

Міністерство освіти і науки України
Криворізький національний університет
Факультет інформаційних технологій
Кафедра автоматизації, комп'ютерних наук і технологій

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеня вищої освіти – бакалавр
за освітньо-професійною програмою
«Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

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

тема роботи:

***«Система моніторингу якості виробничої лінії на базі стенда
FESTO серії MPS 400 з використанням методів статистичного
контролю процесів»***

Виконав студент гр. АКІТ-23ск _____ Подковський О. О.

Керівник _____ Рубан С. А.

Нормоконтроль _____ Маринич І. А.

Завідувач кафедри _____ Рубан С. А.

КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет: інформаційних технологій

Кафедра: автоматизації, комп'ютерних наук і технологій

Ступінь вищої освіти: Бакалавр

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедрою: к.т.н. Рубан С.А.

« 29 » січня 2026 р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу бакалавра

студентові групи АКІТР-23ск Подковському Олександру Олександровичу

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Система моніторингу якості
виробничої лінії на базі стенда FESTO серії MPS 400 з використанням
методів статистичного контролю процесів»

затверджено наказом по університету № 172с від 30.03.2026 р.

2. Термін здачі кваліфікаційної роботи: 08.06.2026 р.

3. Склад кваліфікаційної роботи: Пояснювальна записка обсягом 91 с.,
презентація у Microsoft PowerPoint (12 слайдів) в електронному та
друкованому вигляді

4. Консультанти кваліфікаційної роботи:

Розділ 1-2

доц. Рубан С. А.

Нормоконтроль

доц. Маринич І. А.

5. Календарний план:

№	Етапи роботи	Термін виконання
1	<i>Вступ</i>	<i>01.03.26</i>
2	<i>Розділ 1</i>	<i>05.04.26</i>
3	<i>Розділ 2</i>	<i>01.05.26</i>
4	<i>Висновки</i>	<i>25.05.26</i>
5	<i>Оформлення кваліфікаційної роботи</i>	<i>28.05.26</i>
6	<i>Підготовка презентації та графічного матеріалу</i>	<i>20.05.26</i>
7	<i>Підготовка доповіді до захисту</i>	<i>05.06.25</i>

6. Дата видачі завдання: 29.01.2026р.

Керівник _____ / Рубан С. А./

7. **Запевнення:** Я, Подковський Олександр Олександрович, запевняю, що ця кваліфікаційна робота виконана самостійно, не містить академічного плагіату, фабрикації, фальсифікації. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

Із чинним Положенням про академічну доброчесність Криворізького національного університету ознайомлений.

Чітко усвідомлюю, що в разі виявлення у кваліфікаційній роботі умисних порушень робота не допускається до захисту або оцінюється незадовільно.

Студент _____ / Подковський О. О./

АНОТАЦІЯ

Подковський О. О. Система моніторингу якості виробничої лінії на базі стенда FESTO серії MPS 400 з використанням методів статистичного контролю процесів: кваліфікаційна робота бакалавра : 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка. Кривий Ріг. Криворізький національний університет, 2026. 91 с.

Об'єктом дослідження є процес моніторингу якості продукції на для навчально-виробничого стенда FESTO MPS 400. Предметом дослідження є методи статистичного управління процесами та програмно-технічні засоби їх реалізації в інформаційних системах виробничого моніторингу.

Метою роботи є розробка та апробація системи моніторингу якості виробничої лінії на базі стенда FESTO MPS 400 із використанням методів статистичного контролю процесів.

У першому розділі розглянуто теоретичні основи статистичного управління процесами, сучасні програмні засоби SPC та особливості навчально-виробничого стенда FESTO MPS 400 як об'єкта дослідження. У другому розділі розроблено архітектуру системи моніторингу якості, спроектовано інформаційні потоки та структури даних, реалізовано алгоритм побудови р-карти Шухарта і виявлення порушень статистичної стабільності процесу. Виконано програмну реалізацію системи у середовищі Node-RED, розроблено інформаційну панель оператора для стенду FESTO MPS 403-1.

Практична цінність роботи полягає у створенні системи статистичного моніторингу якості, що може використовуватися в навчальному процесі та дослідженнях у сфері Industry 4.0.

СТАТИСТИЧНЕ УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСАМИ, SPC, КОНТРОЛЬ ЯКОСТІ, INDUSTRY 4.0, NODE-RED, FESTO MPS 400, АНАЛІТИКА.

					КНУ КРБ.174.26.06.00.ПЗ						
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		Подковський О. О.			АНОТАЦІЯ			Літ.		Арк.	Аркушів
Перевір.		Рубан С.А.								3	1
Н. Контр.		Маринич І.А.			КНУ АКІТР-23ск						
Затверд.		Маринич І.А.									

ЗМІСТ

ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ТА ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ	10
1.1 Концепція забезпечення якості в сучасному виробництві	10
1.2 Концепція забезпечення якості в сучасному виробництві	13
1.3 Методи статистичного контролю процесів та класифікація контрольних карт.....	17
1.4 Методи виявлення нестабільності виробничих процесів на основі правил Western Electric та Nelson	21
1.5 Показники здатності виробничих процесів та оцінювання якості технологічних систем	27
1.6 Аналіз сучасних програмних засобів статистичного контролю процесів та промислової аналітики	30
1.7 Аналіз навчально-виробничого стенда FESTO MPS 403-1 як об'єкта дослідження	36
1.8 Постановка задачі розробки системи SPC-моніторингу стенду FESTO MPS 403-1.....	40
РОЗДІЛ 2	45
2.1 Архітектура системи моніторингу якості виробничої лінії.....	45
2.2 Проєктування інформаційних потоків та моделі даних.....	50
2.3 Розробка алгоритму статистичного контролю процесу.....	55
2.4 Реалізація алгоритмів виявлення порушень статистичної стабільності процесу	59
2.5 Реалізація системи моніторингу у середовищі Node-RED	64
2.6 Організація зберігання статистичних даних у MongoDB	77
2.7 Розробка інформаційної панелі оператора	81
Висновки до розділу:	85

ВИСНОВКИ

88

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

91

					<i>КНУ КРБ.174.26.06.00.ПЗ</i>	Арк.
						6
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

ВСТУП

Сучасний розвиток промисловості характеризується активним впровадженням цифрових технологій, концепції Industry 4.0 та засобів Industrial Internet of Things (IIoT), які забезпечують інтеграцію виробничого обладнання, інформаційних систем та аналітичних сервісів у єдине цифрове середовище. Одним із ключових напрямів цифрової трансформації виробництва є створення систем моніторингу та аналізу виробничих процесів, здатних не лише збирати дані про роботу обладнання, але й забезпечувати своєчасне виявлення відхилень, прогнозування погіршення якості продукції та підтримку прийняття рішень.

У сучасних виробничих системах особливого значення набуває забезпечення стабільності технологічних процесів та підтримання необхідного рівня якості продукції. Традиційні підходи до контролю якості часто базуються на періодичному контролі готової продукції та аналізі абсолютної кількості дефектів. Проте такі підходи не дозволяють своєчасно виявляти приховані тенденції до погіршення якості та не забезпечують можливості превентивного реагування на зміни стану виробничого процесу.

Ефективним інструментом вирішення зазначених завдань є статистичне управління процесами (Statistical Process Control, SPC), яке дозволяє оцінювати стабільність виробничих процесів на основі аналізу статистичних характеристик продукції та своєчасно виявляти появу спеціальних причин варіації. Застосування контрольних карт Шухарта та правил виявлення нестабільності процесу дає можливість переходу від реактивного контролю якості до превентивного управління виробництвом.

					КНУ КРБ.174.26.06.00.ПЗ				
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					
Розроб.		Подковський О. О.			ВСТУП	Літ.		Арк.	Аркушів
Перевір.		Рубан С.А.						6	2
						КНУ АКІТР-23ск			
Н. Контр.		Маринич І.А.							
Затверд.		Маринич І.А.							

Водночас у навчальних лабораторіях та дослідницьких виробничих комплексах питання інтеграції методів статистичного управління процесами із сучасними цифровими платформами Industry 4.0 залишається недостатньо дослідженим. Особливо актуальним є створення навчально-дослідницьких систем, які дозволяють поєднати засоби автоматизації, промислові мережі, технології Industrial Internet of Things та інструменти статистичного аналізу виробничих даних.

Однією з таких платформ є навчально-виробничий стенд FESTO серії MPS 400, який відтворює принципи функціонування сучасних автоматизованих виробничих ліній та забезпечує можливість дослідження засобів автоматизації, промислових протоколів обміну даними та цифрових технологій моніторингу виробництва. У складі існуючої інформаційної системи стенда реалізовано збір виробничих даних, передачу інформації із застосуванням протоколу MQTT, використання системи комп'ютерного зору та засобів візуалізації виробничих параметрів. Проте система не містить інструментів статистичного аналізу якості продукції та оцінювання стабільності виробничого процесу.

У зв'язку з цим актуальним є розроблення системи моніторингу якості виробничої лінії, яка забезпечуватиме автоматизоване формування статистичних показників якості, побудову контрольних карт, виявлення порушень статистичної стабільності процесу та інформування оператора про потенційні проблеми у роботі виробничої системи.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- виконати аналіз сучасних підходів до статистичного управління процесами та забезпечення якості продукції в умовах Industry 4.0;
- дослідити методи статистичного контролю процесів, контрольні карти Шухарта та правила виявлення нестабільності виробничих процесів;
- провести аналіз навчально-виробничого стенда FESTO MPS 400 та існуючої інформаційної системи виробничої лінії;

					КНУ КРБ.174.26.06.00.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

- розробити архітектуру системи статистичного моніторингу якості, інтегрованої до цифрової інфраструктури стенда;
- спроектувати інформаційні потоки та структури зберігання статистичних даних;
- розробити алгоритм статистичного контролю процесу на основі р-карти Шухарта;
- реалізувати алгоритми автоматичного виявлення порушень статистичної стабільності виробничого процесу;
- виконати програмну реалізацію системи у середовищі Node-RED із використанням MQTT та MongoDB;
- розробити інформаційну панель оператора для візуалізації результатів статистичного аналізу;
- провести експериментальну апробацію системи та оцінити ефективність її функціонування.

Об'єктом дослідження є процес моніторингу якості продукції на автоматизованій виробничій лінії навчально-виробничого стенда FESTO MPS 400.

Предметом дослідження є методи статистичного управління процесами, алгоритми виявлення порушень статистичної стабільності та програмно-технічні засоби їх реалізації в інформаційних системах моніторингу виробництва.

Практична цінність отриманих результатів полягає у створенні системи статистичного моніторингу якості виробничої лінії, інтегрованої до навчально-виробничого стенда FESTO MPS 400. Розроблена система забезпечує автоматичне виявлення порушень статистичної стабільності процесу, накопичення історичних даних про якість продукції та візуалізацію результатів аналізу в режимі реального часу. Отримані результати можуть використовуватися під час проведення лабораторних занять, виконання студентських наукових досліджень та подальшого розвитку цифрової інфраструктури навчально-дослідницьких виробничих комплексів.

					КНУ КРБ.174.26.06.00.ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ МЕТОДІВ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ТА ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ

1.1 Концепція забезпечення якості в сучасному виробництві

Якість продукції є одним із ключових факторів конкурентоспроможності сучасних промислових підприємств. В умовах глобалізації ринків, посилення вимог споживачів та зростання складності виробничих систем забезпечення стабільної якості продукції стає важливим завданням для підприємств різних галузей промисловості. Від рівня якості безпосередньо залежать економічні показники виробництва, репутація виробника, рівень задоволеності споживачів та здатність підприємства ефективно функціонувати в умовах ринкової конкуренції.

Традиційно контроль якості на промислових підприємствах здійснювався шляхом перевірки готової продукції після завершення виробничого процесу. Такий підхід дозволяв виявляти невідповідні вироби перед їх передачею споживачу, проте не забезпечував своєчасного виявлення причин виникнення дефектів. У результаті підприємство несло додаткові витрати, пов'язані з переробкою продукції, утилізацією браку, простоями обладнання та перевитратами матеріальних ресурсів.

Розвиток теорії управління якістю привів до поступового переходу від концепції кінцевого контролю до концепції управління якістю на всіх етапах життєвого циклу продукції. Сучасний підхід передбачає не лише виявлення дефектів, але й попередження їх виникнення шляхом систематичного контролю виробничих процесів. Основою такого підходу є розгляд якості як властивості виробничої системи в цілому, а не лише окремого виробу.

					КНУ КРБ.174.26.06.01.ПЗ						
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		Подковський О. О.			РОЗДІЛ 1			Літ.	Арк.	Аркушів	
Перевір.		Рубан С. А								8	15
Н. Контр.		Маринич І.А.									
Затверд.		Маринич І.А.									
								КНУ АКІТР-23ск			

У міжнародній практиці прийнято розрізняти поняття контролю якості (Quality Control, QC), забезпечення якості (Quality Assurance, QA) та управління якістю (Quality Management, QM).

Контроль якості являє собою сукупність операцій, спрямованих на перевірку відповідності продукції встановленим вимогам. Основним завданням QC є виявлення невідповідностей та відбракування продукції, що не відповідає встановленим критеріям якості. До методів контролю якості належать візуальний контроль, вимірювання геометричних параметрів, функціональні випробування, неруйнівний контроль та інші процедури перевірки.

Забезпечення якості охоплює організаційні та технічні заходи, спрямовані на створення умов для стабільного випуску якісної продукції. На відміну від контролю якості, який орієнтований на виявлення дефектів, QA спрямоване на запобігання їх виникненню шляхом стандартизації процесів, впровадження регламентів, навчання персоналу та вдосконалення виробничої діяльності.

Управління якістю є більш широким поняттям і включає планування якості, забезпечення якості, контроль якості та постійне вдосконалення виробничих процесів. Найбільшого поширення набули системи менеджменту якості, побудовані відповідно до вимог міжнародних стандартів серії ISO 9000.

Подальший розвиток концепцій управління якістю привів до появи підходу Total Quality Management (TQM), який розглядає якість як стратегічну мету діяльності підприємства. Основними принципами TQM є орієнтація на споживача, залучення персоналу до процесів удосконалення, процесний підхід до управління та безперервне поліпшення діяльності організації.

Важливий внесок у розвиток сучасних систем забезпечення якості зробили концепції Lean Manufacturing та Six Sigma. Концепція ощадливого виробництва (Lean Manufacturing) спрямована на усунення всіх видів втрат у виробничих процесах та підвищення ефективності використання ресурсів. У свою чергу, методологія Six Sigma орієнтована на мінімізацію варіації процесів та зниження ймовірності виникнення дефектів шляхом використання статистичних методів аналізу даних.

					<i>КНУ КРБ.174.26.06.01.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

Особливістю сучасних виробничих систем є високий рівень автоматизації та широке використання цифрових технологій. Концепція Industry 4.0 передбачає інтеграцію виробничого обладнання, систем керування, інформаційних ресурсів та аналітичних платформ у єдиний цифровий простір. У таких умовах контроль якості стає невід'ємною складовою кіберфізичних виробничих систем.

Важливу роль у реалізації концепції цифрового виробництва відіграють технології Industrial Internet of Things (IIoT), які забезпечують збір даних безпосередньо від технологічного обладнання та датчиків. Отримані дані можуть оброблятися в режимі реального часу із застосуванням сучасних методів аналітики, машинного навчання та статистичного аналізу. Це дозволяє оперативно виявляти відхилення у роботі обладнання, прогнозувати виникнення дефектів та приймати обґрунтовані управлінські рішення.

Одним із найбільш ефективних підходів до реалізації превентивного контролю якості є статистичне управління процесами (Statistical Process Control, SPC). На відміну від традиційного контролю готової продукції, SPC дозволяє контролювати сам виробничий процес, аналізувати його стабільність та своєчасно виявляти появу спеціальних причин варіації [1, 4]. Завдяки цьому забезпечується раннє виявлення потенційних проблем і зменшується ймовірність випуску бракованої продукції.

Таким чином, сучасний розвиток промислового виробництва характеризується переходом від реактивних методів контролю якості до проактивних систем моніторингу та управління виробничими процесами. Реалізація таких систем базується на використанні технологій Industrial IoT, засобів промислової інтеграції даних та методів статистичного аналізу. Одним із найбільш поширених інструментів такого аналізу є статистичне управління процесами, розгляду якого присвячено наступний підрозділ роботи.

					КНУ КРБ.174.26.06.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

1.2 Концепція забезпечення якості в сучасному виробництві

Однією з основних особливостей сучасного промислового виробництва є необхідність забезпечення стабільності технологічних процесів в умовах високої складності виробничих систем, великої кількості контрольованих параметрів та постійної зміни зовнішніх умов. Навіть за умови використання сучасного обладнання та автоматизованих систем керування повністю усунути варіацію виробничих процесів неможливо. Будь-який технологічний процес характеризується випадковими коливаннями параметрів, обумовленими властивостями матеріалів, особливостями роботи обладнання, впливом навколишнього середовища та іншими факторами.

У зв'язку з цим одним із ключових завдань систем забезпечення якості є не усунення варіації як такої, а її контроль та своєчасне виявлення відхилень, які можуть свідчити про погіршення роботи виробничої системи. Найбільш поширеним підходом до вирішення цього завдання є статистичне управління процесами (Statistical Process Control, SPC) [1].

Статистичне управління процесами являє собою сукупність методів математичної статистики, призначених для моніторингу, аналізу та вдосконалення виробничих процесів на основі даних, що збираються безпосередньо під час виробництва продукції. Основною метою SPC є забезпечення статистичної стабільності процесу та своєчасне виявлення причин, які можуть призвести до виникнення дефектів.

Історія статистичного управління процесами бере свій початок у 1920-х роках і пов'язана з роботами американського вченого Walter A. Shewhart, який працював у дослідницьких лабораторіях Bell Labs. Саме ним було сформульовано концепцію контрольних карт та запропоновано підхід до розділення причин варіації виробничих процесів на дві категорії: звичайні (common causes) та спеціальні (special causes).

Звичайні причини варіації є невід'ємною властивістю будь-якого виробничого процесу. До них належать випадкові коливання характеристик

					КНУ КРБ.174.26.06.01.ПЗ	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

матеріалів, незначні відмінності в роботі обладнання, температурні зміни та інші фактори, які неможливо повністю усунути. Якщо на процес впливають лише звичайні причини варіації, він вважається статистично керованим або статистично стабільним.

Спеціальні причини варіації пов'язані з виникненням аномальних ситуацій, які порушують нормальний перебіг технологічного процесу. До таких причин можуть належати несправності обладнання, помилки оператора, використання неякісної сировини, неправильні налаштування технологічних режимів або знос інструменту. Виникнення спеціальних причин призводить до переходу процесу в нестабільний стан та потребує втручання персоналу.

Концепція статистичного управління процесами базується на припущенні, що своєчасне виявлення спеціальних причин дозволяє запобігти випуску значної кількості бракованої продукції. На відміну від традиційного контролю готових виробів, SPC орієнтований на аналіз поведінки самого процесу та виявлення тенденцій до погіршення якості ще до появи масового браку.

Основним інструментом SPC є контрольні карти Шухарта. Контрольна карта являє собою графічне відображення зміни контрольованого показника у часі, на якому додатково відображаються центральна лінія процесу та контрольні межі (рис. 1.1). Центральна лінія характеризує середній рівень контрольованого параметра, тоді як верхня та нижня контрольні межі визначають допустимий діапазон його випадкових коливань.

За умови статистично стабільного процесу більшість точок повинні знаходитися в межах контрольних границь і демонструвати випадковий характер розташування. Виявлення точок за межами контролю або виникнення характерних закономірностей у послідовності точок може свідчити про появу спеціальних причин варіації та необхідність проведення додаткового аналізу.

					<i>КНУ КРБ.174.26.06.01.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

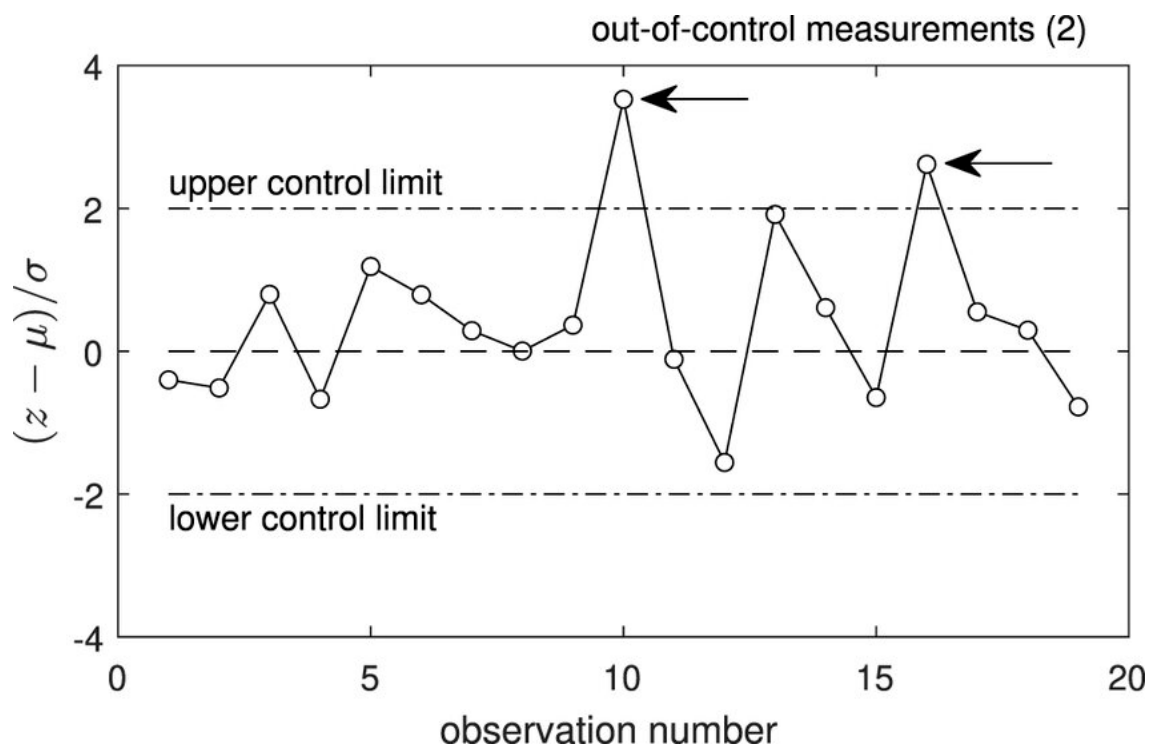


Рисунок 1.1 – Приклад контрольної карти Шухарта [2]

Залежно від типу контрольованих даних використовуються різні типи контрольних карт. Для безперервних вимірювань застосовуються карти середніх значень та розмахів, карти середніх значень та стандартних відхилень, а також карти індивідуальних спостережень. Для контролю атрибутивних характеристик використовуються р-карти, пр-карти, с-карти та u-карти.

Особливий інтерес для даної роботи становлять р-карти, призначені для контролю частки бракованої продукції у вибірках змінного розміру. Такі карти широко використовуються у виробничих системах, де результат контролю має бінарний характер – виріб класифікується як придатний або непридатний. Саме така ситуація реалізується у навчально-виробничому стенді FESTO MPS 400 [6], де система технічного зору здійснює автоматичне сортування деталей за результатами контролю.

Подальший розвиток статистичного управління процесами пов'язаний із появою додаткових статистичних критеріїв виявлення нестабільності процесів. Найбільшого поширення набули правила Western Electric [3] та правила Nelson [4], які дозволяють виявляти не лише окремі викиди за межі контрольних

границь, але й приховані тенденції, зміщення середнього значення процесу та поступове погіршення його характеристик.

На сучасному етапі розвитку промисловості статистичне управління процесами стало невід'ємною складовою концепції Industry 4.0 [7-9]. Традиційні SPC-системи, які раніше базувалися переважно на ручному зборі даних та автономному аналізі статистичної інформації, поступово трансформуються у цифрові системи моніторингу, інтегровані з промисловими мережами та інформаційними платформами підприємств.

Концепція Industry 4.0 передбачає створення кіберфізичних виробничих систем, у яких фізичні процеси тісно інтегровані з цифровими моделями, засобами аналітики та системами підтримки прийняття рішень. У такому середовищі статистичне управління процесами отримує нові можливості завдяки автоматизованому збору великих обсягів виробничих даних, їх обробці в режимі реального часу та використанню сучасних інструментів візуалізації.

Однією з ключових технологій цифрового виробництва є Industrial Internet of Things (IIoT), який забезпечує безперервний обмін даними між виробничим обладнанням, сенсорами, контролерами та інформаційними системами. У результаті контрольні карти можуть формуватися автоматично на основі даних, отриманих безпосередньо від технологічного обладнання без участі оператора.

Суттєвими перевагами цифрових SPC-систем є висока швидкість виявлення відхилень, можливість централізованого накопичення історичних даних, інтеграція із системами MES та SCADA, а також підтримка віддаленого моніторингу виробничих процесів. Крім того, накопичені дані можуть використовуватися для побудови прогнозних моделей та реалізації концепції предиктивного обслуговування обладнання.

Таким чином, статистичне управління процесами є одним із базових інструментів забезпечення якості в умовах цифрової трансформації промисловості. Поєднання методів SPC з технологіями Industrial IoT, промисловими протоколами обміну даними та сучасними платформами

					КНУ КРБ.174.26.06.01.ПЗ	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

аналітики дозволяє створювати ефективні системи моніторингу виробничих процесів у реальному часі. Саме такий підхід реалізується у даній роботі при розробці системи моніторингу якості виробничої лінії на базі навчально-виробничого стенда FESTO MPS 400 [6].

1.3 Методи статистичного контролю процесів та класифікація контрольних карт

Статистичне управління процесами базується на використанні спеціалізованих статистичних інструментів, призначених для аналізу поведінки виробничих процесів у часі. Центральне місце серед таких інструментів займають контрольні карти Шухарта, які дозволяють оцінювати стабільність процесу, виявляти появу спеціальних причин варіації та своєчасно реагувати на відхилення від нормального режиму роботи.

Контрольна карта являє собою графічне представлення статистичних характеристик процесу, побудоване за результатами послідовних спостережень або вибірок. На контрольній карті відображаються значення контролюваного показника, центральна лінія процесу та контрольні межі, що визначають область його статистично допустимих коливань.

Основна ідея контрольних карт полягає в тому, що випадкові коливання параметрів процесу мають певні статистичні закономірності. Якщо процес перебуває під впливом лише звичайних причин варіації, його поведінка є передбачуваною і точки на карті розташовуються випадковим чином відносно центральної лінії. Поява спеціальних причин призводить до порушення цієї закономірності, що проявляється у вигляді характерних статистичних сигналів.

Вибір типу контрольної карти залежить від природи контрольованих даних, розміру вибірок та поставлених завдань контролю. Усі контрольні карти умовно поділяються на дві великі групи: карти для кількісних (неперервних) даних та карти для атрибутивних даних.

					КНУ КРБ.174.26.06.01.ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Карти для кількісних характеристик використовуються у випадках, коли контрольований параметр може бути виміряний у певних одиницях та приймати довільні числові значення в межах визначеного діапазону. До таких параметрів належать розміри деталей, маса виробів, температура, тиск, концентрація речовин та інші фізичні величини.

Найбільш поширеним представником цієї групи є карта середніх значень і розмахів ($\bar{X}$ -R карта). Вона використовується для аналізу процесів, у яких спостереження об'єднуються у невеликі підгрупи обсягом від двох до десяти вимірювань. Верхня карта відображає зміну середніх значень вибірок, тоді як нижня карта характеризує внутрішньогрупову варіацію через показник розмаху.

Для підгруп більшого розміру застосовуються карти середніх значень і стандартних відхилень ($\bar{X}$ -S карти). На відміну від $\bar{X}$ -R карт, у цьому випадку для оцінювання розсіювання використовується стандартне відхилення, що забезпечує вищу статистичну точність.

У випадках, коли формування підгруп є неможливим або економічно недоцільним, використовуються карти індивідуальних значень і рухомих розмахів (X-MR карти). Такі карти широко застосовуються для контролю безперервних технологічних процесів, де вимірювання надходять послідовно через певні інтервали часу.

Основною перевагою карт для кількісних характеристик є висока чутливість до змін параметрів процесу. Проте їх використання потребує наявності вимірювальних систем, здатних отримувати точні числові значення контрольованих параметрів.

У багатьох виробничих процесах результат контролю має дискретний характер і не може бути представлений безперервною величиною. У таких випадках використовується поняття атрибутивного контролю.

Атрибутивні дані характеризують належність виробу до певної категорії. Найпростішим прикладом є класифікація продукції як придатної або

бракованої. Також можуть аналізуватися кількість дефектів на виробі або кількість невідповідностей у партії продукції.

Для таких задач використовуються спеціальні контрольні карти атрибутів.

p-карта (Proportion Defective Chart) призначена для контролю частки бракованих виробів у вибірці. Вона використовується тоді, коли кожна одиниця продукції може бути класифікована як придатна або непридатна, а розмір вибірок може змінюватися.

Для кожної підгрупи розраховується відношення кількості бракованих виробів до загальної кількості перевірених виробів:

$$p_i = \frac{d_i}{n_i}, \quad (1.1)$$

де d_i – кількість бракованих виробів; n_i – загальна кількість виробів у підгрупі.

У навчально-виробничому стенді FESTO MPS 400 модуль комп'ютерного зору на базі Raspberry Pi розпізнає кількість деталей на двох вихідних лотках: лоток №1 збирає невідповідні (браковані) деталі, лоток №2 – придатні. Дані передаються в MQTT тему "Slide" у форматі JSON-повідомлення з полями Timestamp, Slide1, Slide2.

Це класичний випадок атрибутивних даних: кожна деталь – це випробування Бернуллі з результатом «придатна / брак». Сукупність n деталей у часовому вікні підкоряється біноміальному розподілу $B(n, p)$, де p – істинна (невідома) частка браку процесу.

Основною перевагою p-карти є можливість роботи зі змінним обсягом вибірок, що особливо важливо для автоматизованих виробничих систем із нерівномірною продуктивністю.

np-карта (Number Defective Chart) використовується для контролю абсолютної кількості бракованих виробів у вибірках однакового розміру.

На відміну від p-карти, вона аналізує не частку браку, а безпосередньо кількість дефектних одиниць продукції. Основним обмеженням np-карти є необхідність підтримання постійного обсягу вибірок.

					КНУ КРБ.174.26.06.01.ПЗ	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

с-карта (Count Chart) застосовується для контролю кількості дефектів у виробі або процесі за умови незмінного розміру контрольованої області.

Типовими прикладами є контроль кількості подряпин на поверхні деталі, кількості пор у зварному шві або кількості помилок у програмному коді.

и-карта (Defects per Unit Chart) використовується для контролю кількості дефектів на одиницю продукції у випадках, коли розмір вибірок змінюється.

На відміну від с-карти, вона дозволяє враховувати різний обсяг контрольованих виробів або різну площу контрольованої поверхні.

Узагальнену класифікацію контрольних карт наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Класифікація контрольних карт, що використовуються у статистичному контролі процесів

Тип карти	Тип даних	Розмір підгрупи	Контрольований показник
$\bar{X}$ -R	Кількісні	2–10	Середнє значення та розмах
$\bar{X}$ -S	Кількісні	понад 10	Середнє значення та стандартне відхилення
X-MR	Кількісні	1	Індивідуальні значення
p	Атрибутивні	змінний	Частка браку
np	Атрибутивні	сталий	Кількість бракованих виробів
c	Атрибутивні	сталий	Кількість дефектів
u	Атрибутивні	змінний	Кількість дефектів на одиницю

У розроблюваній системі моніторингу якості джерелом інформації виступає модуль комп'ютерного зору стенда FESTO MPS 400, який автоматично виконує сортування виробів на придатні та браковані. Результатом контролю є не числове значення певного параметра виробу, а його належність до однієї з двох категорій.

Таким чином, дані системи мають атрибутивний характер і можуть бути представлені як послідовність результатів типу «придатний/бракований». Крім того, кількість деталей, що виготовляються протягом окремих часових інтервалів, може змінюватися залежно від режиму роботи виробничої лінії. Це означає, що розмір статистичних підгруп не є сталим.

					КНУ КРБ.174.26.06.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

За таких умов використання $\bar{X}$ -R, $\bar{X}$ -S або X-MR карт є недоцільним через відсутність безперервних вимірювань. Використання пр-карти також є обмеженим через змінний обсяг вибірок. Карти с та u орієнтовані на контроль кількості дефектів, тоді як у даній роботі аналізується частка бракованої продукції.

Отже, найбільш доцільним інструментом статистичного контролю для поставленої задачі є р-карта Шухарта, яка дозволяє здійснювати моніторинг частки бракованих виробів за умов змінного розміру вибірок та забезпечує ефективне виявлення відхилень у роботі виробничої лінії.

1.4 Методи виявлення нестабільності виробничих процесів на основі правил Western Electric та Nelson

Однією з головних задач статистичного управління процесами є своєчасне виявлення моменту переходу виробничого процесу зі статистично керованого стану до стану, в якому починають діяти спеціальні причини варіації. Для вирішення цієї задачі використовуються спеціальні статистичні критерії, що дозволяють аналізувати характер розташування точок на контрольних картах та виявляти ознаки нестабільності ще до появи значної кількості бракованої продукції.

Найпростішим способом оцінювання стабільності процесу є перевірка знаходження контрольованого показника в межах верхньої та нижньої контрольних границь. Однак на практиці такий підхід часто виявляється недостатньо чутливим. У багатьох випадках процес починає поступово зміщуватися або демонструвати систематичні зміни задовго до того, як контрольований показник вийде за межі статистичного контролю.

Для підвищення чутливості контрольних карт були розроблені спеціальні правила аналізу послідовностей точок, які дозволяють виявляти приховані зміни поведінки процесу. Найбільшого поширення набули правила Western Electric та правила Nelson.

					КНУ КРБ.174.26.06.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

Правила Western Electric були розроблені у середині ХХ століття фахівцями компанії Western Electric та вперше опубліковані в довіднику зі статистичного контролю якості. Основною метою їх розробки було підвищення ефективності виявлення спеціальних причин варіації без істотного збільшення кількості хибних спрацювань.

У класичному вигляді система Western Electric містить чотири основні правила.

1. Правило WE-1: одна точка за межами трьох сигм

Найпростішим критерієм нестабільності є вихід хоча б однієї точки за межі верхньої або нижньої контрольної границі (рис. 1.2).

Для контрольних карт Шухарта контрольні межі зазвичай встановлюються на рівні трьох стандартних відхилень від центральної лінії:

$$UCL = CL + 3\sigma, \quad (1.2)$$

$$LCL = CL - 3\sigma. \quad (1.3)$$

За умови нормального розподілу ймовірність випадкового потрапляння точки за межі $\pm 3\sigma$ становить приблизно 0,27 %. Тому поява такої точки розглядається як сильна ознака виникнення спеціальної причини варіації.

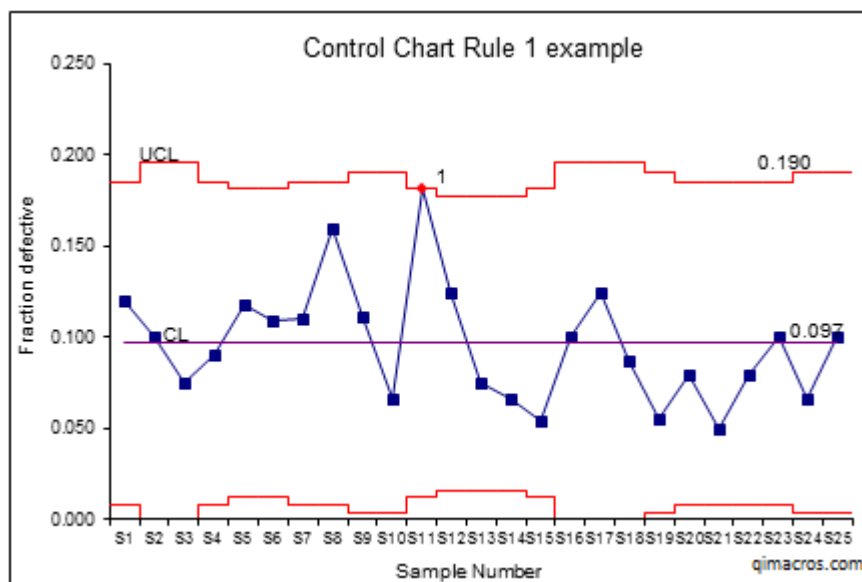


Рисунок 1.2 – Ілюстрація першого правила Western Electric [10]

Перевагою правила WE-1 є простота реалізації та інтерпретації. Проте воно здатне виявляти лише достатньо великі зміни процесу і може не реагувати на поступове погіршення його характеристик.

2. Правило WE-2: дві з трьох точок за межами двох сигм

Для підвищення чутливості до помірних змін використовується правило WE-2. Воно спрацьовує, якщо дві з трьох послідовних точок знаходяться за межами двох стандартних відхилень від центральної лінії з одного боку (рис. 1.3).

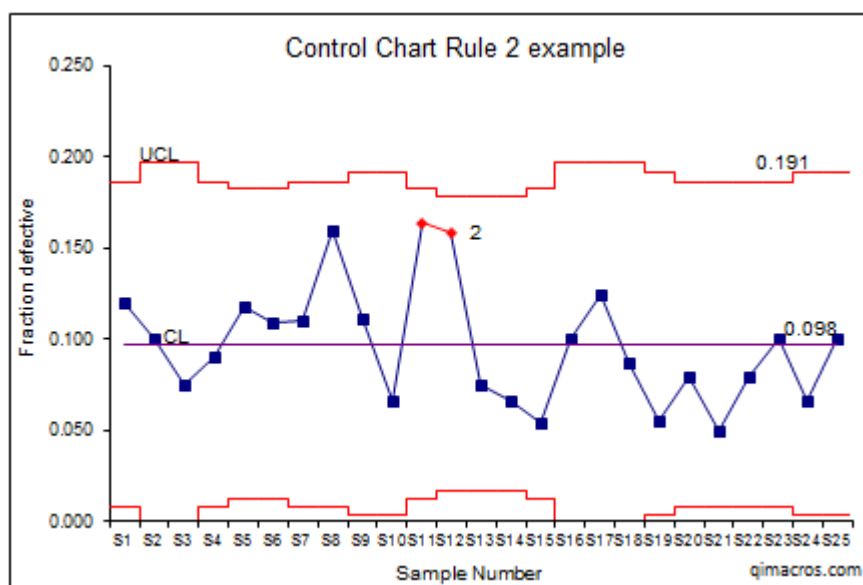


Рисунок 1.3 – Ілюстрація другого правила Western Electric [10]

Такий критерій дозволяє виявляти зміщення процесу ще до того, як окремі точки вийдуть за контрольні межі.

3. Правило WE-3: чотири з п'яти точок за межами однієї сигми

Наступний рівень чутливості забезпечує правило WE-3. Воно вважається виконаним, якщо чотири з п'яти послідовних точок знаходяться далі ніж на одне стандартне відхилення від центральної лінії з одного боку (рис. 1.4).

Дане правило дозволяє виявляти навіть незначні, але систематичні зміщення процесу.

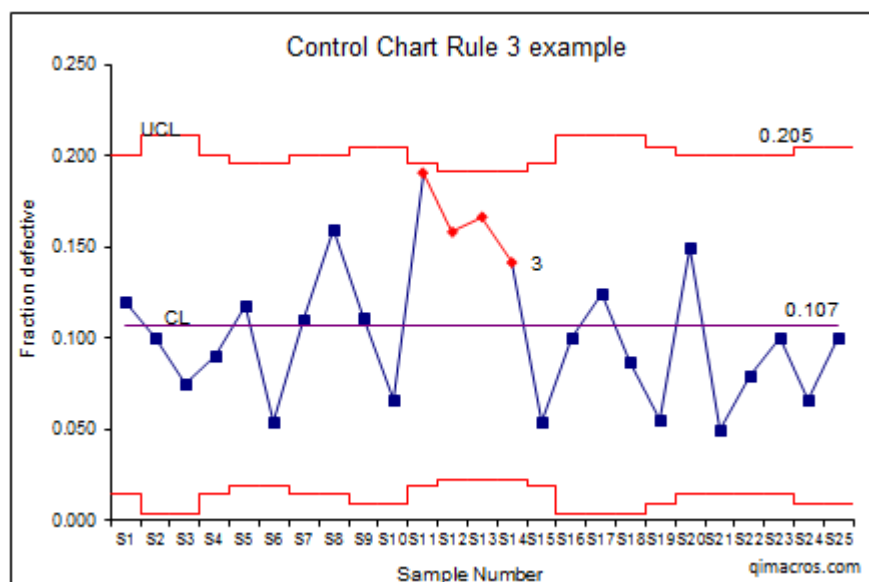


Рисунок 1.4 – Ілюстрація третього правила Western Electric [10]

4. Правило WE-4: вісім послідовних точок по один бік центральної лінії

Одним із найбільш поширених критеріїв є правило WE-4. Воно спрацьовує, якщо вісім послідовних точок розташовані по один бік від центральної лінії (рис. 1.5).

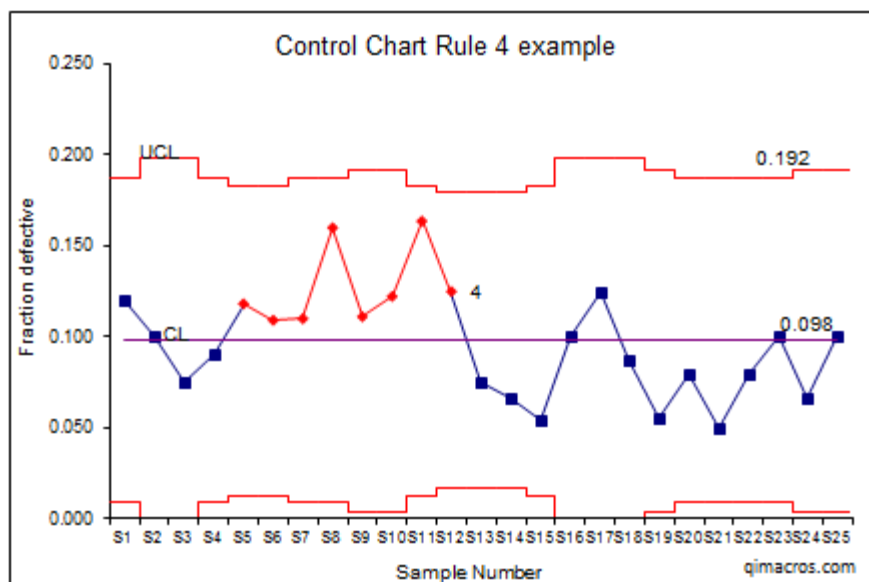


Рисунок 1.5 – Ілюстрація четвертого правила Western Electric [10]

Ймовірність випадкового виникнення такої ситуації становить:

$$P = \left(\frac{1}{2}\right)^8 = 0,00390625, \quad (1.4)$$

тобто приблизно 0,39 %.

Таке розташування точок свідчить про зміщення середнього значення процесу та появу систематичної причини варіації.

Особливістю правила WE-4 є його здатність виявляти зміни навіть тоді, коли всі точки знаходяться в межах контрольних границь.

Для реалізації правил Western Electric простір між центральною лінією та контрольними границями умовно поділяється на три зони:

- зона С — від 0 до 1σ ;
- зона В — від 1σ до 2σ ;
- зона А — від 2σ до 3σ .

Завдяки такому поділу стає можливим формалізувати правила WE-2 та WE-3 і автоматизувати їх перевірку в інформаційних системах моніторингу.

Подальший розвиток методів статистичного контролю процесів пов'язаний з роботами Lloyd S. Nelson, який у 1984 році запропонував розширений набір критеріїв виявлення нестабільності [4].

Правила Nelson орієнтовані на виявлення більш складних закономірностей поведінки процесу, які можуть свідчити про приховані зміни технологічного режиму або деградацію обладнання.

Усього система містить вісім правил, проте найбільшого практичного значення набули критерії трендів та циклічних змін.

Одним із найбільш інформативних критеріїв є правило монотонного тренду.

Воно вважається виконаним, якщо шість або більше послідовних точок демонструють безперервне зростання або спадання значення контролюваного показника.

Подібна ситуація може бути наслідком:

- поступового зносу обладнання;
- зміни властивостей сировини;
- температурного дрейфу;
- накопичення похибок налаштування;

					КНУ КРБ.174.26.06.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

– погіршення роботи вимірювальної системи.

Для виробничих систем правило тренду має особливе значення, оскільки дозволяє виявляти проблеми ще до того, як вони призведуть до виходу процесу за контрольні межі.

Інші правила Nelson орієнтовані на виявлення циклічних змін та надмірної регулярності у поведінці процесу.

Наприклад, чергування точок вище та нижче центральної лінії може свідчити про періодичний вплив зовнішнього фактора або про надмірне регулювання процесу оператором.

Такі закономірності особливо важливі для автоматизованих виробничих систем, у яких можуть виникати резонансні явища, циклічні коливання навантаження або некоректно налаштовані контури керування.

У традиційних системах статистичного контролю аналіз контрольних карт виконувався вручну спеціалістами з якості. У сучасних цифрових виробництвах перевірка правил Western Electric та Nelson здійснюється автоматизовано програмними засобами.

Використання технологій Industrial Internet of Things забезпечує безперервне надходження виробничих даних від обладнання та датчиків. Це дозволяє виконувати аналіз контрольних карт у режимі реального часу та негайно повідомляти операторів про появу ознак нестабільності процесу.

Для реалізації таких функцій у сучасних системах моніторингу широко використовуються платформи промислової інтеграції даних, серед яких особливе місце займає Node-RED [11]. Автоматизоване виявлення статистичних порушень дозволяє оперативно реагувати на відхилення, скорочувати кількість бракованої продукції та підвищувати ефективність виробничих процесів.

У межах даної роботи для контролю стабільності виробничої лінії на базі стенда FESTO MPS 400 планується реалізація трьох критеріїв виявлення нестабільності: правила WE-1, правила WE-4 та правила монотонного тренду Nelson. Такий набір критеріїв забезпечує виявлення як різких відхилень

					КНУ КРБ.174.26.06.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

показників якості, так і поступових змін стану виробничого процесу, що дозволяє підвищити ефективність системи моніторингу якості.

1.5 Показники здатності виробничих процесів та оцінювання якості технологічних систем

Одним із важливих завдань сучасних систем управління якістю є не лише забезпечення статистичної стабільності виробничого процесу, але й оцінювання його здатності випускати продукцію, що відповідає встановленим технічним вимогам. Навіть якщо процес перебуває під статистичним контролем і не демонструє ознак впливу спеціальних причин варіації, це ще не гарантує відповідності продукції заданим допускам.

Для кількісного оцінювання можливостей виробничого процесу використовуються показники здатності процесу (Process Capability Indices), які характеризують співвідношення між природною варіацією процесу та межами допустимих значень контрольованого параметра.

Показники здатності процесу широко застосовуються у машинобудуванні, приладобудуванні, металургії, електронній промисловості та інших галузях, де необхідно забезпечувати високу точність виготовлення продукції та стабільність технологічних процесів.

Здатність процесу характеризує його можливість стабільно виробляти продукцію в межах встановлених специфікацією допусків.

Для кожного контрольованого параметра зазвичай визначаються:

- верхня межа специфікації (Upper Specification Limit, USL);
- нижня межа специфікації (Lower Specification Limit, LSL).

Між цими межами розташовується область допустимих значень параметра.

У статистично стабільному процесі більшість вимірних значень повинна перебувати в межах встановлених допусків. Оцінювання здатності процесу полягає у порівнянні ширини поля допуску з природною варіацією процесу.

					КНУ КРБ.174.26.06.01.ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Найпростішим показником здатності процесу є індекс C_p .

Він визначається як відношення ширини поля допуску до ширини природного розсіювання процесу:

$$C_p = \frac{USL - LSL}{6\sigma}, \quad (1.5)$$

де USL – верхня межа специфікації; LSL – нижня межа специфікації; σ – стандартне відхилення процесу.

Коефіцієнт 6σ відповідає природному розсіюванню процесу, в межах якого для нормального розподілу знаходиться приблизно 99,73 % усіх спостережень.

Показник C_p характеризує потенційну здатність процесу забезпечувати виконання вимог специфікації за умови ідеального центрування процесу відносно поля допуску.

Основним недоліком цього показника є те, що він не враховує фактичне положення середнього значення процесу.

Для врахування можливого зміщення процесу використовується індекс C_{pk} . Він визначається як мінімум двох відношень:

$$C_{pk} = \min\left(\frac{USL - \mu}{3\sigma}, \frac{\mu - LSL}{3\sigma}\right), \quad (1.6)$$

де μ – середнє значення процесу; σ – стандартне відхилення процесу.

На відміну від C_p , показник C_{pk} враховує не лише величину варіації, але й ступінь зміщення процесу відносно центру поля допуску.

Якщо процес ідеально центрований, значення C_p та C_{pk} практично збігаються. У разі зміщення середнього значення процесу величина C_{pk} зменшується.

Саме тому на практиці показник C_{pk} використовується значно частіше, ніж C_p .

У промисловості існують загальноприйняті рекомендації щодо інтерпретації значень показників здатності процесу (табл. 1.2).

Таблиця 1.2 – Інтерпретація значень C_{pk}

Значення C_{pk}	Оцінка процесу
$C_{pk} < 1,0$	Процес не здатний забезпечити виконання вимог
$1,0 \leq C_{pk} < 1,33$	Мінімально прийнятний рівень
$1,33 \leq C_{pk} < 1,67$	Стабільний виробничий процес
$1,67 \leq C_{pk} < 2,0$	Високий рівень якості
$C_{pk} \geq 2,0$	Світовий рівень якості (Six Sigma)

У багатьох галузях машинобудування мінімально допустимим значенням вважається $C_{pk} = 1,33$, тоді як для відповідальних виробів авіаційної та автомобільної промисловості часто встановлюються вимоги $C_{pk} \geq 1,67$.

Окрім індексів C_p та C_{pk} , у практиці управління якістю використовуються показники P_p та P_{pk} .

На відміну від C_p та C_{pk} , які оцінюють короткострокову здатність процесу на основі статистично стабільних вибірок, показники P_p та P_{pk} розраховуються за довгостроковими даними та враховують усі джерела варіації, що виникають протягом тривалого періоду експлуатації.

Таким чином, C_p і C_{pk} характеризують потенційні можливості процесу; P_p і P_{pk} характеризують фактичну довгострокову продуктивність процесу.

Порівняння цих показників дозволяє оцінити ступінь впливу зовнішніх факторів та стабільність виробничої системи у довгостроковій перспективі.

У практиці статистичного управління процесами важливо розуміти, що показники здатності процесу мають сенс лише для статистично стабільних процесів. Якщо процес перебуває під впливом спеціальних причин варіації, його статистичні характеристики постійно змінюються, а отримані значення C_p та C_{pk} можуть бути недостовірними.

Тому класична методологія SPC передбачає двоетапний підхід:

1. Спочатку перевіряється статистична стабільність процесу за допомогою контрольних карт.

2. Після підтвердження стабільності виконується оцінювання здатності процесу за показниками C_p та C_{pk} .

Таким чином, контрольні карти та індекси здатності процесу є взаємодоповнюючими інструментами системи управління якістю.

У розроблюваній системі моніторингу якості виробничої лінії на базі стенда FESTO MPS 400 основним джерелом даних є результати автоматичного сортування деталей на придатні та браковані за допомогою системи технічного зору. Отримані дані мають атрибутивний характер і містять інформацію про кількість придатних та бракованих виробів у межах певного інтервалу часу.

Для аналізу таких даних використовується р-карта Шухарта, яка дозволяє контролювати частку бракованої продукції та виявляти порушення статистичної стабільності процесу.

На відміну від карт для кількісних характеристик, р-карта не оперує безперервними вимірюваннями параметрів виробів і не використовує інженерні допуски у вигляді верхньої та нижньої меж специфікації. У зв'язку з цим прямий розрахунок показників C_p та C_{pk} для реалізованої системи є неможливим.

Разом із тим у складі інформаційної системи стенда FESTO MPS 400 наявний окремий потік вимірювальних даних, який отримує через OPC UA інформацію про фізичні параметри виробів, зокрема їх висоту та масу. У разі використання цих даних можливе розширення розробленої системи шляхом впровадження контрольних карт для кількісних характеристик та автоматизованого розрахунку показників здатності процесу.

Таким чином, у межах даної роботи основна увага приділяється оцінюванню статистичної стабільності процесу на основі атрибутивних даних, тоді як показники здатності процесу розглядаються як перспективний напрямок подальшого розвитку системи моніторингу якості виробничої лінії.

1.6 Аналіз сучасних програмних засобів статистичного контролю процесів та промислової аналітики

Статистичне управління процесами є одним із найбільш поширених інструментів забезпечення якості продукції у промисловості. З розвитком

					КНУ КРБ.174.26.06.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

цифрових технологій класичні методи SPC поступово трансформувалися у комплексні програмні рішення, що поєднують функції збору виробничих даних, статистичного аналізу, візуалізації та підтримки прийняття рішень. Сучасні системи статистичного контролю процесів інтегруються із засобами автоматизації виробництва, промисловими мережами та платформами Industrial Internet of Things, забезпечуючи моніторинг технологічних процесів у режимі реального часу.

Умовно програмні засоби, що використовуються для реалізації SPC-функцій, можна поділити на три групи:

- спеціалізовані статистичні пакети;
- промислові SPC-системи;
- універсальні платформи промислової аналітики та Industrial IoT.

До найбільш відомих спеціалізованих засобів статистичного аналізу належить Minitab.

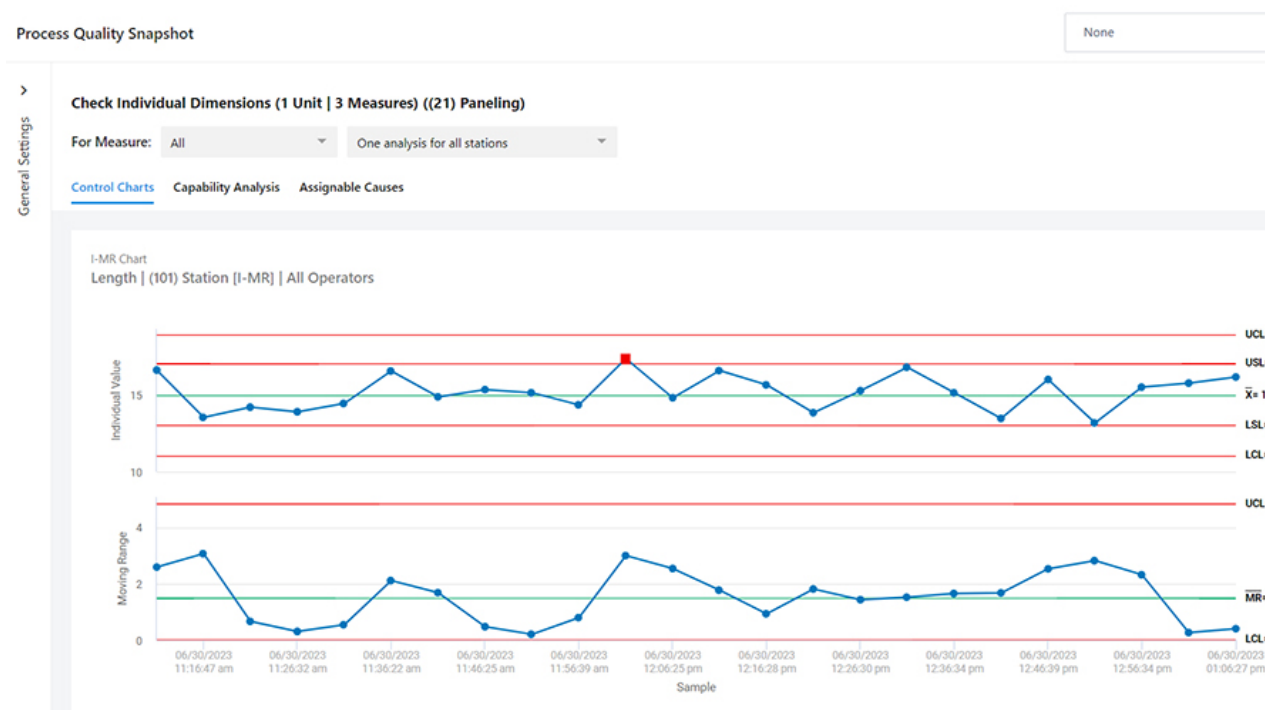


Рисунок 1.6 – Інтерфейс побудови контрольних карт у ПЗ Minitab [12]

Дана система широко використовується в рамках методології Six Sigma та дозволяє виконувати побудову контрольних карт, аналіз здатності процесів, регресійний аналіз, планування експериментів та інші статистичні дослідження.

Основними перевагами Minitab є:

- велика кількість статистичних методів;
- висока точність розрахунків;
- підтримка міжнародних стандартів SPC;
- широке використання у промисловості та наукових дослідженнях.

Разом із тим система орієнтована переважно на автономний статистичний аналіз і не призначена для безпосередньої інтеграції з виробничим обладнанням у режимі реального часу.

Ще одним поширеним статистичним пакетом є JMP, розроблений компанією SAS Institute (рис. 1.7).

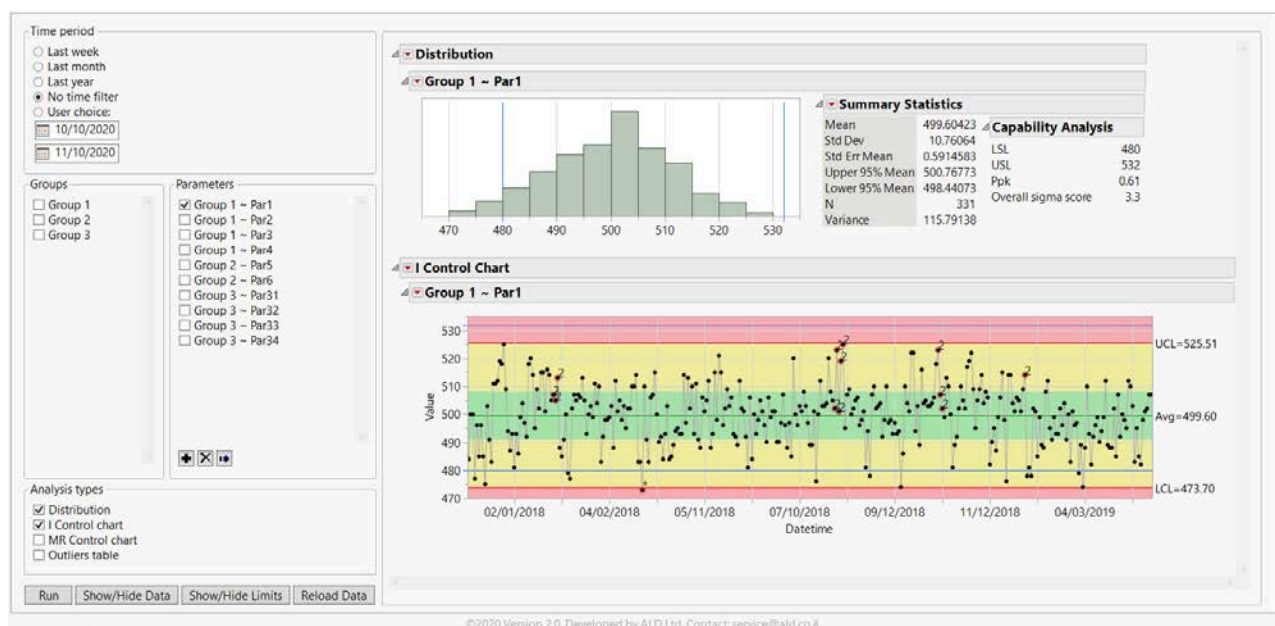


Рисунок 1.7 – Інтерфейс інструментів статистичного контролю процесів у ПЗ JMP [13]

Система забезпечує розвинені можливості інтерактивної візуалізації даних, аналізу тенденцій та побудови прогнозних моделей. Проте, як і Minitab, вона більше орієнтована на аналітичну діяльність, ніж на інтеграцію із системами автоматизації виробництва.

Для застосування безпосередньо на виробництві використовуються спеціалізовані промислові системи статистичного контролю процесів.

Одним із найбільш відомих рішень цього класу є InfinityQS ProFicient (рис. 1.8).

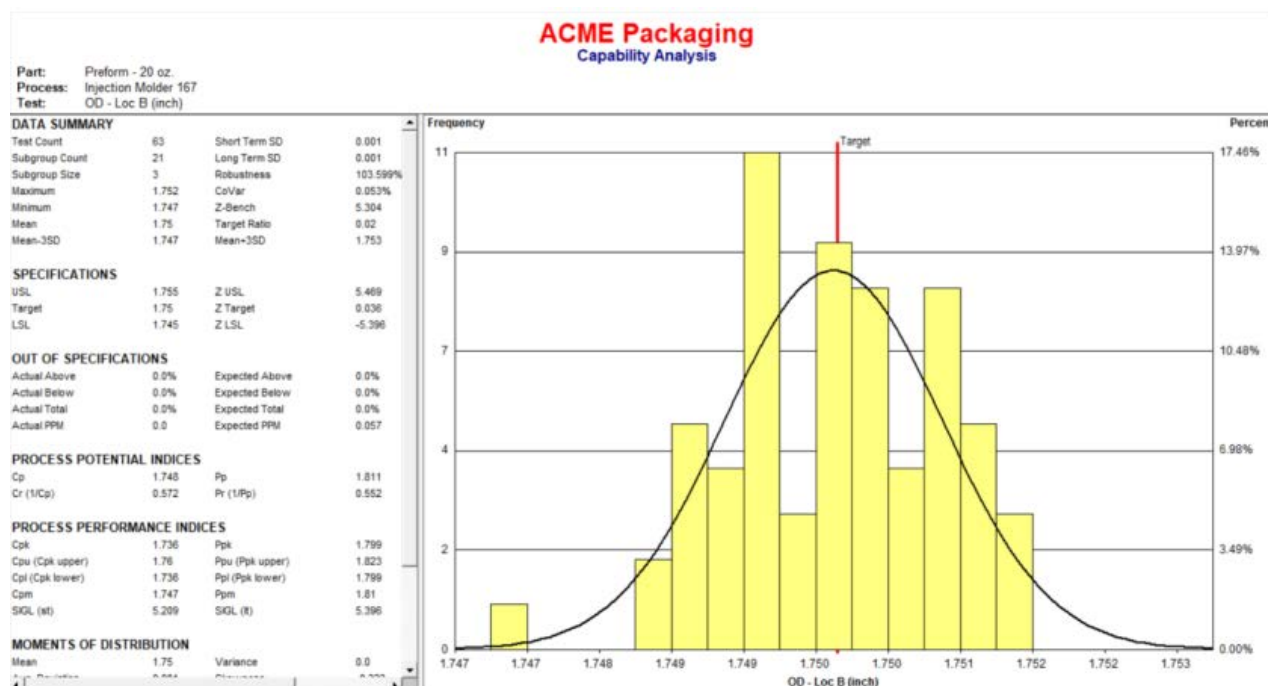


Рисунок 1.8 – Інтерфейс інструментів аналізу показників здатності у ПЗ InfinityQS ProFicient [14]

Система забезпечує:

- автоматичний збір виробничих даних;
- побудову контрольних карт;
- моніторинг ключових показників якості;
- формування тривожних повідомлень;
- аналіз причин виникнення дефектів.

Перевагою InfinityQS є можливість роботи в режимі реального часу та підтримка великої кількості виробничих майданчиків.

Іншим поширеним рішенням є WinSPC, яка орієнтована на машинобудівні та металообробні підприємства.

Система підтримує:

- контрольні карти Шухарта;
- аналіз $\bar{C}_p$ і $\bar{C}_{pk}$;
- інтеграцію з вимірювальним обладнанням;
- автоматичну генерацію звітів.

Основним недоліком таких рішень є висока вартість ліцензій та складність адаптації до нестандартних навчальних або дослідницьких установок.

Широке застосування у промисловості також отримали рішення сімейства Q-DAS, які використовуються для збору та аналізу даних вимірювань у виробництві автомобільних компонентів, авіаційної техніки та високоточного машинобудування (рис. 1.9).

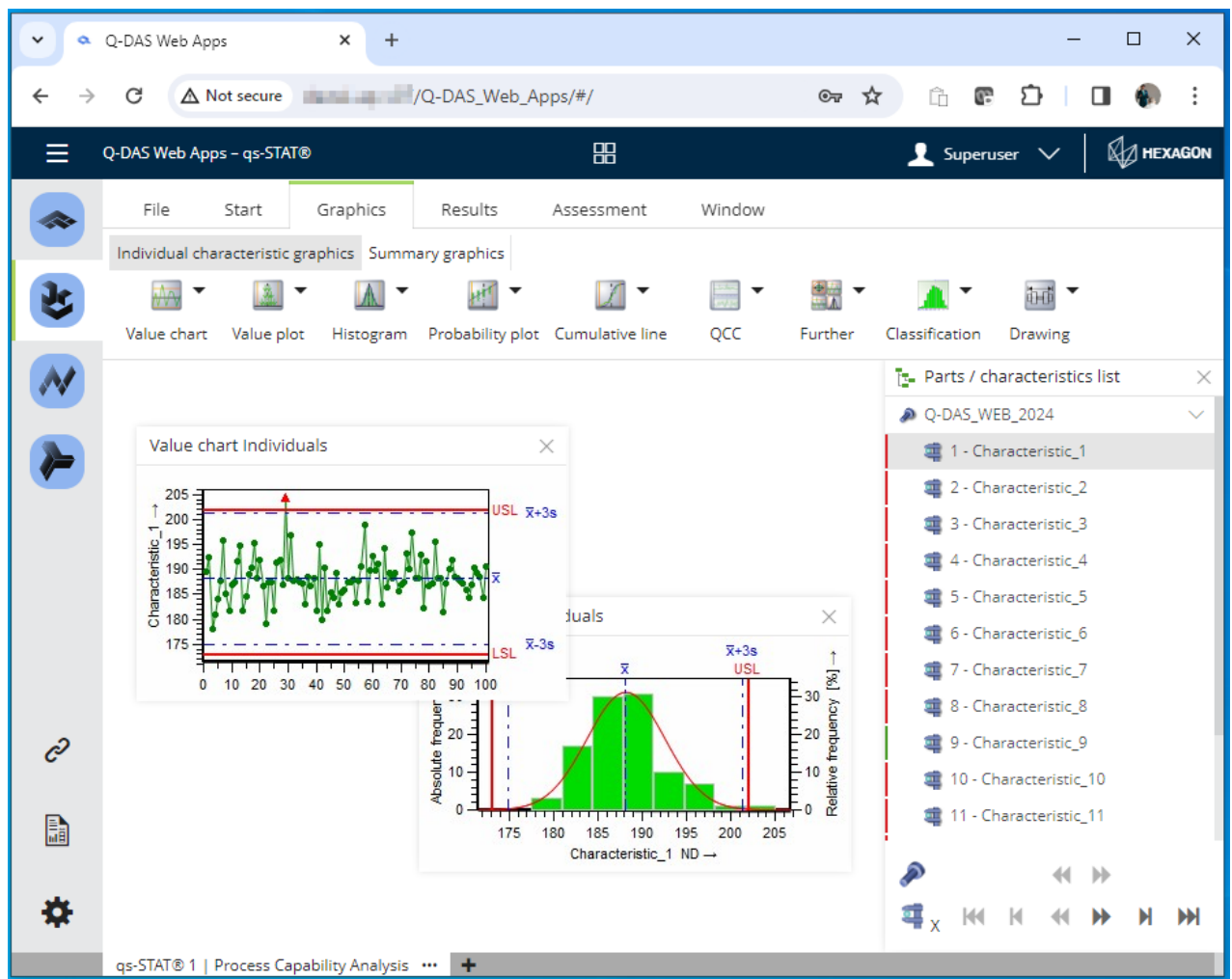


Рисунок 1.9 – Інтерфейс інструментів статистичного контролю процесів у ПЗ Q-DAS solara.MP [15]

Особливістю Q-DAS є орієнтація на відповідність міжнародним стандартам забезпечення якості та інтеграція з корпоративними системами управління виробництвом.

Останніми роками активно розвиваються універсальні платформи Industrial IoT, які дозволяють реалізовувати функції SPC у поєднанні з іншими інструментами промислової аналітики.

Однією з найбільш відомих платформ цього класу є Ignition компанії Inductive Automation [16, 17].

Ignition забезпечує:

- інтеграцію з OPC UA;
- роботу з промисловими базами даних;
- побудову SCADA-систем;
- створення веб-дашбордів;
- реалізацію функцій аналітики виробничих даних.

Завдяки відкритій архітектурі система може використовуватися для побудови власних рішень статистичного контролю процесів.

Широкі можливості для промислової аналітики також надають платформи сімейства FactoryTalk Analytics та AVEVA Insight.

Такі рішення дозволяють реалізовувати концепції цифрових двійників, прогностного обслуговування обладнання та аналізу виробничих показників на основі великих масивів даних.

Однак їх впровадження потребує значних фінансових витрат та використання складної корпоративної інфраструктури.

Використання відкритих платформ для реалізації SPC-систем

Окрему групу становлять відкриті програмні платформи, що дозволяють створювати власні системи моніторингу виробничих процесів.

Особливий інтерес у цьому контексті становить Node-RED — платформа потокового програмування, призначена для інтеграції пристроїв, сервісів та інформаційних систем.

Основними перевагами Node-RED є:

- відкритий вихідний код;
- підтримка протоколів MQTT, OPC UA, HTTP та інших;
- можливість швидкого створення інформаційних потоків;
- підтримка веб-інтерфейсів моніторингу;
- інтеграція з базами даних;
- простота модифікації алгоритмів.

У поєднанні з брокерами MQTT та документно-орієнтованими базами даних, зокрема MongoDB, Node-RED дозволяє реалізовувати функції SPC-моніторингу без використання дорогих спеціалізованих програмних комплексів.

Такий підхід є особливо актуальним для навчальних лабораторій, дослідницьких стендів та малих виробничих підприємств.

1.7 Аналіз навчально-виробничого стенда FESTO MPS 403-1 як об'єкта дослідження

Одним із сучасних напрямів підготовки фахівців у галузі автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій є використання навчально-виробничих комплексів, що відтворюють принципи функціонування реальних автоматизованих виробництв. Такі комплекси дозволяють поєднати вивчення засобів автоматизації, промислових мереж, інформаційних технологій та методів аналізу виробничих даних у межах єдиного навчально-дослідницького середовища.

Навчально-виробничий стенд FESTO серії MPS 400 (Modular Production System) належить до класу модульних виробничих систем та призначений для моделювання процесів автоматизованого виготовлення, контролю та сортування продукції. Комплекс розроблений компанією Festo Didactic як навчальна платформа для підготовки фахівців у галузях автоматизації виробництва, мехатроніки, робототехніки та концепції Industry 4.0.

					<i>КНУ КРБ.174.26.06.01.ПЗ</i>	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Особливістю системи є модульний принцип побудови, який дозволяє формувати виробничі лінії різної конфігурації залежно від навчальних або дослідницьких завдань. Кожен модуль реалізує окрему виробничу операцію та може функціонувати як автономно, так і у складі інтегрованої виробничої системи.

Навчальна фабрика забезпечує можливість відпрацювання практичних навичок проєктування автоматизованих систем керування, інтеграції промислових контролерів, використання промислових протоколів обміну даними та впровадження сучасних цифрових технологій моніторингу виробництва.

У даній роботі об'єктом дослідження є виробнича лінія на базі стенда FESTO MPS 403-1, яка реалізує цикл обробки та сортування заготовок.

До складу виробничої лінії входять кілька взаємопов'язаних технологічних станцій, які забезпечують послідовне виконання виробничих операцій.

Функціонально виробничий процес можна подати у вигляді таких етапів:

- подача заготовки до виробничої лінії;
- транспортування виробу між технологічними позиціями;
- контроль параметрів виробу;
- класифікація виробу за результатами контролю;
- автоматичне сортування;
- накопичення готової продукції та браку.

У процесі роботи кожна деталь проходить повний цикл виробництва, а результати контролю можуть використовуватися для формування статистичних показників якості.

Завдяки наявності декількох технологічних операцій система моделює типові задачі сучасного дискретного виробництва та є зручним об'єктом для дослідження методів статистичного управління процесами.

					<i>КНУ КРБ.174.26.06.01.ПЗ</i>	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Керування виробничою лінією здійснюється за допомогою програмованих логічних контролерів (ПЛК), які реалізують алгоритми автоматичного виконання технологічного циклу.

До складу системи автоматизації входять:

- датчики положення;
- фотоелектричні датчики;
- виконавчі пневматичні механізми;
- транспортні пристрої;
- модулі введення-виведення;
- програмовані логічні контролери.

ПЛК забезпечують збір сигналів від датчиків, виконання логічних алгоритмів керування та формування команд для виконавчих механізмів.

Використання сучасних засобів автоматизації дозволяє відтворювати принципи побудови реальних промислових виробничих систем та створює основу для подальшої цифровізації виробничого процесу.

Особливістю досліджуваної виробничої лінії є наявність автоматизованої системи контролю якості продукції.

У лабораторному комплексі контроль якості реалізується шляхом автоматичного аналізу виробів та їх подальшого сортування на придатні й браковані.

Результатом контролю є прийняття одного з двох рішень:

- виріб відповідає встановленим вимогам;
- виріб визнається бракованим.

Така схема контролю повністю відповідає задачам атрибутивного статистичного контролю, де кожна одиниця продукції класифікується за принципом «придатний/непридатний».

У межах даної роботи саме результати сортування використовуються як джерело інформації для побудови р-карти Шухарта та оцінювання стабільності виробничого процесу.

					<i>КНУ КРБ.174.26.06.01.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

Важливою особливістю сучасної конфігурації лабораторного комплексу є наявність цифрової інфраструктури, побудованої відповідно до принципів Industrial Internet of Things.

Архітектура інформаційної системи включає, програмовані логічні контролери з підтримкою OPC UA серверів, брокер повідомлень MQTT, платформу Node-RED, базу даних MongoDB, веб-інтерфейс моніторингу, MES-систему та веб-магазин на базі OpenCart.

Обмін даними між компонентами системи здійснюється із застосуванням промислових протоколів OPC UA та MQTT.

Використання OPC UA забезпечує стандартизований доступ до технологічних параметрів виробничої лінії, тоді як MQTT використовується для передачі подій та телеметричних повідомлень між компонентами системи.

Для автоматизації процесу оцінювання якості продукції у складі інформаційної системи використовується модуль комп'ютерного зору на базі одноплатного комп'ютера Raspberry Pi.

Основним завданням системи комп'ютерного зору є автоматичне визначення кількості деталей, що потрапили до відповідних накопичувальних лотків після сортування.

Результати роботи модуля передаються до інформаційної системи у вигляді MQTT-повідомлень, що містять накопичувальні лічильники придатної та бракованої продукції.

Саме ці дані використовуються для подальшого розрахунку статистичних показників якості та побудови контрольних карт.

Використання комп'ютерного зору дозволяє повністю автоматизувати процес збору статистичної інформації та виключити вплив людського фактора на результати контролю.

Навчально-виробничий стенд FESTO MPS 400 є перспективним об'єктом для дослідження методів статистичного контролю процесів завдяки поєднанню реального виробничого обладнання, засобів автоматизації та сучасної цифрової інфраструктури.

					<i>КНУ КРБ.174.26.06.01.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

До основних переваг стенда як об'єкта дослідження належать:

- моделювання реального виробничого процесу;
- наявність автоматизованого контролю якості;
- підтримка промислових протоколів OPC UA та MQTT;
- можливість інтеграції із засобами Industrial IoT;
- підтримка збору та накопичення виробничих даних;
- можливість реалізації сучасних методів промислової аналітики.

Наявність системи автоматичного сортування продукції та цифрового каналу передачі інформації про результати контролю створює необхідні передумови для впровадження статистичного моніторингу якості в режимі реального часу.

Таким чином, навчально-виробничий стенд FESTO MPS 400 є повноцінною кіберфізичною виробничою системою, що поєднує засоби автоматизації, промислові мережі та цифрові технології аналізу даних. Це робить його ефективною платформою для дослідження та апробації методів статистичного контролю процесів у контексті концепції Industry 4.0.

1.8 Постановка задачі розробки системи SPC-моніторингу стенду FESTO MPS 403-1

Незважаючи на наявність розвиненої інфраструктури збору та зберігання виробничих даних, існуюча інформаційна система орієнтована переважно на оперативне відображення поточного стану обладнання та фіксацію історії подій.

У поточній конфігурації система дозволяє:

- контролювати стан виробничої лінії;
- отримувати телеметричні дані від обладнання;
- накопичувати історичні записи про виробничі події;
- візуалізувати технологічні параметри в режимі реального часу.

					<i>КНУ КРБ.174.26.06.01.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

Водночас система не забезпечує автоматизованого статистичного аналізу показників якості продукції та не дозволяє оцінювати стабільність виробничого процесу з використанням методів SPC.

Фактично інформаційна система виконує функції збору та відображення даних, але не реалізує механізмів підтримки прийняття рішень щодо стану виробничого процесу.

У разі виникнення тенденцій до погіршення якості оператор змушений самостійно аналізувати накопичену інформацію та виявляти можливі відхилення. Такий підхід не забезпечує своєчасного виявлення прихованих змін у роботі виробничої системи та не дозволяє реалізувати превентивне управління якістю.

Однією з особливостей досліджуваної виробничої лінії є наявність автоматизованої системи контролю та сортування продукції.

У процесі роботи виробничої лінії кожна виготовлена деталь проходить процедуру контролю та автоматично класифікується як придатна або бракована. Результати сортування фіксуються інформаційною системою та можуть використовуватися як джерело статистичних даних про якість виробництва.

Таким чином, у системі вже наявна необхідна інформаційна база для впровадження методів статистичного управління процесами.

Накопичення інформації про кількість придатних та бракованих виробів відкриває можливість переходу від простого збору даних до їх аналітичної обробки з використанням контрольних карт Шухарта та інших інструментів SPC.

Особливо актуальним є впровадження механізмів автоматичного виявлення:

- раптового зростання частки браку;
- поступового погіршення якості продукції;
- зміщення статистичних характеристик процесу;
- виникнення нестабільних режимів роботи виробничої лінії.

					КНУ КРБ.174.26.06.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

Реалізація таких функцій дозволяє значно підвищити інформативність системи моніторингу та наблизити її функціональність до сучасних промислових платформ забезпечення якості.

З урахуванням проведеного аналізу можна зробити висновок, що існуюча інформаційна система стенда FESTO MPS 400 забезпечує необхідні засоби збору, передавання та накопичення виробничих даних, однак не містить механізмів статистичного контролю процесів.

У зв'язку з цим виникає задача розробки додаткового програмного модуля статистичного моніторингу якості, інтегрованого до існуючої цифрової інфраструктури стенда.

Основною метою створення такого модуля є забезпечення автоматизованого аналізу показників якості продукції та виявлення ознак нестабільності виробничого процесу в режимі реального часу.

Для досягнення поставленої мети система повинна забезпечувати:

- автоматичний збір даних про результати сортування продукції;
- формування статистичних підгруп;
- розрахунок частки бракованої продукції;
- побудову р-карти Шухарта;
- автоматичне визначення контрольних меж;
- перевірку правил Western Electric та Nelson;
- генерацію повідомлень про виявлені порушення;
- накопичення статистичних показників у базі даних;
- візуалізацію результатів аналізу на веб-панелі оператора.

При цьому важливою вимогою є збереження архітектурної незалежності нового модуля від існуючих компонентів інформаційної системи. Система статистичного моніторингу повинна використовувати наявні джерела даних та не впливати на функціонування підсистем керування виробничою лінією.

					<i>КНУ КРБ.174.26.06.01.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

Висновки за розділом:

У першому розділі виконано аналіз сучасних підходів до забезпечення якості продукції в автоматизованих виробничих системах та досліджено теоретичні основи статистичного управління процесами.

Показано, що в умовах цифрової трансформації промисловості та впровадження концепції Industry 4.0 особливого значення набувають методи превентивного контролю якості, які дозволяють своєчасно виявляти відхилення у виробничих процесах та запобігати виникненню браку. Встановлено, що одним із найбільш ефективних інструментів такого контролю є статистичне управління процесами (SPC), яке базується на аналізі варіацій технологічних параметрів та результатів виробництва.

У ході дослідження розглянуто основні типи контрольних карт Шухарта, виконано їх класифікацію та визначено особливості застосування для різних типів виробничих даних. Встановлено, що для задачі контролю частки бракованої продукції у виробничій лінії найбільш доцільним є використання р-карти, яка призначена для аналізу атрибутивних даних за умов змінного обсягу вибірок.

Досліджено сучасні методи виявлення нестабільності виробничих процесів на основі правил Western Electric та Nelson. Визначено, що використання таких критеріїв дозволяє виявляти не лише явні виходи контрольованих показників за межі статистичного контролю, але й приховані тенденції до погіршення якості продукції та зміщення характеристик процесу.

Також розглянуто показники здатності виробничих процесів $\bar{C}_p$, $\bar{C}_{pk}$, $\bar{P}_p$ та $\bar{P}_{pk}$, які використовуються для оцінювання відповідності процесу встановленим технічним вимогам. Показано, що зазначені показники є важливим інструментом оцінювання якості технологічних систем, проте їх використання потребує наявності безперервних вимірюваних параметрів виробу.

					<i>КНУ КРБ.174.26.06.01.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

Проведено аналіз сучасних програмних засобів статистичного контролю процесів та промислової аналітики. Встановлено, що поряд із спеціалізованими комерційними системами статистичного контролю все більшого поширення набувають відкриті платформи Industrial Internet of Things, які забезпечують інтеграцію виробничих даних, реалізацію алгоритмів статистичного аналізу та побудову інформаційно-аналітичних систем моніторингу.

Виконано аналіз навчально-виробничого стенда FESTO MPS 400 як об'єкта дослідження та встановлено, що його архітектура поєднує засоби автоматизації, комп'ютерного зору, промислові протоколи обміну даними та сучасну цифрову інфраструктуру, що відповідає принципам концепції Industry 4.0. Показано, що існуюча інформаційна система стенда забезпечує збір та накопичення виробничих даних, однак не містить засобів статистичного аналізу показників якості продукції.

На основі проведеного аналізу обґрунтовано необхідність розробки додаткового модуля статистичного моніторингу якості, який забезпечуватиме автоматизований контроль частки бракованої продукції, побудову р-карти Шухарта, виявлення ознак нестабільності виробничого процесу та формування інформаційної підтримки для прийняття рішень. Результати проведеного дослідження стали теоретичною основою для проєктування та реалізації системи моніторингу якості виробничої лінії, розглянутої у другому розділі роботи.

РОЗДІЛ 2

ПРОЄКТУВАННЯ ТА АПРОБАЦІЯ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ЯКОСТІ ВИРОБНИЧОЇ ЛІНІЇ

2.1 Архітектура системи моніторингу якості виробничої лінії

Відповідно до результатів аналізу, виконаного у першому розділі, для реалізації функцій статистичного контролю якості було прийнято рішення про розробку окремого програмного модуля SPC-моніторингу, інтегрованого до існуючої цифрової інфраструктури навчально-виробничого стенда FESTO MPS-403-1.

Основною вимогою до розроблюваної системи було забезпечення можливості автоматичного аналізу показників якості продукції без втручання в роботу існуючих підсистем керування виробничою лінією. Такий підхід дозволяє реалізувати принцип архітектурної незалежності аналітичного рівня від рівня технологічного керування та виключає вплив системи моніторингу на виконання виробничого процесу.

Розроблена система моніторингу якості побудована відповідно до концепції багаторівневої архітектури цифрового виробництва та включає чотири функціональні рівні:

- рівень виробничого обладнання;
- рівень збору даних;
- рівень статистичної обробки;
- рівень візуалізації та підтримки прийняття рішень.

На нижньому рівні знаходиться виробнича лінія FESTO MPS 400, що здійснює виготовлення та сортування продукції. У процесі роботи формуються первинні дані про результати контролю якості виробів.

					КНУ КРБ.174.26.06.02.ПЗ						
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		Подковський О. О.			РОЗДІЛ 2			Літ.	Арк.	Аркушів	
Перевір.		Рубан С. А.								25	37
Н. Контр.		Маринич І.А.									
Затверд.		Маринич І.А.									
								КНУ АКІТР-23ск			

Рівень збору даних представлений модулем комп'ютерного зору на базі Raspberry Pi та інфраструктурою обміну повідомленнями MQTT. Завданням цього рівня є формування цифрового представлення виробничих подій та передача інформації до системи моніторингу.

Рівень статистичної обробки реалізований у середовищі Node-RED та забезпечує виконання алгоритмів агрегації даних, побудови контрольних карт і виявлення порушень статистичної стабільності процесу.

Верхній рівень системи утворюють база даних MongoDB та веб-інтерфейс оператора, які забезпечують накопичення історичних даних, формування звітної інформації та візуалізацію результатів аналізу.

До складу розробленої системи входять такі основні компоненти:

1. Виробнича лінія FESTO MPS 400.
2. Система комп'ютерного зору.
3. MQTT-брокер.
4. Платформа Node-RED.
5. База даних MongoDB.
6. Dashboard оператора.

Виробнича лінія виконує функції виготовлення, контролю та сортування виробів. Результатом роботи лінії є потік деталей, класифікованих як придатні або браковані.

Модуль комп'ютерного зору здійснює автоматичний підрахунок деталей у накопичувальних лотках та формує повідомлення про поточний стан виробничого процесу.

У межах реалізованої системи саме цей компонент виступає джерелом первинних даних для статистичного аналізу.

MQTT-брокер виконує функції транспортного рівня та забезпечує доставку повідомлень між окремими компонентами інформаційної системи.

Використання архітектури Publish/Subscribe дозволяє підключати нові модулі моніторингу без внесення змін до існуючих компонентів виробничої системи.

					<i>КНУ КРБ.174.26.05.02.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

Платформа Node-RED є центральним елементом системи SPC-моніторингу. На цій платформі реалізовано:

- збір повідомлень про результати сортування;
- формування статистичних підгруп;
- розрахунок частки браку;
- побудову контрольних меж;
- перевірку правил Western Electric;
- генерацію повідомлень про порушення.

База даних MongoDB використовується для накопичення результатів статистичного аналізу та історії спрацювань правил контролю.

Застосування документно-орієнтованої моделі даних дозволяє гнучко зберігати статистичні показники та забезпечує можливість подальшого розширення системи.

Інтерфейс оператора (Dashboard) забезпечує:

- відображення поточних показників якості;
- візуалізацію контрольної карти;
- відображення статистики браку;
- інформування про виявлені порушення.

Функціонування системи моніторингу якості здійснюється за таким алгоритмом.

Після завершення операції сортування система комп'ютерного зору визначає кількість деталей у лотках придатної та бракованої продукції.

Отримані значення передаються через MQTT-брокер до середовища Node-RED у вигляді структурованих повідомлень.

На основі послідовності повідомлень система визначає кількість нових виробів, що з'явилися за певний проміжок часу, та накопичує статистичну інформацію в межах заданих часових інтервалів.

Після завершення інтервалу спостереження формується статистична підгрупа, для якої обчислюється частка бракованої продукції.

					<i>КНУ КРБ.174.26.06.02.ПЗ</i>	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

На основі накопиченої історії спостережень розраховуються центральна лінія процесу та контрольні межі р-карти Шухарта.

Далі виконується автоматична перевірка критеріїв статистичної стабільності, включаючи вихід за контрольні межі, зміщення процесу та трендові зміни показників якості.

Результати аналізу зберігаються у базі даних та відображаються на інформаційній панелі оператора.

У разі виявлення порушень система автоматично формує попереджувальні повідомлення, що дозволяє своєчасно реагувати на зміни стану виробничого процесу.

Важливою особливістю запропонованої архітектури є те, що розроблений модуль статистичного моніторингу не здійснює запис даних до програмованих логічних контролерів та не впливає на алгоритми керування виробничою лінією. Система функціонує виключно як аналітичний модуль, що використовує виробничі дані для оцінювання стабільності процесу.

Такий підхід відповідає сучасним принципам побудови систем промислової аналітики, де аналітичний рівень відокремлюється від рівня технологічного керування та не створює ризиків для функціональної безпеки виробничого обладнання.

Крім того, використання MQTT та Node-RED забезпечує високу масштабованість рішення. У перспективі система може бути розширена для одночасного моніторингу декількох виробничих станцій, реалізації додаткових типів контрольних карт або інтеграції з системами MES та SCADA.

На рис. 2.1 наведено архітектуру системи моніторингу якості виробничої лінії на базі стенда FESTO серії MPS 400 з використанням методів статистичного контролю процесів.

					<i>КНУ КРБ.174.26.06.02.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

Архітектура системи SPC-моніторингу якості виробничої лінії FESTO MPS 400

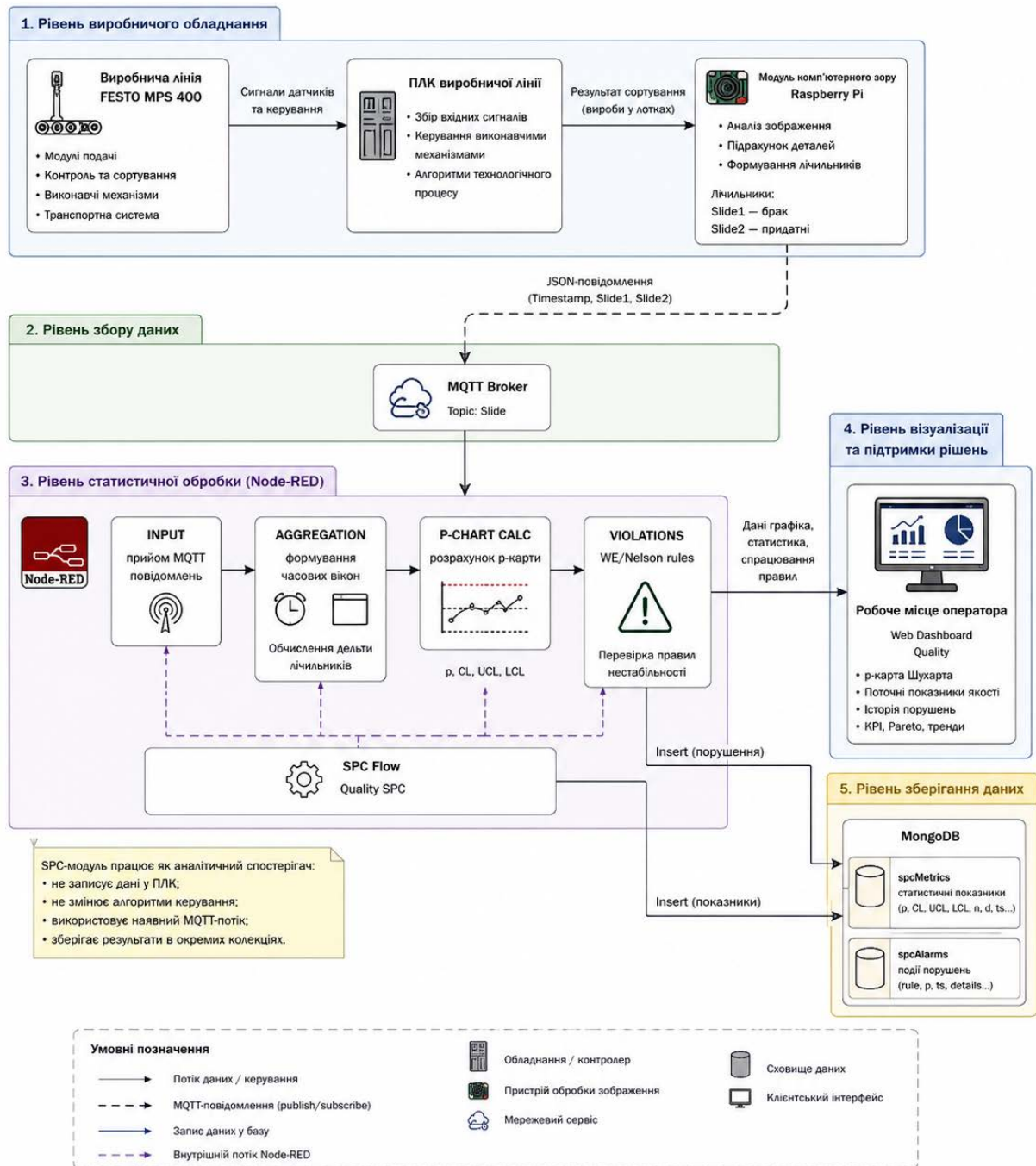


Рисунок 2.1 – Архітектура системи SPC-моніторингу якості виробничої лінії
FESTO MPS 403-1

2.2 Проєктування інформаційних потоків та моделі даних

Однією з основних вимог до розроблюваної системи моніторингу якості є забезпечення безперервного надходження виробничих даних до підсистеми статистичного аналізу. Для реалізації цієї вимоги використовується подієво-орієнтована архітектура, побудована на основі протоколу MQTT.

На відміну від традиційного підходу, коли система моніторингу періодично опитує джерела даних, використання механізму Publish/Subscribe дозволяє передавати інформацію лише при виникненні нових виробничих подій. Це зменшує мережеве навантаження та забезпечує оперативне оновлення статистичних показників.

У розробленій системі основним джерелом інформації є модуль комп'ютерного зору, який виконує автоматичний підрахунок деталей після завершення операції сортування.

Інформаційний потік формується відповідно до схеми:

Виробнича лінія → Raspberry Pi → MQTT Broker → Node-RED → MongoDB → Dashboard

Кожен етап обробки даних виконує окрему функцію:

- формування первинних даних;
- передавання повідомлень;
- статистична обробка;
- збереження результатів;
- візуалізація показників.

Таким чином забезпечується модульна структура системи та можливість її подальшого розширення.

Основою статистичного аналізу є дані про кількість придатних та бракованих виробів.

Після виконання операції сортування система комп'ютерного зору визначає кількість деталей у відповідних накопичувальних лотках.

					<i>КНУ КРБ.174.26.06.02.ПЗ</i>	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Отримані значення передаються через MQTT у вигляді повідомлень JSON-формату.

Приклад повідомлення наведено нижче:

```
{
  "timestamp": "2025-05-12T10:35:14Z",
  "slide1": 3,
  "slide2": 4
}
```

де timestamp – час формування повідомлення; slide1 – накопичена кількість бракованих виробів; slide2 – накопичена кількість придатних виробів.

Особливістю реалізованої системи є використання накопичувальних лічильників. Тому для визначення кількості виробів, виготовлених за поточний інтервал часу, необхідно обчислювати приріст значень лічильників відносно попереднього повідомлення.

Час	Slide1	Slide2
t_1	2	0
t_2	3	4

У цьому випадку за інтервал між t_1 та t_2 виготовлено 1 бракований виріб та 4 придатних виробів. Загальний обсяг продукції становить 5 виробів.

Саме ці значення використовуються для формування статистичних підгруп.

Відповідно до методології SPC аналіз процесу виконується не для окремих виробів, а для статистичних підгруп. У розробленій системі підгрупи формуються за часовим принципом.

Для кожного інтервалу спостереження накопичуються:

- кількість придатних виробів;
- кількість бракованих виробів;
- загальна кількість виробів.

Після завершення інтервалу обчислюється частка браку за формулою (1.1). Отримане значення є черговою точкою р-карти Шухарта.

Застосування часових вікон дозволяє отримувати статистичні вибірки приблизно однакової інформативності незалежно від поточної інтенсивності роботи виробничої лінії.

Для накопичення результатів статистичного аналізу використовується окрема колекція MongoDB spcMetrics. Кожний документ колекції містить результати аналізу однієї статистичної підгрупи.

Приклад структури документа наведено нижче:

```
{
  "timestamp": "2025-05-12T10:40:00Z",
  "goodCount": 48,
  "rejectCount": 3,
  "totalCount": 51,
  "p": 0.0588,
  "CL": 0.0432,
  "UCL": 0.1297,
  "LCL": 0.0000
}
```

Документ містить:

- часову мітку підгрупи;
- кількість придатних виробів;
- кількість бракованих виробів;
- частку браку;
- центральну лінію;
- верхню контрольну межу;
- нижню контрольну межу.

Така структура забезпечує можливість побудови історичних графіків та виконання подальшого аналізу.

Окремо в системі зберігаються результати спрацювання правил Western Electric та Nelson. Для цього використовується колекція spcAlarms.

					КНУ КРБ.174.26.06.02.ПЗ	Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Типова структура документа наведена нижче:

```
{
  "timestamp": "2025-05-12T10:40:00Z",
  "rule": "WE-4",
  "severity": "warning",
  "value": 0.081,
  "message": "8 послідовних точок вище центральної лінії"
}
```

Основними полями документа є:

- дата та час спрацювання;
- код правила;
- рівень важливості;
- значення контрольованого показника;
- текстове пояснення події.

Наявність окремої колекції порушень дозволяє реалізувати журнал статистичних подій та спростити подальший аналіз причин погіршення якості продукції.

Для наочного представлення руху даних між компонентами системи побудовано UML-діаграму інформаційних потоків (рис. 2.2), яка відображає повний життєвий цикл даних: від факту сортування деталі до формування статистичної підгрупи, розрахунку р-карти, запису в MongoDB та відображення результатів на Dashboard.

У результаті проєктування інформаційних потоків сформовано структуру обробки виробничих даних, яка забезпечує автоматичне надходження результатів сортування продукції до підсистеми статистичного аналізу. Розроблено моделі даних для зберігання статистичних показників та подій порушення стабільності процесу. Запропонована структура інформаційних потоків забезпечує підтримку побудови р-карт Шухарта, реалізацію правил Western Electric і Nelson та створює основу для реалізації алгоритмів статистичного контролю процесу.

					<i>КНУ КРБ.174.26.06.02.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

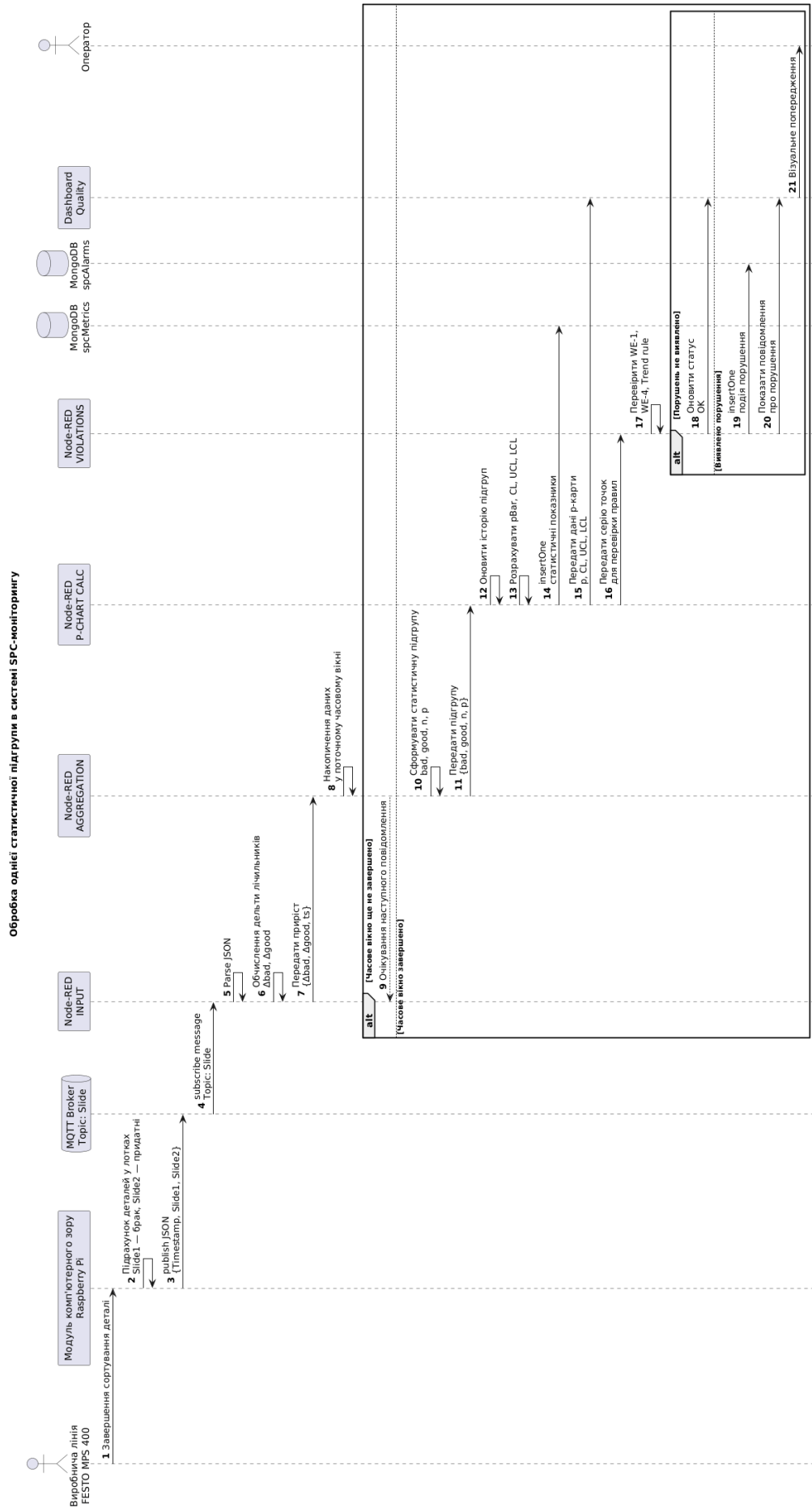


Рисунок 2.2 – Діаграма компонентів для веб-сервісу візуалізації даних екологічного моніторингу

2.3 Розробка алгоритму статистичного контролю процесу

Основною задачею розроблюваної системи моніторингу якості є автоматизоване оцінювання стабільності виробничого процесу за результатами сортування продукції на придатну та браковану. Оскільки результат контролю кожної деталі має атрибутивний характер, для статистичного аналізу було обрано р-карту Шухарта, яка дозволяє контролювати частку невідповідної продукції у вибірках змінного розміру.

Вхідними даними для алгоритму є повідомлення від модуля комп'ютерного зору, що містять накопичувальні значення кількості деталей у двох лотках: лотку бракованої продукції та лотку придатної продукції. Такі дані не можуть безпосередньо використовуватися для побудови контрольної карти, оскільки вони відображають загальні накопичені значення, а не кількість деталей, виготовлених за конкретний інтервал часу. Тому першим етапом алгоритму є обчислення приросту лічильників між двома послідовними повідомленнями.

Нехай у момент часу t_k система отримує значення лічильників:

$$S_{1,k}, \quad (2.1)$$

$$S_{2,k}, \quad (2.2)$$

де $S_{1,k}$ – накопичена кількість бракованих деталей, а $S_{2,k}$ – накопичена кількість придатних деталей. Тоді кількість нових бракованих та придатних деталей за інтервал між повідомленнями визначається як:

$$\Delta d_k = S_{1,k} - S_{1,k-1}, \quad (2.3)$$

$$\Delta g_k = S_{2,k} - S_{2,k-1}, \quad (2.4)$$

де Δd_k – приріст кількості бракованих деталей, Δg_k – приріст кількості придатних деталей.

У разі, якщо одне з нових значень лічильників є меншим за попереднє, така ситуація інтерпретується як скидання лотків або обнулення лічильників.

У цьому випадку поточне повідомлення не використовується для накопичення статистики, а нові значення приймаються як базові для подальших розрахунків. Це дозволяє уникнути появи від'ємних приростів, які не мають фізичного сенсу.

Після обчислення приростів дані накопичуються у межах статистичного часового вікна. У розробленій системі використовується підхід формування підгруп за фіксованими часовими інтервалами. Такий підхід є зручним для виробничої лінії, продуктивність якої може змінюватися залежно від режиму роботи станда, пауз, дій оператора або умов проведення експерименту.

$$d_i = \sum \Delta d_k, \quad (2.5)$$

$$g_i = \sum \Delta g_k, \quad (2.6)$$

$$n_i = d_i + g_i, \quad (2.7)$$

де d_i – кількість бракованих деталей у (і)-му часовому вікні, g_i – кількість придатних деталей, n_i – загальна кількість деталей у підгрупі.

Після завершення часового вікна формується статистична підгрупа, для якої обчислюється частка бракованої продукції:

$$p_i = \frac{d_i}{n_i}, \quad (2.8)$$

де p_i – вибіркова частка браку у (і)-й підгрупі.

Якщо протягом часового вікна не було виготовлено жодної деталі, тобто $n_i=0$, така підгрупа не використовується для побудови контрольної карти. Це дозволяє уникнути некоректних статистичних розрахунків і появи штучних точок на графіку.

Для побудови р-карти необхідно визначити центральну лінію процесу. Оскільки розмір підгруп може змінюватися, центральна лінія розраховується як середньозважена частка браку за всією накопиченою історією підгруп:

$$\tilde{p} = \frac{\sum_{i=1}^m d_i}{\sum_{i=1}^m n_i}, \quad (2.9)$$

де – кількість сформованих статистичних підгруп.

					КНУ КРБ.174.26.06.02.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

Значення характеризує середній рівень браку у виробничому процесі та використовується як центральна лінія контрольної карти:

$$CL = \tilde{p}. \quad (2.10)$$

Оскільки р-карта ґрунтується на біноміальному розподілі, стандартне відхилення частки браку для кожної підгрупи визначається за формулою:

$$\sigma_{p_i} = \sqrt{\frac{\tilde{p} \cdot (1 - \tilde{p})}{n_i}}. \quad (2.11)$$

де n_i – розмір відповідної підгрупи.

Важливою особливістю р-карти є те, що контрольні межі розраховуються окремо для кожної точки, оскільки обсяг підгрупи може бути різним. Верхня контрольна межа визначається як:

$$UCL_i = \tilde{p} + 3 \cdot \sigma_{p_i}. \quad (2.12)$$

Нижня контрольна межа визначається як:

$$LCL_i = \tilde{p} - 3 \cdot \sigma_{p_i}. \quad (2.13)$$

Оскільки частка браку не може бути від'ємною величиною, нижня контрольна межа обмежується нулем:

$$LCL_i = \max(0, \tilde{p} - 3 \cdot \sigma_{p_i}). \quad (2.14)$$

Отже, для кожної статистичної підгрупи система формує набір значень:

$$\{t_i, d_i, g_i, n_i, p_i, CL, UCL_i, LCL_i\}. \quad (2.15)$$

де t_i – час завершення відповідного статистичного вікна.

На основі цих даних будується р-карта Шухарта, яка дозволяє візуально оцінити зміну частки браку в часі та виявити порушення статистичної стабільності процесу.

Загальний алгоритм статистичного контролю процесу можна подати у вигляді такої послідовності дій (рис. 2.3):

1. Отримання MQTT-повідомлення з поточними значеннями лічильників придатної та бракованої продукції.
2. Перетворення повідомлення з JSON-формату у внутрішню структуру даних.

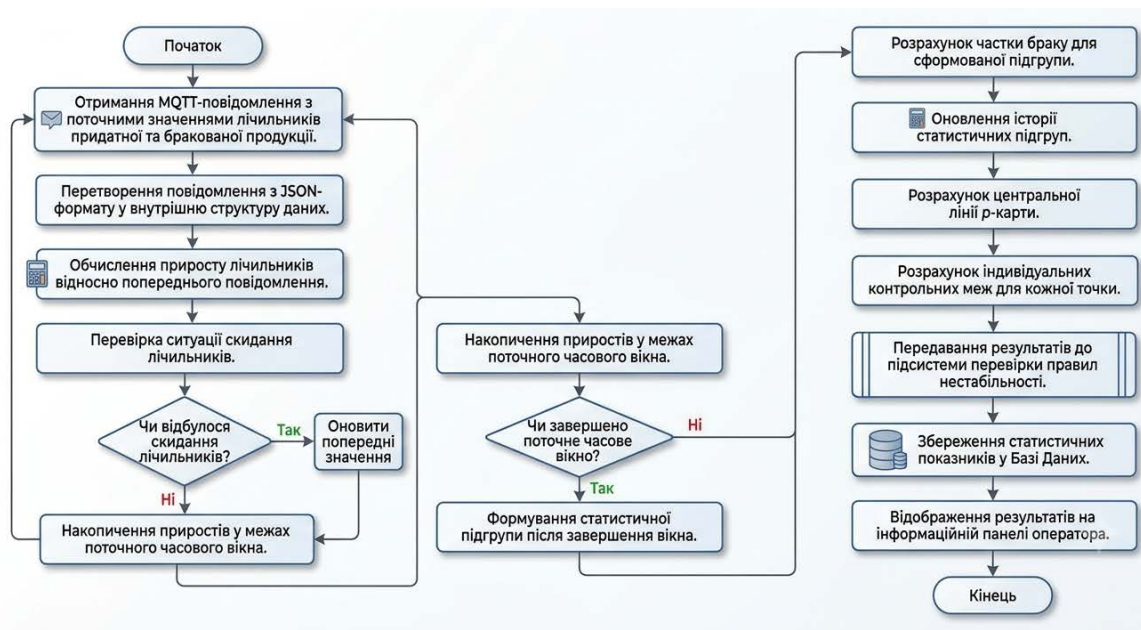


Рисунок 2.3 – Блок-схема алгоритму SPC для лабораторного стенду FESTO MPS 403-1

3. Обчислення приросту лічильників відносно попереднього повідомлення.
4. Перевірка ситуації скидання лічильників.
5. Накопичення приростів у межах поточного часового вікна.
6. Формування статистичної підгрупи після завершення вікна.
7. Розрахунок частки браку для сформованої підгрупи.
8. Оновлення історії статистичних підгруп.
9. Розрахунок центральної лінії p-карти.
10. Розрахунок індивідуальних контрольних меж для кожної точки.
11. Передавання результатів до підсистеми перевірки правил нестабільності.
12. Збереження статистичних показників у базі даних.
13. Відображення результатів на інформаційній панелі оператора.

Розроблений алгоритм забезпечує перехід від первинних виробничих подій до статистично обґрунтованої оцінки стану процесу. Його перевагою є можливість роботи з нерівномірним потоком виробів, використання змінного

обсягу підгруп та автоматичне оновлення контрольних меж при накопиченні нових даних.

Таким чином, запропонований алгоритм статистичного контролю процесу забезпечує основу для автоматизованого моніторингу якості виробничої лінії на базі стенда FESTO MPS 400. На наступному етапі доцільно реалізувати механізми виявлення порушень статистичної стабільності процесу на основі правил Western Electric та Nelson.

2.4 Реалізація алгоритмів виявлення порушень статистичної стабільності процесу

Побудова контрольної карти сама по собі не забезпечує автоматичного визначення стану виробничого процесу. Для прийняття рішень щодо його стабільності необхідно виконувати аналіз розташування статистичних точок відносно центральної лінії та контрольних меж.

У класичних системах статистичного управління процесами така перевірка виконується за допомогою набору формалізованих критеріїв, які дозволяють виявляти появу спеціальних причин варіації. У межах даної роботи реалізовано автоматичну перевірку трьох правил:

1. WE-1 (вихід точки за контрольні межі);
2. WE-4 (вісім послідовних точок по один бік центральної лінії);
3. Nelson Trend Rule (монотонний тренд).

Вибір саме цих правил обумовлений необхідністю забезпечення контролю як різких відхилень показників якості, так і поступових змін стану виробничого процесу.

Після формування кожної нової статистичної підгрупи система автоматично виконує перевірку всіх активних критеріїв. Результати перевірки використовуються для формування повідомлень про порушення та накопичуються у базі даних.

					<i>КНУ КРБ.174.26.06.02.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59

Правило WE-1 є найпростішим критерієм виявлення нестабільності процесу. Порушення фіксується у випадку, якщо значення частки браку виходить за межі контрольної області:

$$p_i > UCL_i, \quad (2.16)$$

або

$$p_i < LCL_i, \quad (2.17)$$

де p_i – частка браку у поточній підгрупі; UCL_i – верхня контрольна межа; LCL_i – нижня контрольна межа.

Алгоритм перевірки реалізовано шляхом порівняння поточного значення р-карти з відповідними контрольними межами.

Якщо умова виконується, система:

1. формує подію порушення;
2. записує її до колекції `spcAlarms`;
3. відображає повідомлення оператору;
4. змінює індикатор стану процесу на панелі моніторингу.

Перевагою даного критерію є його висока надійність та простота інтерпретації.

Правило WE-4 використовується для виявлення зміщення середнього значення процесу. Критерій вважається порушеним, якщо вісім послідовних точок знаходяться по один бік від центральної лінії:

$$p_{i-k} > CL, \quad k = 0, \dots, 7, \quad (2.18)$$

або

$$p_{i-k} < CL, \quad k = 0, \dots, 7. \quad (2.19)$$

Для реалізації цього правила система підтримує буфер останніх восьми значень р-карти.

Після появи нової точки виконується:

1. перевірка розташування всіх восьми точок;
2. визначення їх відносного положення щодо центральної лінії;
3. формування події порушення у випадку виконання критерію.

Застосування правила WE-4 дозволяє виявляти ситуації, коли процес починає працювати зі зміщеним середнім значенням, навіть якщо жодна точка ще не вийшла за контрольні межі.

Для виробничих процесів такий тип відхилень є особливо небезпечним, оскільки часто свідчить про систематичні зміни технологічного режиму.

Для виявлення поступового погіршення якості реалізовано правило тренду Nelson.

У межах даної роботи порушення фіксується у випадку наявності шести послідовних точок, що утворюють монотонно зростаючу або спадну послідовність:

$$p_{i-5} < p_{i-4} < p_{i-3} < p_{i-2} < p_{i-1} < p_i, \quad (2.20)$$

або

$$p_{i-5} > p_{i-4} > p_{i-3} > p_{i-2} > p_{i-1} > p_i. \quad (2.21)$$

Для перевірки правила використовується ковзне вікно із шести останніх значень частки браку.

Поява тренду може свідчити про:

- поступове погіршення роботи обладнання;
- накопичення похибок налаштування;
- зміну властивостей заготовок;
- деградацію системи контролю.

На відміну від правила WE-1, критерій тренду дозволяє виявляти проблеми ще до появи статистично значущого зростання рівня браку.

У разі спрацювання будь-якого правила система формує структурований запис про подію.

До складу запису входять:

- дата та час спрацювання;
- тип правила;
- значення показника якості;
- текстове пояснення;
- рівень важливості.

					КНУ КРБ.174.26.06.02.ПЗ	Арк.
						61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Структура повідомлення має вигляд:

```
{
  "timestamp": "2025-05-12T10:40:00Z",
  "rule": "WE-4",
  "severity": "warning",
  "value": 0.081,
  "message": "8 послідовних точок вище центральної лінії"
}
```

Усі події зберігаються в колекції `spcAlarms`, що дозволяє аналізувати історію порушень та виконувати подальші дослідження причин нестабільності процесу.

Розроблені алгоритми реалізовані як окремий функціональний модуль у складі SPC-потoku Node-RED (рис. 2.4).

Вхідними даними для модуля є результати розрахунку p -карти:

- поточне значення p_i ;
- центральна лінія CL ;
- верхня контрольна межа UCL_i ;
- нижня контрольна межа LCL_i .

Результатом роботи модуля є:

- перелік активних порушень;
- оновлений статус процесу;
- повідомлення оператору;
- записи для MongoDB.

Такий підхід забезпечує незалежність логіки статистичного аналізу від інших компонентів системи та спрощує подальше розширення набору критеріїв контролю.

Отже, розроблено алгоритми автоматичного виявлення порушень статистичної стабільності виробничого процесу на основі правил Western Electric та Nelson. Реалізовано критерії виходу показника за контрольні межі, зміщення процесу відносно центральної лінії та виявлення монотонних трендів.

					КНУ КРБ.174.26.06.02.ПЗ	Арк.
						62
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Перевірка статистичної стабільності процесу

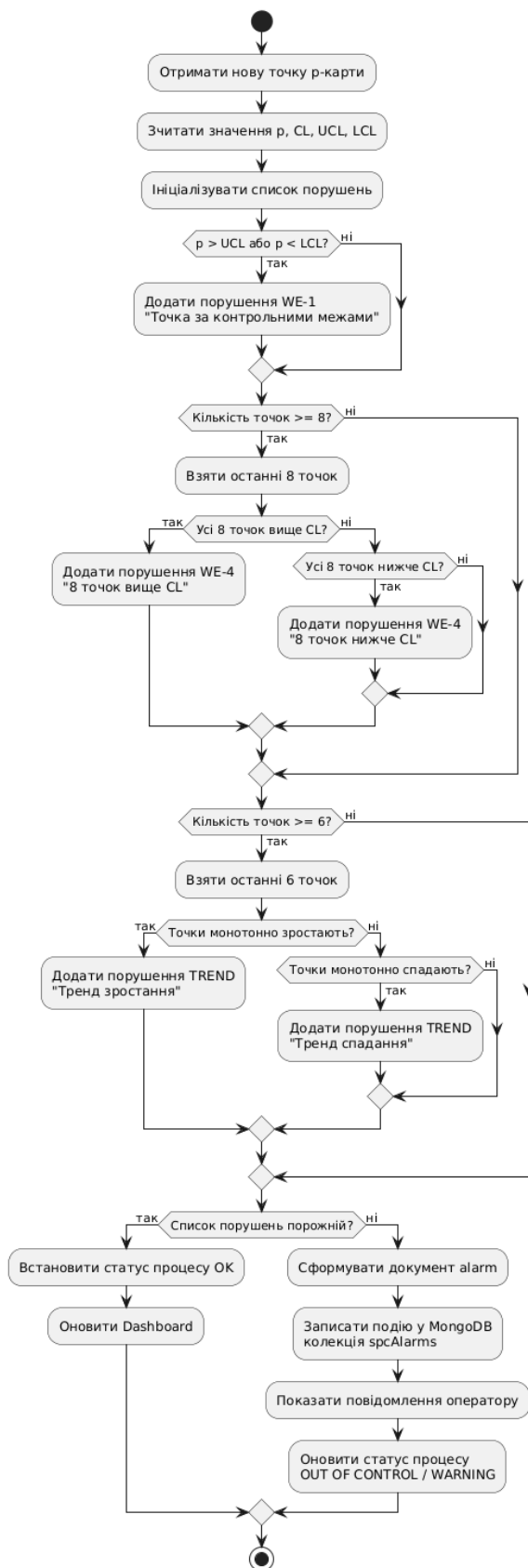


Рисунок 2.4 – UML Activity Diagram алгоритму перевірки статистичної стабільності процесу

Запропоновані алгоритми інтегровано до архітектури системи моніторингу якості та забезпечують автоматичне формування повідомлень про відхилення у роботі виробничої лінії.

2.5 Реалізація системи моніторингу у середовищі Node-RED

Реалізацію системи моніторингу якості виробничої лінії виконано у середовищі Node-RED, яке використовується як платформа промислової інтеграції даних, маршрутизації повідомлень та побудови веб-інтерфейсів. Вибір Node-RED обумовлений його підтримкою подієво-орієнтованої моделі обробки даних, можливістю роботи з протоколом MQTT, інтеграцією з базами даних та зручністю реалізації алгоритмів обробки виробничої інформації за допомогою функціональних вузлів JavaScript.

Розроблена система реалізована у вигляді окремого потоку Node-RED, що забезпечує ізоляцію SPC-модуля від існуючих потоків керування та моніторингу стенда. Такий підхід дозволяє використовувати наявні джерела виробничих даних без втручання у логіку керування виробничою лінією. SPC-потік не виконує запису у програмовані логічні контролери та не змінює стан виконавчих механізмів, а функціонує як аналітичний модуль спостереження.

Функціонально потік моніторингу якості поділено на декілька логічних блоків:

- блок прийому вхідних даних;
- блок обчислення приростів лічильників;
- блок формування статистичних часових вікон;
- блок розрахунку р-карти;
- блок перевірки правил статистичної стабільності;
- блок запису результатів до бази даних;
- блок візуалізації показників на Dashboard.

Першим етапом роботи системи є отримання повідомлень від MQTT-брокера. Для цього у Node-RED використовується вузол mqtt in, налаштований на підписку на тему Slide (рис. 2.5).

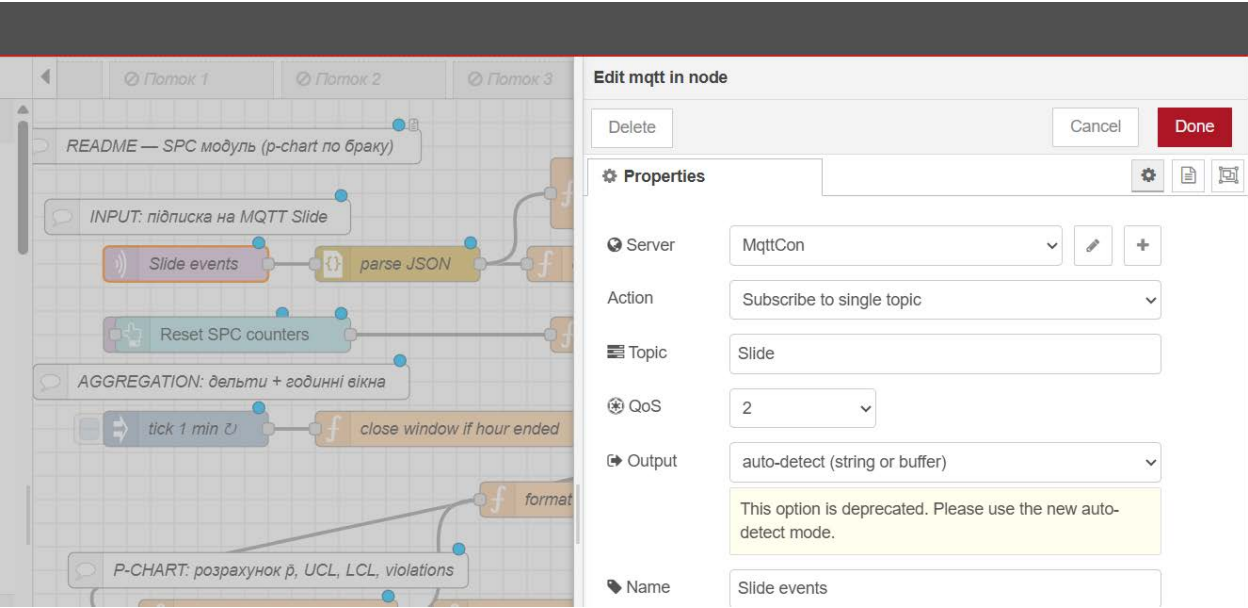


Рисунок 2.5 – Налаштування вузла mqtt in для читання даних від MQTT-брокера

Повідомлення, що надходять у цю тему, містять результати роботи модуля комп'ютерного зору та мають JSON-структуру з полями часу формування повідомлення, кількості бракованих деталей та кількості придатних деталей.

Після отримання повідомлення воно передається до вузла json, який виконує перетворення текстового JSON-повідомлення у внутрішній об'єкт JavaScript (рис. 2.6). Це необхідно для подальшої обробки даних у функціональних вузлах Node-RED.

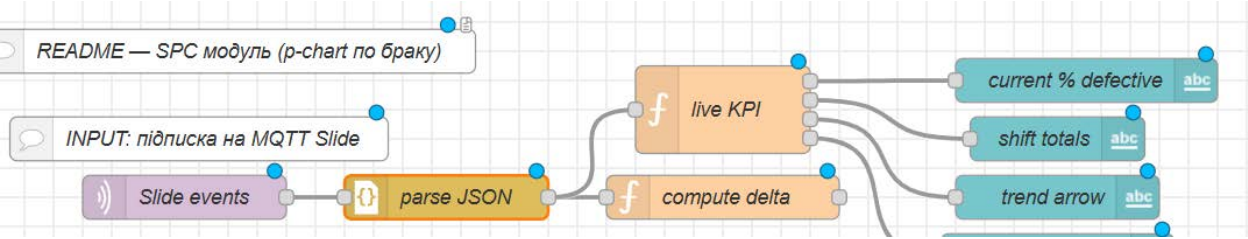


Рисунок 2.6 – Частина потоку для читання та перетворення даних від модуля комп'ютерного зору

Таким чином, на виході блоку прийому формується структуроване повідомлення, яке містить актуальні значення накопичувальних лічильників Slide1 та Slide2.

Оскільки вхідні дані представлені накопичувальними значеннями, для статистичного аналізу необхідно визначати приріст кількості деталей між двома послідовними повідомленнями.

Для цього використовується функціональний вузол compute delta (рис. 2.7), який зберігає попередні значення лічильників у глобальному контексті Node-RED та порівнює їх з поточними значеннями.

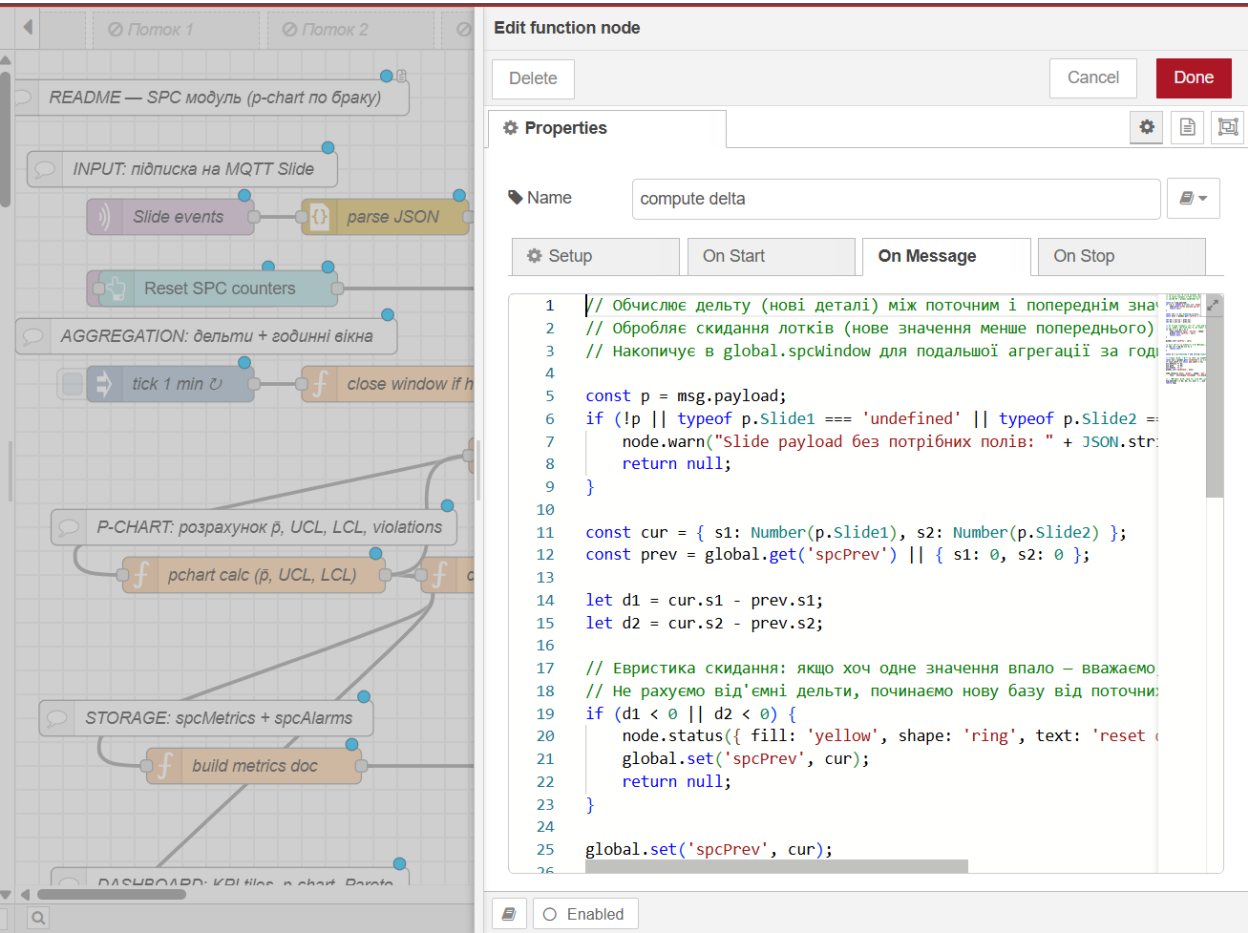


Рисунок 2.7 – Налаштування вузла function для збереження попередніх значень лічильників у глобальному контексті та порівняння із поточними значеннями

Нижче наведено код реалізації даної функції:

```
// Обчислює дельту (нові деталі) між поточним і попереднім значеннями
лічильників. Обробляє скидання лотків (нове значення менше попереднього) як
"лоток очищено". // Накопичує в global.spcWindow для подальшої агрегації за
годинним вікном.

const p = msg.payload;
if (!p || typeof p.Slide1 === 'undefined' || typeof p.Slide2 === 'undefined') {
  node.warn("Slide payload без потрібних полів: " + JSON.stringify(p));
  return null;
}
const cur = { s1: Number(p.Slide1), s2: Number(p.Slide2) };
const prev = global.get('spcPrev') || { s1: 0, s2: 0 };

let d1 = cur.s1 - prev.s1;
let d2 = cur.s2 - prev.s2;

// Евристика скидання: якщо хоч одне значення впало – вважаємо, що оператор
очистив лотки.
// Не рахуємо від'ємні дельти, починаємо нову базу від поточних значень.
if (d1 < 0 || d2 < 0) {
  node.status({ fill: 'yellow', shape: 'ring', text: 'reset detected' });
  global.set('spcPrev', cur);
  return null;
}

global.set('spcPrev', cur);

// Якщо нічого не змінилося – пропускаємо, не засмічуємо буфер
if (d1 === 0 && d2 === 0) {
  return null;
}
const ts = p.Timestamp ? new Date(p.Timestamp).getTime() : Date.now();

// Додаємо подію в поточне вікно агрегації
const win = global.get('spcWindow') || { start: null, defects: 0, good: 0,
events: 0 };
if (win.start === null) win.start = ts;
win.defects += d1;
win.good    += d2;
win.events  += 1;
global.set('spcWindow', win);

node.status({ fill: 'green', shape: 'dot',
  text: `Δbad=${d1} Δok=${d2} win:${win.defects}/${win.defects+win.good}` });

// Пропускаємо подію далі для live KPI (необов'язково)
msg.payload = { d1, d2, ts, win: { ...win } };
return msg;
```

					КНУ КРБ.174.26.06.02.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		67

У разі нормальної роботи системи прирости визначаються як різниця між поточними та попередніми значеннями лічильників. Якщо поточне значення одного з лічильників менше за попереднє, така ситуація інтерпретується як скидання лотків або обнулення лічильників. У цьому випадку повідомлення не використовується для накопичення статистики, а нові значення приймаються як базові.

Такий підхід дозволяє уникнути некоректного врахування від’ємних приростів та забезпечує стійкість алгоритму до ручного скидання накопичувальних лотків оператором.

У результаті роботи вузла формується повідомлення, що містить кількість нових бракованих та придатних деталей за поточний інтервал між повідомленнями.

Після обчислення приростів дані накопичуються у межах поточного статистичного вікна. Для цього у глобальному контексті Node-RED використовується структура, яка містить:

- час початку вікна;
- кількість бракованих деталей;
- кількість придатних деталей;
- кількість отриманих подій.

Формування підгруп за часовим принципом дозволяє адаптувати систему до нерівномірної роботи навчально-виробничого стенда. У реальному режимі роботи тривалість вікна прийнято рівною одній годині, що забезпечує достатній обсяг статистичних даних для побудови р-карти.

Для контролю завершення часового вікна використовується вузол inject, який періодично активує перевірку стану поточного вікна (рис. 2.8). Якщо з моменту початку вікна минув заданий інтервал часу, система формує статистичну підгрупу.

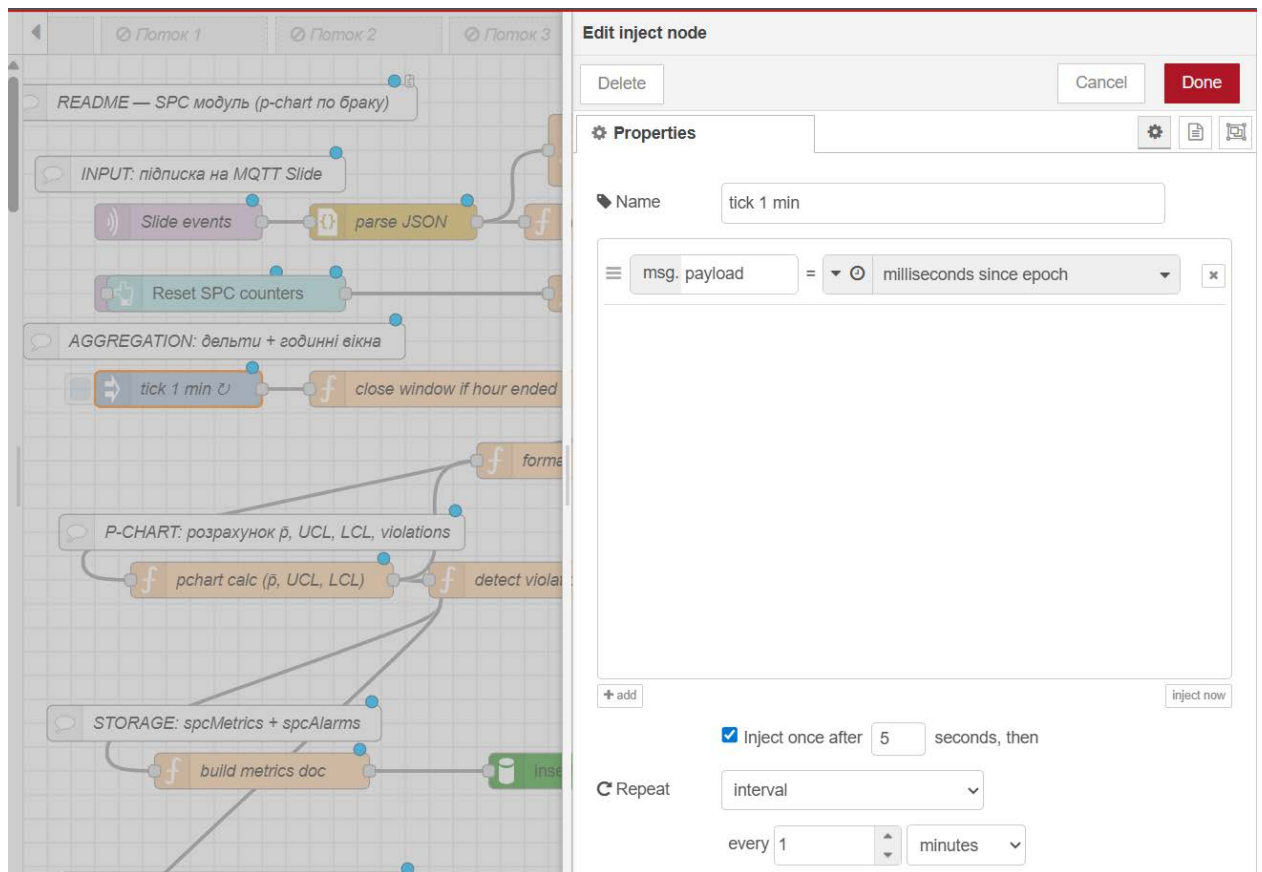


Рисунок 2.8 – Налаштування вузла inject для періодичної перевірки стану поточного вікна

До складу підгрупи входять:

- час початку інтервалу;
- час завершення інтервалу;
- кількість бракованих деталей;
- кількість придатних деталей;
- загальна кількість деталей;
- частка браку.

Після формування підгрупи вона додається до історії статистичних спостережень, а поточне вікно ініціалізується заново.

Після формування нової статистичної підгрупи виконується перерахунок параметрів р-карти Шухарта. Для цього використовується функціональний вузол pchart calc (рис. 2.9).

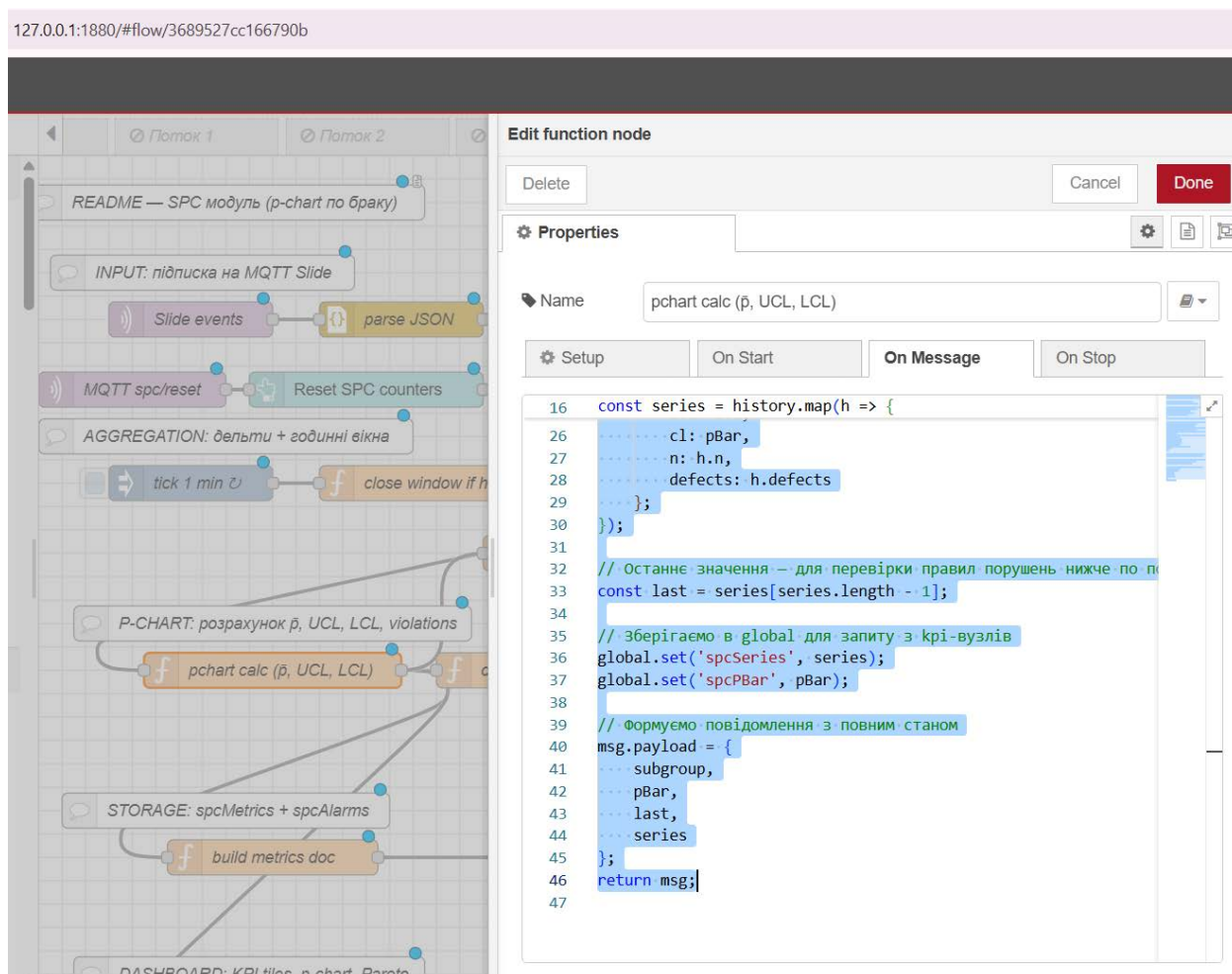


Рисунок 2.9 – Налаштування вузла function для розрахунку параметрів р-карти Шухарта

На першому етапі вузол обчислює середньозважену частку браку за всією накопиченою історією підгруп. Це значення використовується як центральна лінія контрольної карти.

Далі для кожної точки історії виконується розрахунок стандартного відхилення частки браку з урахуванням розміру відповідної підгрупи. Оскільки обсяг підгруп може змінюватися, контрольні межі обчислюються індивідуально для кожної точки.

Нижче наведено код реалізації функції pchart calc:

```
// Перерахунок контрольних меж за всією наявною історією і формування series для графіка.  
// Бере на вхід msg.payload = закрита підгрупа, msg.history = масив усіх підгруп.  
  
const subgroup = msg.payload;  
const history = msg.history || [];  
  
//  $\bar{p}$  – середньозважена частка браку по всіх підгрупах  
let totalDefects = 0, totalN = 0;  
for (const h of history) {  
    totalDefects += h.defects;  
    totalN      += h.n;  
}  
const pBar = totalN > 0 ? totalDefects / totalN : 0;  
  
// UCL/LCL для p-карти зі змінним розміром підгрупи – рахуємо індивідуально на кожну точку  
const series = history.map(h => {  
    const n = Math.max(h.n, 1);  
    const sigma = Math.sqrt(pBar * (1 - pBar) / n);  
    const ucl = pBar + 3 * sigma;  
    const lcl = Math.max(0, pBar - 3 * sigma);  
    return {  
        ts: new Date(h.timestamp).getTime(),  
        p: h.p,  
        ucl: ucl,  
        lcl: lcl,  
        cl: pBar,  
        n: h.n,  
        defects: h.defects  
    };  
});  
  
// Останнє значення – для перевірки правил порушень нижче по потоку  
const last = series[series.length - 1];  
  
// Зберігаємо в global для запиту з крі-вузлів  
global.set('spcSeries', series);  
global.set('spcPBar', pBar);  
  
// Формуємо повідомлення з повним станом  
msg.payload = {  
    subgroup,  
    pBar,  
    last,  
    series  
};  
return msg;
```

					КНУ КРБ.174.26.06.02.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		71

Результатом роботи вузла є масив точок контрольної карти, кожна з яких містить:

- часову мітку;
- значення частки браку;
- центральну лінію;
- верхню контрольну межу;
- нижню контрольну межу;
- кількість виробів у підгрупі;
- кількість бракованих виробів.

Сформований масив використовується для побудови графіка р-карти на інформаційній панелі оператора та передається до блоку перевірки статистичних правил.

Блок перевірки статистичної стабільності реалізовано у функціональному вузлі detect violations (рис. 2.10).

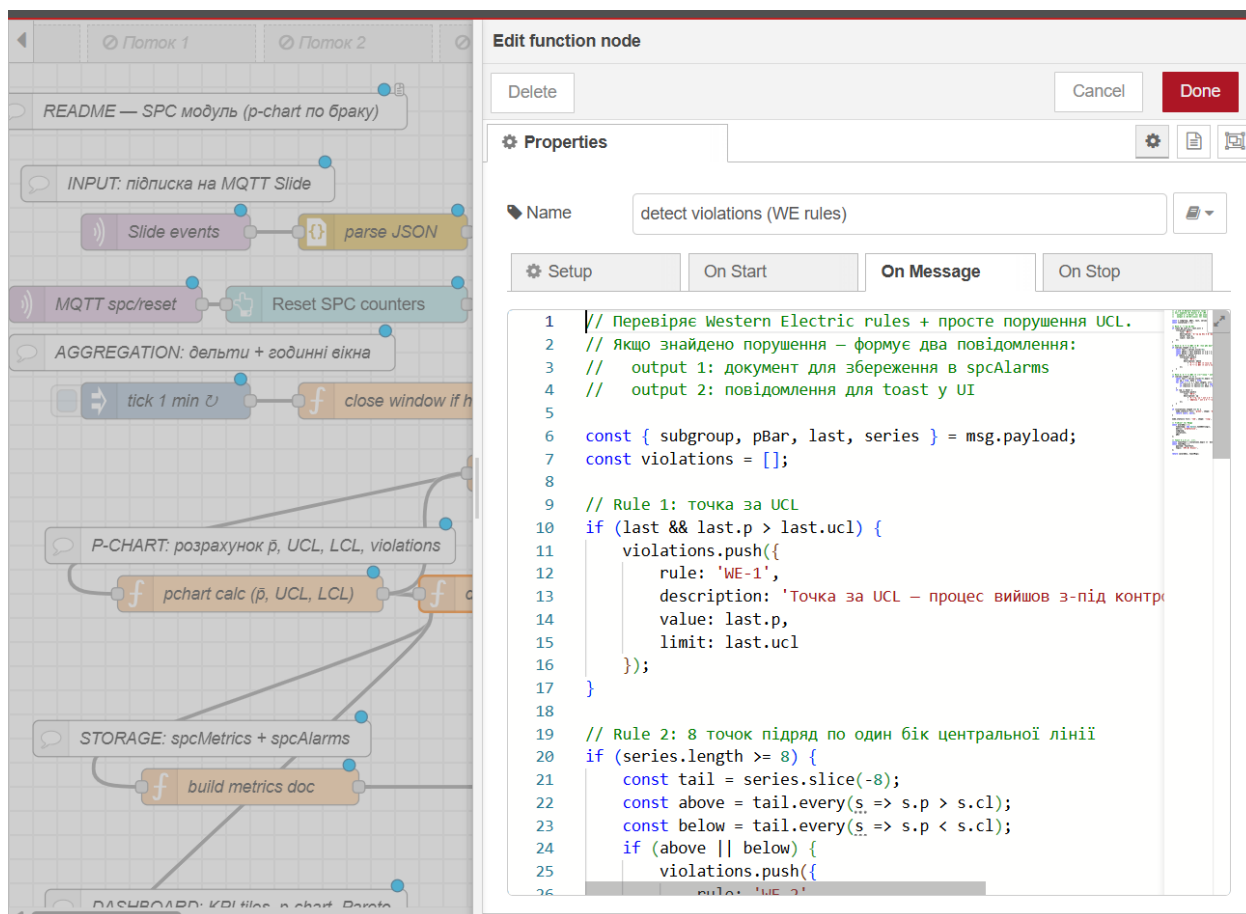


Рисунок 2.10 – Вузол detect violations для перевірки статистичної стабільності

Даний вузол отримує результати розрахунку р-карти та виконує аналіз останніх точок контрольної карти.

У межах роботи реалізовано перевірку трьох критеріїв:

- вихід поточної точки за верхню контрольну межу;
- розташування восьми останніх точок по один бік центральної лінії;
- наявність монотонного тренду за останніми шістьма точками.

Якщо жодне правило не спрацьовує, система оновлює поточний стан процесу як нормальний. Якщо виявлено порушення, формується структурований документ події, який передається до блоку збереження та до інтерфейсу оператора.

Важливою особливістю реалізації є використання двох виходів функціонального вузла: один вихід призначений для запису події у базу даних, інший – для відображення повідомлення на Dashboard. Це дозволяє розділити потік даних для зберігання та потік оперативного інформування оператора.

Для довготривалого зберігання результатів статистичного аналізу використовується MongoDB. Запис виконується за допомогою вузлів mongodb4.

У системі використовуються дві окремі колекції:

- spcMetrics – для зберігання статистичних показників сформованих підгруп (рис. 2.11);
- spcAlarms – для зберігання подій порушення статистичної стабільності (рис. 2.12).

Перед записом статистичних показників формується документ, що містить часові межі підгрупи, кількість придатних і бракованих деталей, загальну кількість виробів, частку браку, центральну лінію та контрольні межі.

Події порушень зберігаються окремо, що дозволяє вести журнал статистичних відхилень та надалі аналізувати причини нестабільності виробничого процесу.

					КНУ КРБ.174.26.06.02.ПЗ	Арк.
						73
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

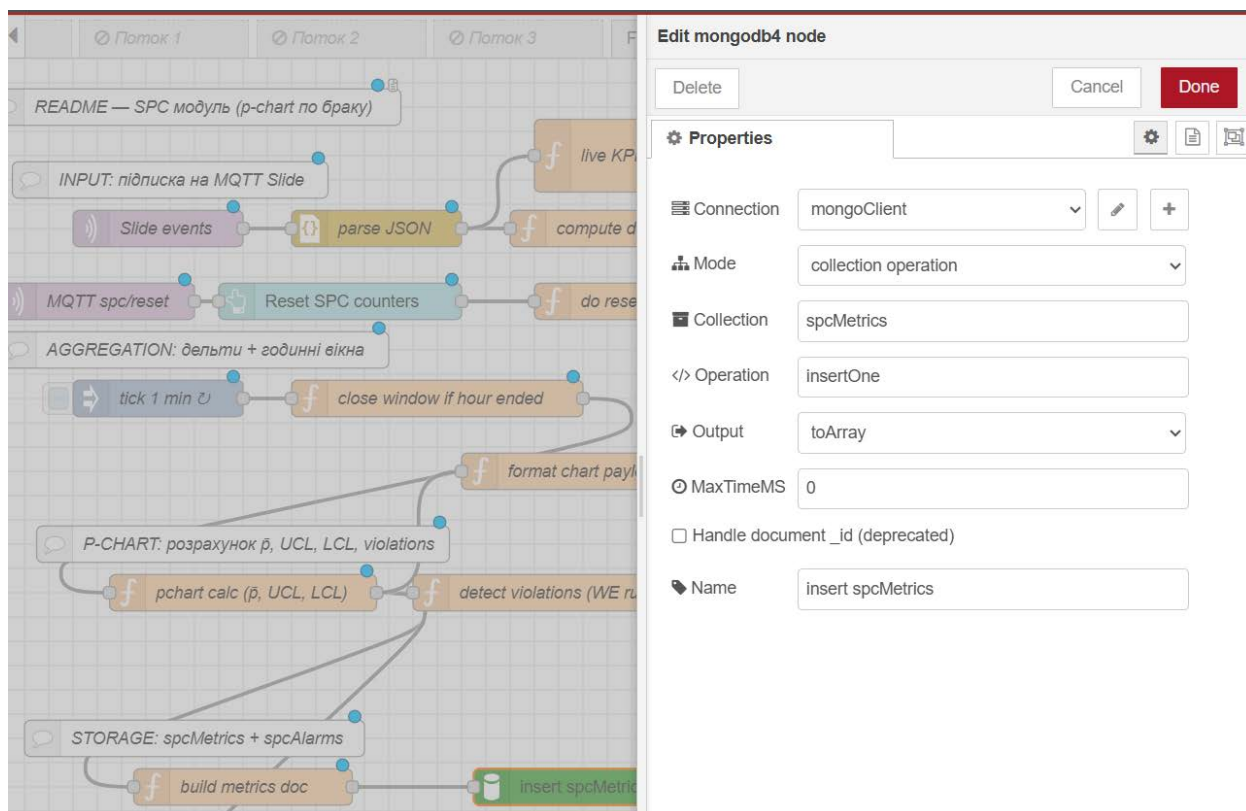


Рисунок 2.11 – Налаштування вузла mongodb4 для зберігання статистичних показників сформованих підгруп

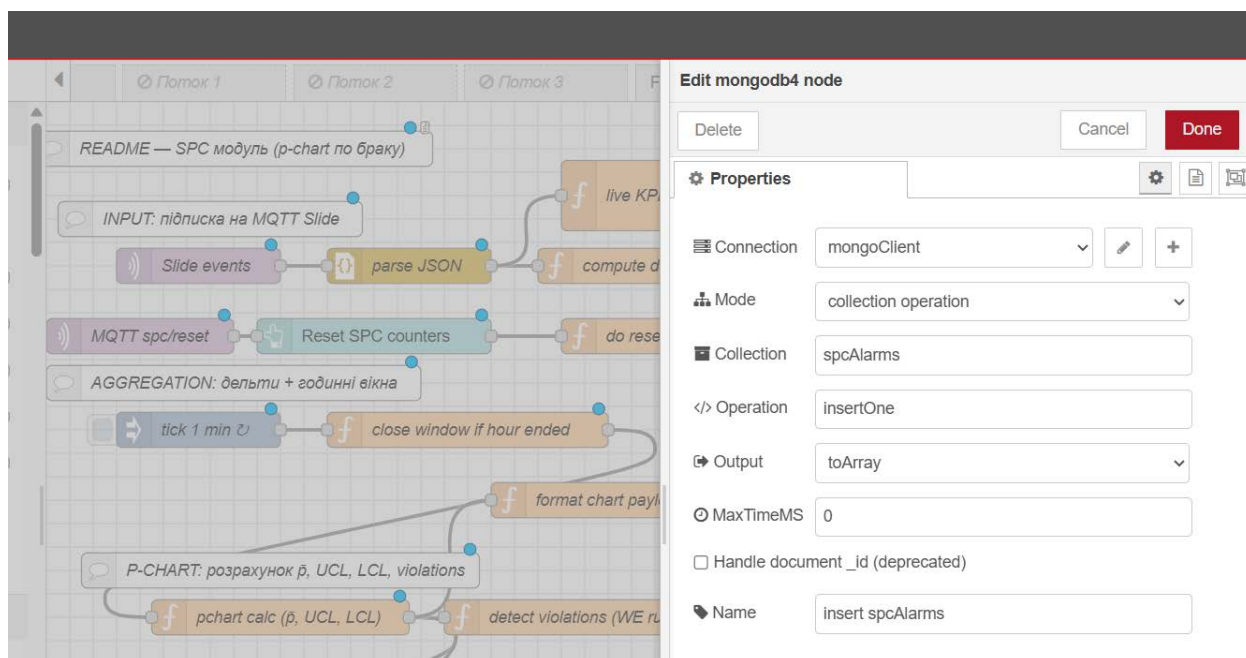


Рисунок 2.12 – Налаштування вузла mongodb4 для зберігання подій порушення статистичної стабільності

Для представлення результатів роботи системи оператору використовується Node-RED Dashboard. У межах розробленої системи створено окрему вкладку Quality, на якій розміщуються основні елементи моніторингу.

Інтерфейс містить:

- KPI-показник поточної частки браку;
- показник частки браку за останні часові інтервали;
- індикатор тренду;
- індикатор поточного статусу процесу;
- графік р-карти;
- діаграму розподілу браку за годинами;
- повідомлення про статистичні порушення.

Графік р-карти дозволяє оператору візуально оцінити зміну частки браку в часі та порівняти її з контрольними межами. Повідомлення про порушення відображаються у вигляді спливаючих повідомлень, що забезпечує оперативне інформування оператора про потенційні проблеми у виробничому процесі.

Оскільки частина проміжних даних зберігається у глобальному контексті Node-RED, після перезапуску середовища необхідно відновити історію статистичних спостережень.

Для цього у системі передбачено окремий стартовий блок, який після запуску Node-RED виконує запит до колекції spcMetrics, отримує останні записи статистичних підгруп та відновлює внутрішній стан р-карти (рис. 2.13).

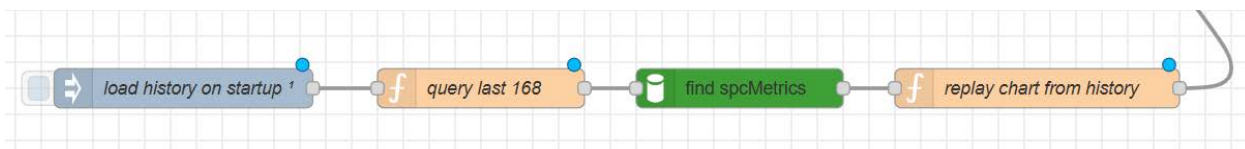


Рисунок 2.13 – Частина потоку для відновлення внутрішнього стану р-карти після запуску системи

Завдяки цьому інформаційна панель не починає роботу з порожнього стану після перезапуску системи, а відображає накопичену історію спостережень.

Загальний вигляд потоку для реалізації статистичного моніторингу наведено на рис. 2.14.

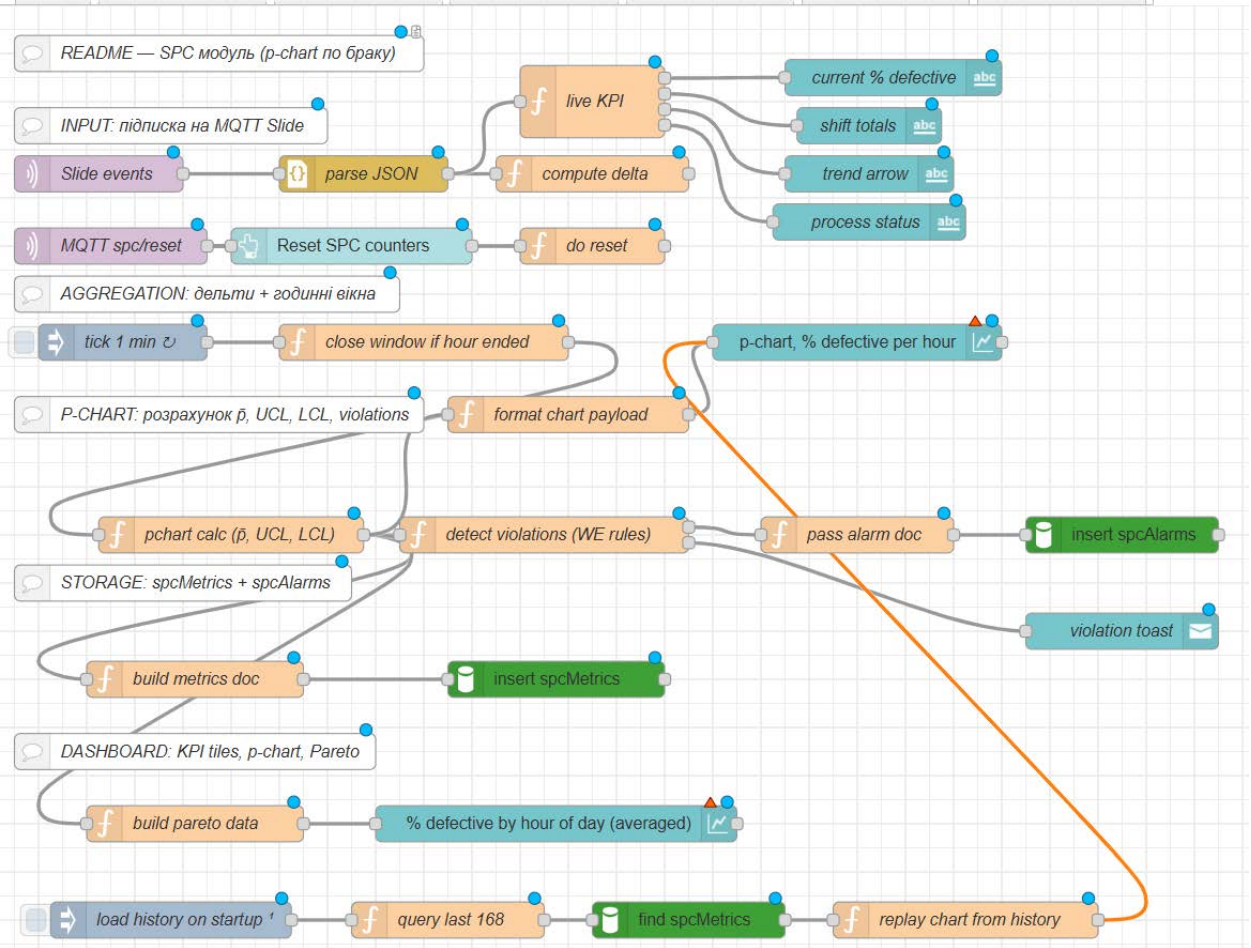


Рисунок 2.14 – Вигляд потоку повної реалізації моніторингу якості виробничої лінії на базі стенда FESTO серії MPS 400

Отже, розглянуто реалізацію системи моніторингу якості виробничої лінії у середовищі Node-RED. Описано структуру SPC-потокy, призначення його основних функціональних блоків, порядок прийому MQTT-повідомлень, обчислення приростів лічильників, формування статистичних підгруп, розрахунок р-карти, перевірку правил нестабільності, збереження результатів у MongoDB та візуалізацію показників на Dashboard.

Розроблена реалізація забезпечує автоматизоване перетворення виробничих подій у статистичні показники якості та дозволяє здійснювати моніторинг стабільності виробничого процесу в режимі реального часу.

2.6 Організація зберігання статистичних даних у MongoDB

Ефективне функціонування системи моніторингу якості потребує накопичення історичних статистичних даних, результатів аналізу виробничого процесу та журналу подій порушення статистичної стабільності. Збереження таких даних необхідне для побудови контрольних карт, аналізу тенденцій зміни показників якості та подальшого дослідження причин виникнення дефектів.

Для реалізації підсистеми зберігання даних було обрано систему керування базами даних MongoDB. Вибір даної платформи обумовлений її документно-орієнтованою моделлю даних, високою продуктивністю під час роботи з часовими рядами та наявністю готових засобів інтеграції із середовищем Node-RED.

На відміну від реляційних баз даних, MongoDB дозволяє зберігати документи зі змінною структурою без необхідності жорсткого визначення схеми таблиць. Такий підхід є особливо зручним для систем Industrial IoT, де структура даних може змінюватися в процесі розвитку інформаційної системи.

До основних переваг використання MongoDB належать:

- підтримка JSON-подібного формату документів;
- висока швидкість операцій запису;
- зручна інтеграція з Node-RED;
- масштабованість;
- підтримка індексування часових полів;
- ефективне зберігання телеметричних даних.

Таким чином, MongoDB повністю відповідає вимогам системи статистичного моніторингу виробничої лінії.

					<i>КНУ КРБ.174.26.06.02.ПЗ</i>	Арк.
						77
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У межах розробленої системи використовується окрема база даних `quality_monitoring`, що містить дві основні колекції (табл. 2.1):

- `spcMetrics`;
- `spcAlarms`.

Таблиця 2.1 – Структура бази даних системи SPC-моніторингу

Колекція	Призначення
<code>spcMetrics</code>	Зберігання статистичних підгруп та параметрів р-карти
<code>spcAlarms</code>	Зберігання подій порушення статистичної стабільності

Такий підхід забезпечує логічне розділення статистичних показників та журналу подій.

Основною колекцією системи є `spcMetrics`, у якій зберігаються результати статистичної обробки кожної сформованої підгрупи.

Типовий документ має структуру:

```
{
  "_id": ObjectId("..."),
  "windowStart": "2025-05-12T10:00:00Z",
  "windowEnd": "2025-05-12T11:00:00Z",
  "goodCount": 112,
  "rejectCount": 4,
  "totalCount": 116,
  "p": 0.0345,
  "CL": 0.0281,
  "UCL": 0.0742,
  "LCL": 0.0000,
  "createdAt": "2025-05-12T11:00:01Z"
}
```

Кожний документ містить:

- часові межі підгрупи;
- кількість придатних виробів;
- кількість бракованих виробів;
- загальну кількість виробів;
- частку браку;
- параметри р-карти.

Поле `createdAt` використовується для сортування записів та формування історичних графіків.

Кожен документ відповідає одній статистичній підгрупі та одній точці р-карти.

Для накопичення інформації про порушення статистичної стабільності використовується колекція `sprAlarms`. До неї записуються всі випадки спрацювання правил Western Electric та Nelson.

Структура документа має вигляд:

```
{
  "_id": ObjectId("..."),
  "timestamp": "2025-05-12T11:00:00Z",
  "rule": "WE-4",
  "severity": "warning",
  "value": 0.081,
  "message": "8 послідовних точок вище центральної лінії",
  "acknowledged": false
}
```

Поле `acknowledged` використовується для позначення подій, які були переглянуті оператором.

Наявність окремої колекції дозволяє:

- вести історію статистичних порушень;
- аналізувати частоту виникнення відхилень;
- визначати найбільш характерні причини нестабільності процесу;

					КНУ КРБ.174.26.06.02.ПЗ	Арк.
						79
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- формувати звітність за результатами роботи виробничої лінії.

Для забезпечення високої швидкодії системи використовуються індекси MongoDB.

Основними індексованими полями є:

1. Для колекції spcMetrics: windowEnd, createdAt.
2. Для колекції spcAlarms: timestamp, rule, acknowledged.

Індексування дозволяє прискорити:

- побудову часових графіків;
- формування статистичних звітів;
- пошук подій за часовим інтервалом;
- фільтрацію активних порушень.

Оскільки система працює у безперервному режимі та накопичує статистичні дані протягом тривалого часу, важливим питанням є управління обсягом інформації.

У розробленій системі передбачено зберігання повної історії статистичних підгруп та подій порушення стабільності процесу.

При подальшому розвитку системи може бути реалізовано:

- автоматичне архівування старих записів;
- агрегування історичних даних за добу, тиждень або місяць;
- перенесення архівів до окремої бази даних.

Такий підхід дозволить забезпечити стабільну продуктивність системи навіть при багаторічній експлуатації.

Обмін даними між Node-RED та MongoDB реалізовано за допомогою вузлів mongodb4.

У процесі роботи системи виконуються такі операції:

- запис статистичних підгруп до колекції spcMetrics;
- запис подій порушень до колекції spcAlarms;
- зчитування історичних даних для побудови р-карти;
- відновлення стану системи після перезапуску Node-RED.

Використання готових вузлів MongoDB дозволило уникнути створення окремого серверного програмного забезпечення та реалізувати повний цикл роботи із даними безпосередньо у середовищі Node-RED.

Отже, розглянуто організацію підсистеми зберігання статистичних даних на базі MongoDB. Обґрунтовано вибір документно-орієнтованої бази даних для задач моніторингу якості виробничої лінії. Розроблено структуру колекцій `sprMetrics` та `sprAlarms`, визначено моделі документів, механізми індексування та принципи взаємодії із середовищем Node-RED. Запропонована структура забезпечує надійне зберігання статистичних показників та створює основу для побудови інформаційної панелі оператора, що розглядається у наступному підрозділі.

2.7 Розробка інформаційної панелі оператора

Ефективність систем статистичного моніторингу значною мірою залежить не лише від правильності реалізації алгоритмів аналізу даних, але й від способу представлення результатів оператору. Навіть найскладніші аналітичні алгоритми не забезпечують практичної користі без наявності зручних засобів візуалізації та інтерпретації результатів.

У межах розробленої системи для представлення результатів статистичного контролю процесу створено спеціалізовану інформаційну панель оператора (Dashboard), реалізовану засобами Node-RED Dashboard.

Основними завданнями інформаційної панелі є:

- відображення поточного стану виробничого процесу;
- візуалізація статистичних показників якості;
- відображення контрольної карти Шухарта;
- інформування про порушення статистичної стабільності;
- надання оператору історичних даних для аналізу.

Інтерфейс розроблено відповідно до принципів промислових HMI/SCADA-систем, де основна увага приділяється оперативному виявленню відхилень та мінімізації часу реакції персоналу.

Інформаційну панель організовано у вигляді окремої вкладки Quality Monitoring, що містить декілька функціональних областей.

Функціонально інтерфейс складається з таких блоків:

- блок ключових показників якості;
- блок поточного стану процесу;
- блок контрольної карти Шухарта;
- блок статистики виробництва;
- блок повідомлень про порушення;
- блок історичних подій.

Такий поділ дозволяє оператору швидко оцінити поточний стан виробничої системи та отримати детальну інформацію у разі виникнення відхилень.

У верхній частині інформаційної панелі розміщено набір KPI-віджетів, що відображають основні показники виробничого процесу (рис. 2.15).

До складу ключових показників входять:

- загальна кількість виготовлених виробів;
- кількість придатної продукції;
- кількість бракованої продукції;
- поточна частка браку;
- середнє значення частки браку.

Використання KPI-карток дозволяє оператору отримувати узагальнену інформацію про стан виробництва без необхідності аналізу графіків та таблиць.

Для підвищення наочності значення показників супроводжуються кольоровою індикацією відповідно до поточного рівня якості виробничого процесу.

					<i>КНУ КРБ.174.26.06.02.ПЗ</i>	Арк.
						82
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

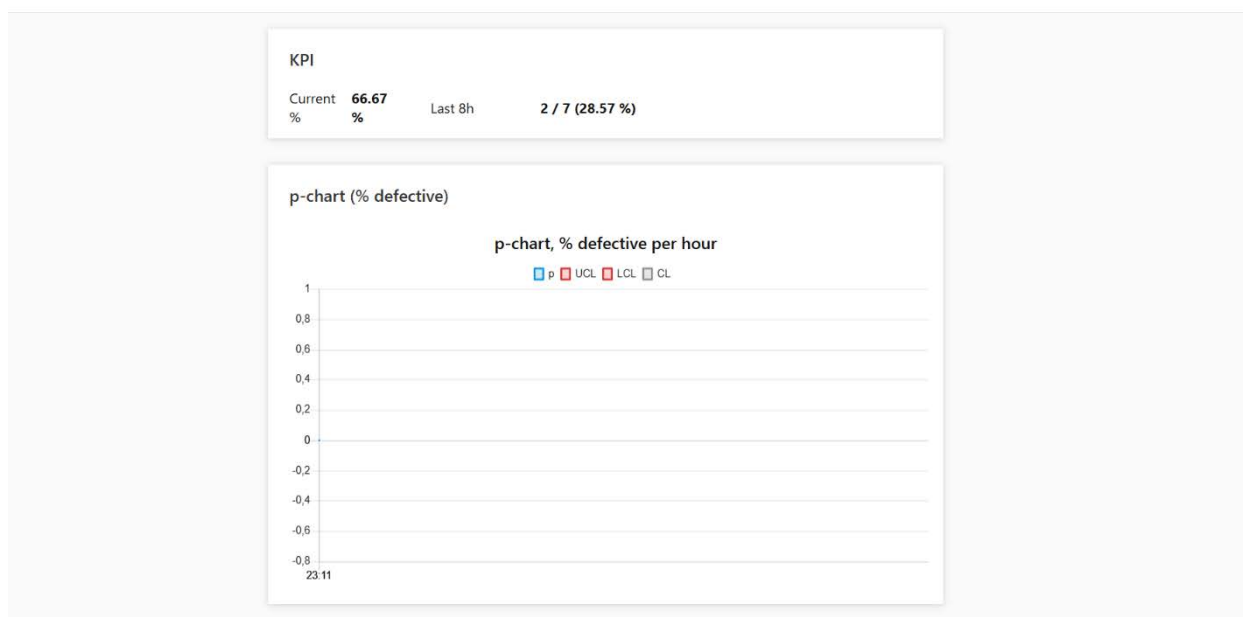


Рисунок 2.15 – Вигляд інформаційної панелі Quality Monitoring для моніторингу якості виробничої лінії на базі стенда FESTO серії MPS 400

Центральним елементом інформаційної панелі є графік р-карти Шухарта.

На графіку одночасно відображаються:

- фактичні значення частки браку;
- центральна лінія процесу;
- верхня контрольна межа;
- нижня контрольна межа.

Кожна точка графіка відповідає окремій статистичній підгрупі, сформованій у межах визначеного часового інтервалу.

Відображення контрольної карти дозволяє оператору:

- оцінювати стабільність процесу;
- виявляти зміщення характеристик якості;
- спостерігати довгострокові тенденції;
- аналізувати ефективність коригувальних дій.

Особливістю реалізованої системи є автоматичне оновлення графіка після завершення кожного статистичного вікна, що забезпечує моніторинг процесу в режимі реального часу.

Для оперативної оцінки стану виробничого процесу на інформаційній панелі реалізовано індикатор статистичного статусу.

Індикатор може перебувати в одному з трьох станів:

1. Нормальний режим (In Control): процес перебуває під статистичним контролем, активні порушення відсутні.
2. Попередження (Warning): виявлено порушення правил WE-4 або правила тренду Nelson, що може свідчити про початок деградації процесу.
3. Порушення контролю (Out of Control): зафіксовано вихід точки за контрольні межі або одночасне спрацювання декількох критеріїв нестабільності.

Використання інтегрального статусу дозволяє швидко оцінювати поточний стан виробничої системи без необхідності аналізу окремих показників.

Для інформування оператора про відхилення у роботі виробничої лінії реалізовано підсистему повідомлень.

У разі спрацювання одного з правил статистичного контролю система автоматично формує повідомлення, що містить:

- дату та час події;
- тип правила;
- значення контролюваного показника;
- текстовий опис причини спрацювання.

Приклади повідомлень:

Час	Тип	Опис
12.05.2026 11:00	WE-1	Точка вийшла за верхню контрольну межу
12.05.2026 14:00	WE-4	Вісім послідовних точок вище центральної лінії
12.05.2026 16:00	TREND	Виявлено висхідний тренд частки браку

Такі повідомлення дозволяють оператору швидко визначити характер відхилення та прийняти відповідні рішення щодо подальших дій.

Окрім оперативних повідомлень, система забезпечує ведення журналу подій статистичного контролю.

Журнал формується на основі колекції spcAlarms та містить повну історію спрацювань правил Western Electric і Nelson.

Наявність історичного журналу дозволяє:

- аналізувати причини нестабільності процесу;
- оцінювати ефективність коригувальних заходів;
- досліджувати повторюваність порушень;
- формувати аналітичну звітність.

У перспективі журнал подій може використовуватися як джерело даних для побудови систем предиктивної аналітики та прогнозування якості виробництва.

Таким чином, було виконано розробку інформаційної панелі оператора системи моніторингу якості виробничої лінії. Визначено структуру Dashboard, описано механізми відображення ключових показників якості, контрольної карти Шухарта, повідомлень про статистичні порушення та журналу подій. Реалізований інтерфейс забезпечує моніторинг виробничого процесу в режимі реального часу та створює зручне середовище для аналізу результатів статистичного контролю.

Висновки до розділу:

У другому розділі виконано проєктування, програмну реалізацію та експериментальну апробацію системи моніторингу якості виробничої лінії на базі навчально-виробничого стенда FESTO MPS 400 із використанням методів статистичного управління процесами.

На основі аналізу існуючої інформаційної інфраструктури стенда розроблено архітектуру системи SPC-моніторингу, інтегровану до наявного цифрового середовища без втручання в алгоритми керування виробничою

					<i>КНУ КРБ.174.26.06.02.ПЗ</i>	Арк.
						85
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

лінією. Запропоноване рішення побудовано відповідно до принципів багаторівневої архітектури Industry 4.0 та включає засоби збору даних, промислові протоколи обміну інформацією, підсистему статистичного аналізу, базу даних та інформаційну панель оператора.

Виконано проєктування інформаційних потоків системи та розроблено модель даних для накопичення статистичних показників якості. Визначено структуру повідомлень, механізми формування статистичних підгруп і моделі зберігання результатів аналізу у базі даних MongoDB. Запропонована організація інформаційних потоків забезпечує автоматичне перетворення виробничих подій у статистичні показники, придатні для подальшого аналізу.

Розроблено алгоритм статистичного контролю процесу на основі р-карти Шухарта, що дозволяє виконувати моніторинг частки бракованої продукції за умов змінного розміру вибірок. Запропоновано механізм формування статистичних підгруп на основі часових інтервалів та алгоритм автоматичного розрахунку центральної лінії процесу і контрольних меж.

Для підвищення ефективності моніторингу реалізовано алгоритми автоматичного виявлення порушень статистичної стабільності виробничого процесу. У складі системи впроваджено правила Western Electric та Nelson, які забезпечують виявлення як різких відхилень показників якості, так і поступових тенденцій погіршення виробничого процесу.

Програмну реалізацію системи виконано у середовищі Node-RED із використанням протоколу MQTT для збору виробничих даних та MongoDB для їх довготривалого зберігання. Розроблено інформаційну панель оператора, яка забезпечує візуалізацію р-карти Шухарта, ключових показників якості, повідомлень про порушення статистичного контролю та журналу подій.

Проведена експериментальна апробація на базі стенда FESTO MPS 400 підтвердила працездатність розробленої системи. У ході експериментів перевірено коректність формування статистичних підгруп, побудови контрольної карти та роботи реалізованих правил контролю. Результати дослідження показали, що система здатна своєчасно виявляти різні типи

					<i>КНУ КРБ.174.26.06.02.ПЗ</i>	Арк.
						86
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

відхилень у роботі виробничої лінії та забезпечує ефективний статистичний моніторинг якості продукції в режимі реального часу.

Отримані результати підтверджують доцільність використання відкритих технологій Industrial Internet of Things для побудови систем статистичного управління процесами та демонструють можливість їх ефективного застосування в навчально-дослідницьких виробничих комплексах, побудованих відповідно до концепції Industry 4.0.

					<i>КНУ КРБ.174.26.06.02.ПЗ</i>	Арк.
						87
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі вирішено актуальне завдання підвищення інформативності систем моніторингу виробничих процесів шляхом впровадження засобів статистичного управління процесами у цифрову інфраструктуру навчально-виробничого стенда FESTO MPS 400. Розроблено систему моніторингу якості виробничої лінії, що забезпечує автоматизований збір, обробку, аналіз та візуалізацію статистичних показників якості продукції в режимі реального часу.

У процесі виконання роботи проведено аналіз сучасних підходів до забезпечення якості продукції в автоматизованих виробничих системах та досліджено особливості застосування методів статистичного управління процесами в умовах цифрового виробництва. Встановлено, що використання контрольних карт Шухарта та правил Western Electric і Nelson дозволяє своєчасно виявляти порушення статистичної стабільності виробничих процесів та забезпечувати перехід від реактивного до превентивного управління якістю.

У ході дослідження виконано аналіз сучасних програмних засобів статистичного контролю процесів і промислової аналітики, а також проведено дослідження навчально-виробничого стенда FESTO MPS 400 як об'єкта впровадження системи статистичного моніторингу. Встановлено, що існуюча інформаційна система стенда забезпечує збір та накопичення виробничих даних, однак не містить засобів автоматизованого аналізу статистичних характеристик процесу, що обумовило необхідність розробки окремого модуля SPC-моніторингу.

У результаті виконання роботи розроблено архітектуру системи моніторингу якості, інтегровану до існуючої цифрової інфраструктури виробничої лінії.

					КНУ КРБ.174.26.06.00.ПЗ						
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		Подковський О. О.			ВИСНОВКИ			Літ.	Арк.	Аркушів	
Перевір.		Рубан С.А.								64	2
								КНУ АКІТР-23ск			
Н. Контр.		Маринич І.А.									
Затверд.		Маринич І.А.									

Запропоноване рішення реалізовано відповідно до принципів Industry 4.0 із використанням відкритих технологій Industrial Internet of Things, протоколу MQTT, середовища Node-RED та документно-орієнтованої бази даних MongoDB.

Розроблено алгоритм статистичного контролю процесу на основі р-карти Шухарта, який забезпечує автоматичний розрахунок частки бракованої продукції, центральної лінії процесу та контрольних меж. Для підвищення ефективності контролю реалізовано алгоритми автоматичного виявлення порушень статистичної стабільності на основі правила виходу за контрольні межі, правила зміщення процесу відносно центральної лінії та правила монотонного тренду.

Програмну реалізацію системи виконано у середовищі Node-RED. Розроблено структуру інформаційних потоків, модель зберігання статистичних даних та інформаційну панель оператора, яка забезпечує відображення ключових показників якості, контрольної карти Шухарта та повідомлень про порушення статистичної стабільності виробничого процесу.

Проведена експериментальна апробація на базі навчально-виробничого стенда FESTO MPS 400 підтвердила працездатність розробленої системи. У процесі випробувань перевірено коректність збору виробничих даних, формування статистичних підгруп, побудови контрольної карти та роботи реалізованих правил статистичного контролю. Отримані результати показали, що система здатна ефективно виявляти як різкі, так і поступові зміни стану виробничого процесу та забезпечує своєчасне інформування оператора про появу ознак нестабільності.

Практична цінність роботи полягає у створенні функціонуючої системи статистичного моніторингу якості, яка може використовуватися під час виконання лабораторних робіт, наукових досліджень та підготовки фахівців у галузі автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій, промислової аналітики та Industrial Internet of Things. Розроблена система також може слугувати основою для подальших досліджень у напрямі впровадження методів

					<i>КНУ КРБ.174.26.06.00.ПЗ</i>	Арк.
						89
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

предиктивної аналітики, машинного навчання та цифрових двійників виробничих систем.

Таким чином, мету кваліфікаційної роботи досягнуто, а поставлені завдання виконано в повному обсязі.

					КНУ КРБ.174.26.06.02.ПЗ	Арк.
						90
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Montgomery D. C. Introduction to Statistical Quality Control. 8th ed. Hoboken : Wiley, 2019. 768 p. URL: http://sirangcoop.com/wp-content/uploads/2023/10/Douglas_C_Montgomery_Introduction_to_statistical_quality_control-2.pdf (дата звернення: 04.06.2026).

2. Hinojosa M., García A., García M., García-Ruiz C. Multivariate control charts for calibration of hydrophones using the Mahalanobis statistic. URL: https://www.researchgate.net/publication/372981906_Multivariate_control_charts_for_calibration_of_hydrophones_using_the_Mahalanobis_statistic (дата звернення: 04.06.2026).

3. Western Electric Company. Statistical Quality Control Handbook. URL: <https://static1.squarespace.com/static/5f0983034219c6086e8100ac/t/5f6a1302d0323e338862e7b7/1600787208299/introduction.pdf> (дата звернення: 04.06.2026).

4. Nelson L. S. The Shewhart Control Chart—Tests for Special Causes // Journal of Quality Technology. 1984. Vol. 16, No. 4. P. 237–239. DOI: 10.1080/00224065.1984.11978921. URL: <https://www.leansixsigmadefinition.com/wp-content/uploads/2023/07/The-Shewhart-Control-Chart-Tests-for-Special-Causes-Lloyd-Nelson-Journal-of-Quality-Technology.pdf> (дата звернення: 04.06.2026).

5. ISO 7870-2:2013. Control charts — Part 2: Shewhart control charts. URL: <https://www.iso.org/standard/69639.html> (дата звернення: 04.06.2026).

6. Festo Didactic. Learning Factory Distribution Pro – Joining and Sorting Inline. URL: https://www.festo.com/at/en/p/learning-factory-distribution-pro-joining-and-sorting-inline-id_PROD_DID_8130882/?page=0 (дата звернення: 04.06.2026).

					КНУ КРБ.174.26.05.00.ПЗ						
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		Подковський О. О.			СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ			Літ.	Арк.	Аркушів	
Перевір.		Рубан С.А.								66	3
								КНУ АКІТР-23ск			
Н. Контр.		Маринич І.А.									
Затвердив		Маринич І.А.									

7. The usage of Statistical Process Control (SPC) in Industry 4.0 conditions.
URL:

https://www.researchgate.net/publication/378163840_The_usage_of_Statistical_Process_Control_SPC_in_Industry_40_conditions (дата звернення: 04.06.2026).

8. Statistical Process Control in Industry 4.0 Environment. IEOM Society Proceedings. URL: <https://index.ieomsociety.org/index.cfm/item/53187> (дата звернення: 04.06.2026).

9. Smart Statistical Process Control for Industry 4.0 Applications // IEEE Xplore Digital Library. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/11473638> (дата звернення: 04.06.2026).

10. Western Electric Rules for Control Charts. QI Macros. URL: <https://www.qimacros.com/control-chart/western-electric-rules/> (дата звернення: 04.06.2026).

11. Node-RED Documentation. URL: <https://nodered.org/docs/> (дата звернення: 04.06.2026).

12. Statistical Process Control (SPC). Minitab. URL: <https://www.minitab.com/en-us/solutions/analytics/statistical-process-control/> (дата звернення: 04.06.2026).

13. JMP Live for Statistical Process Control. JMP. URL: <https://www.jmp.com/en/software/jmp-live-for-spc> (дата звернення: 04.06.2026).

14. Adoption Guide for Statistical Process Control. InfinityQS. URL: https://www.infinityqs.com/InfinityQS/media/assets/files/success/PoD_AdoptionGuide.pdf (дата звернення: 04.06.2026).

15. Q-DAS qs-STAT Web Solara MP Web. Hexagon Manufacturing Intelligence. URL: <https://nexus.hexagon.com/community/public/q-das/w/knowledge-base/12370/qs-stat-web-solara-mp-web> (дата звернення: 04.06.2026).

16. Making the Most of SPC. Inductive Automation. URL: <https://inductiveautomation.com/resources/icc/2013/making-the-most-of-spc> (дата

					<i>КНУ КРБ.174.26.06.02.ПЗ</i>	Арк.
						65
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

звернення: 04.06.2026).

17. SPC 3 Enterprise. Sepasoft. URL: <https://www.sepasoft.com/sepasoft-news/press-release-spc-3-enterprise/> (дата звернення: 04.06.2026).

18. ISO 14067:2018 Greenhouse gases – Carbon footprint of products – Requirements and guidelines for quantification [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.iso.org/standard/71206.html> (дата звернення: 02.06.2026).

19. Моркун Н. В., Маринич І. А. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи бакалавру для студентів спеціальності 151 “Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології”. Кривий Ріг : Видавничий центр КНУ, 2019. 50 с.

20. ДСТУ 3008:2015. Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення. Київ, ДП «УкрННЦ», 2015. 26с. (Інформація та документація).

21. ДСТУ 8302:2015. Бібліографічне посилання. Загальні вимоги та правила складання Київ, ДП «УкрННЦ», 2016. 16 с. (Інформація та документація).

22. ДСТУ 3582:2013. Бібліографічний опис. Скорочення слів і словосполучень в українській мові. Загальні вимоги та правила. Київ, ДП «УкрННЦ», 2013. 23 с. (Інформація та документація)

23. ДСТУ 3651.0-97 Метрологія. Одиниці фізичних величин. Основні одиниці фізичних величин Міжнародної системи одиниць. Основні положення, назви та позначення Київ, Держстандарт України, 1998. 27 с. (Інформація та документація).

					<i>КНУ КРБ.174.26.06.02.ПЗ</i>	Арк.
						66
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		