Математична модель буде також набором диференціальних рівнянь у частинних похідних з доданими граничними умовами теплопередачі від поверхні кабелю до повітря. Додатковими припущеннями в цій частині процесу є:

- Температура повітря навколо кабелю відома і вона однакова як температура навколишнього середовища.
- Тепло передається вільною конвекцією від поверхні кабелю до навколишнього повітря.
- Початковий розподіл температури в радіальному напрямку кабелю становить відомий з кінця попередньої частини процесу (вода охолодження).

Математична модель для цієї заключної частини процесу наведена нижче

1. Тепловий баланс жили кабелю (провідника):

$$u\rho_j c_{pj} \frac{\partial T_j}{\partial z} - \lambda_j \left[\frac{\partial^2 T_j}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_{jp}}{\partial r} \right] = 0$$

2. Тепловий баланс для полімеру (утеплювача):

$$u\rho_P c_{pP} \frac{\partial T_P}{\partial z} - \lambda_P \left[\frac{\partial^2 T_P}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_P}{\partial r} \right] = 0$$

3. Відповідно до обговорення існує лише одне нове рівняння, яке раніше не було написано для цієї частини процесу, і це гранична умова для поверхні кабелю:

$$\frac{\partial T_P}{\partial r} = - \frac{h_{air}}{\lambda_P} (T_P - T_{air})$$

$$\frac{\partial T_P}{\partial r} = - \frac{h_{air}}{\lambda_P} (T_P - T_{air}) \quad (2.23)$$

За наведеними рівняннями моделі можна розрахувати всі параметри екструзійної лінії для забезпечення якісного процесу виробництва. Автори в роботі [27] розрахували оптимальні параметри для виробництва кабельної продукції. Основним параметром для нашої системи є швидкість 60 м/хв та зусилля натягу 25Нм.

Висновки до розділу 2

В розділі описано основні залежності, які використовуються для моделювання процесів екструзії для розрахунку параметрів виробничої лінії виробництва кабелів.

Розв'язання диференціальних рівнянь чисельним методом ліній дозволяє отримати оптимальні значення параметрів процесу для якісного виробництва кабелів. Далі необхідно розробити систему керування, яка буде підтримувати ці параметри в заданих межах. Це дозволить підвищити продуктивність виробництва та покращити якість продукції.

3. РОЗРОБКА АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА КАБЕЛЮ

3.1 Аналіз процесу з точки зору розробки системи керування

Електричні кабелі – це ізольовані проводи або провідники, що мають захисну оболонку і використовуються для передачі електричних або телекомунікаційних сигналів. Вони мають численні переваги в різних побутових, промислових, телекомунікаційних і електронних додатках. Кабелі широко використовуються для живлення електричних приладів або обладнання, передачі електроенергії на різних рівнях напруги для будинків і промисловості. Типи кабелів, які зазвичай використовуються, залежать від робочих напруг і номінальних струмів ланцюга. Існують різні види кабелів, які включають одножильні, багатожильні, коаксіальні та волоконно-оптичні. Провідна частина кабельних каналів пропускає струм через кабель, а його ізоляція підтримує електрику в провіднику. Струмопровідна частина переважно виготовляється з міді завдяки її високій електро- і теплопровідності, пластичності, гнучкості, спаюваності, високій температурі плавлення, високій стійкості до корозії та зношування. Однак алюміній також використовується для повітряних ліній електропередачі через його відносно меншу вагу.

У процесах виробництва електричних кабелів першою стадією є волочіння дроту. Волочіння дроту зменшує товсті дротяні стрижні на провідники різних розмірів. Наступним етапом є процес відпалу, під час якого дроти проходять термічну обробку для подальшого підвищення їх провідності. Після відпалу дроти можна склеювати разом для формування багатожильного провідника, попередньо нагрітого та покритого ізоляційними матеріалами, такими як полівінілхлорид (ПВХ), поліетилен (ПЕ) і зшитий поліетилен (ЗШП). Стадія покриття досягається за допомогою процесу, який

називається екструзією. Екструзія є важливою частиною виробничого процесу, оскільки вона захищає провідник від механічних пошкоджень, екологічної небезпеки та зменшує втрати міді в кабелях. Після екструзії ізольовані дроти охолоджуються під час проходження через охолоджувальний жолоб і контролюються вимірювальним приладом для перевірки відповідності діаметра ізольованого кабелю та іскровим тестером для виявлення дефектів у покритті. Нарешті, кабелі розрізають на стандартні відрізки, упаковують у кабельні котушки та надають клієнтам. Функціональна схема процесу виробництва електричного кабелю із зображенням екструзійної лінії показана на рис. 3.1.

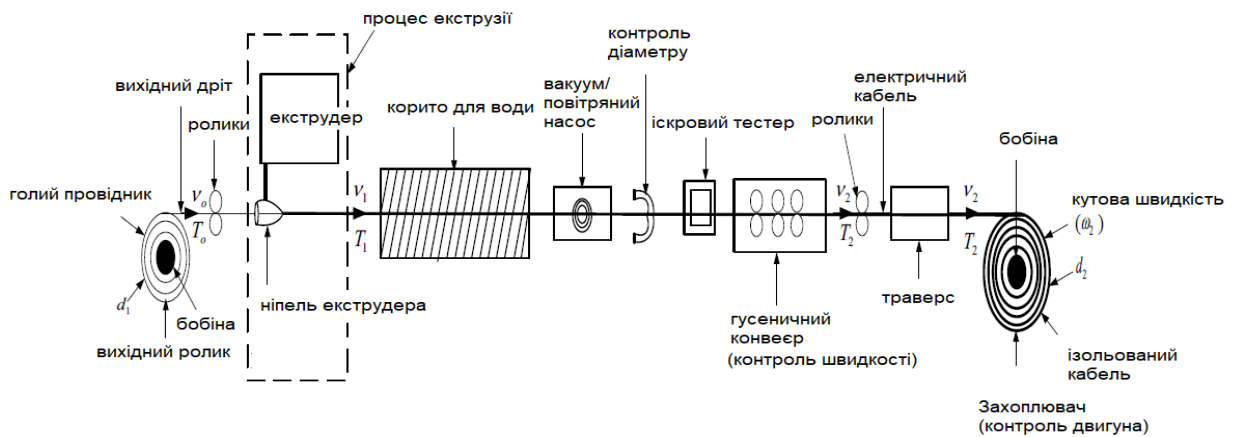


Рисунок – 3.1. Функціональна схема лінії екструзії електричного кабелю

Однак деякі проблеми, пов'язані з виробництвом кабелю, включають корозію провідників, тріщини, порожнечі, перегрів ізоляції кабелю та зміну товщини ізоляції, що впливає на якість виготовлених кабелів. Ефект полягає в тому, що коли номінальний струм проходить через ці низькоякісні кабелі, він генерує тепло, яке ці кабелі з поганою ізоляцією не можуть витримати. Таким чином, це спричиняє спалахи пожеж, які зазвичай спостерігаються на ринках, у будинках і на промислових підприємствах, що призводить до втрати невинних людей та майна майже щороку. Основні причини цих проблем або

дефектів пов'язані з параметрами процесу екструзії, такими як тиск, температура, швидкість лінії, швидкість шнека екструзійної машини та властивості сировини. Компанії прагнуть мінімізувати ці дефекти за допомогою контролерів, які відстежують і контролюють швидкість лінії, швидкість шнека, тиск і температуру процесу екструзії.

Лінійна швидкість процесу екструзії - це лінійна швидкість кабелю в екструзійній лінії. Це швидкість, з якою екструдований кабель витягується за допомогою витягування та згортається за допомогою приймача. Швидкість лінії головним чином контролюється приводами витягування, відведення та прийому та має бути постійною, щоб уникнути дефектів кабелю. Таким чином, приводи витягування, відводу та приймання повинні відстежувати швидкість обертання один одного, щоб підтримувати швидкість лінії постійною, щоб уникнути зміни необхідної товщини екструдованого кабелю. Лінії екструзії електричних кабелів часто працюють на надзвичайно високих швидкостях, тому будь-які помилки, такі як товщина ізоляції, можуть швидко перерости в надзвичайні показники браку. Під час процесу екструзії необхідний ефективний контроль швидкості приводів витягування, відводу та приймання, щоб забезпечити виготовлення кабелів високої якості.

При виробництві кабелів важливою операцією є нанесення ізоляції на провідник. При цьому важливим є контроль швидкості та натягу дроту при проходженні через екструдер. Коливання у швидкості призводять до нерівномірності нанесення ізоляції. В результаті на одній частині провідника вона товстіша, а в іншій – тонша. Такий дріт отримує нерівномірні захисні властивості на всій довжині, що призводить до браку. Тому контроль швидкості руху кабелю в процесі екструзійного нанесення ізоляції є важливим технічним завданням, оскільки може підвищити продуктивність праці, покращити якість продукції та зменшити кількість браку.

Основним параметром, який необхідно контролювати є лінійна швидкість дроту в лінії екструзії. При цьому швидкість контролюється

трьома електроприводами: видачі, відводу та прийому. Перший розмотує дріт з вихідної бобіни і транспортує його до екструдера. Електропривід відводу протягує дріт через екструдер на охолодження. Третій – намотує кінцевий кабель на прийомну бобіну.

Сам процес виробництва відбувається на високих швидкостях і наявність неточностей в регулюванні швидкості електроприводу може призвести до суттєвого погіршення якості продукції. Таким чином електродвигуни повинні відстежувати швидкості один одного, щоб забезпечити стабільну товщину нанесеної ізоляції. Під час проходження процесу необхідний активний контроль в режимі реального часу із регуляторами, які забезпечують стабільну швидкість лінії.

При виробництві електричного кабелю застосовуються приводи постійного струму для ділянки відводу та асинхронні машини для приводу ділянок видачі та прийому. Також у деяких виробничих системах може застосовуватися сервопривід.

Двигун постійного струму є досить простим в керуванні, проте за рахунок наявності іскріння на щітках не можуть працювати в пожежонебезпечних середовищах. Він має принципову перевагу в досягненні широкого діапазону регулювання швидкості за допомогою різноманітних простих методів керування

$$N \frac{E_b}{f} PN = K \frac{V - I_a R}{f} \quad (3.1)$$

Регулювати швидкість такого приводу N можна за рахунок зміни опору в якорі R , зміною потоку на полюсах або зміною прикладеної напруги V . Збільшення потоку та напруги живлення збільшує швидкість двигуна, а збільшення опору зменшує його швидкість та швидкість лінії, і навпаки.

Асинхронні двигуни володіють численними перевагами. Серед них це: високий ККД, міцна конструкція, момент самозапуску, простота та мінімальне обслуговування. Однак такі приводи володіють нижчим пусковим

моментом, мають втрати енергії на ковзанні. Ці параметри призводять до втрати ефективності двигуна і до появи IGBT транзисторі, мають високу складність керування. Тому асинхронний привід став повністю домінуючим у багатьох сферах застосування. Швидкість асинхронного приводу визначається виразами:

$$n = (1 - s)n_s \quad (3.2)$$

$$n_s = \frac{120f}{p} \quad (3.3)$$

Швидкість такого приводу можна змінювати шляхом зміни кількості полюсів (p), ковзання (s), напруги живлення (V) або частоти (f). Зміна останньої є найбільш частим випадком регулювання.

Контроль параметрів процесу нанесення ізоляції відбувається за рахунок керування двома електроприводами, системи відводу та прийому.

3.2. Вибір елементної бази та загальної структури системи керування

Більше 90% контролерів, що працюють сьогодні, є звичайними контролерами, які в основному працюють за пропорціонально-інтегрально-диференціальним (ПІД) законом регулювання. Він містить в собі пропорційний (П), пропорційно-інтегральний (ПІ) і пропорційно-диференціальний (ПД) регулятори. Ці контролери пропонують найпростіше та водночас ефективне рішення багатьох реальних проблем керування. Вони мають базову конструкцію і їх легко налаштовувати. При використанні цих контролерів потрібне математичне моделювання установки та налаштування параметрів контролера. Параметри контролера включають пропорційне посилення (K_p), інтегральне посилення (K_i) і похідний диференціал (K_d).

Стандартне рівняння ПІД контролера приведено нижче.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (3.1)$$

Пропорційний член забезпечує загальну керуючу дію, що відповідає сигналу помилки. Інтегральний член регулює стаціонарні помилки, а похідний – перехідну характеристику. Метод налаштування Циглера Ніколса [16] найбільше загальний метод, який використовується для налаштування параметрів системи для звичайних контролерів. Параметри розрахунку коефіцієнтів наведено в таблиці 3.1

Значення K_p , K_i і K_d для забезпечення ефективної реакції ПД-регулятора підбираються шляхом підтримки значень підсилення K_i і K_d на нульовому рівні та збільшення значення K_p від нуля до критичного підсилення K_c , при якому відбуваються стійкі коливання системи. При критичному підсиленні визначається критичний період P_c . Далі за формулами таблиці 3.1 можна провести розрахунок параметрів ПД регулятора. В системі MATLAB є окремий модуль PID Autotune, який дозволяє зробити таке налаштування в напіваавтоматичному режимі.

Також для керування швидкістю приводів можна використовувати інтелектуальне керування за рахунок контролерів нечіткої логіки.

Методи штучного інтелекту мають широке застосування в системах управління. Попередні контролери використовували звичайні регулятори.

Таблиця 3.1. Формули для налаштування ПД регулятора за методом Циглера Ніколса

Тип контролера	K_p	K_i	K_d
Пропорційний	$0,5 K_c$	-	-
Пропорційно-інтегральний	$0,45 K_c$	$1,2 K_p/P_c$	-

Пропорційно-інтегрально-диференціальний	0,6 Kc	2 Kp/Pc	KpPc/8
---	--------	---------	--------

Однак інтелектуальні контролери, включаючи контролер нечіткої логіки (Fuzzy Logic) і адаптивну нейронечітку систему нечіткого висновку (Adaptive Neuro Fuzzy Inference System – ANFIS), використовуються для досягнення високої продуктивності.

Контролер нечіткої логіки - це інтелектуальна техніка, яка забезпечує засоби для роботи з нелінійними функціями за допомогою мови та принципів міркування, подібних до того, як люди вирішують проблеми [17]. Причина їх розробки полягала в тому, що попередні контролери потребували математичних моделей заводу, якими необхідно керувати. Неточні математичні моделі установки впливатимуть на продуктивність контролера здебільшого для нелінійних і складних задач керування. Контролер нечіткої логіки не потребує математичних моделей або експертних знань про завод. Легше реалізувати системи нечіткої логіки, оскільки вони засновані на природній мові та людському спілкуванні. Такий контролер складається з чотирьох інтерфейсів, а саме: фазифікації, бази правил, механізму висновку та дефазифікації. Незважаючи на здатність контролера нечіткої логіки контролювати завод без потреби в математичній моделі він не може навчатися і адаптуватися до нових умов.

Адаптивна нейросистема нечіткого висновку - це багаторівнева мережева комбінація алгоритмів навчання штучних нейронних мереж і контролерів нечіткої логіки. Він використовує звичайний інтерфейс і навчання та здатність нейромереж покращувати знання систем. Найбільше використовувана модель є модель Такагі-Сугено, оскільки вона є обчислювально ефективною і добре працює з оптимізацією та адаптивними техніками [18].

Розглядаючи контролер нечіткої логіки з двома входами x і y , виходом f і а мережа прямого зв'язку складається з п'яти рівнів, кожен шар складається або з квадратних вузлів, або з круглих. Адаптивні або квадратні вузли складаються з наборів параметрів, які можна змінювати, тоді як параметри фіксованих або круглих вузлів не можна змінювати. Формула для функцій вузла може відрізнитися від шару до шару. Спрощена архітектура такої мережі приведена на рис. 3.3 [19].

Рівень 1 (O_i^1) складається з вхідних параметрів функцій належності, а формула для його результату виражена у виразі 3.2. Параметри в цьому шарі відомі як вхідні параметри.

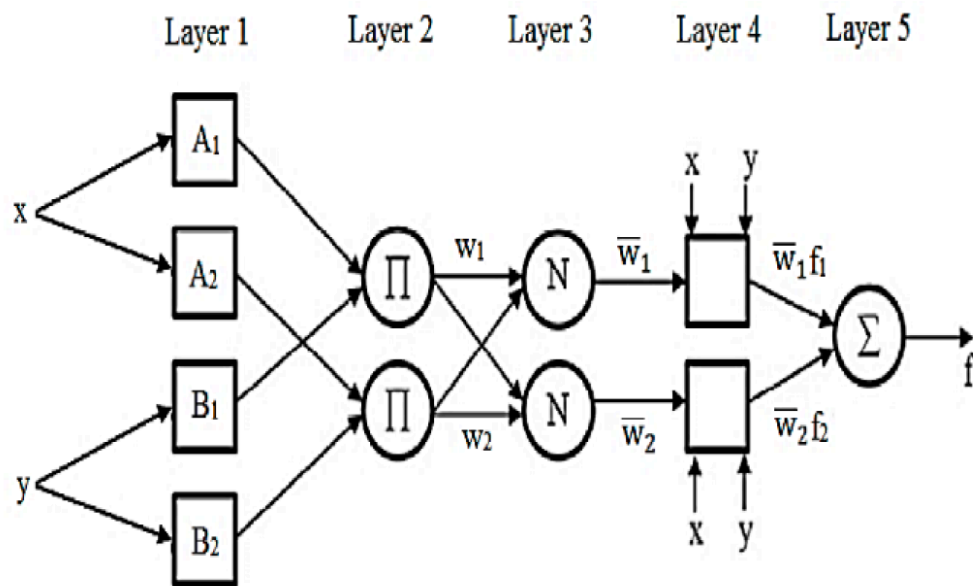


Рисунок – 3.2. Спрощена архітектура адаптивної нейросистеми нечіткого висновку [28].

$$O_i^1 = \mu A_i(x), \quad i = 1, 2 \quad (3.2)$$

Рівень 2 (O_i^2) складається з вузлів правила, де кожен вузол обчислює силу впливу правила за допомогою множення. Вираз для кута сили впливу та загальної кількості правил, що використовуються в структурі наведені нижче.

$$O_i^2 = \omega = \mu A_i(x) \times \mu B_i(y), \quad i = 1, 2 \quad (3.3)$$

$$R_n = j^i \quad (3.4)$$

У шарі 3 (O_i^3), кожен вузол обчислює відношення сили впливу i -го правила до суми всіх впливів. Вузли називаються середніми вузлами, і їхній результат показаний у нижче.

$$O_i^3 = \overline{\omega}_i = \frac{\omega_i}{\omega_1 + \omega_2}, \quad i = 1, 2 \quad (3.5)$$

На рівні 4 кожен вузол обчислює внесок i -го правила до загального результату, а його результат виражений у формулі 3.6.

$$O_i^4 = \overline{\omega}_i f_i = \overline{\omega}_i (p_i x + q_i y + r_i), \quad i = 1, 2 \quad (3.6)$$

Останній рівень містить вихідний вузол, який підсумовує загальний вклад шарів і наведений нижче.

$$O_i^5 = f = \sum_i \overline{\omega}_i f_i = \frac{\sum_i \omega_{if}}{\sum_i \omega_i} \quad (3.7)$$

Архітектура адаптивної нейросистеми нечіткого висновку ідентифікує змінні шляхом застосування двох алгоритмів навчання, алгоритм зворотного поширення та гібридний алгоритм навчання. Алгоритми навчання порівнюють бажані виходи до вимірних виходів системи, а потім системи налаштовані так, щоб зменшити різницю між ними якомога більше.

Проте для реалізації такого контролера необхідно мати попередні дані технологічного процесу, щоб налаштувати нейромережу. Тому для реалізації нашої системи будемо розглядати використання ПІД регулятора та контролера нечіткої логіки.

Контроль швидкості екструзійної лінії вимагає контролю приводів лінії видачі, відводу та прийому. Приводи включають: двигун постійного струму 1GG6206-0NF40-1WV3-Z Siemens, що приводить в дію плату, яка поступово розмотує дріт на екструзійній лінії для покриття ізоляційними матеріалами; двигун постійного струму G 11.0644 AEG для приводу відведення, який витягує покритий дріт з екструзійної лінії та 3-фазний серводвигун змінного струму IVE132S і 3-фазний асинхронний серводвигун SVM-132-10 для приводу прийому, який намотує дріт або кабель з покриттям на бобіни.

Ці двигуни контролювалися шляхом отримання помилкової швидкості, обчисленої за допомогою різниці між еталонною швидкістю та фактичною швидкістю приводів у будь-який момент часу. Потім помилка та зміна швидкості помилки проходили через розроблений контролер. Вихідний сигнал контролера порівнювався зі струмом приводу, а потім проходив через схему широтно-імпульсної модуляції, яка перетворювала вихідний сигнал в еквівалентний сигнал для керування спрацьовуванням біполярного транзистора з ізолюваним затвором (IGBT), щоб остаточно контролювати швидкість приводу. У нашому випадку типовий розмір кабелю 25 мм^2 з рекомендованою швидкістю лінії 60 м/хв з ізоляцією із зшитого поліетилену та ПВХ. Таким чином, при моделювання 25 мм^2 приймається як навантаження на лінію, а 60 м/хв – як повна швидкість лінії, яку необхідно контролювати.

На рис. 3.3 представлено концепцію дизайну пропонованого керування швидкістю лінії екструзії. Привід видачі не розглядався, оскільки розмір кабелю, який використовувався, є малим, тому для його витягування

знадобиться мінімальна сила. Таким чином, протягування кабелю цього розміру здійснювалося за допомогою приводу відводу.

За функціональною системою провели розробку схеми електричної принципової для розробки прототипу такої системи. В якості керуючої використано мікроконтролер ESP32, який володіє необхідним функціоналом та надійністю для забезпечення контролю процесу. Також серед аналогів цей контролер має низьку вартість.

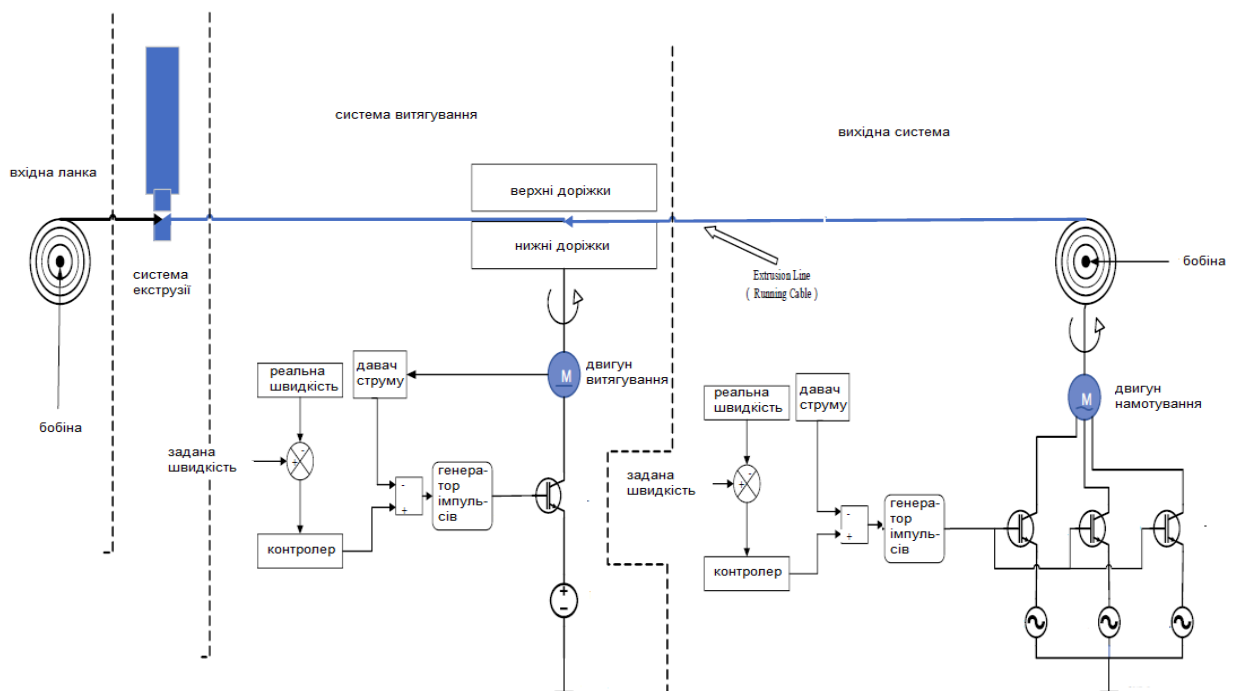


Рисунок – 3.3. Функціональна схема системи керування лінією екструзії.

Схема електрична принципова реалізованої системи керування приведена на рис. 3.4.

3.3. Налаштування регуляторів та моделювання роботи автоматизованої системи керування технологічним процесом виробництва кабелю

Швидкість лінії для екструзійної системи, що складається з двигуна постійного струму, і серводвигуна змінного струму, як головних приводів відводу, моделювалася за допомогою блоків MATLAB/Simulink, які запускають екструзійну лінію. Параметри процесу були отримані з паспортних даних електродвигунів.

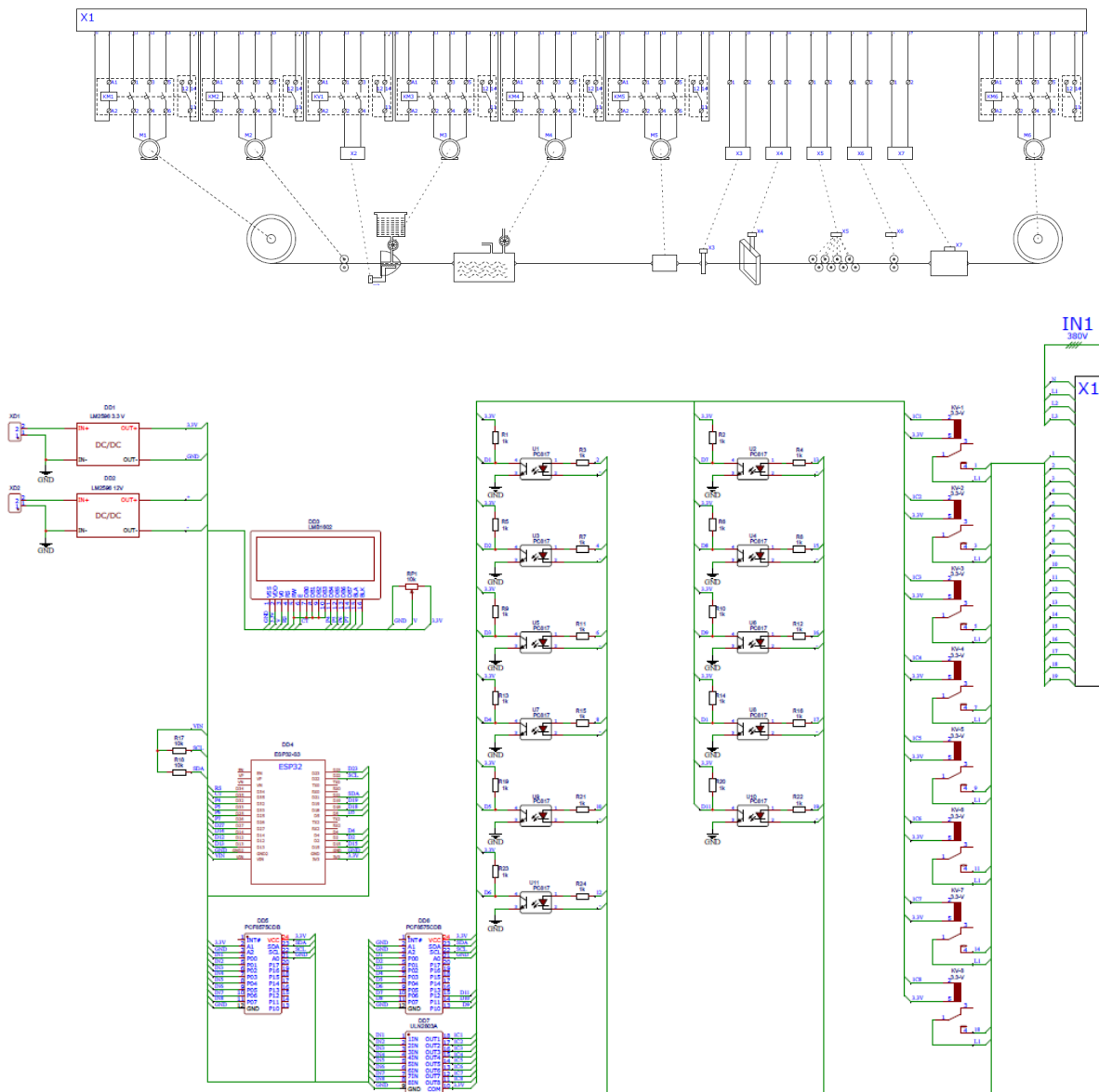


Рисунок – 3.4. Схема електрична принципова прототипу системи керування

Двигун постійного струму для витягування та серводвигун змінного струму для приймання були змодельовані окремо, але з такою ж заданою швидкістю 60 м/хв, що й швидкість екструзійної лінії, і тим самим крутним моментом навантаження 25 Нм, як навантаження всієї екструзійної лінії. Це пояснюється тим, що коли швидкість намотувального приводу падає через накопичення ваги на бобіні в результаті намотування кабелю на бобіну, контролер повинен забезпечити подачу більшого струму до натяжного двигуна, щоб збільшити крутний момент і привести двигун до необхідної або заданої швидкості, щоб підтримувати постійну швидкість лінії.

Моделювання приводів відводу та прийому.

Обидві моделі приводів відводу та прийому складаються з опорної швидкості як заданої швидкості, біполярного транзистора з ізольованим затвором (IGBT) як схеми перетворювача, який регулює напругу живлення, що подається на відповідні двигуни. Модель також складається з блоку схеми керування, що містить головний контролер і генератор імпульсів, які генерують необхідний імпульс затвора для IGBT для регулювання напруги, що подається на відповідні двигуни. Еталонна швидкість, що використовується для різних контролерів, становить 60 м/хв для кабелю розміром 25 мм².

Роботу системи моделювали з використанням пакету прикладних програм MATLAB Simulink. Модель розробляли для приводів двигуна постійного струму системи відводу та асинхронного приводу системи прийому. Для моделювання роботи системи було застосовано ПІД регулятор та контролер нечіткої логіки. Два варіанти виконання регулювання порівнювались між собою з метою забезпечення кращої якості контролю швидкості.

Модель системи керування лінією відводу із застосуванням ПД регулятора приведена на рис. 3.5.

Модель системи керування лінією прийому із застосуванням ПД регулятора приведена на рис. 3.6.

Для налаштування параметрів регуляторів для ліній прийому та відводу використовували утиліту MATLAB/Simulink/Autotuning. В результаті налаштувань ПД регуляторів приведені в таблиці 3.2.

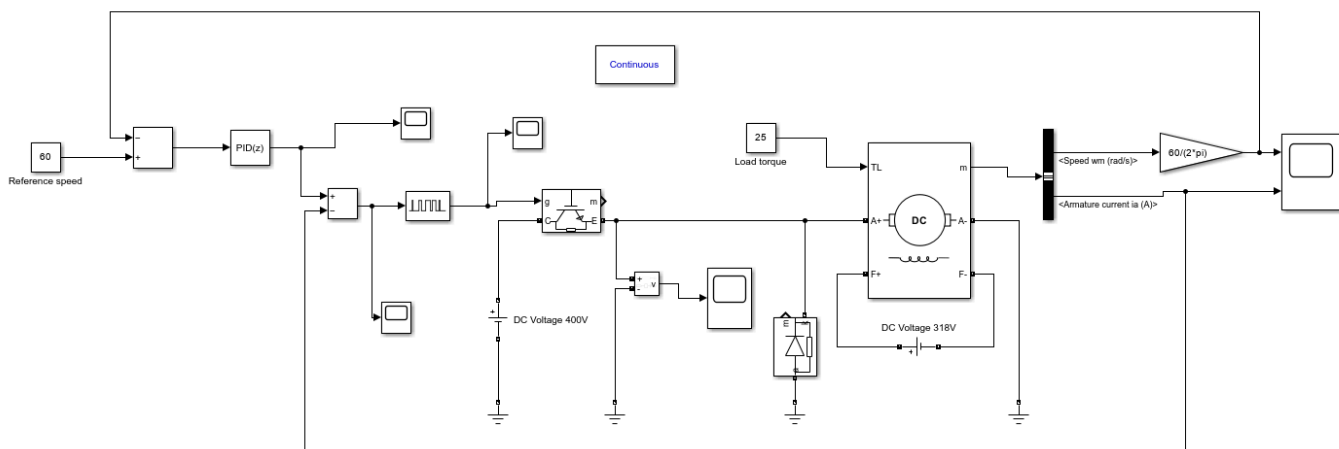


Рисунок – 3.5. Модель системи керування лінією відводу із застосуванням ПД регулятора.

Проектування контролера нечіткої логіки

Поява техніки нечіткої логіки допомогла відтворити процес людського мислення в його алгоритмі керування. Він використовувався для досягнення стабільної, точної та надійної швидкості екструзійної лінії.

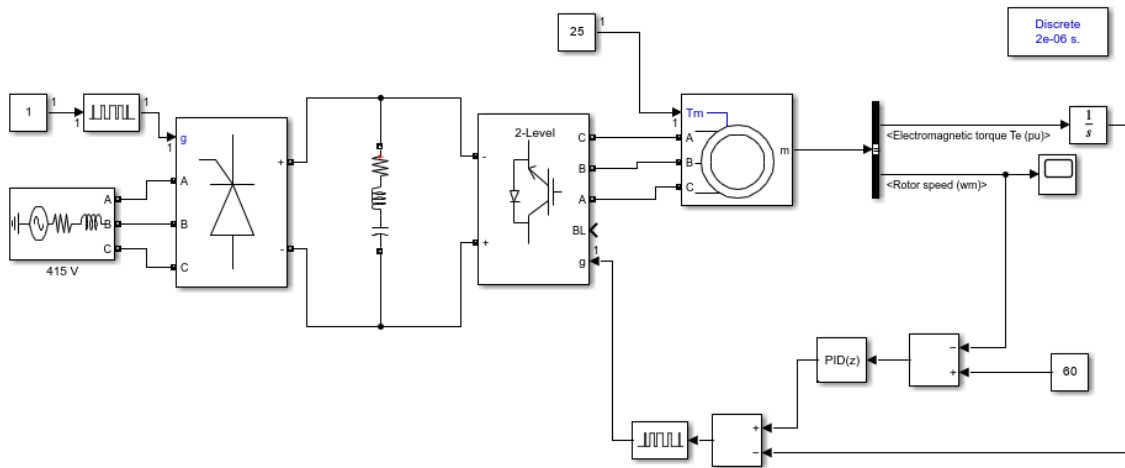
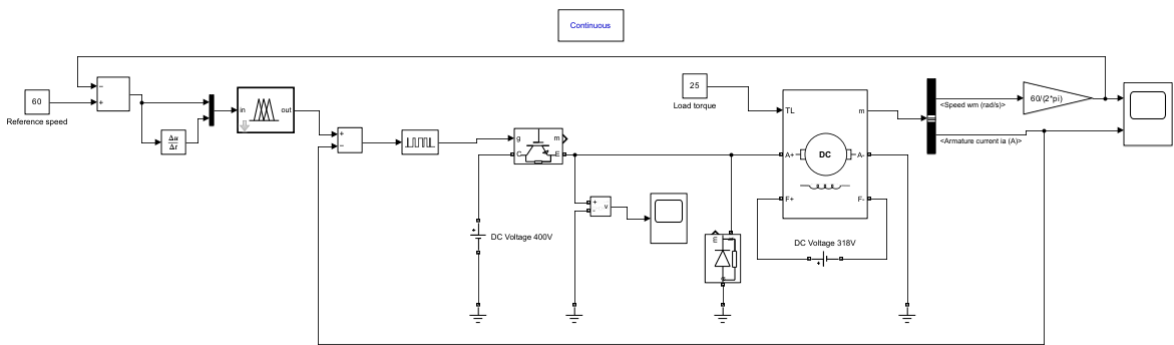


Рисунок – 3.6. Модель системи керування лінією прийому із застосуванням ПІД регулятора.

Контролер нечіткої логіки приймає два входи, помилку $e(t)$ і зміну помилки $\dot{e}(t)$ і видає один вихід $u(t)$, що представляє керуючий сигнал. Модель такого контролера показана на рис. 3.7.

Таблиця 3.2. Значення коефіцієнтів ПІД регуляторів для системи керування.

Вид системи	Параметри ПІД регулятора		
	K_p	K_i	K_d
Система відводу	54.00	324.32	2.23
Система прийому	24.00	58.40	2.47



a)

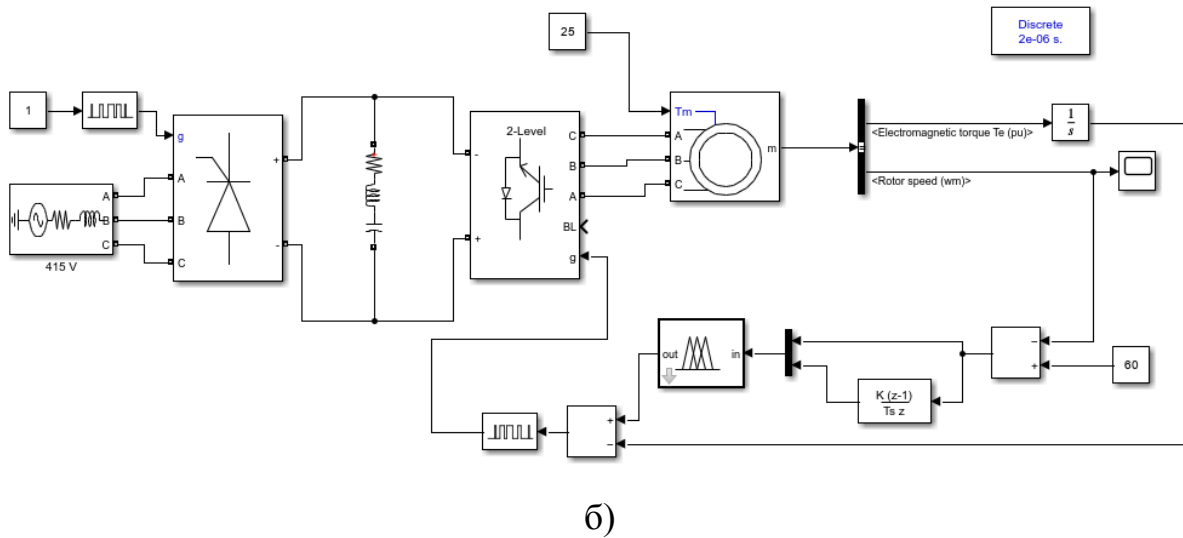


Рисунок – 3.7. Модель системи керування із застосуванням контролера нечіткої логіки: а) для лінії відводу; б) для лінії прийому.

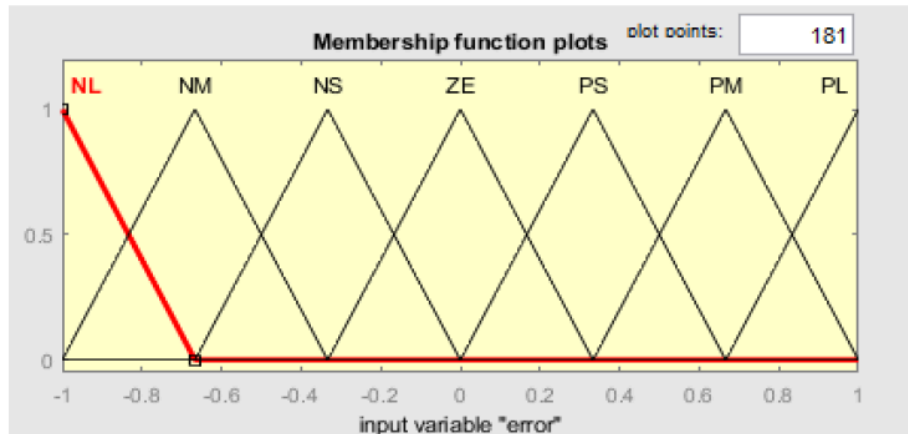
Фазифікація.

Фазифікація передбачає перетворення чітких значень у нечіткі значення. Трикутні функції приналежності використовувалися для нечіткості вхідних даних завдяки зменшенню похибки стаціонарного стану, простоті та ефективності обчислень порівняно з трапецієподібними, гаусовими та дзвоноподібними функціями приналежності. Сім трикутних функцій приналежності використовувалися для вхідних і вихідних змінних, як показано на рис. 3.8 та 3.9 відповідно. Діапазон функцій приналежності похибки $e(t)$, зміни похибки $\dot{e}(t)$ і виходу $u(t)$ дорівнює $[-1 \ 1]$ і був визначений на основі допуску системи відводу та прийому.

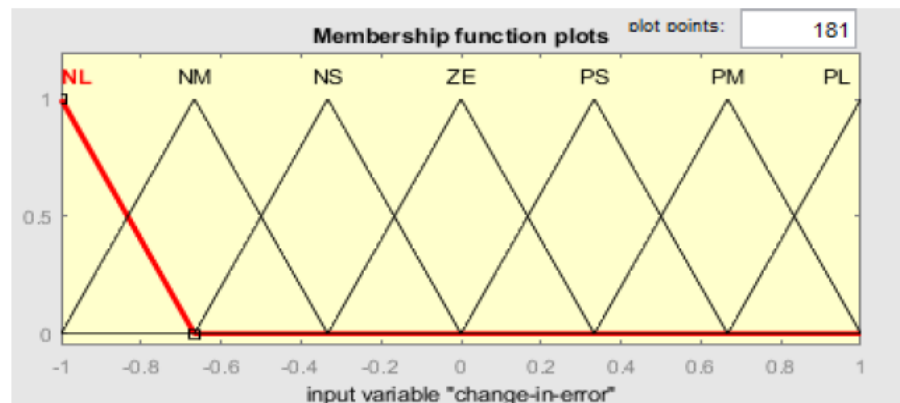
Для налаштування контролера нечіткої логіки необхідно провести фазифікацію змінних. Для реалізації алгоритму керування використали 49 правил.

Для цього вводимо два вхідних сигнали: сигнал розузгодження DF (різниця між заданою швидкістю та фактичною швидкістю) та зміна сигналу розузгодження CDF (інтегральна складова сигналу DF).

Значення змінних прийняли наступні mS = мінус малий, mM = мінус середній, mL = мінус великий, zE = нуль, pL = плюс великий, pM = плюс середній pS = плюс малий для входів і mL = мінус великий, mLM = мінус великий середній, mM = мінус середній, mMS = мінус середній малий, mS = мінус малий, zE = нуль, pS = плюс малий, pMS = плюс середній малий, pM = плюс середній, pML = плюс середній великий і pL = плюс великий для виходів.



а)



б)

Рисунок – 3.8. Вхідні функції належності нечіткого логічного контролера: а) : сигнал розузгодження DF; б) зміна сигналу розузгодження CDF.

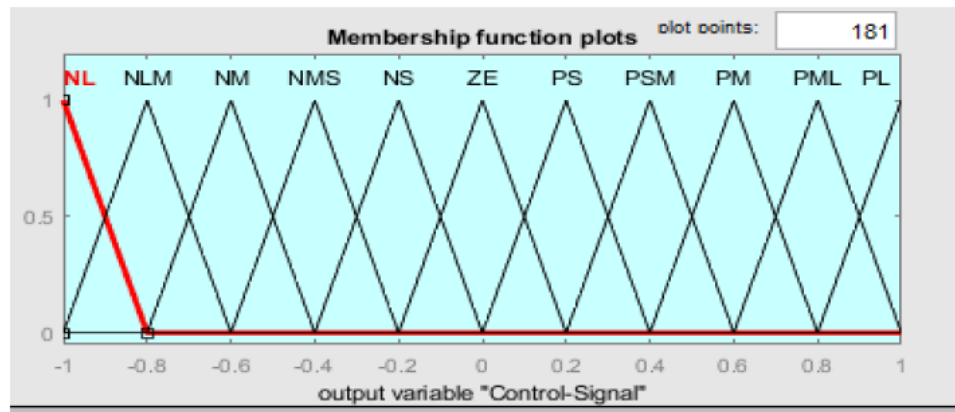


Рисунок – 3.9. Функції належності виходу контролера нечіткої логіки

Співвідношення між змінними наведено в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3. Реалізація правил нечіткої логіки.

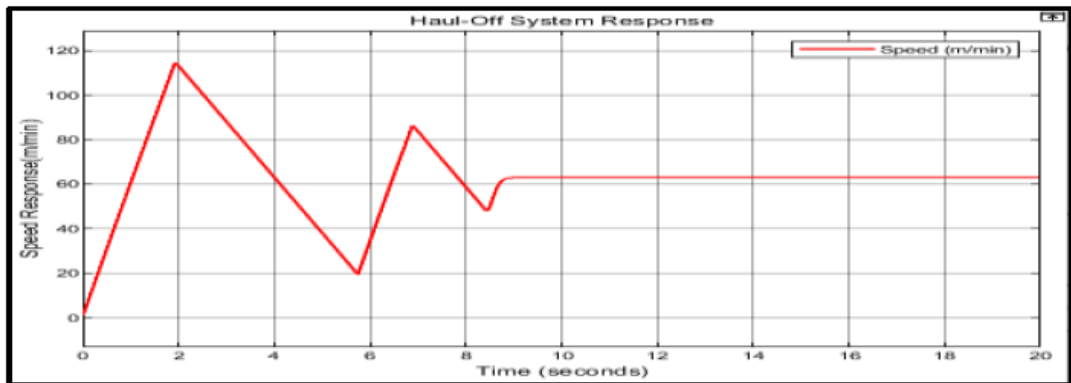
DF/CDF	mL	mM	mS	zE	pS	pM	pL
mL	mL	mL	mLM	mM	mMS	mS	zE
mM	mL	mLM	mM	mMS	mS	zE	pS
mS	mLM	mM	mMS	mS	zE	pS	pMS
ZE	mM	mMS	mS	zE	pS	pMS	pM
pS	mMS	mS	zE	pS	pMS	pM	pLM
pM	mS	zE	pS	pMS	pM	pLM	pL
pL	zE	pS	pMS	pM	pLM	pL	pL

Процес дефазифікації перетворює нечіткий вихід, який є керуючим сигналом, у чітке значення для керування установкою. Метод центроїдної

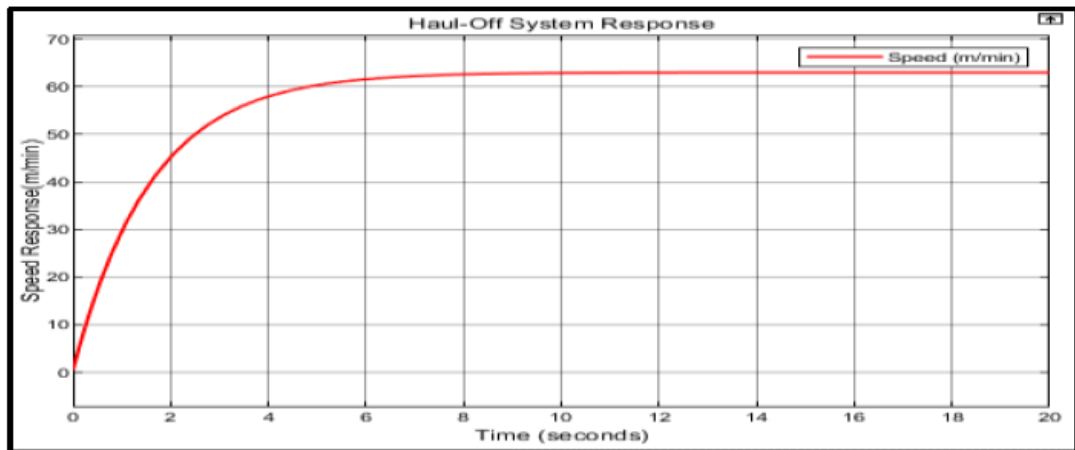
дефазифікації використовувався для отримання чіткого значення завдяки його обчислювальній ефективності.

В результаті проведеного моделювання отримали графіки перехідних процесів системи керування при зміні технологічних параметрів на лінії. Для ділянки відводу графіки перехідних процесів приведені на рис. 3.10, а для ділянки прийому на рис.3.11.

Система керування має еталонну швидкість 60 м/хв і використовує вбудований блок двигуна постійного струму MATLAB/Simulink для системи відводу та блок асинхронного двигуна змінного струму для системи прийому.



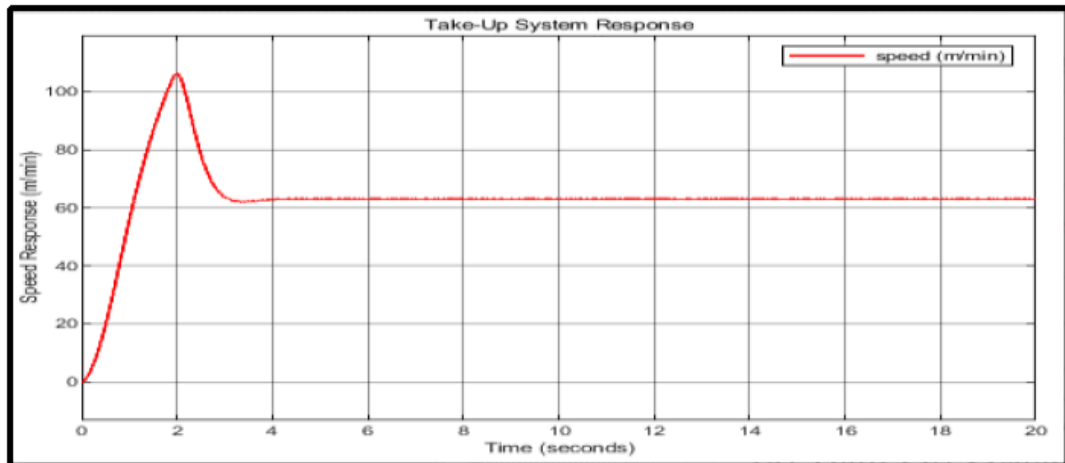
а)



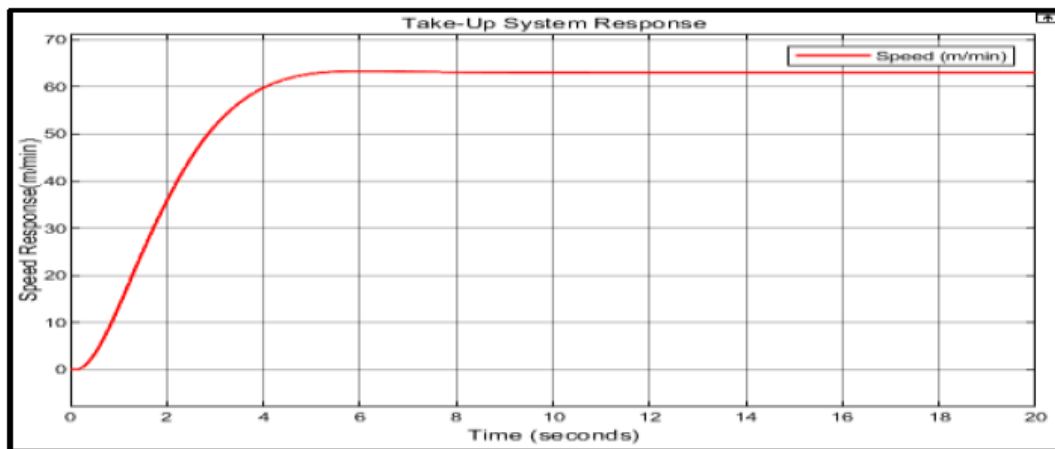
б)

Рисунок – 3.10. Графіки перехідних процесів системи керування для ділянки відводу: а) з використанням ПІД регулятора; б) з використанням контролера нечіткої логіки.

Ефективність системи з ПД-контролером показує, що швидкість коливається з великими перевищеннями як для систем відведення, так і для систем прийому, і для встановлення потрібно більше часу. Це вказує на коливання з великими викидами та великим часом встановлення для всієї екструзійної лінії.



a)



б)

Рисунок – 3.11. Графіки перехідних процесів системи керування для ділянки прийому: а) з використанням ПД регулятора; б) з використанням контролера нечіткої логіки.

Контролер нечіткої логіки створює менший відсоток перерегулювання, встановлюється швидше та є більш стабільним порівняно з ПІД-регулятором.

В процесі регулювання час підйому для ділянки відводу для ПІД регулятора склав 0,216 сек, тоді як для контролера нечіткої логіки 3,340 сек. Однак перерегулювання склало 71,5 % для першого та 7,4 % для другого виду регулювання. Також для контролера нечіткої логіки характерний менший час встановлення (7,4 сек) порівняно з ПІД регулятором (8,8 сек) та більш плавна характеристика. Тому використання контролера нечіткої логіки для лінії відводу є більш доцільним.

Як видно з рис. 3.11 контролер нечіткої логіки має більший час встановлення (5,8 сек) порівняно з ПІД регулятором (4,7 сек), але має менше значення перегулювання 4,7% порівняно з 56,6% відповідно. Виходячи зі сказаного контролер нечіткої логіки можна рекомендувати і для лінії прийому.

Висновки до розділу 3

В розділі проведено аналіз процесу з точки зору розробки системи керування. Розроблено функціональну схему екструзійної лінії виробництва кабелю перерізом 25 мм².

Систему керування реалізовано на базі мікроконтролера ESP32 та розроблено схему електричну принципову прототипу системи.

Для автоматизованого регулювання параметрів технологічного процесу було проаналізовано два варіанти реалізації системи: з використанням ПД регулятора та контролера нечіткої логіки.

Для двох варіантів регулювання було проведено моделювання в програмному пакеті MATLAB/Simulink. За результатами моделювання контролер нечіткої логіки можна рекомендувати і для лінії відводу та прийому.

4. РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЄКТУ «СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМ ПРОЦЕСОМ ВИГОТОВЛЕННЯ КАБЕЛЬНОЇ ПРОДУКЦІЇ»

4.1 Опис та технологічний аудит ідеї стартап-проєкту

На основі розглянутого вище матеріалу в цьому розділі буде проведено аналіз стартап проєкту системи керування технологічним процесом виготовлення кабельної продукції.

Система призначення для керування процесом виготовлення кабельної продукції, зокрема керуванням процесом екструзійного нанесення ізоляції.

Зміст ідеї, що пропонується, можливі напрямки її застосування та основні вигоди, що може отримати користувач за кожним напрямком застосування наведені в таблиці 4.1 [33].

Таблиця 4.1. Опис ідеї стартап проєкту.

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Система керування технологічним процесом виготовлення кабельної продукції	Інтелектуальне керування процесами екструзійного нанесення ізоляції	Покращена рівномірність нанесеної ізоляції, точність нанесення
	Адаптивний адаптивний контроль натягу дроту	Зменшення дефектів виготовлених кабелів
	Застосування нечітких алгоритмів для регуляторів натягу	Підвищена ефективність виробництва, економія енергоресурсів

Використовуючи розроблену систему можна оптимізувати процес нанесення ізоляції, що дозволить підвищити якість продукції і позитивно відіб'ється на динаміці продажів.

На наступному етапі проводимо порівняльний аналіз переваг стартапу порівняно з пропозиціями конкурентів. Такий аналіз наведено в таблиці 4.2.

Як видно із таблиці стартап володіє двома сильними сторонами, однією слабкою та двома нейтральними. Це свідчить про домінацію сильних сторін, що вказує на позитивні можливості проєкту стати успішним.

Таблиця 4.2. Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проєкту

№ п/п	Техніко-економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів			W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проєкт	Мегават (кабельний завод)	Мега-кабель (підприємство по виготовленню кабелів)			
1.	Вартість розробки	Висока	Середня	Середня	-	+	-
2.	Якість ізоляції	Висока	Низька	Середня	-	-	+
3.	Складність контролю обладнання	Висока	Низька	Низька	+	-	-
4.	Контроль в реальному часі	Повністю присутній	Відсутній	Частково	-	-	+
5.	Кількість автоматизованого обладнання	Висока	Низька	Середня	-	+	-

Далі аналізуємо технічні особливості, спектр можливих технологічних рішень. Для аналізу здійсненності проєкту використаємо таблицю 4.3.

Використання мікроконтролерів не є інноваційним, але для актуальності на ринку необхідно використовувати максимально ефективні рішення. Технологічна реалізація проєкту можлива, так як всі необхідні технології є наявними на ринку та знаходяться у широкому доступі.

Таблиця 4.3 Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1.	Система керування технологічним процесом виготовлення кабельної продукції	Сучасні датчики	+	+
		Новітні контролери	+	+
		Підтримка нечіткої логіки	+	+
		Контроль в реальному часі	+	+
Обрана технологія реалізації ідеї проекту: Система на основі програмованого логічного контролера з використанням алгоритмів нечіткої логіки				

4.2 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап проекту

Визначення основних ризиків та можливостей, які можна очікувати від ринку є необхідним, оскільки дозволяє спроектувати напрями розвитку стартапу зі урахуванням всіх складових ринкового положення, попиту цільових клієнтів та пропозицій конкурентів. Доцільно використати ці знання під час ринкового впровадження проекту.

Спочатку проведемо аналіз попиту: наявність попиту, обсяг, динаміка розвитку ринку (таблиця 4.4) [34].

Таблиця 4.4. Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	20
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	400000
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростаюча
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Відсутні
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Вимоги щодо безпеки та надійності системи
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	30%

Розглянувши таблицю стає зрозуміло що даний ринок налічує пристойну кількість конкурентів, а ринок є зростаючим. Звичайно що головну загрозу становлять інноваційні компанії та компанії гіганти.

Визначимо потенційні групи клієнтів, їх характеристики, та формуємо орієнтовний перелік вимог до товару для кожної групи. Результати приведені в таблиці 4.5.

Таблиця 4.5. Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до послуги
1	Автоматизація процесу виробництва кабельної продукції	Виробництва та підприємства приладобудівного сегменту.	Якість виготовленої продукції, висока продуктивність	Надійна робота системи, можливість дистанцій-ного керування.

Дослідивши цільову аудиторію на ринку визначено, що основними клієнтами є виробництва та підприємства приладобудівного та машинобудівного сегменту.

Відмінностями у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів є загальна якість експлуатації установки, швидкість роботи системи та рентабельність.

Інформація про вимоги майбутніх покупців до товару буде враховано в подальшій розробці стартап-проекту.

Після визначення потенційної цільової аудиторії продукту проведемо аналіз ринкового середовища: складаються таблиці факторів, що сприяють ринковому впровадженню проекту, та фактори, що йому перешкоджають. Дані наведені у таблиці 4.6

В заповненій таблиці наведені фактори, які можуть в значній мірі нашкودити стартап проекту. Як протидію цим факторам запропоновані контрдії які мають покращити становище проекту в складних ситуаціях.

Таблиця 4.6. Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1.	Конкуренти	Складність запропонувати вигідніші умови	Зменшення ціни за рахунок використання дешевших комплектуючих з більш якісним програмним забезпеченням
2.	Висока конкуренція	Клієнти звертаються до інших замовників	Виділяти сильні сторони продукту та просувати це при маркетинговій стратегії
3.	Нові технології на ринку	Поява більш інноваційних технологій	Розробка з урахуванням появи нових технологій
4.	Не обізнаність на ринку	Невідомі підходи до клієнтів.	Залучення експертів
5.	Не відомість	Клієнт не дізнається про компанію	Потужна маркетингова стратегія

Проаналізувавши фактори загроз, які впливають на продукт, можна визначити такі основні негативні фактори: висока конкуренція, висока вартість систем такого класу, нові технології на ринку, недостатній попит товару, низька обізнаність споживачів. Для успішного ведення стартапу необхідно постійно проводити аналіз конкурентів, слідкувати за трендами та технологіями у сфері та залучати кращих спеціалістів галузі.

Слід зазначити, що окрім загроз, що можуть перешкоджати розвитку продукту, існують і фактори можливостей, що відображають переваги, на яких буде проводитись впровадження проекту. Фактори можливостей проекту зображені у таблиці 4.7.

В таблиці наведено фактори, які дозволяють вивести продукт на ринок та підвищити ефективність його впровадження.

При появі на ринку важливим є розуміння своїх конкурентів, їх можливостей та швидкості адаптації. Також важливо враховувати їх можливий вплив на ринок.

Ця інформація заноситься в таблицю 4.8

Таблиця 4.7. Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1.	Вдосконалення	Модернізація функціонування системи	Розвиток та залучення додаткових коштів
2.	Вихід на закордонні ринки	Ріст можливих сфер застосування та продажу	Аналіз закордонних ринків
3.	Збільшення виробництва кабелів	Різке збільшення попиту на кабельну продукцію	Розширення виробництва, сфери впровадження системи
4	Енергозбереження	Застосування обладнання та алгоритмів, які економлять енергоресурси	Впровадження енергоефективних технологій для зменшення споживання енергії і зниження виробничих витрат

Таблиця 4.8. Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
Тип конкуренції: олігополія	На ринку існує певна кількість фірм, що випускають схожі системи	Створення високо технологічної системи
За рівнем конкурентної боротьби: національний	Конкуренція компаній на міжнародному рівні	Аналіз аудиторії та їх потреб з врахуванням національних особливостей
За характером конкурентних переваг: нецінова	Конкурентні переваги не залежать від вартості продукції	Увага до якості системи
За інтенсивністю: марочна	Бренд має значний вплив	Надання функцій, які не надають конкуренти

Проаналізувавши дані таблиці 4.8 можна зробити висновок, що на ринку присутня олігополія, так як ринок не перенасичений компаніями зі схожою продукцією. Рівень конкурентної боротьби – національний з внутрішньогалузевою ознакою. Конкуренція за видами є товарно видовою.

Після аналізу конкуренції нижче наведений більш детальний аналіз умов конкуренції в галузі.

Таблиця 4.9. Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
Складові аналізу	Мегават	Компанії, що займаються виробництвом кабельної продукції	Вартість на обладнання, кількість наявного обладнання	Промислові виробництва	Відсутні
Висновки:	Потужний конкурент	Присутні можливості для входу на ринок	Диктують вартість на обладнання	Прагнуть мати якісну продукцію	Відсутні

Аналіз конкуренції в галузі за М.Портером показав прямих та потенційних конкурентів у галузі, можливості входу на ринок та інтенсивність конкурентів, клієнтів та їх основні вимоги до продукції, що виготовляється, товари замітники є відсутніми.

Після всіх аналізів визначається та обґрунтовується перелік факторів конкурентоспроможності.

Таблиця 4.10. Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1	Точність регулювання	Дотримання параметрів якості ізоляції у чіткому діапазоні
2	Час регулювання	Зменшений час перерегулювання системи
3	Технічна підтримка	Допомога спеціалістів на всіх етапах впровадження системи
4	Якість комплектуючих	Висока якість всіх елементів системи
5.	Простота в експлуатації	Наведені чіткі інструкції та алгоритми керування системою

Таблиця 4.11. Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін «системи керування технологічним процесом виготовлення кабельної продукції»

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з розробкою						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	Технологічність	15						+	
2	Ефективність	14						+	
3	Висока якість	16							+
4	Технічна підтримка	18				+			
5.	Ціна	14				+			

Дослідивши слабкі і сильні сторони проекту, зроблено висновок, що розроблена система є конкурентоспроможною завдяки ефективності, високій якості та технічній підтримці, при цьому програє у вартості.

Таблиця 4.12. SWOT- аналіз стартап-проекту

Сильні сторони: Надійність обладнання, простота автоматичний режим, економічність, якість	Слабкі сторони: Складність налаштування, Висока вартість компонентів
Можливості: 1. Удосконалення. 2. Вихід на міжнародний ринок. 3. Збільшення виробництв у галузі Створення систем виготовлення кабелів. 4. Підтримка держави. 5.Тренд на автоматизацію виробництв.	Загрози: 1. Висока вартість продукції. 2.Нові технології на ринку. 3. Висока конкуренція. 4. Недостатній попит товару на ринку. 5. Невідомість.

Проведено SWOT-аналіз, що представлений у таблиці 4.12, на основі якого ми можемо стверджувати про сильні та слабкі сторони продукту та можливості і загрози. На базі даного аналізу виконуються альтернативи ринкової поведінки та приблизний час реалізації з врахуванням конкурентів. Визначені альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту показано у таблиці 4.13.

Таблиця 4.13. Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	Стратегія орієнтування продукту на нішу державних підприємств великих міст	Висока ймовірність	9-14 місяців
2	Стратегія орієнтування продукту на нішу приватних підприємств великих міст	Висока ймовірність	4-6 місяців
3	Стратегія компенсації слабких сторін стартапу наявними ринковими можливостями	Середня ймовірність	8 місяців

Проаналізувавши таблицю 4.13 можна прийти до висновку, що доцільніше використовувати стратегію орієнтування продукту на нішу державних та приватних підприємств великих міст через високу ймовірність отримання ресурсів та менші строки реалізації в порівнянні з іншими альтернативами.

4.3. Розроблення ринкової та маркетингової програми стратегії проекту

У даному підрозділі проводиться розробка ринкової стратегії, що в першу чергу передбачає визначення стратегії охоплення ринку, а саме опис цільових груп споживачів. Отриманий результат занесено у таблицю 4.14.

Цільовими групами продукту будуть мережеві підприємства та промислові компанії, таким чином обрано використовувати диференційну маркетингову стратегію, так як комунікація буде відбуватись одночасно з двома сегментами ринку, але для кожного буде розроблятися окрема програма ринкового впливу.

Таблиця 4.14. Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
	Промислові компанії	Так	Високий	Велика	Середня
	Мережеві підприємства	Так	Середній	Середня	Середня
	Локальні підприємства	Так	Низький	Низька	Складна
Які цільові групи обрано: Промислові компанії та мережеві підприємства Під час аналізу потенційних груп споживачів було прийнято рішення, що компанія буде працювати із мережевими підприємствами та промисловими компаніями.					

Для роботи в обраному сегменті ринку необхідно сформувавши базову стратегію розвитку. Отриманий результат представлено в таблиці 4.15.

Таблиця 4.15. Визначення базової стратегії розвитку

Обрана альтернатива розвитку проекту	Орієнтація продукту на ринок приватних та державних промислових компаній великих міст, мережевих підприємств
Стратегія охоплення ринку	Диференційований маркетинг - це стратегія, коли компанія розробляє окремі маркетингові кампанії для різних сегментів ринку, враховуючи особливості та потреби кожного з них.
Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Технологічність, точність, ефективність
Базова стратегія розвитку	Стратегія диференціації - полягає у створенні унікальної ціннісної пропозиції для споживачів, яка відрізняє продукт або послугу компанії від конкурентів.

Базовою стратегією розвитку обрано стратегію диференціації, через наявність на ринку конкурентів, котрі займаються сегментуванням ринку, ключовими конкурентоспроможними позиціями є технологічність, точність та ефективність продукції.

Далі визначимо базову стратегію конкурентної поведінки, що зазначена у таблиці 4.16.

Таблиця 4.16. Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки
Ні	Забирати існуючих та шукати нових	Так (мету використання)	Заняття конкурентної ніші

Обрано стратегію заняття конкурентної ніші, так як продукт не є «першопрохідцем» у галузі систем контролю виробництва кабельної продукції, компанія буде шукати нових споживачів та відмовляється від копіювання характеристик товару конкурентів (однакова лише мета використання).

На основі побажань покупців обраної ніші до постачальника і продукту, а також в залежності від стратегії розвитку та стратегії конкурентної поведінки розробляємо стратегію позиціонування яка визначається у формування ринкової позиції, за яким споживачі мають ідентифікувати проект. Результати наведені у таблиці 4.17.

Таблиця 4.17. Визначення стратегії позиціонування

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
	Простота експлуатації, висока якість продукції	Стратегія диференціації	Якість продукції, широкий функціонал, економічність	Технологічність, ефективність, точність

У результаті проведеного аналізу у даному підрозділі визначена система рішень, щодо ринкової поведінки стартапу, вона визначає вектор напрямку роботи компанії на ринку та ключову конкурентоспроможність.

Під час створення маркетингової програми першим кроком є розробка маркетингової концепції товару, який отримає споживач. У таблиці 4.18 наведені результати ключових переваг.

Таблиця 4.18. Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
Точність	Висока точність контролю технологічних показників	Точність забезпечується використанням якісного обладнання та розробленим алгоритмом роботи системи
Швидкість роботи	Швидке налаштування параметрів системи в залежності від збудованих факторів	Невеликий час перехідного процесу регулювання
Технологічність	Сучасні технології контролю натягу та процесів екструзії	Використання сучасних методів та технологій для контролю натягу та процесів екструзії

Отже під час визначення ключових переваг концепції потенційного товару було визначено такі ключові потреби: точність, швидкість роботи та технологічність. Дані потреби задовольняються якістю обладнання, що використовується, невеликим часом перехідного процесу регулювання та завдяки впровадженню сучасних методів та технологій контролю.

У таблиці 4.19 було описано три рівні моделі товару, а саме товар за задумом, товар у реальному виконання, товар із підкріпленням.

Проаналізувавши рівні моделі товару, можна дійти до висновку, що продукт у реальному виконанні в достатній мірі відповідає товару за задумом, який був спроектований ще на стадії ідеї стартап-проекту, однак було внесені

певні незначні корективи для того, щоб товар був краще адаптований до умов ринку.

Таблиця 4.19. Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові		
I. Товар за задумом	Система керування технологічним процесом виготовлення кабельної продукції/		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх /Тл/Е/Ор
	1. Економічна	М	Е
	2. Технологічна	Нм	Тл
	3. Швидкість роботи	Нм	Тх
	4. Призначення	Нм	Ор
	5. Технічна підтримка	Нм	Тх
	Якість: стандарти, нормативи, технічний регламент		
	Пакування: Мікроконтролер з набором датчиків, програмне забезпечення, герметична упаковка		
Марка: Назва бренду та назва установки			
III. Товар із підкріпленням	До продажу с: Консультація з можливості інтегрування		
	Після продажу: Підтримка товару		

Після аналізу рівнів моделей товару, проведено визначення встановлення меж ціни, які необхідно враховувати для встановлення адекватної цінової політики на товар. Проведено аналіз цін товарів конкурентів та доходів користувачів продукту і його результати занесено до таблиці 4.20

Таблиця 4.20. Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
1	400000 грн	600000 грн	Високий	400000-600000 грн

Проаналізувавши ціни, визначено такі межі встановлення цін на власний продукт, щоб він міг конкурувати з товарами-аналогам та товарами-замінниками, при цьому бути доступними для групи споживачів.

Наступним кроком є визначення оптимальної системи збуту, в межах якого приймається рішення (див. табл. 4.21).

Таблиця 4.21. Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1	Підприємства виконують закупівлю системи контролю	Своєчасне виконання запланованих робіт та поставок, технічна підтримка системи	Ринок України та міжнародні поставки	Торгівля через спеціалізовані фірми та партнерів

Проведено формування системи збуту де розглянуто специфіку закупівельної поведінки цільових клієнтів, функції збуту постачальника, глибина каналу збуту та оптимальна система збуду, що заключається в торгівлі через спеціалізовані фірми та партнерів.

Далі проводиться аналіз концепції маркетингових комунікацій, що дозволить збільшити загальні продажі товару та прибуток компанії шляхом налаштування каналів збуту продукції.

Таблиця 4.22. Концепція маркетингових комунікацій

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
1	Пошук якісної продукції за низькою ціною	Тематичні виставки присвячені систем контролю, таргетована реклама в інтернеті	Вигідна ціна на систему, дотримання високої якості обладнання	Показати сильні сторони продукту	Демонстрація можливостей

Провівши необхідний аналіз та дослідження, створено концепцію маркетингових комунікацій, яка виражається в активній рекламі на тематичних виставках та таргетованій рекламі в інтернет ресурсах, завданням якої є демонстрація сильних сторін продукту компанії.

Бізнес модель дозволить надати цінність нашим клієнтам, залучити їх та забезпечити дохідні потоки через продаж представленої системи для керування технологічним процесом виготовлення кабельної продукції.

Наш стартап пропонує систему моніторингу та регулювання технологічними параметрами виробництва кабелю, що дозволяє підприємствам зекономити енергозатрати та покращити якість виготовленої продукції. Також передбачається співпраця з виробниками програмованих логічних контролерів та постачальниками датчиків, щоб постійно вдосконалювати точність та швидкодію роботи системи, яка аналізує параметри технологічного процесу та автоматично регулює їх при екструзійному нанесенні ізоляції. Основні активності включають розробку програмного та апаратного забезпечення, виробництво обладнання та створення зручного інтерфейсу управління. Перевагами цієї системи є енергоефективність, зручний інтерфейс управління та можливість дистанційного контролю параметрів, швидка реакція на відхилення параметрів, чітке регулювання.

Цільова аудиторія - виробництва та підприємства приладобудівного сегменту та сегменту виробництва кабельної продукції. Прибуток буде отримано за рахунок продажу розробленої технології, яка забезпечує точне та ефективне регулювання параметрів технологічного процесу.

Просування продукту планується через активну рекламу на спеціалізованих виставках та цілеспрямовану рекламу в Інтернеті, з фокусом на демонстрації переваг продукту.

4.4 Економічна ефективність стартап проєкту

При розробці стартап проєктів важливим є не тільки наявність ідеї або інноваційного продукту, але і аналіз доцільності вкладення коштів, оцінка ефективності прибутків.

Для проведення такої процедури ми маємо оцінити прибутки, які будуть отримані при впровадженні стартапу і порівняти їх з необхідними затратами для його реалізації.

Прибуто буде отримано за рахунок реалізації продукту: продаж мікроконтролерних систем керування; продаж програмного забезпечення; підтримка систем.

Витрати при реалізації носять постійний характер (оренда приміщень, реклама, зарплата постійних працівників компанії, таких, як інженери, маркетологи, менеджери) і не залежать від кількості продукції та змінний характер (закупка обладнання необхідного для виготовлення комплексного обладнання, витрати на електроенергію, зарплата робочих) і залежать від кількості виготовленої продукції

Отже, проводимо оцінку витрат, які будуть при реалізації проєкту.

Постійний характер витрат:

- 10 000 грн/міс - оренда приміщень.
- 10 000 грн/міс - реклама.
- 70 000 грн/міс - зарплата постійних працівників компанії (інженери, маркетологи, менеджери)

Змінний характер витрат:

- 25 000 грн – мікроконтролер, плати;
- 5 000 грн - зарплата робочих;
- 25000 грн - датчики;

Оціночний прибуток складає:

– 400 000 грн - відпускна вартість системи + пдв 80 000 грн

Обсяги виробництва продукції на перші 5 місяців наведено в таблиці 4.23.

Таблиця 4.23 – Обсяги виробництва продукції

Показник	Значення по місяцях, тис. грн.				
	1	2	3	4	5
Загальна потреба в продукції, шт.	3	5	7	10	15
Ціна одного набору тис. грн.	400	400	400	400	400
Річні обсяги випуску в вартісних показниках (тис. грн.)	1200	2000	2800	4000	6000

Визначимо витрати, необхідні для реалізації поточної діяльності за проектом (таблиця 4.24).

Таблиця 4.24 – Виробничі витрати

№ з/п	Стаття витрат	Сукупні витрати за період місяців, тис. грн.				
		1	2	3	4	5
1	Загальногосподарські витрати, оплата праці постійного персоналу	5	10	15	20	25
1.1	Витрати на оренду та утримання приміщень, обладнання	10	20	30	40	50
1.2	Витрати на збут, просування та рекламу	10	20	30	40	50
2	Витрати на матеріальні ресурси (комплектуючі, сировина)	50	100	150	200	250
3	Витрати на оплату праці	70	140	210	280	350
Разом:		145	290	435	580	725

Точка беззбитковості відображає обсяг виробництва інноваційної продукції, при досягненні якого виручка від реалізації покриває сумарні витрати на її виробництво. Розрахунок точки беззбитковості року проводиться за формулою:

$$T_{\text{б}} = \frac{C}{P-V} \quad (4.1)$$

де C – постійні витрати на весь обсяг продукції (ті, які не залежать від обсягу виробництва продукції – загальногосподарські витрати та витрати на оплату праці); P – ціна одиниці продукції; V – змінні витрати на одиницю продукції.

$$T_{\text{б}} = \frac{C}{P-V} = \frac{90000}{400000-55000} = 0.26 \quad (4.2)$$

Визначимо формування грошового потоку від реалізації проекту.

Чистий дисконтований дохід (NPV, Net Present Value) – це різниця між надходженнями за весь період інноваційного проекту та інвестиціями в проект. Розрахунок чистого дисконтованого доходу наведений в таблиці 4.25.

Таблиця 4.25 – Формування грошового потоку від реалізації проекту

№	Показник	Значення по місяцях					Разом
		1	2	3	4	5	
1	Надходження від проекту (виручка від реалізації продукції, послуг)	1200	2000	2800	4000	6000	16000
2	Загальні витрати	145	290	435	580	725	2175
3	Грошовий потік	1055	1710	2365	3420	5275	13825
4	Акумуляований грошовий потік	1055	1710	2365	3420	5275	13825

Оскільки $NPV > 0$ протягом розрахункового періоду, то даний інноваційний проект доцільно прийняти.

Індекс рентабельності інвестицій в проект (ROI, Return On Investment) характеризує рівень грошового потоку, що припадає на одиницю

інноваційних витрат і обчислюється за формулою (4.3), коли інвестиція здійснюється багато разів:

$$ROI = \frac{\sum_T D_T}{\sum_T I_T} \quad (4.3)$$

де D_T – надходження у відповідному періоді;

I_T – інвестиція у відповідному періоді.

Індекс рентабельності за 5 місяців:

$$ROI = \frac{16000}{2175} = 7.35 \quad (4.4)$$

Показник $ROI > 1$, отже даний інноваційний проект доцільно прийняти. Даний критерій ROI використовують при виборі певного проекту із декількох альтернативних, у яких NPV приблизно однакові.

Період окупності інвестицій (Ток) – це розрахунковий термін від початку реалізації проекту, починаючи з якої акумульований грошовий потік (ACF) приймає стійке позитивне значення. Іншими словами, це – період (вимірюваний в місяцях, кварталах або роках), починаючи з якого первинні вкладення та інші витрати, пов'язані з інвестиційним проектом, покриваються сумарними результатами його здійснення.

Термін окупності розраховується за формулою :

$$T = t + \frac{|ACF_{t-}|}{(|ACF_{t-}| + |ACF_{t+}|)} = 1 + \frac{0}{0+1} = 1 \quad (4.5)$$

де t – останній період реалізації проекту, при якому акумульований грошовий потік (різниця накопиченого доходу і витрат) приймає від’ємне значення;

$ACF_t -$ – це остання від’ємна різниця накопиченого доходу та витрат (грн.);

$ACF_t +$ – це перша позитивна різниця накопиченого доходу та витрат (грн.).

Отже, на 1-му місяці після початку реалізації проект повністю окупить себе.

Для реалізації описаного стартап проекту не виникає гострої потреби у фінансуванні.

Проект є економічно вигідним і вкладені кошти швидко окупляться. Враховуючи всі фактори в галузі виробництва кабелів можна стверджувати, що даний проект є ефективним і може бути впроваджений.

Висновки до розділу 4

Даний розділ магістерської дисертації присвячений розробці стартап-проекту «Система керування технологічним процесом виготовлення кабельної продукції». Висвітлено загальну ідею проекту, система призначена для аналізу та керування технологічними параметрами процесу екструзійного нанесення ізоляції при виробництві кабельної продукції.

Система дозволить виконати економію витрат на електроенергію та покращити якість виробленої продукції.

Проведено аналіз потенційних клієнтів стартапу, дослідження показало що основними клієнтами являються підприємства приладобудівного та виробничого сегменту. Після визначення цільової аудиторії виконано аналіз ринкового середовища, що включає фактори загроз та можливостей.

Аналіз конкуренції в галузі за М.Портером показав, що потенційними конкурентами є компанії, що займаються виробництвом автоматичних систем контролю процесу виробництва кабелю, можливості для входу на ринок присутні. На базі SWOT-аналізу визначено альтернативні стратегії ринкового впровадження проекту, що являють собою нейтралізацію загроз, використовуючи сильні сторони розробленої системи. Створено модель бізнесу.

У підсумку можна зазначити, що ринкова комерціалізація проекту можлива виходячи з наведеного вище аналізу. Стрімка динаміка росту ринку створює нові можливості для впровадження та розвитку спроектованої системи. Не дивлячись на рівень конкуренції існує перспектива входу та закріплення на ринку, оскільки є можливість запропонувати постійно зростаючій групі потенційних клієнтів технологію, яка буде здійснювати точне та ефективне регулювання параметрів технологічного процесу виготовлення кабельної продукції.

ВИСНОВКИ

Розглянуто системи керування натягом дроту при виробництві кабелів як основного фактора, який впливає на якість продукції. Описано фактори, які впливають на появу браку при виробництві кабелів та методи їх усунення.

Описано основні залежності, які використовуються для моделювання процесів екструзії для розрахунку параметрів виробничої лінії виробництва кабелів. Розв'язання диференціальних рівнянь чисельним методом ліній дозволяє отримати оптимальні значення параметрів процесу для якісного виробництва кабелів. Далі необхідно розробити систему керування, яка буде підтримувати ці параметри в заданих межах. Це дозволить підвищити продуктивність виробництва та покращити якість продукції.

Проведено аналіз процесу з точки зору розробки системи керування. Розроблено функціональну схему екструзійної лінії виробництва кабелю перерізом 25 мм². Систему керування реалізовано на базі мікроконтролера ESP32 та розроблено схему електричну принципову прототипу системи.

Для автоматизованого регулювання параметрів технологічного процесу було проаналізовано два варіанти реалізації системи: з використанням ПІД регулятора та контролера нечіткої логіки. Для двох варіантів регулювання було проведено моделювання в програмному пакеті MATLAB/Simulink. За результатами моделювання контролер нечіткої логіки можна рекомендувати і для лінії відводу та прийому.

Створено стартап проект автоматизованої системи керування технологічним процесом виготовлення кабельної продукції. Висвітлено загальну ідею проекту, визначено слабкі та сильні сторони. Проведено порівняльний аналіз ринку та визначено цільову ідею продукту, фактори загроз та можливостей, створено бізнес-модель.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

[1] Robert Agyare Ofosu, Huangqiu Zhu. Tension control algorithms used in electrical wire manufacturing processes: a systematic review. *Cogent engineering*. 2024. V. 11. No. 1. 2322837. <https://doi.org/10.1080/23311916.2024.2322837>.

[2] Jie-Shiou, L., Ming-Yang, C., Ke-Han, S., & Mi-Chi, T. Wire tension control of an automatic motor winding machine—An iterative learning sliding mode control approach. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2018. 50. p. 50–62. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2017.09.003>.

[3] Li, X., Zhu, Z., Shen, G., & Tang, Y. (2021). Wire tension coordination control of electro-hydraulic servo driven double-rope winding hoisting systems using a hybrid controller combining the flatness-based control and a disturbance observer. *Symmetry (Basel)*, 13(4), 716. <https://doi.org/10.3390/sym13040716>.

[4] Liu Y., Fang Q., Yinglin K. Modeling of tension control system with passive dancer roll for automated fiber placement. *Mathematical Problems in Engineering*, 2020, p. 1–11. DOI: 10.1155/2020/9839341.

[5] Ofosu R. A., Kaberere K. K., Nderu J. N., amau, S. I. Design of BFA-optimized fuzzy electronic load controller for micro hydro power plants. *Energy for Sustainable Development*. 2019. 51. 13–20. <https://doi.org/101016/j.esd.2019.04.003>.

[6] Kang C. G., Lee B. J. MIMO tension modelling and control for roll-to-roll converting machines. In *Proceedings of the 17th World Congress the International Federation of Automatic Control*. 2008. pp. 11877–11882. <https://doi.org/10.3182/20080706-5-KR-1001.02011>.

[7] Zhu R. Precise tension control of fibre winding and placement machine using closed-loop tension control system. *Textile Research Journal*. 2010. 6(3). 47–42.

[8] Raul P. R., Pagilla P. R. Modelling and frequency response of web tension with a pendulum dancer and comparison of load cell and dancer-based

tension control systems. In Proceedings of the International Conference on Web Handling. 2011. p. 85–104.

[9] Cazac V., Nuca I. Adjusting of the control system of asynchronous motor drive for wire drawing machine and winding mechanism. In Proceedings of the 10th International Conference on Electromechanical and Power Systems. 2015. p. 286–291.

[10] Giannoccaro N. I., Sakamoto T., Uchitomi I. A gain scheduling of PI controllers of a multispans web transport system. International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems. 2016. 9(3). 1516–1533. <https://doi.org/10.21307/ijssis-2017-928>.

[11] Ayokunle Adesanya, Ademola Abdulkareem, Lambe Mutalub Adesina. Predicting extrusion process parameters in Nigeria cable manufacturing industry using artificial neural network. Heliyon. Volume 6. Issue 7. 2020. e04289. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04289>.

[12] Chukwuebuka U-Dominic, Modestus Okwu and others. Improving the Quality and Operations of a Cable Manufacturing Company by Implementing Six Sigma- DMAIC Technique. Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management. Sao Paulo. Brazil. 2021. 1096-1108. DOI: 10.46254/SA02.20210525.

[13] Vanja Kosar, Z. Gomzi. Modeling of the power cable production line. Thermochimica Acta 457(1). 2007. P. 70-82. DOI: 10.1016/j.tca.2007.02.020.

[14] Mustafa Severengiz, Tobias Sprenger, Günther Seliger. Challenges and Approaches for a Continuous Cable Production. Procedia CIRP 40. 2016. p. 18 – 23.

[16] Baalaganapathy Manohar, Periasamy Chinnapalaniandi. Computational fluid dynamics simulation of single screw extruders in cable industries. Volume: 05 Issue: 03. 2016. P. 85-89.

[17] Vitor Fernando, Crespim Sousa, Francisco José and other. Developing a Novel Fully Automated Concept to Produce Bowden Cables for the Automotive Industry. *Machines*. 2022. 10(5). 290. <https://doi.org/10.3390/machines10050290/>

[18] Mykola Ostroverkhov, Anton Silvestrov, Galyna Kryvoboka. Identification of the parameters of the cable production process. *Technology Audit and Production Reserves*. 2017. 5(1(37)). p. 29-34.

[20] Armghan, H., Yang, M., Armghan, A., Ali, N., Wang, M. Q., & Ahmad, I. Design of integral terminal sliding mode controller for the hybrid AC/DC microgrids involving renewables and energy storage systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2020. 119. 105857. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.105857>.

[21] X. Chu X. Nian, X. Fu. Tension Control of Web Winding Systems for Speed-up Phase. 39th Chinese Control Conference (CCC). Shenyang. China. 2020. p. 1756-1761. doi: 10.23919/CCC50068.2020.9189375.

[22] Оробчук Б., Сисак І., Бабюк С. Автоматизована система релейного захисту від замикань на землю. *Вісник ТНТУ*. 2012. Том 66. № 2. с.198-206.

[23] Fadhel S. S., Noaman S. F. The generalized backstepping control method for stabilizing and solving systems of multiple delay differential equations. In 1st Scientific International Conference. College of Science. Al-Nahrain University. pp 150–156. <https://doi.org/10.22401/ANJS.00.1.20>.

[24] Ganeshthangaraj P., Muhammad Z., Yang-Hoi D., Kyung-Hyun C. Fuzzy logic-based control design for active dancer closed loop web tension control. *International Journal of Applied Engineering Research and Application*. 2012. 2(3). p. 438–443.

[25] Gassmann V., Knittel D., Pagilla P., Bueno M. A fixed-order h1 tension control in the unwinding section of a web handling system using a pendulum dancer. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. 2012. 20(1). p. 173–180.

[26] Gerngrob M., Kohler M., Endisch C., Kennel R. Model-Based Control of Nonlinear Wire Tension in Dynamic Needle Winding Processes. In Proceedings of the 2020 IEEE International Conference on Industrial Technology 2020. pp. 281–238.

[27] Vanja Kosar, Z. Gomzi, Krešimir Šintić. Modelling and simulation of the continuous power cable processing. Chemical Engineering and Processing - Process Intensification. 2007. 46(2). p. 83-88. DOI: 10.1016/j.cep.2006.05.001.

[28] D. S. Hooda, Vivek Raich. Fuzzy Logic Models and Fuzzy Control. Alpha Science International Ltd. Oxford. U.K. 2017. 409 p. URL : <https://pzs.dstu.dp.ua/logic/bibl/control.pdf>. (дата звернення 10.06.2024).

[29] N. Elias, N. M. Yahya, E. H. Sing. Numerical analysis of fuzzy logic temperature and humidity control system in pharmaceutical warehouse using MATLAB fuzzy toolbox: intelligent manufacturing and mechatronics. Proceedings of Symposium. Pahang. Malaysia. Springer. Singapore. 2018. p. 623-629.

[30] J. T. Dzib, E. J. Alejos-Moo., A. Bassam and other. Photovoltaic module temperature estimation: a comparison between artificial neural networks and adaptive neuro fuzzy inference systems models. International Symposium on Intelligent Computing Systems. 2016. vol.10. p. 46-60. DOI: 10.1007/978-3-319-30447-2_4.

[31] M. Sahin, R. Erol. A comparative study of neural networks and ANFIS for forecasting attendance rate of soccer games. Mathematical and Computational Applications. 2017. vol. 22. p. 1-43. DOI: 10.3390/mca22040043.

[32] Тижук Д.Ю., Філіппова М.В. Методи керування лінійною швидкістю екструзії при виробництві кабельної продукції. Матеріали VII Міжнародної науково-практичної конференції «Наука, технології, інновації: світові тенденції та регіональний аспект». 27–28 вересня 2024 р. Інститут інноваційної освіти. Одеса. с. 67-69.

[33] Гавриш, О. А., Бояринова К. О., Копішинська К. О. Розробка стартап-проектів. Конспект лекцій : навчальний посібник для студентів

спеціальностей 151 – «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» та 152 – «Метрологія та інформаційно-вимірвальна техніка»; КПІ ім. Ігоря Сікорського. Електронні текстові данні (1 файл: 2,88 Мбайт). Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 188 с.

[34] Гавриш, О. А., Бояринова К. О., Копішинська К. О. Розробка стартап-проектів: практикум: навчальний посібник для студентів спеціальностей 151 – «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» та 152 – «Метрологія та інформаційно-вимірвальна техніка»; КПІ ім. Ігоря Сікорського. Електронні текстові данні (1 файл: 2,11 Мбайт). Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 116 с.

[35] Тижук Д. Аналіз параметрів системи автоматизованого контролю керування процесом виробництва кабельної продукції // Контроль і управління в складних системах (КУСС 2024), ВНТУ, Вінниця;

[36] D.Yu. Tyzhuk, M.V. Filippova. Control system of the technological process for cable production. XX Науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Ефективність та автоматизація інженерних рішень у приладобудуванні», 4-5 грудня 2024 р, м. Київ, Україна

[37] Філіппова М.В., Тижук Д.Ю Система контролю швидкості нанесення ізоляції в кабельному виробництві // Науково виробничий журнал «Електромеханічні і енергозберігаючі системи» м. Кременчук. (прийнято до друку)