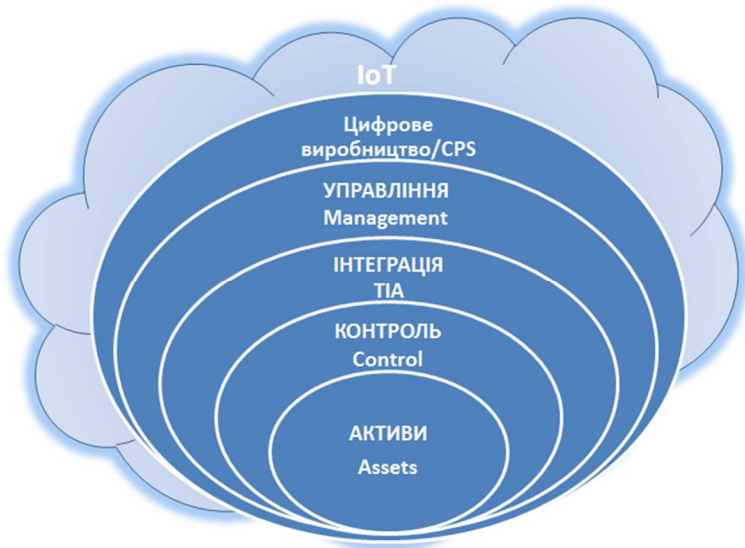


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

О.В. Василенко, Г.В. Сніжної, Ю.С. Ямненко

МЕНЕДЖМЕНТ ЦИФРОВОГО ВИРОБНИЦТВА



2022р.

УДК:004.94 (75.8)

B19

Василенко О.В., Сніжної Г.В., Ямненко Ю.С.

В19 Менеджмент цифрового виробництва / О.В. Василенко, Г.В. Сніжної, Ю.С. Ямненко – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2022. – 120 с.

Затверджено Вченою Радою національного університету «Запорізька політехніка. Протокол № 4/20 від 22.11.2021.

Рецензенти:

О.М. Юрченко – д.т.н., проф., зав. відділу транзисторних перетворювачів Інституту електродинаміки НАН України

А.В. Переверзєв – д.т.н., проф., проректор з наукової роботи (Запорізький інститут економіки та інформаційних технологій)

О.В. Вовна – д.т.н., проф., зав. кафедри Електронної техніки ДВНЗ ДонНТУ

Визначено основні особливості виробництва етапу четвертої промислової революції, ознаки і критерії цифрової трансформації виробництва, згідно концепції Індустрія 4.0. Проведено аналіз програм автоматизованого проектування та виробництва в його історичному розвитку. Показані різні моделі цифрового виробництва, визначено основні платформи, що забезпечують менеджмент процесів виробництва та бізнесу протягом створення доданої вартості (життєвого циклу виробу).

Розглянуто основні методологічні засади та принципи побудови систем контролю якості (QMS) для цифрового виробництва. Визначено тренди розвитку менеджменту цифрового виробництва, зокрема в контексті Індустрія 5.0. Надано нормативне та методичне забезпечення та приклади цифрової трансформації різного масштабу для українських виробництв.

Ключові слова: *Індустрія 4.0, кібер-фізичні системи, цифрове виробництво, Інтернет речей, цифрові платформи, менеджмент якості цифрового виробництва, штучний інтелект, машинне навчання, Індустрія 5.0, масштаби цифрової трансформації.*

ISBN 978-617-529-293-8

©Василенко О.В., Сніжної Г.В., Ямненко Ю.С.

©Запоріжжя, НУ «Запорізька політехніка», 2022 рік

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	5
ВСТУП	8
1 БАЗИС ЦИФРОВОГО ВИРОБНИЦТВА	10
1.1 Основні положення концепції Індустрія 4.0	10
1.2 Поняття «цифрового виробництва»	16
1.2.1 Моделі цифрового виробництва	17
1.2.2 Підхід Model-based у цифровому виробництві	20
1.3 Рівні та стадії автоматизованого проектування та виробництва	22
1.4 Історичний погляд на розвиток підсистем цифрового виробництва	24
1.5 Системи управління проектуванням та виробництвом	26
1.6 «Гравці» цифрового виробництва	29
1.6.1 Управління життєвим циклом товару	31
1.6.2 Системи планування ресурсів підприємства (ERP)	32
1.6.3 Системи управління виробничими процесами (MES)	34
1.6.4 Відмінності та взаємодія ERP та MES	35
1.7 Інтернет речей як основа для тотальної автоматизації	37
1.8 Апаратна база цифрового виробництва	42
1.8.1 Інтелектуальні датчики	44
1.9 Висновки по розділу	47
2 МЕНЕДЖМЕНТ ЯКОСТІ ЦИФРОВОГО ВИРОБНИЦТВА	49
2.1 Функціональні показники виробництва	49
2.2 Принципи побудови систем якості	51
2.3 Моделі і стандарти управління цифровим виробництвом	54
2.4 Ощадливе виробництво та Шість сигм	59
2.5 Менеджмент виробництва в Siemens Digital Enterprise	60
2.5.1 Рівні АСК ТП	62
2.5.2 Система QMS Siemens Digital Enterprise	64
2.5.3 Реалізація компоненту цифрового виробництва на базі апаратно-програмного забезпечення Siemens	65
2.6 Висновки по розділу	68

3 ПЕРСПЕКТИВИ ЦИФРОВОГО ВИРОБНИЦТВА.....	69
3.1 Інтеграція цифрових платформ.....	71
3.2 Технології Big Data в цифровому виробництві.....	74
3.3 Штучний інтелект в цифровому виробництві.....	77
3.4 Цифрові двійники як фактор підвищення якості продукції та ефективності виробництва.....	78
3.5 Предиктивний контроль та машинне навчання.....	81
3.6 Загрози Індустрії 4.0 та Індустрія 5.0.....	84
3.7 Аналіз стану підтримки руху Індустрія 4.0 в Україні.....	90
3.8 Рух цифрової трансформації виробництва в Україні.....	94
3.9 Методики впровадження технологій І4.0 у виробництво.....	95
3.9.1 Шляхи і масштабування цифрової трансформації.....	100
3.9.2 Модифікація апаратного забезпечення.....	103
3.10 Висновки по розділу.....	104
Висновки.....	106
Перелік посилань.....	108
Додаток А Стратегічні органи ЄС, які розробляють міжнародні підходи до стандартизації Industry 4.0.....	120

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРЕЧЕНЬ

- ACS – Automated Control System (система автоматичного керування)
- AI – Artificial intelligence (штучний інтелект)
- APM – Assets Performance magement (управління продуктивністю активів)
- APS – Advanced Planning & Scheduling (системи планування та складання виробничих розкладів)
- AWP – the automated workplace of the operator (автоматизоване робоче місце оператора)
- BoM – Bills of Materials (перелік матеріалів/компонентів)
- CAE – Computer-Aided Engineering (автоматизований інжиніринг)
- CAD – Computer Aided Design (системи автоматизованого проектування)
- CADAM – Computer-augmented Design and Manufacturing (комп'ютерне доповнене проектування та виготовлення)
- CALS – Computer Aided Logistics Support/Continuous Acquisition and Life Cycle Support (автоматизована підтримка логістики/поточного нагляду та життєвого циклу)
- CAM – Computer-Aided Manufacturing (автоматизоване виробництво)
- CAPP – Computer-Aided Process Planning (автоматизоване планування процесів)
- CAS – Computer Algebra System (універсальні математичні процесори)
- CMMS – Computerized Maintenance Management System (комп'ютеризовані системи технічного обслуговування)
- CPS – Cyber-Physical System (кібер-фізична система)
- CPPS – Cyber Physical Production System (кіберфізична виробнича система)
- CNC – Computer numerical control (комп'ютерне числове керування, числове програмне керування [верстатами])
- CRM – Customer Relationship Management (управління взаємовідносинами з клієнтами)
- DCA – Data Collection / Acquisition (збір і зберігання даних)
- DM – Digital Manufacturing (цифрове виробництво)

DOC – Document Control (управління документами)
DPU – Dispatching Production Units (диспетчеризація виробництва, координація виготовлення продукції)
EAM – Enterprise Asset Management (за управління технічним обслуговуванням і ремонтами)
ERP – Enterprise resource planning (планування ресурсів підприємства)
HMI – Human-Machine Interface (людино-машинний інтерфейс)
IPC – Inter-process communication (системи, що забезпечують міжпроцесорну взаємодію)
IT – Information and communication technologies, ICT (інформаційно-комунікаційні технології)
I4.0 – Industry 4.0 (Індустрія4.0)
IoT – Internet of Things (Інтернет речей)
IIoT – Industrial Internet of Things (промисловий Інтернет речей)
KPIs – Key Performance Indicator (ключові показники [виробництва])
LUM – Labor / User Management (управління людськими ресурсами)
MES – Manufacturing execution System (система контролю виробництва)
MFD – Multi-Function Display (мультифункціональний дисплей)
ML – Machine Learning (машинне навчання)
MM – Maintenance management (управління техобслуговуванням і ремонтом)
MPM – Manufacturing process management (управління виробничим процесом)
NPD – New product development (менеджмент маркетингу та проектування нових продуктів)
ODS – Operations / Detail Scheduling (оперативне детальне планування)
PA – Performance Analysis (аналіз ефективності)
PDM – Product Data Management (управління даними про продукт)
PLC – Programmable logic controller (програмований логічний

контролер, промисловий контролер)

PLM – Product lifecycle management (управління життєвим циклом продукту)

PM – Process Management (управління процесами виробництва)

PPR – Product, Process and Resources (дані про продукти, процеси і ресурси)

PTG –Product Tracking & Genealogy (відстеження і генеалогія продукції)

QM – Quality Management (управління якістю)

QMS – Quality Management Systems (системи управління якістю)

RAS – Resource Allocation and Status (контроль стану і розподіл ресурсів)

SAP – System Applications and Products in Data Processing (системні додатки та засоби обробки даних)

SCADA – Supervisory Control and Data Acquisition (наглядний контроль та збір даних)

SPC – Statistical process control (статистичний моніторинг та контроль)

VM – Virtual Manufacturing (віртуальне виробництво)

АСК ТП – автоматизована система керування технологічними процесами

АРМ – Автоматизоване робоче місце [оператора]

ЕОМ – Електронна обчислювальна машина

ІВТ – Інформаційно-вимірювальна техніка

ІВС – Інформаційно-вимірювальна система

МСБ, МСП – малий та середній бізнес / підприємство

САР – Система автоматизованого регулювання

САК – Система автоматичного керування

САПР – Система автоматизованого проектування

СУЯ – Системи управління якістю

ЧПК – Числове програмне керування

ВСТУП

В тренді тотальної світової цифрової трансформації, або ж «цифровізації», народилася концепція Industry 4.0 (Індустрія 4.0), яка інтегрована із іншими «рухами» 4.0: Energy 4.0, Utility 4.0, Logistic 4.0, Mobility 4.0 та технологіями 4.0 (xxxTech): фінансовими (FinTech), освітніми (EdTech), якості життя (MedTech) тощо [1]. Індустрія 4.0 (I4.0) є основним рушієм четвертої промислової революції [2]. Експерти виділяють чотири базових технології, в результаті впровадження яких очікуються революційні зміни в світовій економіці. Це Інтернет речей (Internet of Things, IoT), зокрема, промисловий Інтернет речей (Industrial Internet of Things, IIoT), цифрові екосистеми (кібер-фізичні системи), аналітика великих даних (Data Driven Decision) на базі штучного інтелекту (Artificial Intelligence) та цифрові платформи. Визначення впливу цих технологій на показники якості виробів та виробництва в цілому є однією з задач даного дослідження.

Головною ознакою I4.0 є поява «розумних фабрик», «цифрових виробництв» (Digital Manufacture), які діють як один великий кібер-фізичний організм, кібер-фізична екосистема. Створення таких систем має на меті підвищення ефективності праці, підвищення культури виробництва та якості виробів, та, звісно, збільшення прибутку, завдяки розширенню можливостей організації для швидкого реагування на запити ринку, створення конкурентоспроможного товару та виробництва в цілому. Можна сказати, що це все досягається комплексним впровадженням новітніх технологій, обладнання, підходів у менеджменті.

Дана робота присвячена дослідженню шляхів та методик цифрової трансформації української промисловості, що передбачає дослідження базових технологій та світового досвіду в контексті I4.0, визначенню ключових «гравців» та чинників цифровізації. Успішність впровадження технологій та цифрових платформ I4.0 у виробництво, зумовлена не лише наявністю відповідного рівня апаратного та програмного забезпечення (тобто ступеню автоматизації виробничих та бізнес-процесів), але й готовністю виробника змінювати принципи та архітектуру управління (менеджменту) підприємства.

В цілому, цифрова трансформація сприяє підвищенню якості продуктів та послуг. Системи управління якістю / Quality Management Systems (СУЯ/QMS) [3,4] дозволяють виробникам здійснювати електронний моніторинг, управління та документування своїх процесів якості, щоб гарантувати, що продукція виробляється з допуском, відповідає всім чинним стандартам і не містить дефектів. СУЯ при переході виробництва до стандартів І4.0 [5] принципово змінюються: вони так само підлягають цифровізації; як і інші функції та підрозділи менеджменту, вони інтегруються, оскільки все підприємство стає єдиним цілим – кібер-фізичною системою. Тобто, в рамках циклу виробництва, процеси контролю якості, які передбачають активний моніторинг подій, мають бути ефективно інтегровані із іншими платформами обраної моделі цифрового виробництва.

Так, програмне забезпечення СУЯ надає процедури, процеси, структуру та ресурси, необхідні для спрощення виробництва та операцій з системою планування ресурсів підприємства (Enterprise resource planning, ERP) [6], а також економічно ефективного управління питаннями якості. В деяких моделях цифрового виробництва, СУЯ інтегровані з системами виконання виробничих процесів (MES) [7], що кардинально підвищує ефективність бізнесу, за рахунок оптимізації виробничих підходів, та, враховуючи замкненість циклу проектування-виробництва, зберігає оптимальні варіанти для подальших розробок. Існують і такі моделі виробництва, в яких СУЯ не виокремлені в окрему програму, тому функції менеджменту якості розподілено між іншими цифровими платформами (як правило, між MES та ERP).

Впровадження систем якості здатне підвищити продуктивність виробництва та сприятиме виготовленню більш якісної продукції, що зробить нашу країну привабливою для залучення інвестицій, налагодження контактів із вітчизняними та зарубіжними постачальниками [8]. Тому аналіз засад та методик цифровізації в умовах української економіки, визначення впливу технологій, цифрових платформ та моделей менеджменту на якість виробів та виробництва в цілому, є актуальними задачами. Дослідження шляхів підвищення якості менеджменту та виробництва в цілому є предметом даного дослідження.

1 БАЗИС ЦИФРОВОГО ВИРОБНИЦТВА

1.1 Основні положення концепції Індустрія 4.0

У 2010 році Німеччина оголосила, що кібер-фізична система може стати головним чинником у скороченні часу та витрат у ланцюгах створення вартості, а у 2014 році концепція Industrie 4.0 (Індустрія 4.0) була вперше офіційно проголошена на державному рівні як двигун німецького виробництва. Ця ініціатива отримала державну підтримку та стрімкий розвиток у таких країнах, як Китай, Франція, Японія, Південна Корея та США. З виходом концепції на світову арену, вона часто стала називатися Industry 4.0, або скорочено І4.0. Галузі та спектри впливу, які охоплює ця концепція, наведені на рисунку 1.1 [9].



Рисунок 1.1 – Класифікація впровадження І4.0 [9]

Кібер-фізичні системи (Cyber-Physical Systems, CPS), або цифрові екосистеми [10] складаються з різних фізичних об'єктів,

програмних систем і керуючих контролерів, що дозволяють уявити таке утворення як єдине ціле. Фізичні та обчислювальні ресурси в такій екосистемі тісно пов'язані, моніторинг і управління фізичними процесами здійснюється з використанням технологій ЦіТ та ІТ. Традиційні інженерні моделі гармонійно співіснують з комп'ютерними. Структура взаємодії між компонентами CPS зображена на рисунку 1.2.

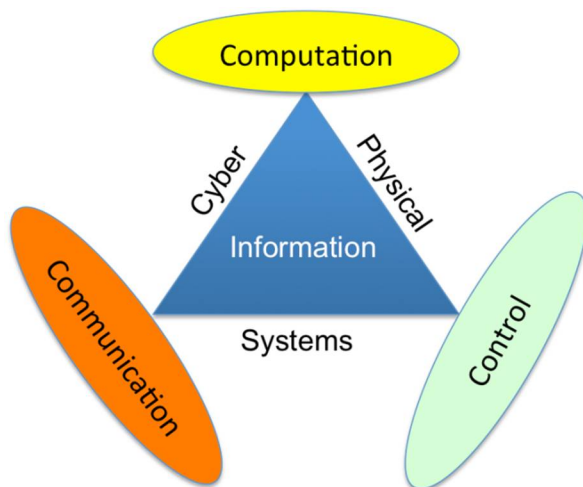


Рисунок 1.2 – Структура взаємодії між компонентами CPS [11]

В CPS вбудовані комп'ютери та контролери моніторять та контролюють фізичні процеси з петлями зворотного зв'язку, де фізичні процеси впливають на обчислення, і навпаки. Економічний і соціальний потенціал таких систем значно перевищує те, що було реалізовано, і в усьому світі здійснюються великі інвестиції для розвитку цих технологій. CPS базується на теорії вбудованих систем, інформаційних технологій, програмного забезпечення, вбудованого в пристрої. CPS інтегрує динаміку фізичних процесів із програмним забезпеченням та мережею, надаючи абстракції та методи моделювання, проєктування та аналізу для інтегрованого цілого. Як ми можна побачити на рисунку 1.3 [12], поняття CPS стосується не тільки цифрового виробництва.

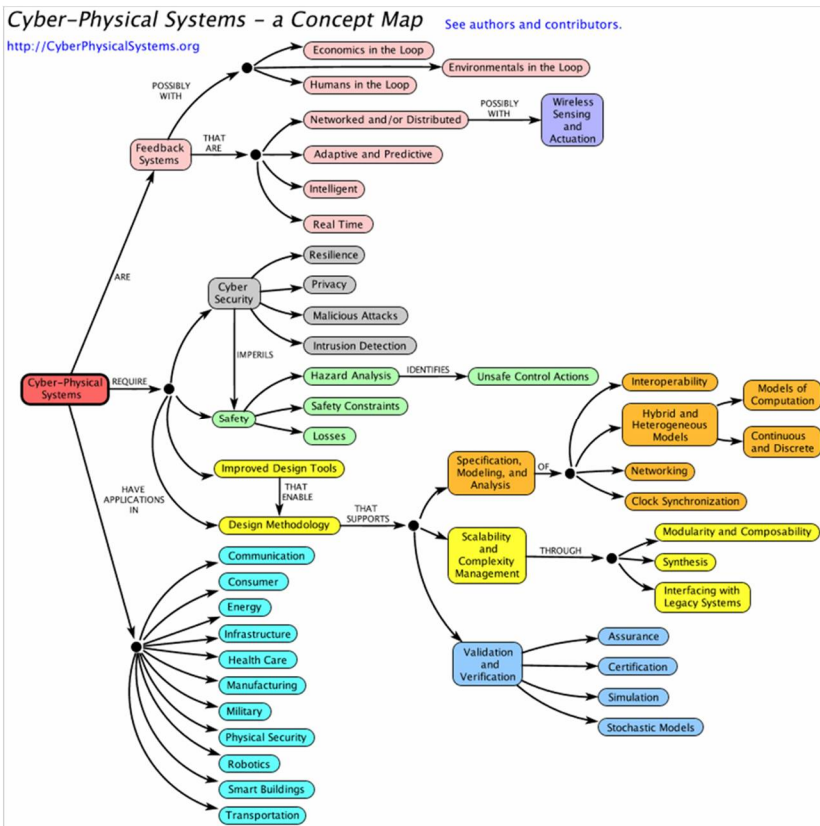


Рисунок 1.3 – Комплекс технології та методологія CPS

Теоретичним підґрунтям CPS є інженерні дисципліни та математичне моделювання. Ключова технічна проблема полягає в тому, щоб поєднати моделі, які розвивалися протягом століть для симуляції фізичних процесів (диференціальні рівняння, стохастичні процеси тощо) із абстракціями, які розвивалися протягом десятиліть в інформатиці (алгоритми та програми). Фізичні моделі дозволяють простежити та дослідити еволюції стану системи в часі, алгоритми інформатики фокусуються на процесах перетворення даних [13].

Для вирішення першого завдання має бути реалізована віртуальна модель кожного об'єкту та процесу на «фізичному»

заводі, тобто треба працювати із моделлю виробництва (Virtual manufacturing, VM), при цьому статичні моделі мають бути перетворені на динамічні моделі системи. Інтеграція між віртуальним та фізичним світами необхідна для передачі віртуальним моделям реальних даних, отриманих у «польових умовах», з метою моделювання майбутніх сценаріїв без необхідності введення даних вручну. Для цього мають реалізовані зв'язки між машинами (machine-to-machine), машинами та мережами (machine and network), машинами та людьми (machine-to-human) [14].

Для реалізації CPS необхідні два взаємодоповнюючі та паралельні підходи: кібернетизація фізичного (віртуалізація) та фізична кібернетизація (матеріалізація) (рис.1.4).

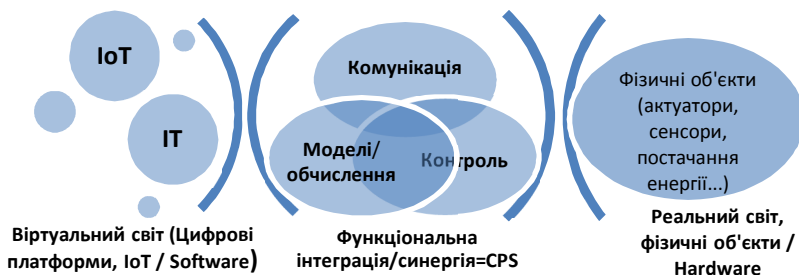


Рисунок 1.4 – CPS як інтеграція віртуального та фізичного світів

Цифрове виробництво є одним з найбільш характерних ознак та «двигуном» І4.0. Цифрове виробництво (Digital Enterprise, Digital Manufacturing, DM) [15], або e-Manufacturing, Smart Factory є інтегрованою кібер-фізичною системою (CPS) [16] і ключовим елементом 4-ї промислової революції [17]. На рисунку 1.5 показані так звані «об'єкти 4.0», які охоплені Інтернетом речей (IoT). Це «розумні/Smart» прилади (Smart devices, Smart sensors), сучасні мехатронні системи та системи моніторингу та керування, системи більш високого рівня (Smartphone, Smart Home) та агрегативні системи, метасистеми, або ж системи систем (Smart City, Smart Factory).

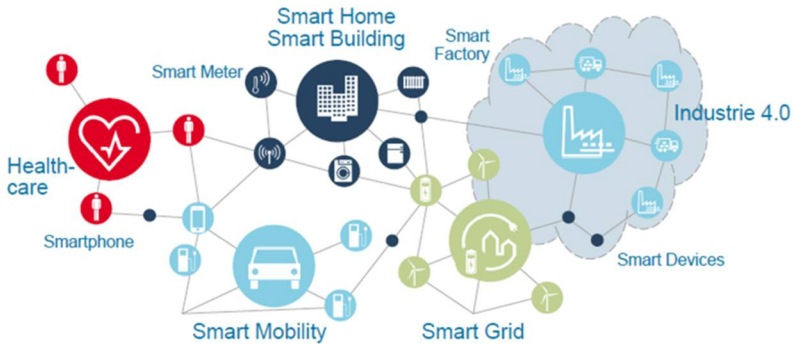


Рисунок 1.5 – Системи та об’єкти 4.0

Оскільки цифрове виробництво є кібер-фізичною системою, його розвиток передбачає розвиток кожної зі складових CPS: це і впровадження новітніх матеріалів (наприклад для адитивного виробництва, Additive Manufacturing), приладів і пристроїв (апаратна, «фізична» складова, Hardware), так і технологій керування (ІТ) та управління/менеджменту (кібер-складова).

Термін «керування» тут пов’язаний більше із фізичною складовою CPS, її активами (Assets), наприклад, з методами, процесами та способами використання датчиків, контролерів, обчислювальної техніки і систем зв’язку для створення, збору, передачі, оброблення, моніторингу, регуляції, контролю та візуалізації значимих даних (інформації). Термін управління (менеджмент) тут пов’язаний із питаннями загального нагляду та управління процесами виробництва, бізнесу, матеріальними ресурсами та персоналом, тобто стосується більше кібернетичної складової CPS. Менеджмент якості включає багато аспектів, це, фактично, комплексна оцінка якості виробу та виробництва, тому розвиток всіх складових CPS беззаперечно впливає на якість.

Індустрія 4.0 визначає концепцію та тенденції розвитку цифрового виробництва і знаходиться на перетині стратегій більш високого рівня: промислової та цифрової. Як проголошено у Хартії «Індустрія 4.0 в Україні» у 2016 році, приналежність до І4.0 стає чітким водорозділом у світі на 2 групи країн: дуже багаті та дуже бідні [18]. В розвинених державах впровадження І4.0 є стратегічною задачею, тому для України вкрай важливо

напрацювати власні рішення в цій галузі [19], тим більше, що у світі вже спостерігається впровадження технологічних рішень та формування вимог до професійних навичок працівників в рамках наступної хвилі промислової революції – Industry 5.0 [20].

В парадигмі I4.0 автоматизовані на базі Індустріального інтернету речей виробничі та інші системи перетворюються на кібер-фізичні системи шляхом впровадження технологій штучного інтелекту, хмарних сервісів, машинного навчання, систем прийняття рішень тощо. Це сприяє суттєвому (революційному) зростанню ефективності, гнучкості та стійкості CPS. Технології, які стали базовими для I4.0, та продовжують свій розвиток вже в цій парадигмі, представлені на рисунку 1.6. Це автоматизація та роботизація (Robot), штучний інтелект та машинне навчання (AI, ML), інтернет речей, в тому числі, індустриальний інтернет речей (IoT, IIoT), хмарні технології (Cloud), аналіз великих даних та кібер-безпека (Big Data), моделювання (Simulation), застосовуються розподілені реєстри (технології блокчейн / Blockchain), віртуальна і доповнена реальність (Virtual and Augmented Reality). Деякі з цих факторів будуть розглянуті як чинники впливу на якість продукції/послуг та менеджмент якості в контексті даної роботи.

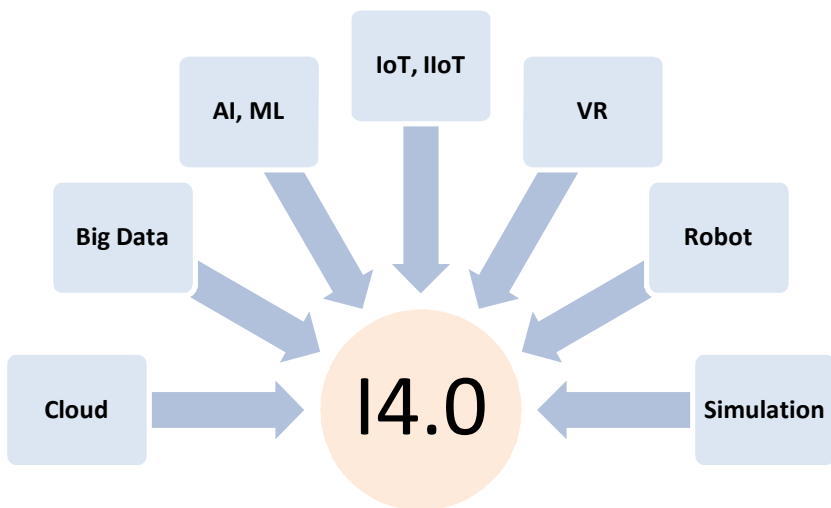


Рисунок 1.6 – Базові технології I4.0

1.2 Поняття «цифрового виробництва»

Цифрове виробництво розглядається як одна з основних технологій, що забезпечує наступний рубіж у виробництві, так звану кіберфізичну виробничу систему (Cyber Physical Production System, CPPS) [21]. CPPS є основним елементом Індустрії 4.0 і визначаються як системи взаємодії обчислювальних об'єктів у постійному зв'язку з навколишнім фізичним світом, з його поточними процесами, що забезпечують і використовують (одночасно) послуги доступу та обробки даних, доступні в Інтернеті. Можна вважати, що цифрове, або віртуальне виробництво (Digital, Virtual Manufacturing – VM) – це найпотужніша система автоматизованого проєктування технічних об'єктів, де об'єкти (продукти виробництва та устаткування) моделюються на всіх рівнях абстракції, на всіх стадіях і етапах проєктування і виробництва, що дозволяє приймати оптимальні рішення і розробляти найбільш конкурентоспроможну продукцію. Здійснюється наскрізне проєктування з використанням набору спеціалізованих програм, або кількох універсальних.

Таким чином, віртуальне виробництво – це сукупність комп'ютерних технологій для визначення, моделювання та візуалізації виробничого процесу на ранніх стадіях проєктування, коли можна виявити і вирішити деякі, якщо не всі, проблеми, пов'язані з виробництвом. Цифрові платформи, які використовуються у віртуальному виробництві, включають в себе набір систем автоматизації кожної стадії життєвого циклу продукту, від синтезу концепції до реалізації. Ось деякі з них: автоматизований інжиніринг (може забезпечуватися програмами класу CAE – Computer-Aided Engineering), автоматизоване проєктування (може забезпечуватися програмами проєктування об'єктів з різних доменів, CAD – Computer-Aided Design), автоматизоване планування процесів (Computer-Aided Process Planning – CAPP), автоматизоване виробництво (Computer-Aided Manufacturing – CAM), різні надбудови та програмні зв'язки між цими платформами [22]. Вся проєктна документація об'єднується за допомогою технологій CALS (Computer Aided Logistics Support/Continuous Acquisition and Life Cycle Support) [23].

Для реалізації концепції цифрового виробництва використовуються програмні продукти, які можна згрупувати наступним чином [24]:

- засоби для «інтелектуального» зберігання текстових і графічних даних про виріб і виробниче обладнання;
- засоби для імітаційного моделювання об'єктів і процесів;
- засоби для візуалізації та комунікації.

Дослідження взаємодії програмних продуктів для забезпечення автоматизованого проектування на всіх рівнях віртуального виробництва є актуальним завданням, оскільки саме від оптимального поєднання компонентів залежить кінцевий результат – конкурентоспроможність виготовленої продукції, зумовлена найкращим в обраному сегменті ринку поєднанням якість-ціна.

1.2.1 Моделі цифрового виробництва

В CPPS є фізичні компоненти (Physical components): актуатори, сенсори, контролери, інколи – вбудовані та мехатронні системи, та кібер-компоненти (Cyber components): засоби аналізу та прийняття рішень, цифрові платформи (Digital Platforms) для менеджменту бізнес-процесів та виробничих процесів тощо протягом життєвого циклу виробу (PLM).

Мехатронні системи відносяться більшою частиною до Physical components, вони є основною матеріальною складовою цифрового виробництва [25]. Мехатронні системи є синергетичною композицією механіки, електроніки (силової та інформаційної) та ІТ та використовуються для програмованого руху (рисунок 1.7, а) в автоматизованих системах (вбудовані системи, роботи, верстати із ЧПК/CNC, маніпулятори тощо), які можна віднести до активів (Assets) виробництва. Тобто, коли виконавчим механізмом (актуатором) в системі автоматичного керування (Automated Control System, ACS) є двигун, то для програмного керування рухом використовуються мехатронні системи. Зрозуміло, що в складі цифрового виробництва багато мехатронних систем, та й самі вони за своїм принципом нагадують прості CPS. Ієрархічна модель CPPS на базі мехатронних систем, представлена на рисунку 1.7, б.

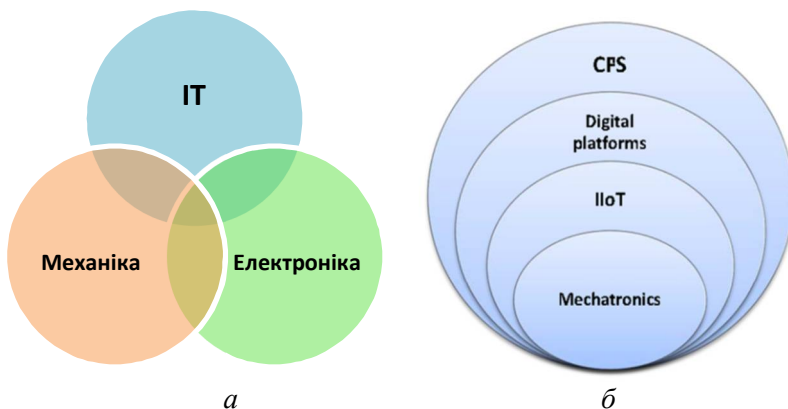


Рисунок 1.7 – Мехатронні системи: а) структура;
б) мехатроніка, як базис для CPS

Серед Digital Platforms в CPPS використовуються CADAM – Computer-augmented Design and Manufacturing; CAM – Computer-aided Manufacturing; PLM – Product Lifecycle management; SAP – Systems Applications and Products in Data Processing тощо.

Як бачимо, шар IIoT ніби огортає мехатронні системи і використовується для спілкування їх із верхніми рівнями, або для делегації їм частини функцій, наприклад, в галузі прийняття рішень, або моніторингу процесів, створення людино-машинних інтерфейсів (HMI). Мехатронні пристрої перебувають здебільшого у фізичному світі, а цифрові платформи через засоби комунікації «дематеріалізують» та віртуалізують цей світ.

На рисунку 1.8 представлена модель Smart Factory від Siemens [26]. Як бачимо, фізичні об'єкти, зокрема, мехатронні системи, займають два нижніх рівня: Field and Control. Функції моніторингу та прийняття рішень передані на рівень Operations. Цікавим є наявність TIA (Total Integrated Automation) порталу. Тут інтегруються об'єкти, системи і технології 4.0, зокрема Smart Grid (розумні енергетичні системи, Totally Integrated Power), здійснюється багатопроцесорна обробка даних. На верхніх рівнях цієї моделі – цифрові платформи управління виробництвом (MES) та бізнес-процесами (ERP).

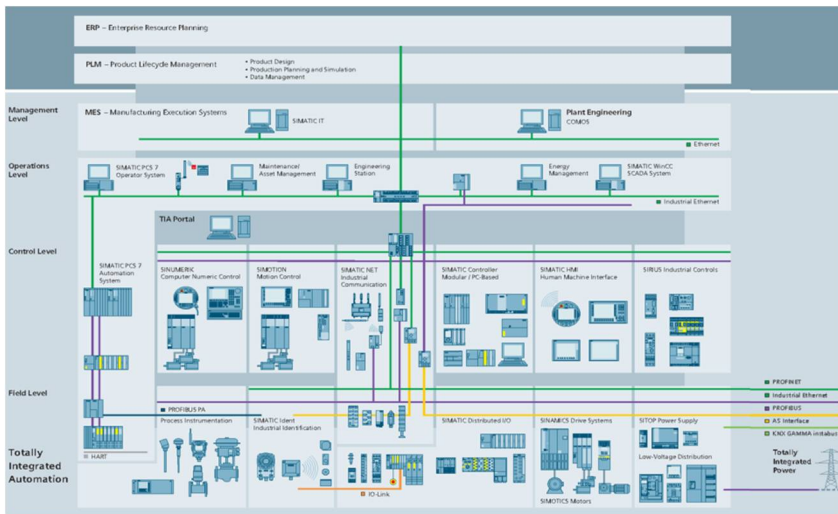


Рисунок 1.8 – Модель Siemens Smart Factory

Можна представити модель CPPS у вигляді 5-рівневої системи, в якій поступово (з 1 по 5 рівень) зменшується ступінь матеріальності, а на середньому рівні здійснюється тотальна інтеграція. Ієрархічна модель такого цифрового/віртуального виробництва представлена на рисунку 1.9.

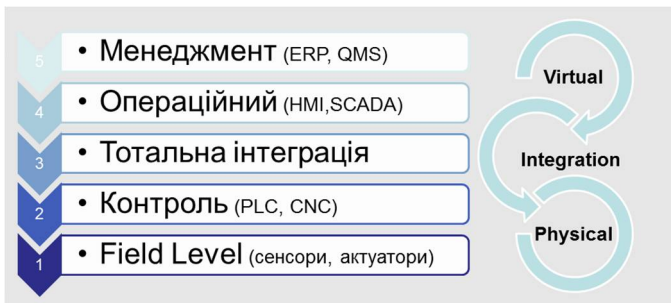


Рисунок 1.9 – Ієрархічна модель CPS

На рисунку 1.10 зображено модель виробництва з огляду на композицію цифрових платформ у вигляді «сірої скриньки». Тут X1 – це технічна пропозиція, X2 – ресурси, Y – результат діяльності виробництва (продукція), яку можна оцінювати через

ключові показники (KPIs): задоволення покупців, прибуток, відходи, вплив на екологію, соціум, здоров'я тощо).

Серед факторів зовнішнього впливу варто виділити поточні умови ринку, ресурсів, стан інновацій, суміжні програми, наприклад хмарні сервіси, оскільки дані від систем управління MES, QMS та планування (Advanced planning and scheduling, APS), технічного обслуговування (Factory Maintenance Management System / Computerized Maintenance Management System – CMMS) тощо, інтерпретуються на рівні управління виробничими операціями (Manufacturing Operations Management – MOM) і направляються до Хмари (Cloud) для аналізу.

Діяльність підприємства, в свою чергу, також впливає на зовнішні фактори (показано вузлами). Модель є статистичною і потребує для симуляції притягнення технологій Big Data. Для мінімізації моделі, непередбачувані фактори впливу (наприклад, пандемія або політичні стреси) можуть бути включені до моделі через деякий (undefined) сукупний параметр із впливом на систему згідно «закону 20 на 80».

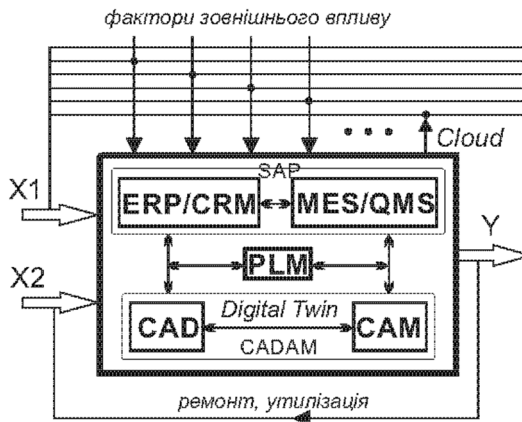


Рисунок 1.10 – Модель взаємодії цифрових платформ

1.2.2 Підхід Model-based у цифровому виробництві

Всю суть технологічного змісту концепції цифрового виробництва з точки зору моделювання можна описати формулою: «Моделювання + Віртуальна реальність» (Simulation

+ Virtual Reality, VR). VR-моделі можуть створюватися як в середовищі пакетів моделювання, так і за допомогою мов моделювання, таких як мова VRML, яка стала одним із засобів представлення тривимірних графічних моделей в промислових додатках. Тривимірні анімація і візуалізація виробничих процесів детально відтворюють всі конструктивні характеристики виробів, виробничого обладнання та допоміжної техніки, планувальних рішень по розміщенню компонентів виробництва (устаткування, зон зберігання тощо), переміщуваної в процесі виробництва техніки (транспортних засобів тощо) та навіть роботу людини.

Підприємство, що впровадило концепцію e-Manufacturing, використовує різні види імітаційних ієрархічно побудованих моделей (дискретних та динамічних) виробничих систем та процесів, наприклад:

- систем транспортування вантажів по території підприємства за допомогою мобільних засобів (навантажувачів, трейлерів тощо);

- складальних конвеєрів;

- складських процесів, що імітують прийом вантажів, переміщення вантажів у зони зберігання і назад, відбір, комплектацію, упаковку і відправку вантажів;

- планувальних рішень, розміщення і проєктування виробничих площ (layout planning);

- ланцюгів поставок, що описують зовнішню логістику підприємства та інш.

Імітаційні моделі виробничих і логістичних процесів призначені для аналізу та оптимізації цих систем та вибору стратегій управління ними, включно із вибором стратегії управління матеріалопотоками, завантаження ресурсів і логістики всіх рівнів планування від цілого виробництва до окремих ділянок. Моделі дозволяють аналізувати різні варіанти організації виробництва з метою його оптимізації без втручання в роботу реальної системи, задовго до будівництва і монтажу виробничого обладнання, оптимізувати роботу існуючих систем за рахунок перевірки змін на цифровий моделі. Таким чином, моделювання складних виробничих і логістичних систем дозволяє вирішувати широкий клас задач на стратегічному, тактичному та оперативному рівнях управління та керування системою.

Для зберігання всіх даних, що належать до сфери e-Manufacturing, використовуються спеціальні засоби управління даними, які дозволяють забезпечувати інформаційну інтеграцію всіх видів діяльності, пов'язаних з підготовкою і реалізацією процесу виробництва. Ядром кожної системи є спеціальний банк даних, в якому представлені основні базові структури даних виробничого призначення, які відповідають даним про продукти, процеси і ресурси (Product, Process and Resources, PPR).

1.3 Рівні та стадії автоматизованого проектування та виробництва

Спадний (градація в міру зниження рівня абстракції) дизайн, або низхідне проектування може бути представлене через концепцію віртуального виробництва, як на рисунку 1.11.

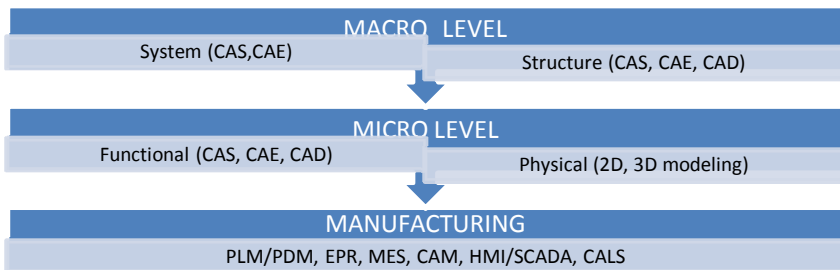


Рисунок 1.11 – Спадний дизайн в концепції віртуального виробництва

Тут означені рівні абстракції проектування:

1. Макро-рівень (Macro-Level) із підрівнями системним та структурним (System, Structure sublevel), системний вище за ступенем абстракції, ніж структурний;

2. Мікро-рівень (Micro-Level) із функціональним та фізичним підрівнями (Functional, Physical sublevel), перший вище за ступенем абстракції, фізичний ще називають рівнем твердого тіла.

3. Виробництво також має стадії та рівні.

Всі три ланки пов'язані між собою багаточисельними прямими та зворотними зв'язками (не показані на даній моделі).

Тут використовуються наступні позначення: CAS – Computer Algebra System [27]; HMI – Human-Machine Interface, включно із системами SCADA – Supervisory Control and Data Acquisition; PDM – Product Data Management, або як варіант PLM – Product lifecycle management; ERP – Enterprise resource planning; MES – Manufacturing execution systems.

Технологія просування проєкту від концепції до реалізації умовно представлена на рисунку 1.12, її ще називають технологією віртуального інжинірингу. Для спрощення, тут не показані зворотні зв'язки.

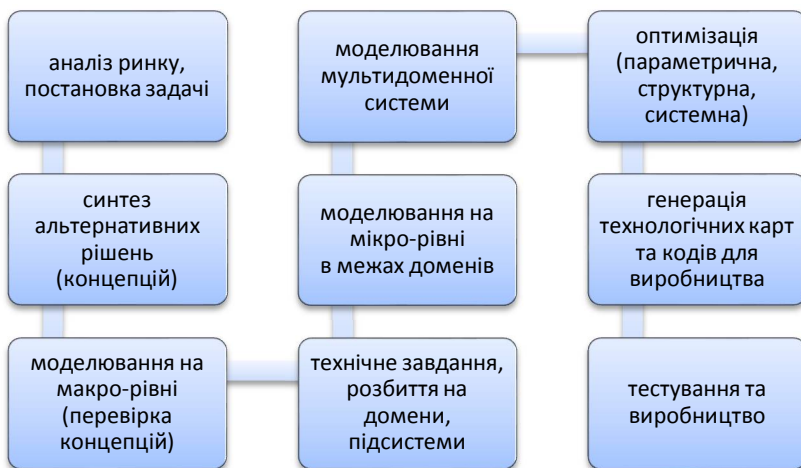


Рисунок 1.12 – Процеси віртуального інжинірингу

Таким чином, віртуальні інженерні середовища виробництва – це інтегровані обчислювальні системи та інструменти, які полегшують проєктування і виробничу діяльність усередині і між організаціями.

Еволюція цифрового виробництва забезпечується як розвитком його окремих складових, так і систем, що забезпечують зв'язки між ними та прозорість / видимість всього процесу.

1.4 Історичний погляд на розвиток підсистем цифрового виробництва

Автоматизація виробництва починалась із впровадження локальних систем автоматизованого регулювання (САР), систем автоматизованого керування (САК), вбудованих та мехатронних систем. Згодом, встановлювались комплекси автоматизованих систем керування технологічними процесами (АСКТП). Загалом, задачі автоматизації технологічних процесів, – це збір даних (Acquire), аналіз даних (Analyze), прийняття рішення (Decide), впровадження рішення (Implement). В кібер-надбудовах CPPS прийняття рішень, як тактичних, так і стратегічних, здійснюється засобами штучного інтелекту (AI).

Приклад порівняння двох автоматизованих систем по задачах, що вони виконують наведеной на рисунку 1.13 [28].

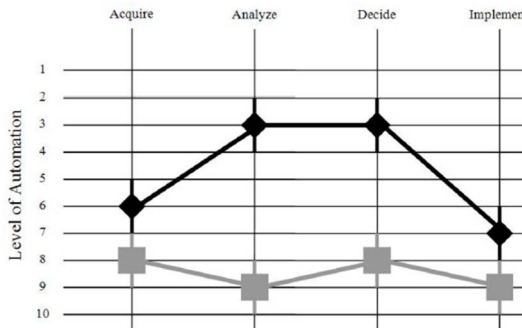


Рисунок 1.13 – Приклади рівнів автоматизації в різних задачах

Перехід від АСК ТП до цифрового виробництва починався із встановлення інформаційного зв'язку із інженерним підрозділом (де проектується майбутній продукт, САД) до виконавчого (там, де продукт виробляється, САМ). Перші системи цифрового (віртуального) виробництва були досить прості, в них зв'язок між САД та виробництвом САМ забезпечувався передачею документів та кодів від перших другим. Наприклад, результатом проектування в ECAD-системі (Electronics CAD) OrCAD v.9.0 [29] були стандартизовані схеми (принципова електрична, схема

комутації тощо), перелік матеріалів/компонентів (Bills of Materials, BoM), програми для певної категорії верстатів з числовим програмним керуванням (CNC), тобто передавалися дані про продукт (перші PDM).

Розподіл функцій систем та людини в залежності від рівня автоматизації показаний в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Функції в залежності від рівня автоматизації

Рівні автоматизації	Механізація та обладнання (Mechanical and Equipment)	Інформація та контроль (Information and Control)
1	Повністю ручна робота (Totally manual)	Людина приймає рішення на основі попереднього досвіду
2, 3	Використовуються різні інструменти (Static or Flexible hand tool hand tool)	Необхідна інструкція з використання інструменту та навчання (Checklists, manuals)
4	Автоматизований ручний інструмент (Automated hand tool)	Вимагається розуміння технологій та всі попередні пункти
5, 6	Пристрій автоматизації (Static machine/workstation), в тому числі такий, що може бути пере-конфігурованим, пере-програмованим (Flexible machine/workstation)	Потрібен нагляд (Supervision), контроль людини над кожною задачею, або загальне керування, нагляд (Intervene)
7	Повна автоматизація Totally automatic	Система сама приймає рішення впродовж всього технологічного циклу

Автоматизоване проєктування в електроніці, особливо і інтелектуальний, цифровій електроніці, потребувало повного контролю над операціями інжинірингу та вироблення, за можливості навіть повного виключення людини, як «генератора

помилку» з технологічних циклів, через надскладність цих систем, тому ознаки PDM (Product Data Management) першими з'явилися в системах проектування ECAD. Фактично, народження таких систем, як комп'ютерно-доповнене (комп'ютеризоване) проектування та виготовлення (Computer-augmented Design and Manufacturing – CADAM) пов'язують із фірмою IBM, яка постачала програмне забезпечення для військової та аерокосмічної галузі (Lockheed) США [30]. Такі сучасні платформи автоматизованого проектування в електроніці, як Synopsys [31], Cadence Allegro X Design Platform [32], SiemensEDA [33] (ранжовані тут за капіталізацією, яка сягає мільярдів доларів), фактично є CADAM-системами. Наприклад, нова версія Allegro X Design Platform від системи Cadence® забезпечує аналіз функціоналу від системного рівня до рівня твердого тіла (див. рис.1.11), аналіз електромагнітних та теплових характеристик, трасування друкованих плат та тривимірне моделювання конструкцій тощо. Все це пов'язано між собою та керується системою PLM [34], яка інтегрується також із системами бізнес-менеджменту. Можливості цієї наскрізної ECAD / CADAM проілюстровані на рисунку 1.14.

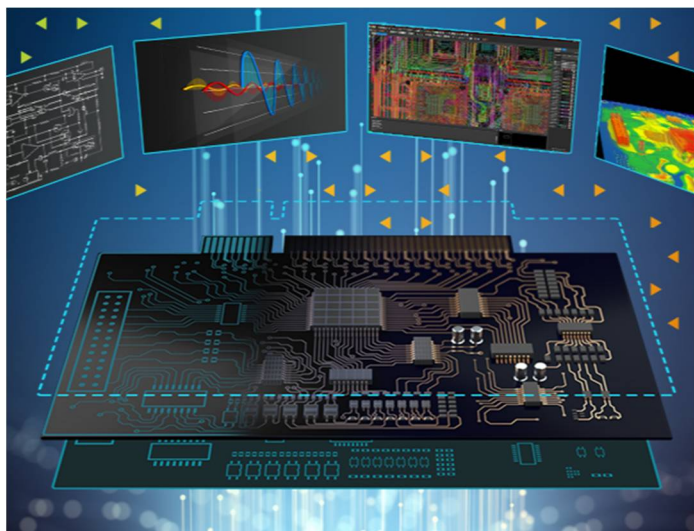


Рисунок 1.14 – Можливості Allegro X Design Platform

Впровадження I4.0 вимагає перевизначення філософії проектування. Отже, хоча автоматизація є основним напрямком I4.0, фокус буде встановлений на взаємодію людини із системами (Human-robot collaboration, HRC) і машинно-машинну взаємодію.

1.5 Системи управління проектуванням та виробництвом

Ідеологія управління процесами проектування та виробництва впродовж життєвого циклу виробу, PLM, з'явилася у 1985 році в корпорації American Motors Corporation (AMC) [35], які прагнули пришвидшити процес розробки продукції, щоб краще конкурувати з великими виробниками. AMC розпочав розробку Jeep Grand Cherokee, використовуючи як MCAD (Mechanical CAD), так і PLM, яка дозволила розв'язувала конфлікти передачі даних, зменшувала технічні зміни, оскільки всі креслення та документи знаходились у центральній базі даних. Управління даними про товари було настільки ефективним, що після придбання AMC компанією Chrysler, система була розширена по всьому підприємству, що дозволило суттєво знизити собівартість при підвищенні якості.

Ідея PLM паралельно розвивалася в Rockwell International, яка у 1982 році розробила початкові концепції управління даними про продукцію (PDM) для програми бомбардувальників B-1B [36]. Система під назвою Engineering Data System (EDS) була доповнена для взаємодії з системами Computervision та CADAM для відстеження конфігурацій деталей та життєвого циклу компонентів та збірок.

Можна відслідкувати трансформацію концепції наскрізного проектування на віртуальне виробництво на прикладі системи CATIA (Computer Aided Three Dimensional Interactive Application) фірми Dassault Systemes [37], перші версії якої представляли собою MCAD, де багатовимірне моделювання дозволяло оптимізувати форми деталей літаків, автомобілів, суден тощо та одразу розробити прес-форми для їхнього виготовлення. Наразі в цій системі проектуються електричні та інші мережі, моделюються та оптимізуються навіть ергономічні показники, із дизайном екстер'єру та інтер'єру включно.

На автомобільному заводі ЗАЗ (Запоріжжя) в 90-х роках була встановлена програма Euclid (аналог CATIA), за допомогою якої виготовлялися прес-форми для кузовних деталей автомобіля Славута.

CATIA V5 була написана «з нуля» і втілила в собі передові технології систем автоматизованого проектування (САПР). Щоб стимулювати її використання, Dassault Systems також застосувала концепцію PLM. Впровадження PLM виявилось настільки ефективним, що цю концепцію поєднання CADx із CAM через PLM підхопила майже вся індустрія САПР.

Сучасна версія CATIA V6 підтримує не тільки наскрізний цикл проектування, але й всі колективні бізнес-процеси протягом життєвого циклу виробу. Така концепція одержала назву «PLM 2.0 на платформі V6», її суть – тривимірне моделювання і колективна робота над проектом в реальному часі.

Тепер CATIA має систему управління даними про товар (PDM) та систему управління життєвим циклом продукту (PLM), ENOVIA. Переваги ENOVIA полягає в тому, що ця система чітко розмежовує право власності на моделі, усуває проблеми з моделюванням, пов'язані з управлінням посиланнями, а також дозволяє зберігати дані в одному центральному місці, що дозволяє мати доступ до них з будь-якої системи.

Для зв'язку між виконавцями, що в умовах глобалізації перебувають у різних точках світу, передбачені засоби підключення до Web. Для обміну інформацією в режимі он-лайн використані хмарні технології. Для уніфікації, розроблено принципове нове лінгвістичне забезпечення (3D-мова). Користувачі CATIA V6 зможуть у наочній формі оперувати одночасно віртуальними та реальними об'єктами [24].

На наш погляд, остання версія CATIA V.6 в колаборації IBM/Dassault Systemes [38] є цілісною системою віртуального виробництва. Її використовують більшість автомобільних виробників світу, аерокосмічна агенція Франції, проектувальники магістральних трубопроводів, виробники двигунів тощо.

Галузі застосування систем Dassault Groupe зображені на рисунку 1.15.

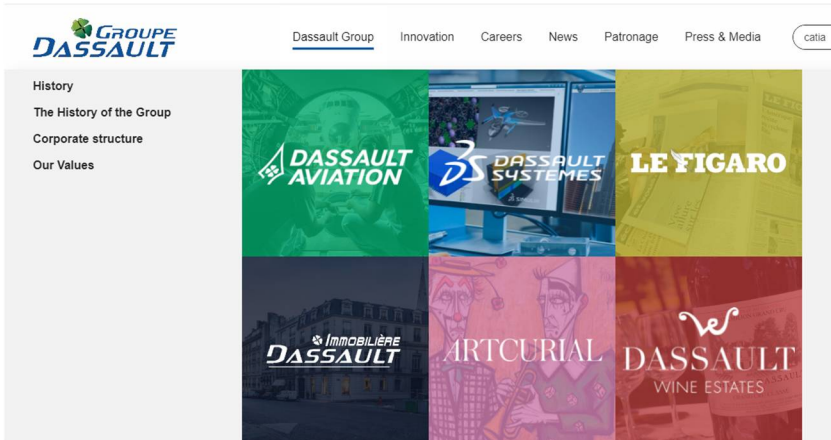


Рисунок 1.15 – Галузі застосування систем фірми Dassault

Система DELMIA Dassault Systemes надає повний набір цифрових платформ, зокрема для 3D моделювання [39,40]. Аналогічні можливості має система Tecnomatix від Siemens / PLM Software [41]. Для моделювання виробництва в системі DELMIA використовується симулятор QUEST, в Tecnomatix використовується симулятор eM-Plant. Вони мають засоби для статистичного аналізу та оптимізації виробничих систем (в тому числі на основі генетичних алгоритмів), побудови мережевих графіків Ганта для планування, діаграм для аналізу матеріальних потоків) [42]. Результати моделювання представляються у вигляді звітів, діаграм, тривимірної візуалізації та симуляції виробничих систем та її елементів.

1.6 «Гравці» цифрового виробництва

В статті [43] розглядається взаємодія платформ віртуального виробництва PLM, ERP та MES. PLM забезпечує вищу в ієрархічному плані платформу для створення продуктів та управління інженерними даними. На етапі створення (синтезу) концепції виробу, процеси створення продукту дозволяють гнучко та креативно працювати, з можливістю повторного використання даних із минулих проєктів.

Процес проектування є циклічним, і по мірі переходу до конкретних технічних рішень, процес управління даними стає жорсткішим, починається менеджмент змін, тому для співпраці необхідно більше організаційних функцій (управління).

На рисунку 1.16 [44] показані основні рівні, програмне забезпечення та ієрархія систем віртуального виробництва (люди, процеси, інструменти/засоби, методи, технології, інформація/дані). Все це можна назвати «гравцями» цифрового виробництва.

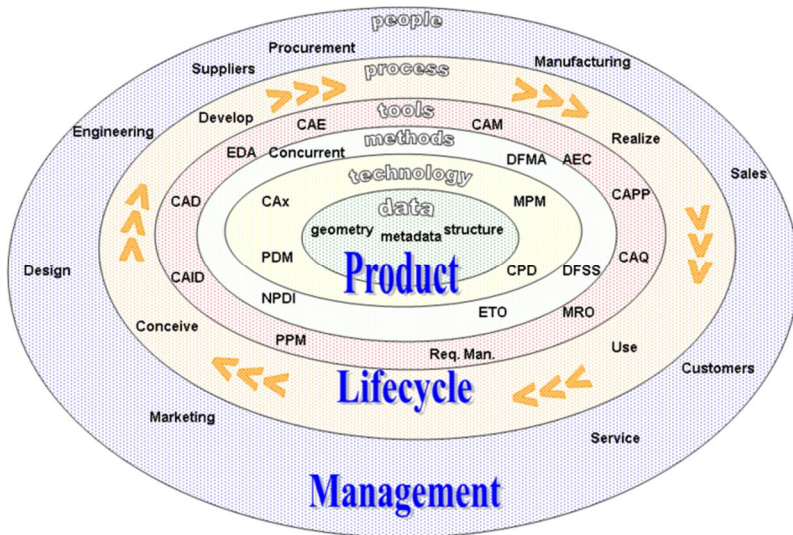


Рисунок 1.16 – Рівні, «гравці» та ієрархія систем Цифрового/віртуального виробництва

PLM розв’язує наступні основні питання:

- які атрибути визначатимуть конкурентоспроможність нового продукту (технічна пропозиція);
- які технології будуть обрані для проектування;
- які технічні показники визначатимуть продукт (технічні характеристики, технічне завдання)?
- які дані PLM будуть надходити до ERP і як вони будуть використовуватися далі?

Оскільки PLM подає дані до виконавчого «механізму» ERP, інформація про товар та бізнес поєднується, дані реструктуруються, щоб підприємство могло працювати та співпрацювати за межами інженерних команд. На цьому етапі різні відділи та функції взаємодіють по всьому підприємстві, контролюючи та керуючи даними ланцюга поставок, даними про клієнтів, фінансовими даними, даними про закупівлі, кадровими даними, планування тощо.

Система управління виробничими процесами (Manufacturing execution system – MES), це спеціалізоване прикладне програмне забезпечення, призначене для вирішення завдань синхронізації, координації, аналізу та оптимізації випуску продукції в рамках виробництва. MES-системи належать до класу систем управління рівня цеху, але можуть використовуватися і для інтегрованого управління виробництвом на підприємстві в цілому (цифрова платформа CPPS).

MES це фактично методичні рекомендації, механізм управління роботою та експлуатацією цеху, що стоїть за більшістю заходів з контролю масового виробництва. Ця система перегрупує всі виробничі рішення на загальнозаводському рівні, зосереджуючись на швидких діях, детальному плануванні, прогнозуванні, постійному вдосконаленні, плановому та фактичному метричному аналізі та постійних коригуваннях.

1.6.1 Управління життєвим циклом товару

Основою менеджменту життєвого циклу продукту (PLM) є створення та централізоване управління всіма даними про товари та технологією, що використовується для доступу до цієї інформації та знань. PLM як дисципліна виникла із таких інструментів, як CAD, CAM та PDM, але може розглядатися як інтеграція цих інструментів із методами, людьми та процесами на всіх етапах життя товару, при чому мова йде не лише про програмні технології, а й про бізнес-стратегію.

У межах PLM існує п'ять основних областей [44]:

1. Системна інженерія (Systems engineering, SE) орієнтована на задоволення всіх вимог, в першу чергу на задоволення потреб споживачів, та координацію процесу проєктування систем із

залученням усіх відповідних дисциплін. Важливим аспектом управління життєвим циклом є підмножина в рамках інженерії систем, що називається інженерною надійністю.

2. Управління портфоліо продукту (Product Portfolio Management, PPM) орієнтований на управління розподілом ресурсів, відстеження прогресу, планування нових проєктів з розробки продуктів, які перебувають у процесі (або перебувають у стані зберігання). PPM, це інструмент, який допомагає керівництву відстежувати прогрес нових продуктів і приймати компромісні рішення при розподілі обмежених ресурсів.

3. Системи проєктування (CAx) – це процес інженерної розробки нового товару, який бізнес продає своїм клієнтам.

4. Управління виробничим процесом (Manufacturing process management, MPM) – це сукупність технологій та методів, що використовуються для визначення способу виробництва продукції.

5. Управління даними про товари (Product data management, PDM) орієнтоване на збір та підтримку інформації про товари та / або послуги через їх розробку та термін експлуатації. Управління змінами є важливою частиною PDM / PLM.

Багато програмних рішень розроблено для організації та інтеграції різних фаз життєвого циклу товару. PLM слід розглядати не як єдиний програмний продукт, а як сукупність програмних засобів та робочих методів, інтегрованих разом для вирішення окремих етапів життєвого циклу, для з'єднання різних завдань, або для управління цілим процесом.

Не слід також забувати, що однією з головних цілей PLM є збір знань, які можуть бути використані для інших проєктів, та координація одночасної розробки багатьох продуктів. Йдеться як про бізнес-процеси, людей і методи, так і про програмні рішення. Хоча PLM головним чином пов'язана з інженерними завданнями, вона також включає маркетингові заходи, такі як управління товарним портфелем (PPM), особливо щодо розробки нових продуктів (new product development – NPD).

1.6.2 Системи планування ресурсів підприємства (ERP)

Платформа ERP перегрупує основну магістраль бізнес-даних,

де результати проектування та виробництво «зустрічаються». Модель даних ERP не може слідувати структурі даних PLM, оскільки вона не призначена для управління такими рівнями креативності та виготовлення прототипів продуктів. Дані ERP мають бути структуровані таким чином, щоб вони забезпечували транзакційні функції подальших процесів (виробництво, ланцюг поставок, збут та маркетинг).

Простежуваність даних у ERP стосується планування, стратегічного узгодження, операцій, дотримання вимог, координації вище та нижче за процесом виробництва. Завдяки своєму транзакційному характеру, дані ERP мають чіткий статус та узгодженість у відповідних бізнес-процесах.

ERP розглядає такі основні питання:

- яка є виробнича стратегія організації;
- як бізнес планує досягти довгострокового сталого зростання;
- які інженерні дані послідовно передаються (каскадуються) від PLM до ERP, щоб забезпечити процеси виробництва (business engine);
- як саме стратегія перетворюється на послідовність операції з усіма бізнес-функціями?
- які стратегічні та пов'язані з бізнесом оперативні рішення приймаються на рівні ERP та які наслідки цього;
- як бізнес може запобігти інцидентам, захистити свою робочу силу та забезпечити відповідність продукції стандартам.

Дані ERP циклічно повертаються назад до PLM, щоб забезпечити інтегровані процеси управління змінами, включаючи дані про постачальника та вартість, матеріали та дані про відповідність, а також дані про конфігурацію продукту та використані платформи.

Дані ERP подаються і до MES, для подання довідкової інформації про продукцію, щодо попиту на продукт, основних графіків, основних даних про продукт, BoMs, стандартних операційних процедур (Standard Operating Procedures), замовлень на зміни, запасів, запланованих ресурсів та ключових показників (KPIs).

1.6.3 Системи управління виробничими процесами (MES)

Система управління виробничими процесами (Manufacturing execution system – MES), це спеціалізоване прикладне програмне забезпечення, призначене для вирішення завдань синхронізації, координації, аналізу та оптимізації випуску продукції в рамках виробництва. MES-системи належать до класу систем управління рівня цеху, але можуть використовуватися і для інтегрованого управління виробництвом на підприємстві в цілому.

MES це фактично методичні рекомендації, механізм управління роботою та експлуатацією цеху, що стоїть за більшістю заходів з контролю масового виробництва. Ця система перегрупує всі виробничі рішення на загальнозаводському рівні, зосереджуючись на швидких діях, детальному плануванні, прогнозуванні, постійному вдосконаленні, плановому та фактичному метричному аналізі та постійних коригуваннях.

MES дає потужні функції та можливості для побудови та налагоджування всього циклу виробництва за вимогами замовника [45]. MES – це програмні рішення, які забезпечують якість та ефективність, вбудовуються у виробничий процес, активно та систематично впроваджуються. Системи виконання виробництва можуть з'єднувати декілька заводів, надають інформацію про поточне виробництво від постачальників та легко інтегруються з обладнанням, контролерами та корпоративними бізнес-додатками, вони також передають дані до систем менеджменту якості QMS, якщо вони виокремлені, або до ERP. Результатом є повна видимість, контроль та оптимізація виробництва та процесів на всьому підприємстві.

Простежуваність даних у MES пов'язана з поточними операціями, продуктивністю, зворотним зв'язком із ERP щодо результатів (продукції) та необхідних поставок (тобто матеріалами та ресурсами). MES є найбільш транзакційною системою виробничої організації, з найвищим рівнем швидкості реагування (реактивності), необхідним для передбачення, вирівнювання та коригування виробничих та бізнес-параметрів.

MES розв'язує наступні основні питання:

- оптимізація технологічних процесів для збільшення ефективності;

- управління ризиками та захистом;
- операційна досконалість на рівні цеху;
- як поєднати інформацію про планування, виконання та контроль у безперервний цикл зворотного зв'язку для узгодження та оптимізації виробництва та ділових операцій.

MES передає дані назад до ERP зі статусом замовлення, використанням ресурсів (робоча сила, обладнання, матеріали), вбудованими даними генеалогії, подіями часу тощо.

1.6.4 Відмінності та взаємодія ERP та MES

Основні відмінності між ERP та MES наведені нижче.

1. Конкретна спрямованість

ERP функціонує як засіб обміну інформації всередині організації. Система єдина для всіх частин бізнесу і дозволяє інформації вільно поширюватися. Діючи в якості передавця даних, ERP стає цінним інструментом для керівництва, оскільки вона дає особам, які приймають рішення, можливість глибоко зануритися в кожну частину бізнесу і зв'язати далекі один від одного в функціональному сенсі дані.

Причина додавання MES в модель цифрового виробництва полягає в необхідності надання засобів для точного контролю виробничих процесів. MES робить кроки або створює звіти на основі того, що відбувається в даний момент, щоб відстежувати і коригувати змінні, що впливають на ефективність виробництва. MES синхронізує численні аспекти виробництва

2. Способи отримання даних.

Люди зазвичай вводять більшу частину інформації в ERP. “Ручне” збирання даних добре працює, оскільки система в першу чергу займається збором, організацією і обміном інформації для планування і керівництва. Сучасні ERP-системи мають одну базу даних для всієї організації, тому надлишкові записи скорочуються або виключаються. Сховище даних також робить обмін інформацією між різними функціональними областями безперешкодним.

В MES моніторинг виробництва в режимі реального часу здійснюється завдяки подіям сканера штрих-кодів, сигналів датчиків IoT, даних зі станцій тестування продукції, зворотного

зв'язку з датчиками складального обладнання та введення даних персоналом виробничого цеху. Ця інформація забезпечує точну і своєчасну інформацію для ERP, дозволяючи організації реагувати на швидко мінливі обставини. Скорочення затримки таким чином збільшує шанси на отримання більш високого грошового прибутку від кожного завдання.

3. Дії систем.

ERP виконує дії на основі фінансових транзакцій. Коли клієнти розміщують замовлення, постачальники висилають рахунки або видають чеки на зарплату, система реагує на це дією. ERP багатофункціональна, але розробники переважно будують її навколо економічної підструктури.

Система MES орієнтована на відстеження подій, характерних для виробничого середовища. Моніторинг даних в реальному часі дозволяє MES виконувати такі завдання, як забезпечення відповідності виробничого процесу, відстеження витрат запасів, автоматичне затримання невідповідного матеріалу, а також зміна процедур замовлення для більш ефективного використання наявних ресурсів.

Взаємодія між верхнім рівнем менеджменту (SAP/ERP) та нижчим рівнем (MES) показана на рисунку 1.17.



Рисунок 1.17 – Взаємодія систем MES та SAP [46]

Розуміння відмінностей між ERP і MES має вирішальне значення для підсумкового прибутку компанії. Фірма Intraratio

[47] надає методичні та інформаційні матеріали по платформах ERP і MES щодо того, як ці дві системи мають працювати разом для підвищення ефективності і прибутковості вашої компанії.

Щодо протиставлення та порівняння Manufacturing Operation Management (MOM) та Manufacturing Execution System (MES), тут думки розділилися: деякі вважають, що MES – це підмножина MOM, інші дотримуються думки, що вони описують різні функціональні простори, треті вважають, що вони описують одне і те саме [48].

1.7 Інтернет речей як основа для тотальної автоматизації

Інтернет речей використовується для обміну інформацією не тільки між людьми, але і між різними «речами», тобто машинами, пристроями, датчиками і т.д. З одного боку, речі, забезпечені датчиками, можуть, обмінюватися даними і обробляти їх без участі людини. З іншого боку, людина може активно брати участь в цьому процесі, наприклад, коли мова йде про прийняття рішень. Інтернет речей ґрунтується на широкосмуговому бездротовому підключенні до Інтернету, датчиках, на штучному інтелекті та роботах, які розуміють зібрані великі дані за допомогою датчиків. Термін «Інтернет речей» (Internet of Things, IoT) був запропонований в 1999 році Кевіном Ештоном, одним з трьох засновників Центру автоматичної ідентифікації Масачусетського університету (Auto-ID Center).

Існує кілька визначень цього терміна, і кожне з них недостатньо точне. Ми будемо використовувати визначення, запропоноване компанією Gartner (тієї самої, яка придумала термін ERP): «Інтернет речей – це мережа фізичних об'єктів, які мають вбудовані технології, що дозволяють здійснювати взаємодію з зовнішнім середовищем, передавати відомості про свій стан і приймати дані ззовні» [49].

IoT складається із слабо пов'язаних між собою мереж, кожна з яких вирішує свої завдання.

В основі IoT лежать:

1. Smart датчики та контролери;
2. засоби передачі та обробки та трансляції даних;

3. технології автоматичної ідентифікації (стандартизація ідентифікаторів триває);

4. актуатори (виконавчі пристрої).

Складовою частиною Інтернету речей є Індустріальний (або Промисловий) інтернет речей (Industrial Internet of Things, ІІоТ). ІІоТ об'єднує машини, хмарні обчислення, аналітику і співробітників заради підвищення ефективності технологічних та бізнес-процесів на цифровому виробництві. Завдяки ІІоТ і стала можливою цифровізація підприємств [49], оскільки саме ІІоТ відкриває пряму дорогу до створення повністю автоматизованих виробництв: ключові компоненти обладнання, засоби виробництва (Assets) забезпечуються різними датчиками, автоматизованими актуаторами і контролерами; зібрані дані обробляються і надсилаються до відповідних служб підприємства, що дозволяє персоналу оперативного приймати обґрунтовані і виважені рішення. Завдання-максимум цифрової трансформації полягає в досягненні такого рівня автоматизації підприємства, при якому на всіх ділянках, де це можливо, машини працюють без участі людей. Роль персоналу при цьому зводиться до контролю роботи машин і реагування лише на екстрені ситуації. Спрощена схема взаємодії ІоТ, ІІоТ та І4.0 представлена на рисунку 1.18. Як бачимо, тільки перетин функціоналів ІоТ, ІІоТ та І4.0 дає життя Industry 4.0 (І4.0).

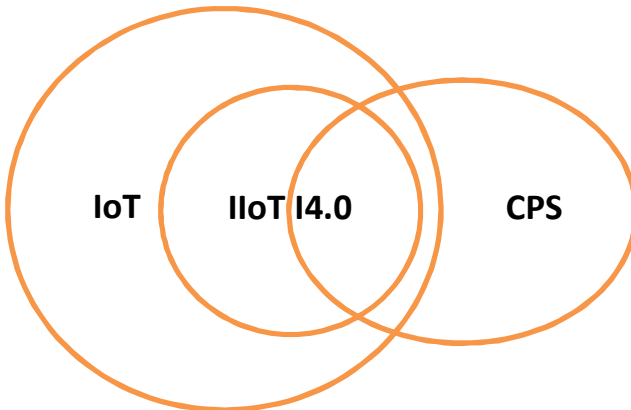


Рисунок 1.18 – Перетин функціоналів ІоТ, ІІоТ та СРС дає І4.0

Детальна структура взаємодії IoT, PoT та I4.0 представлена на рисунку 1.19 [50].

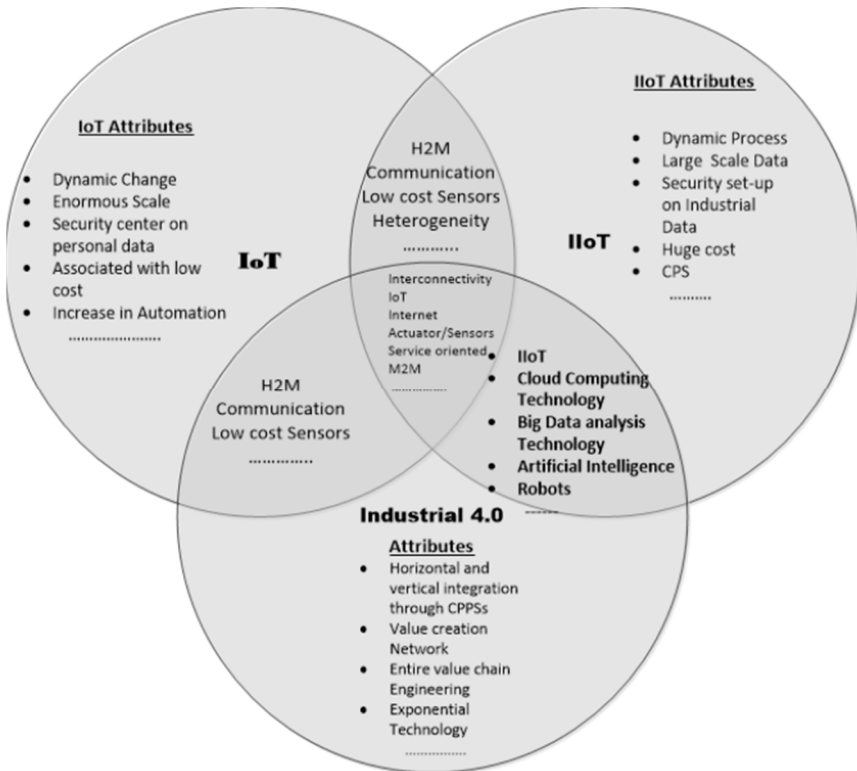


Рисунок 1.19 – Атрибути та спільні концепції IoT, PoT та Industry 4.0

Тут H2M – засоби взаємодії між людиною та машиною (Human-to-Machine). Як бачимо, PoT відрізняє висока ціна порівняно із IoT та взаємодія із CPS/CPSS. Перетин PoT із I4.0 відкриває нові можливості в галузях прийняття рішень на базі штучного інтелекту, аналізу великих даних та хмарних технологій, в створенні нових роботів, цифрових двійників тощо.

Для інтеграції та забезпечення інтероперабельності всіх машин, людей та процесів в межах виробництва, необхідно розробити та узгодити відповідні стандарти. На сьогоднішній день існує кілька моделей IIoT: Еталонна модель IoT від MCE-T, Еталонна модель від Всесвітнього форуму IoT, модель NIST Special Publication 800-183 та Модель Industrial Internet of Things Reference Architecture [51].

Еталонна модель IIoT представлена в [52,53]. Зробимо її планарною та формалізуємо (рис.1.20).

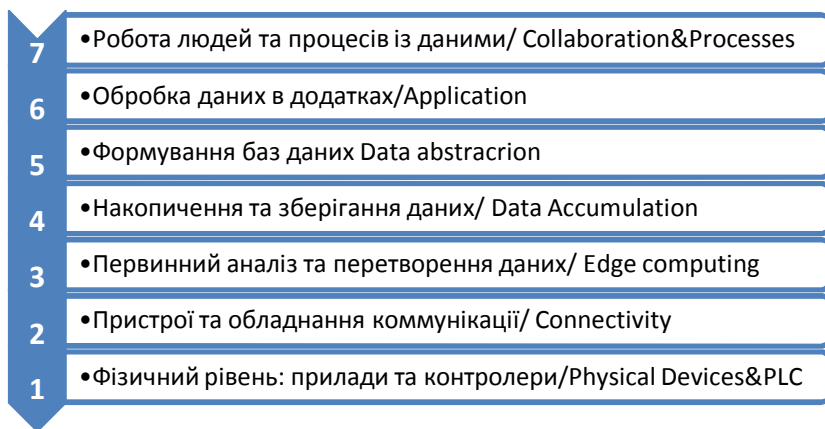


Рисунок 1.20 – Формалізована еталонна модель IIoT (Reference Model of IIoT)

П'ятирівнева архітектура мережі IoT складається з наступних рівнів та об'єктів:

1. Фізичний рівень об'єктів, також відомий як рівень пристроїв, містить фізичні пристрої, які використовуються для збирання та обробки інформації з екосистеми IoT. Фізичні пристрої включають різні типи датчиків, такі як ті, які зазвичай базуються на технологіях мікроелектромеханічних систем (MEMS).

Датчики можуть бути оптичними, датчиками світла, датчиками, що реагують на жести та близькість, датчиками дотику та відбитків пальців, датчиками тиску тощо. Методи стандартизованого підключення і відтворення повинні

використовуватися для інтеграції та налаштування неоднорідних типів датчиків, що належать до пристроїв системи IoT. Дані пристрою, які збираються на цьому рівні, переносяться на рівень абстракції об'єкта за допомогою безпечних каналів.

2. Комунікаційний рівень, рівень передачі даних, які збираються з об'єктів і передаються на рівень керування сервісом за допомогою безпечних каналів передачі. Передача даних може відбуватися за допомогою будь-якої з технологій RFID, 3G, GSM, UMTS, Wi-Fi, Bluetooth low energy, Infrared, ZigBee, NB-IoT, LoRaWAN тощо.

3. Рівень управління сервісом діє як проміжне програмне забезпечення для системи IoT. Цей шар надає конкретні послуги своєму запиту на основі адрес та імен, забезпечує гнучкість при роботі над різними типами неоднорідних об'єктів незалежно від їхніх платформ, також обробляє дані, отримані від попереднього рівня. Після обробки даних приймаються необхідні рішення щодо надання необхідних послуг, які потім виконуються за допомогою мережевих протоколів.

4. Рівень додатків забезпечує різноманітні види послуг, які вимагає замовник. Тип послуги, що запитується клієнтом, залежить від конкретного випадку використання, прийнятого замовником.

5. Бізнес-рівень виконує загальне управління усіма діями та службами IoT. Тут використовуються дані, отримані від попередніх рівнів, для створення компонентів, таких як бізнес-моделі, графіки та блок-схеми. Цей рівень несе відповідальність за розробку, аналіз, впровадження, оцінку та моніторинг вимог системи IoT. Тут використовується великий аналіз даних для підтримки прийняття рішень та виконується порівняння отриманих результатів проти очікуваних результатів для підвищення якості послуг [51]. Таким чином цей рівень пов'язаний із менеджментом якості.

На рисунку 1.21 зображена схема взаємозв'язку рівнів обробки даних в IoT із задачами менеджменту (бізнесу, виробництва) і задачами безпеки передачі даних. Варто зазначити, що дані в мережах IoT поки що захищені слабо. Тут показані три нижніх та шостий рівні еталонної моделі, робота інших поєднана в символах Internet та Cloud.

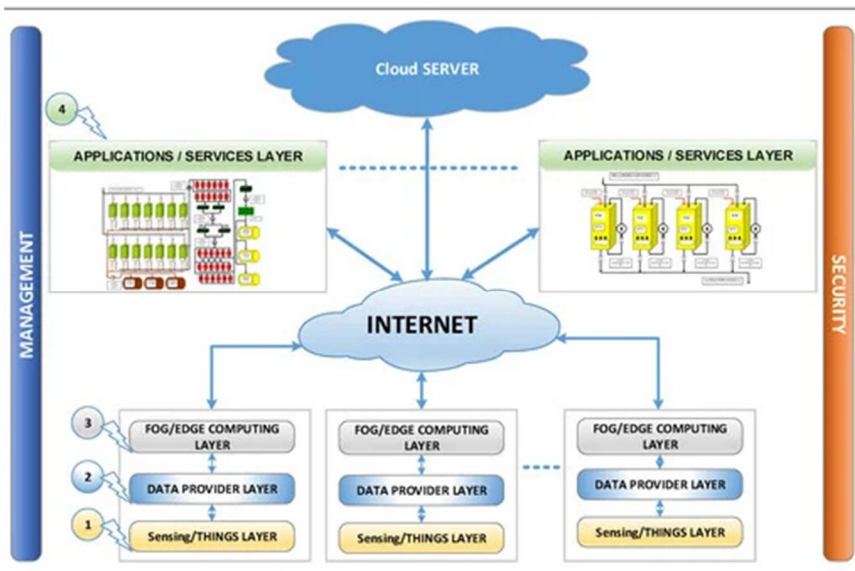


Рисунок 1.21 – Схема взаємозв'язку рівнів обробки даних в ІоТ

1.8 Апаратна база цифрового виробництва

Оскільки цифрове виробництво є CPPS, його «фізична», матеріальна складова розвивалася таким чином, щоб збільшити ступінь своєї інтелектуальності для підвищення ефективності керування активами/обладнанням (Assets) виробництва.

Вбудовані (Embedded System) та особливо мехатронні системи (Mechatronics System) стали основою кібер-фізичних систем, оскільки є синергетичними системами, які поєднують функціонали різних доменів (наприклад, силової, інформаційної електроніки із механікою в мехатронних системах). Виконавчі механізми (актуатори) із електроприводом поєднуються із Smart Sensors та програмованими логічними контролерами у сучасні мехатронні системи, керування в яких здійснюється шляхом подачі сигналів на актуатор після аналізу отриманої від датчиків інформації. Часто мехатронні системи входять до інших систем автоматичного регулювання та керування.

Моніторинг параметрів процесів та прийняття рішень щодо керування фізичними активами часто покладається на штучний інтелект (AI), тобто делегується кібер-надбудовам CPPS та хмарним сервісам [25].

Згідно із моделлю цифрового виробництва від Siemens (див. п.2.5), на польовому рівні (Field) в архітектурі цифрового виробництва – датчики (Sensors), пристрої живлення (Power Supply), системи ідентифікації (Industrial Identification), пристрої взаємодії та обміну даних у багатопроцесорних розподілених системах (Distributed I/O), системи керування двигунами/автоматизований електропривод (Drive Systems), інші системи, що забезпечують взаємодію у багатопроцесорних системах (Industrial Control).

На рівні керування роботизованими системами (Engineering Framework, Control) використовуються наступні пристрої із своїм програмним забезпеченням: контролери (PLC – Programmable logic controllers), мульти-функціональні дисплеї (MFD) та інші засоби для реалізації людино-машинного інтерфейсу (HMI – Human-machine interface), верстати із числовим програмним керуванням (CNC – Computer numerical control), системи, що забезпечують міжпроцесорну взаємодію (IPC – Inter-process communication), комунікаційні системи (Communication), системи контролю багатокоординатного руху (Motion Control) тощо.

На верхніх ієрархічних рівнях виробництва функціонують засоби забезпечення комунікації (в тому числі кібербезпеки / Cybersecurity) згідно механізмів ПоТ та ІоТ, для поєднання кібер-фізичних систем та їхніх підсистем із хмарними сервісами та між собою. Треба сказати, що вся апаратна база CPPS орієнтована на ПоТ/ ІоТ.

Четверта промислова революція, крім перерахованих вище сфер прискореного розвитку, може також задіяти широке впровадження 3D-друку, так звані адитивні технології (Additive technologies), друковану електроніку, пристроїв доповненої реальності, смарт-одягу та кібер-екзоскелетів та автономних роботів (коботів / Cobots), які будуть не компонентами автоматизованих ліній, як зараз, а цілком мобільними високоінтелектуальними пристроями, здатними працювати поруч з людьми.

Завдяки І4.0 і розумним фабрикам, звичайні й повторювані завдання поступово переходять від людей до коботів, які можуть виконувати їх швидко та без нагляду людини. Привабливість коботів нетривіальна для роботодавців: коботи можуть працювати вдень і вночі, і не вимагають перерв. Коли складність завдання перевищує певні пороги, або вимагає знань, які неможливо кодифікувати, завдання направляються безпосередньо до людського інтелекту [54] (рис. 1.22).

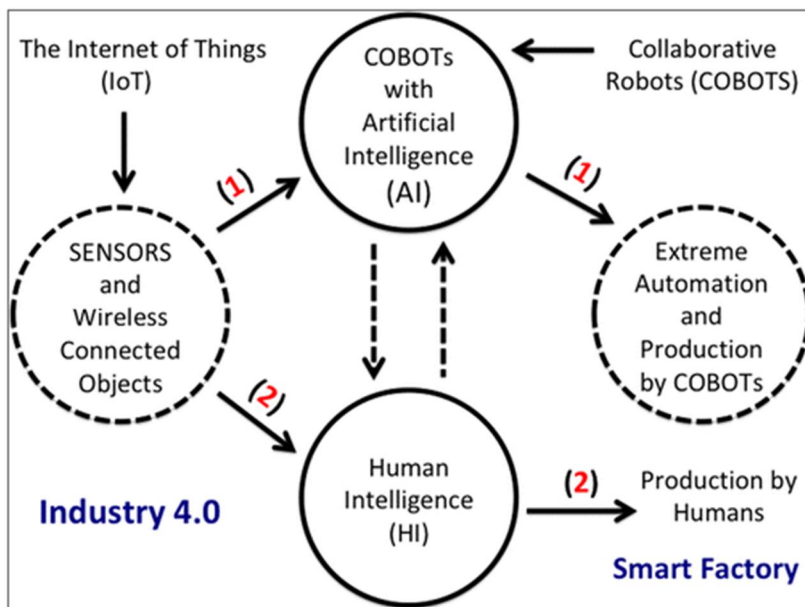


Рисунок 1.22 – Схема взаємодії людей і коботів в І4.0

1.8.1 Інтелектуальні датчики

Ключовими компонентами сучасних промислових систем є «розумні» датчики (Smart Sensors), які подають дані на контролери, монітори та інші операційні технології, що працюють на заводі. Мережа датчиків використовується роками, але поява Інтернету розширила можливості (та проблеми)

використання цих систем. Можливості проектування CPS також розширилися, коли датчики стали частиною промислового Інтернету речей (IIoT) [55,56]. Архітектура та принципи побудови мехатронних систем та CAP/CAK також зазнала змін.

Датчики відіграють різноманітні ролі на сучасному заводі. Окрім надання даних для контролю процесу, вони допомагають оцінювати якість, відстежувати активи, параметри логістики та навіть безпеку працівників. Поява потужного хмарного аналітичного програмного забезпечення та штучного інтелекту дозволила використовувати дані датчиків для зниження витрат на виробництво шляхом оптимізації процесів та прогнозного, предиктивного обслуговування. Після того, як дані датчиків передані в Інтернет, вони можуть бути використані в різних сферах та цифрових платформах CPPS: від управління постачаннями до глобальної координації виробничих ресурсів.

Практично для кожного типу процесу або умов навколишнього середовища є тип датчика, відповідний для його вимірювання. Традиційно інформація, яку надає ця безліч типів датчиків, залишається локальним ресурсом, обмеженим лише одним засобом чи навіть однією машиною. Поява недорогих, широкосмугових можливостей підключення, відкрила двері для доступу до даних датчиків з будь-якої точки Землі, а, отже, і до віддаленого моніторингу та контролю.

Оскільки Smart сенсори розвивалися в концепції 4.0 (див. рис.1.23 [57]), вони фактично самі стають вбудованими системами (Embedded System) із функціями вимірювання, первинної обробки та передачі даних, контролю, комунікації. Отже, Smart сенсори стають повноцінними функціональними підсистемами CPS та CPPS.

Розумні датчики 4.0, завдяки вбудованим трансмітерам та внутрішньому DSP-контролеру із алгоритмами спектрального аналізу, передають для подальшої обробки в хмарні сервіси вже очищені від шумів нормалізовані дані (тобто інформацію). Системи моніторингу на базі традиційних датчиків 3.0 мають іншу архітектуру, оскільки потребують «зовнішнього» мікроконтролера та інших засобів для передачі та обробки даних. Підключити датчик 3.0 до Інтернету можна, але це більш складна задача.

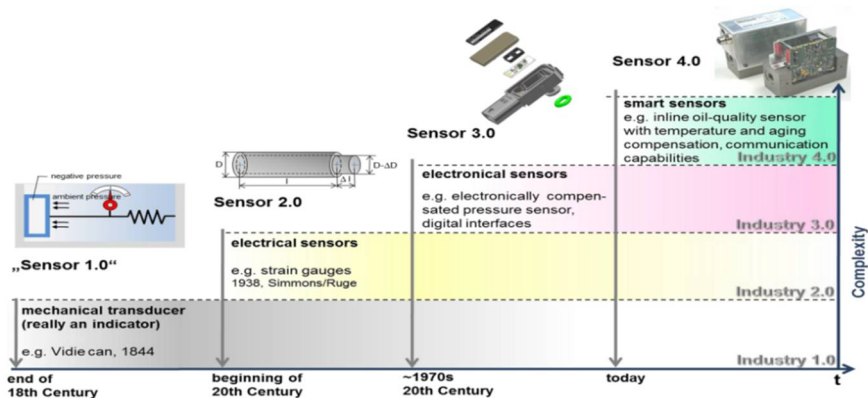


Рисунок 1.23 – Розвиток датчиків, перетворення їх на об’єкти 4.0 (Smart sensors)

Як видно з рис.1.23, складність та функціонал датчиків зростає: від первинного перетворювача механічного типу на першому етапі, електричних та електронних датчиків другого та третього етапу до повноцінних систем, які подібно до інших об’єктів 4.0 є синергетичним поєднанням традиційного функціоналу із можливостями ІТ-галузі, зокрема, IoT/IIoT.

Розумні прилади, пристрої та системи є основою CPPS. Еволюція апаратного забезпечення, перетворення його на об’єкти 4.0, показана на рисунку 1.24.

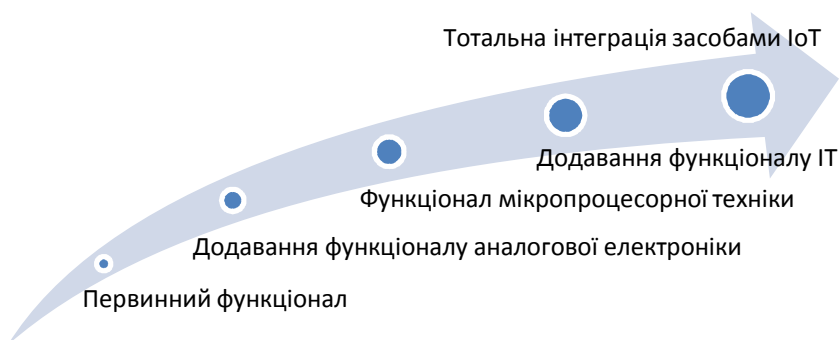


Рисунок 1.24 – Еволюція апаратного забезпечення

1.9 Висновки по розділу

Для забезпечення функціонування цифрового виробництва, яке, згідно концепції Індустрія 4.0, є кібер-фізичною системою, необхідно синергетично поєднати апаратне та програмне забезпечення на всіх ієрархічних рівнях, впродовж життєвого циклу продукту. Засобом такого поєднання є технології IoT/IIoT.

Апаратне забезпечення цифрового виробництва складається з розумних датчиків, контролерів, станцій, виконавчих механізмів (мехатронних систем), засобів комунікації та живлення.

Програмне забезпечення (Software, SW) складається зі спеціалізованого SW (прив'язаного до апаратного забезпечення) та цифрових платформ – надбудов CPPS, що здійснюють збір даних, візуалізацію та функції менеджменту як виробництва, так і бізнес-процесів. Перший тип SW виконує задачі керування (технічний аспект), другий тип SW виконує задачі управління.

Задача всіх складових та цифрового виробництва в цілому, – забезпечення конкурентоспроможності виробу та ефективності бізнеса. Оскільки ідеологія побудови цифрового виробництва базується на засадах забезпечення якості, саме тому моделі цифрової трансформації без виокремленої (як в моделі Siemens Digital Enterprise) системи менеджменту якості (QMS) також є прийнятними.

Еволюція засобів і способів передачі даних, поява Smart-пристроїв, які працюють напряму із IoT, призвела до появи нових архітектур і технологічних рішень при побудові виробничих систем. Класична система для прийняття рішень людиною поступово замінюється системами для прийняття рішень машиною. В першому випадку, це обробка інформації, отриманої від сенсора процесором і візуалізація в SCADA (сенсор-PLC-HMI). В другому випадку, smart sensor сам має вбудовану систему обробки та передачі інформації через IoT у Хмарні сервіси, він виконує нормалізацію та передачу даних, здійснює фільтрацію шуму, формування сигналу, тобто сам стає «об'єктом 4.0». Узагальнюючи, можна сказати, що підсистеми CPPS мають ознаки «4.0», наприклад, сучасні мехатронні системи. Ступінь автономності таких мехатронних систем варіюється: від коботів та рою роботів (повнорозмірні функції CPS), до вбудованих

підсистем, які делегують частину своїх функцій іншим підсистемах та більш високим рівням CPS, особливо в галузі прийняття рішень та HMI.

Рівень (Cloud), до якого передають дані для аналізу та прийняття рішення штучним інтелектом та в якому спілкуються CPS між собою засобами IoT, показаний на рисунку 1.25. Підсистеми верхніх рівнів CPS, мають зворотній зв'язок із штучним інтелектом, як в галузі побудови цифрових двійників (Digital Twins), так і в галузі машинного зору, машинного навчання та інших технологій машинного інтелекту.

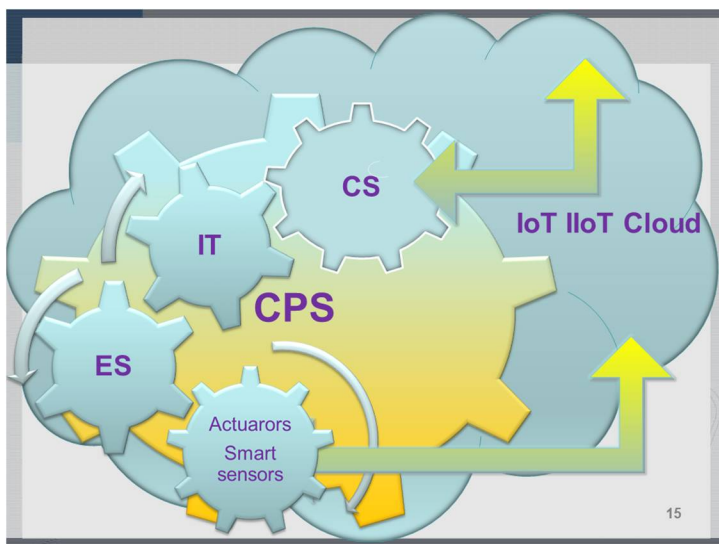


Рисунок 1.25 – Взаємодія підсистем CPS із Cloud-сервісами

На рис.1.25 композиція актуаторів (виконавчих механізмів), сенсорів та систем інформаційної та силової електроніки (Electronic Systems, ES) є мехатронними системами (Mechatronics Systems). Додавання можливостей інформаційних (IT) та комунікаційних систем (Communications System, CS), утворює кібер-фізичну систему (CPS). Як бачимо, Smart сенсори самостійно обробляють та передають інформацію до Cloud, після обробки, інформація повертається на всі рівні CPS для менеджменту (верхні рівні) та керування (на нижні рівні).

2 МЕНЕДЖМЕНТ ЯКОСТІ ЦИФРОВОГО ВИРОБНИЦТВА

2.1 Функціональні показники виробництва

За даними [58], у виробничих системах слід враховувати п'ять довгострокових цілей (рис.2.1):

Витрати (Cost), які можна виміряти в грошових одиницях і, як правило, складаються з постійних та змінних витрат.

Продуктивність (Productivity), яку можна виміряти за кількістю продукції, виробленої протягом певного періоду.

Якість (Quality), яку можна виміряти, наприклад, за рівнем задоволеності споживачів.

Гнучкість (Flexibility), що можна вважати здатністю системи виробляти різноманітну продукцію, наприклад.

Стійкість (Sustainability), що можна виміряти з точки зору екологічної стійкості, тобто біологічного та екологічного впливу виробничої системи.

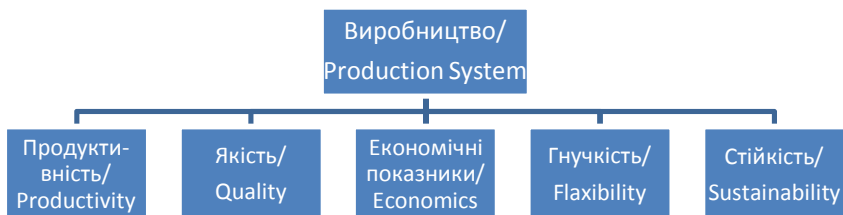


Рисунок 2.1– Основні показники виробництва

Відношення між цими п'ятьма об'єктами можна представити у вигляді піраміди, її верхівка пов'язана з найнижчою вартістю, найвищою продуктивністю, найвищою якістю, найбільшою гнучкістю та найбільшою стійкістю. Точки всередині цієї піраміди пов'язані з різними комбінаціями з п'яти критеріїв. Кінчик піраміди являє собою ідеальну (але, ймовірно, нездійсненну) систему, тоді як основа піраміди представляє найгіршу з можливих систем.

Рівні управління та керування цифровим виробництвом на прикладі архітектурної моделі Siemens Digital Enterprise [59] наведена на рисунку 2.2.



Рисунок 2.2 – Рівні керування виробництвом в моделі Siemens Digital Enterprise

Деякі нові функціональні можливості виробництва наведені нижче:

- простежуваність операцій;
- виявлення невідповідностей управління;
- відстеження даних для відділу кадрів;
- інженерне управління змінами проєкту;
- забезпечення циклів, в тому числі повернення на ремонт;

- статистичний моніторинг та контроль (Statistical process control, SPC) у режимі реального часу [60];
- підвищення виробничих показників (Business Objects, BOBJ);
- забезпечення інтеграції апаратного забезпечення (PCo);
- інтеграція ERP Shop Floor.

Процеси під керівництвом SAP (SAP ME) оптимізовані для конкретних вимог підтримки ІТ-процесів виробництва. Рішення MES, як правило, розширює конфігурацію. SAP Manufacturing Execution у поєднанні з SAP ME (Виробнича інтеграція та розвідка) та SAP ERP пропонує інтегроване рішення с-MES для управління та контролю виробничих процесів у всій компанії [61].

Скачати демо-версію SAP можна за посиланням [62].

2.2 Принципи побудови систем якості

При побудові та функціонуванні СЯ використовують стандарти, в тому числі і міжнародні. В міжнародному стандарті з термінології (ISO 9000) виділені два аспекти управління якістю: «загальне» управління якістю (quality management) і управління якістю як оперативна діяльність (quality control), так звані системи якості на виробництві (СЯ). В технічному значенні, СЯ призначені для контролю продукції на кожному етапі життєвого циклу, контролю технологій, діагностики устаткування. В економічному аспекті, СЯ виконують функції управління економікою якості, в тому числі планування витрат на функціонування СЯ, підготовки та навчання персоналу, дослідження ринків збуту та поставок тощо.

В управлінському аспекті, СЯ виконують функції визначення стратегії та тактики у сфері якості, розподілу обов'язків і повноважень кожного співробітника, розробки методологій управління якістю, осучаснення виробництва, аналіз конкурентоспроможності виробів, контроль за виконанням норм екології і безпеки праці.

Цикл Шухарта-Демінга (PDCA: плануй (Plan), роби (Do), перевіряй (Check), впливай (Act)) дозволяє ефективно управляти якістю на системній основі (рис.2.3). Практично всі програми для автоматизації менеджменту якості також базуються на цьому алгоритмі.

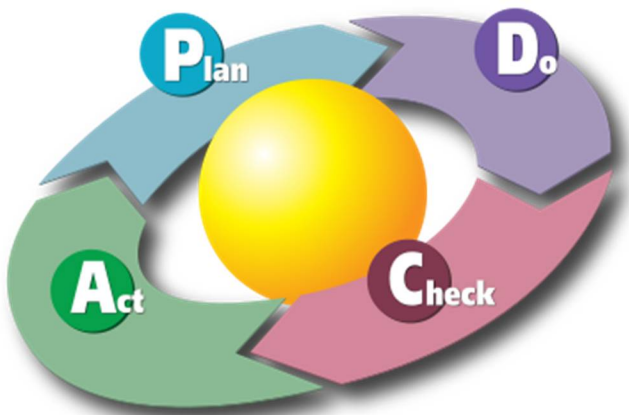


Рисунок 2.3 – Цикл PDCA

Програми і методики, спрямовані на комплексне керування якістю, поліпшення якості товарів, обслуговування і маркетингової діяльності мають відповідати принципам наскрізності та всеохоплення. Якість залежить від всіх підрозділів виробництва, постачальників та споживачів, критерії якості закладаються на етапах виробництва: від стадій техніко-економічного обґрунтування, маркетингу, проектування до виробництва та технічного обслуговування. Цільова функція СЯ – це задоволення вимог споживача. Системи управління якістю (СУЯ) являють собою синергетичне поєднання факторів, що впливають на якість. За допомогою цифровізації можна суттєво підвищити можливості керування якістю.

Цифровізація, залежно від її масштабів, може мати як функціональний, так і системний вплив на все виробництво. До функціональних відносяться нововведення, що зачіпають завдання тільки деяких з функцій управління якістю, системний

вплив призводить до необхідності повного переформатування систем забезпечення якості, та й менеджменту виробництвом в цілому. Цифровізація торкнеться всіх підрозділів апарату управління: технічних, технологічних служб, відділу кадрів, бухгалтерію тощо. Системна цифровізація має проводитися керівництвом для координації внесення змін у діяльність всіх підрозділів. Зрозуміло, що правильно проведені структурні зміни призведуть до революційних змін як з боку якості, так і з боку фінансово-економічних показників.

До службових обов'язків менеджерів з якості входять наступні функції:

1. керівництво розробкою, впровадження та обслуговування СУЯ;

2. сертифікація СУЯ;

3. контроль ефективності СУЯ.

СУЯ можна впровадити на будь-якому підприємстві.

Обов'язкові елементи СУЯ:

- відповідальність керівництва.
- управління ресурсами.
- система контролю вимірювань.
- система управління відхиленнями.

Підтвердження наявності на підприємстві СУЯ є сертифікат ISO 9001, виданий уповноваженим сертифікаційним органом.

Вигоди від впровадження СУЯ:

– своєчасне виявлення критичних процесів та їх виправлення;

– контроль якості абсолютно на всіх етапах виробництва;

– чітке розмежування відповідальності;

– економія завдяки зниженню відсотку браку;

– документально підтверджена безпечність продуктів, що

виробляються;

– створення репутації якісного виробника;

– підвищення конкурентоспроможності продукції;

– за рахунок впровадження зворотного зв'язку зі споживачами, збільшується ступінь лояльності і довіри до підприємства;

– оптимізується документообіг компанії [63,64].

Системи якості мають перетин, або перебирають на себе

функції систем управління відносинами з клієнтами (Customer relationship management, CRM), які використовуються компаніями для управління взаємовідносинами зі споживачами, постачальниками та партнерами.

Принципи побудови сучасних CRM і QMS (СУЯ) досить схожі:

1. наявність єдиного сховища інформації;
2. синхронізація управління множинними каналами взаємодії;
3. постійний аналіз зібраної інформації та прийняття відповідних рішень.

2.3 Моделі і стандарти управління цифровим виробництвом

У 2016 році основними гравцями руху, об'єднаними у Plattform Industrie 4.0 (Bosch, Cisco, ІІС, Pepperl + Fuchs, SAP, Siemens, Steinbeis Institute та ThingsWise) було встановлено, якою має бути еталонна архітектурна модель Industrie 4.0 (RAMI 4.0 – Reference Architectural Model Industrie 4.0), як має виглядати компонент І4.0, тобто оболонка для підключення промислових систем до Інтернету, та які відповідні стандарти необхідно розробити та узгодити між собою. Модель RAMI4.0 [65] зображена на рисунку 2.4.

На рисунку 2.5 [67] зображено два виміри цифрового виробництва згідно прийнятої архітектури RAMI 4.0.

Перший вимір – це матеріальне та пов'язане із ним програмне забезпечення кожного ієрархічного рівня виробництва (зображений ліворуч).

Другий вимір (праворуч) пов'язаний із системою контролю, моніторингу, прийняття рішень та керування (LCVSM – Life Cycle Value and Stream Management), глобальною задачею якої є оптимізація і задоволення вимог всіх «гравців» бізнес-процесів з оглядом на форми звітності та вимог, впродовж всього життєвого циклу (Life Cycle) виробу (від концепції до реалізації та утилізації).

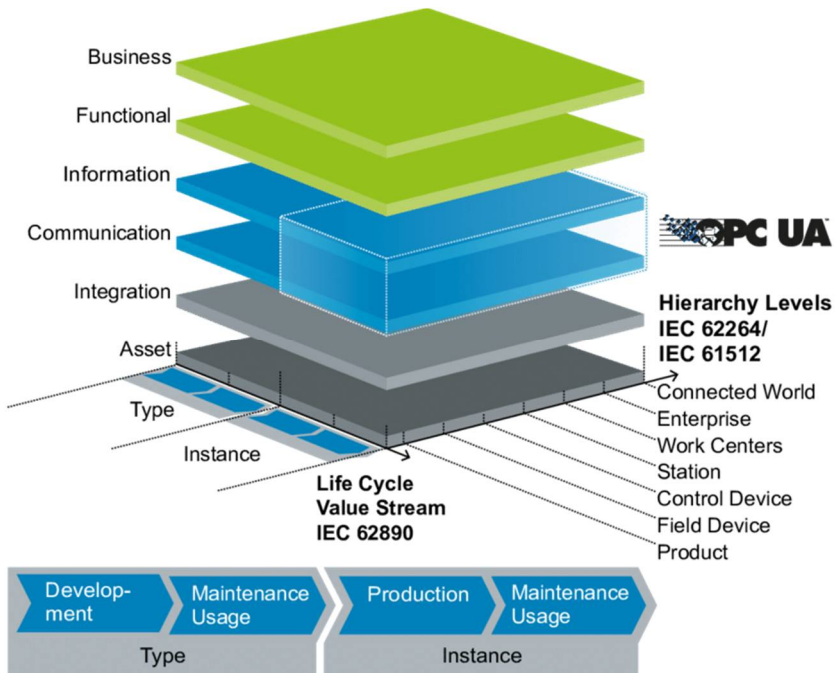


Рисунок 2.3 – Модель RAMI4.0 [66]

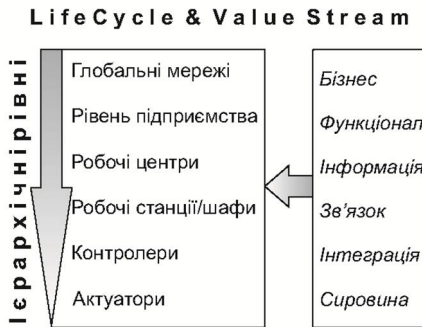


Рисунок 2.4 – Рівні та кооперація згідно RAMI 4.0

Перелік стратегічних органів ЄС, які розробляють спільні міжнародні підходи до стандартизації Industry 4.0 наведено в Додатку А.

Стандарт RAMI4.0 (Reference Architectural Model Industry4.0) розроблений спільно основними виробниками продукції в рамках Індустрії 4.0. Він специфікує ряд головних вже існуючих стандартів ISO/IEC промислової автоматизації та IT по вертикалі промислового підприємства та горизонталі (ланцюжку supply chain), визнається у всіх країнах ЄС.

Міжнародна асоціація виробників і користувачів систем управління виробництвом (MESA International) визначила в 1994 році модель MESA-11, а в 2004 році модель s-MES, які доповнюють моделі і стандарти управління виробництвом і виробничою діяльністю, що сформувалися за останні десятиліття, зокрема:

- стандарт ISA-95, «Інтеграція систем управління підприємством і технологічним процесом» («Enterprise-Control System Integration»), який визначає єдиний інтерфейс взаємодії рівнів управління виробництвом і компанією та робочі процеси виробничої діяльності окремого підприємства;

- стандарт ISA-88, «Управління періодичним виробництвом» («Batch Control»), який визначає технології управління періодичним виробництвом, ієрархію рецептур, виробничі дані;

- модель процесів ланцюжка поставок (Supply-Chain Operations Reference, SCOR): референтна модель для управління процесами ланцюжка поставок, що зв'язує діяльність постачальника і замовника. Модель SCOR описує бізнес-процеси для всіх фаз виконання вимог замовника. Розділ SCOR «Виготовлення» («Make») присвячений, в основному, виробництву.

Мета стандарту ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 9001:2015 [68] передбачає, щоб організація або підприємство створили таку систему менеджменту якості, яка забезпечувала б постійну якість з точки зору задоволеності вимогам клієнта. Стандарт встановлює вимоги, за якими організація повинна довести свою здатність систематично надавати продукцію, яка задовольняє вимоги замовника та регламенти нормативної документації. Тобто це сукупність процедур, методик, протоколів, планів, звітів та ряду інших задокументованих процесів, об'єднаних в систему.

Стандарт Industrial Internet of Thing: Reference Architecture

[69] – від північноамериканського Industrial Internet Consortium також базується на існуючих стандартах ISO/IEC/IEEE у всіх аспектах архітектури IIoT.

Некомерційне промислове співтовариство Open Applications Group (OAG) має своєю метою просування концепції функціональної сумісності між бізнес-додатками і розробку стандартів бізнес-мов для досягнення, в тому числі для компонентів RAMI 4.0.

NIST (National Institute of Standards and Technology, US) випустив програмну статтю Current Standards Landscape for Smart Manufacturing Systems, із найбільш повним оглядом сучасних стандартів по всім 4-м категоріям систем управління:

1. життєвому циклу самого продукту, яке виробляє підприємство;
2. життєвому циклу засобів виробництва, на яких виготовляється продукт;
3. циклу ланцюжка постачань (supply chain);
4. вертикалі підприємства, яка власне є на перетині всіх попередніх циклів.

Міжнародні комітети ISO/IEC/IEEE розробляють спеціальні видання, що специфікують застосування тих чи інших стандартів у відповідних сферах.

Кабінет Міністрів України від 21 липня 2021 р видав постанову № 750 «Щодо сприяння впровадженню технологічного підходу “Індустрія 4.0” в Україні» та на її основі затвердив «Положення про впровадження технологічного підходу “Індустрія 4.0”». В постанові №750 йдеться про сприяння утворенню та діяльності центрів впровадження технологічного підходу “Індустрія 4.0” на базі інфраструктури закладів вищої освіти, наукових установ, наукових та індустріальних парків за ініціативою, зокрема, місцевих органів виконавчої влади, органів місцевого самоврядування, суб’єктів господарювання.

Одним з таких центрів є Асоціація «підприємств промислової автоматизації України» (скорочено АППАУ) – об’єднання юридичних осіб, неприбуткова організація, заснована 2011 року. В рамках проекту aCampus (Awareness CAMPaign for better Use of Standards) – кампанії по росту обізнаності та кращого використання українськими замовниками та розробниками

міжнародних стандартів в області промислової автоматизації та ІТ, при АППАУ був створений Технічний комітет 185 «Промислова автоматизація» [70]. Однією з цілей ТК 185 є виведення п'яти стандартів на рівень ДСТУ: ІЕС 62443, ІЕС 61508, ІЕС 61512, ІЕС 62264, ISO 22400.

Станом на 2021 рік ці стандарти переведені на українську мову, до них додані білі книги та гайди. Для доступу до цих документів необхідно зареєструватись на сайті ТК 185. Однак, до групи стандартів архітектури Індустрії 4.0 входить понад 25 стандартів, які більш детально розкривають суть підходів у виробництві.

З отриманням цих стандартів немає складнощів, вони доступні для платного придбання на сайтах організацій-розробників, таких як ІЕС, ISO, DIN, а також спеціалізованих площадках, наприклад European standards [71] (www.en-standard.eu). В залежності від стандарту, ціна може варіюватись від 40 до 200 євро за один екземпляр.

Для подальшого розвитку Індустрії 4.0 в Україні в АППАУ діє програма членства на трьох рівнях. Що стосується членства в організаціях ІЕС та ISO, то Україну в них представляє П «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості» (ДП «УкрНДНЦ»), як національний орган стандартизації. При подальшому розвитку І4.0 в Україні, перекладені та прийняті закони можна буде придбати на сайті ДП «УкрНДНЦ», де вже доступні стандарти, перекладені ТК 185 від АППАУ.

Безкоштовні робочі (не остаточні) версії перекладів стандартів, що доступні на сайті ТК 185:

МЕК 62443-2-1 Промислові комунікаційні мережі – Інформаційна безпека мережі та системи;

МЕК 62264-1 Інтегрування систем керування підприємством та виробництвом. Частина 1: Моделі та термінологія;

МЕК 61512-1 Керування порційним виробництвом Частина 1: Моделі та термінологія;

МЕК 61508-1. Функційна безпека електричних / електронних / програмованих електронних систем, пов'язаних із безпекою – Частина 1: Загальні вимоги;

ISO 22400-2. Поправка 1: КПЕ для енергоменеджменту.

2.4 Ощадливе виробництво та Шість сигм

В якості інструментів трансформації СУЯ виступають сучасні методології процесного управління, що базуються на підходах Ощадливого виробництва (Lean Production), Шести сигм (Six Sigma) та вимогах до побудови систем управління бізнесом, сформульованих у стандартах ISO 9001:2015 [72-73].

Попри поліваріантність вищезазначених концепцій, всі вони поєднуються єдиною цільовою спрямованістю забезпечення перманентного досягнення бажаних економічних результатів діяльності бізнес-організацій на основі сучасних технологічних, соціальних, економічних, споживчих трендів, які створюють принципово нові передумови для створення та пропонування споживчої цінності.

Методологія Lean Six Sigma з'явилася в результаті об'єднання методів Lean Production, основою якого є скорочення і прискорення процесів, і Six Sigma [74,75] – методології управління якістю, спрямовану на зниження варіацій в процесах, покращення якісних характеристик продукту через призму максимального задоволення запитів клієнтів. Обидва методи мають давню історію успішного застосування, але найбільшу користь продемонстрував досвід їх спільного використання, де вони підсилюють дію один одного [76].

Сьогодні методологія Lean Six Sigma успішно застосовується провідними світовими компаніями у всіх сферах економічної діяльності. Із впровадженням Lean Six Sigma можна одночасно прискорити процеси виходу на ринки конкурентоспроможного товару на 20-70%; підвищити якість продукції та послуг на 20-40%; підвищити ефективність на 10-30%; значно покращити задоволеність споживачів.

До українських компаній, які активно запроваджують інструментарій Lean Six Sigma в процесі трансформації своїх бізнес-моделей, можна віднести: Київстар, Nestle, УПЕК, Tikkurila, Ромстал Україна, AgroGeneration, ПАТ «Маріупольський металургійний комбінат імені Ілліча», ДТЕК Енерго, АТБ, Coca-Cola, АО «Новий стиль», Інтерпайп та багато інших.

2.5 Менеджмент виробництва в Siemens Digital Enterprise

Менеджмент якості Siemens Digital Enterprise здійснюється окремою платформою QMS, яка інтегрує свою діяльність із іншими цифровими платформами. Так, система оперативного управління виробничими процесами (MES) від Siemens гарантує якісний і ефективний виробничий процес із систематичною on-line підтримкою. Система управління виробничими процесами може навіть об'єднувати кілька виробничих об'єктів, вона легко інтегрується з обладнанням, контролерами, PLM-системами, корпоративними бізнес-додатками, системами управління якістю, системами управління лабораторними даними і багатьма іншими додатками. Це дозволяє досягти прозорого управління підприємством із повною керованістю виробничими процесами, із можливостями гнучко перелаштовувати, перебудовувати та оптимізувати виробництво, тобто підвищує якість виробництва в цілому. Переваги такого підходу у менеджменті:

- активне та прозоре управління і забезпечення якості;
- повна контрольованість та візуалізація виробничих процесів;
- безперервне поліпшення системи, без зупинки виробничих процесів;
- підвищення якості продукції, швидке реагування на запити ринку, тобто підсилення бренду;
- підвищення прибутку.

Кібер-надбудова для менеджменту Siemens Digital Enterprise має назву SIMATIC IT. Вона є масштабованою, і може набиратися з наступних основних підсистем:

SIMATIC IT Production Suite – масштабований модульний набір програм, що дозволяє компаніям підвищити ефективність виробництва, забезпечити прозорість роботи та оптимізувати відповідність виробництва.

SIMATIC IT R&D Suite – це рішення для переробних галузей. Це модульна, масштабована платформа для досліджень та розробок та якості. Сюди входить програмне забезпечення для автоматизації лабораторій (lab automation, LIMS), програми для специфікації та управління даними про товари, електронний лабораторний блокнот, управління формулами та рецептами,

засоби для цифрового обміну даними, регуляторне управління тощо.

SIMATIC IT Manufacturing Intelligence Suite надає виробничим операторам, керівництву та керівникам покращений доступ до інформації про завод. Основні цілі – забезпечити інтеграцію та контекстуалізацію даних, допомогти в аналізі інформації для прийняття рішень у режимі реального часу.

SIMATIC IT Preactor, це сімейство провідних світових рішень для вдосконаленого планування (advanced planning and scheduling, APS), призначене для роботи поряд із існуючими системами, а не їх заміни. SIMATIC IT Preactor можна використовувати як для довгострокового планування, так і для детального планування, а замовники можуть вибрати можливості, які задовольняють як їх потреби, так і бюджет.

Отже, підсистеми і платформи для менеджменту виробництва SIMATIC IT, які включають галузеві функціональні можливості, дозволяють виробникам моделювати, візуалізувати та гармонізувати бізнес-процеси в усьому світі.

Варіант MES для виробництва напівпровідників та медичних виробів Camstar™ Enterprise розширює інтегровані рішення компанії Siemens щодо розробки продуктів та автоматизації виробництва. Набір послуг Camstar MES підтримує надзвичайно складні робочі процеси, автоматизований збір даних великого обсягу, масове налаштування, дискретне складання, пакетний процес тощо [77].

Платформа Camstar Electronics Suite від Siemens PLM поєднує в собі можливості контролю виробництва від Camstar та автоматизованого проектування від Mentor's Valor. Це настроювальне та масштабоване рішення MES дозволяє монтажникам друкованих плат (PCB) та проектувальникам корпусів підвищувати рівень ефективності та контролювати виробничі операції за допомогою прямого з'єднання Інтернету речей з машинами та виробничими лініями, тобто впроваджується безперервний цифровий тракт, який надає електронній компанії можливість вдосконалювати свою стратегію цифровізації відповідно до Індустрії 4.0.

Будь-яке проектне рішення можна інтегрувати за допомогою системи SIMATIC IT Unified Architecture Foundation, яка

забезпечує загальну платформу для вбудовування нових та застарілих програм та переходу до інноваційної системи з повністю масштабованим підходом.

Таким чином, відповідно до комплексу функцій, що реалізуються, а також підвищеними вимогами до надійності систем керування обладнанням, структурна схема віртуального виробництва являє собою багаторівневу ієрархічну структуру з розподіленими функціями контролю і керування.

2.5.1 Рівні АСК ТП

Технологічною платформою для побудови АСК ТП в моделі Siemens Digital Enterprise, є компоненти SIMATIC.

Відповідно до вимог стандарту ISA S95 АСК ТП розбивається на наступні рівні керування (рис.2.5):

рівень L0 включає контрольні-вимірювальні прилади, датчики, технічні засоби, що виконують функції автоматичних блокувань і захистів, комутації керуючих сигналів на виконавчі механізми і ручного керування обладнанням, місцеві панелі керування;

рівень L1 реалізується на базі індустріальних контролерів і виконує функції керування технологічним процесом і обладнанням (SIMATIC S7);

рівень L2 реалізується на базі індустріальних персональних комп'ютерів і операційних панелей, що виконують функції візуалізації технологічного процесу та іншої необхідної інформації, прийому, передачі та обробки виробничої та техніко-економічної інформації, що надходить від усіх підсистем (SIMATIC PCS7, SIMATIC WinCC);

на рівні L3 використовується MES для галузі виробництва товарів Opcenter Execution Process (раніше – SIMATIC IT Unified Architecture Process Industries); яку імплементовано до більш глобальної концепції (тотальної) автоматизації Totally Integrated Automation (TIA);

на рівні L4 використовуються SAP системи (Systems Applications and Products in Data processing), які здійснюють облік матеріалів, специфікацій, маршрутів і замовлень; складають перелік компонентів (a bill of materials – BoM), ведуть записи /

транзакції, реєструють поточний стан операцій на виробництві (work in progress, WIP). Система також розвивається в концепції ТІА.

Архітектура моделі менеджменту, тобто рівні та об'єкти управління цифрового виробництва Siemens Digital Enterprise [59] наведена на рисунку 2.5.



Рисунок 2.5 – Рівні керування виробництвом

Таким чином, модель Siemens Digital Enterprise є CPPS, два верхніх рівні є кібер-компонентами, два нижніх є фізичними компонентами, на середньому рівні (L2) здійснюється їхня інтеграція.

Загальний вигляд виробничої частини, укомплектований обладнанням від Siemens, зображений на рисунку 2.6.



Рисунок 2.6 – Цифрове виробництво із обладнанням Siemens

2.5.2 Система менеджменту якості QMS Siemens Digital Enterprise

Система менеджменту якості (QMS) цифрового виробництва від фірми Siemens [78], яка встановлюється «під ключ» як окрема платформа, може бути прикладом інтеграції функцій менеджменту якості та бізнес-процесів. Підприємства, які не мають можливості, або потреби будувати цифрове виробництво «з нуля» можуть використовувати інші підходи побудови систем менеджменту якості, що буде розглянуто далі.

Окрім моніторингу процесів та спрацьовування сигналів тривоги, QMS можуть безпосередньо співпрацювати з виконавчими системами виробництва (MES) та виробничою інформацією, щоб забезпечити відповідність корпоративним та галузевим нормам, а також включити програми якості, такі як

Lean та Six Sigma. Як наслідок, QMS допомагають постійно покращувати якість продукції та запобігати несприятливим подіям. Завдяки єдиному підходу до виробництва, якості та інтелектуальним можливостям, QMS є частиною замкнутого виробничого циклу, що покращує якість продукції та процесу. У єдиних середовищах CPPS, QMS розширюють можливості контролю та поліпшення якості виробу та виробництва за рахунок моніторингу та предиктивного аналізу, дозволяють передбачати нештатні ситуації виробничого або невиробничого походження.

QMS від Siemens Digital Enterprise жорстко інтегрована з MES та, отже виробничою інформацією, що забезпечує швидку ідентифікацію, стримування, оцінку ризиків, здійснення коригування та реалізації запобіжних заходів. В результаті, повернення продукції через проблеми із якістю – мінімальні, більше того, QMS впливає і на оптимізацію технологічних циклів.

Саме тому, систему QMS від Siemens Digital Enterprise можна вважати зразковою і рекомендувати до впровадження, але є одне «але»: оскільки ця система інтегрована у кібер-фізичний простір моделі Digital Enterprise та спирається на апаратно-програмні засоби нижніх рівнів, які також є продуктом корпорації Siemens («розуміє їхню мову передачі даних»), неможливо впровадити цю систему окремо, не впроваджуючи в повному масштабі цифрове виробництво Siemens Digital Enterprise, його фізичні та кібернетичні складові.

2.5.3 Реалізація компоненту цифрового виробництва на базі апаратно-програмного забезпечення Siemens

В якості прикладу менеджменту компоненту цифрового виробництва розглянемо систему автоматизованого керування (САК) (Automated Control System – ACS) технологічним процесом на нижньому, «польовому» рівні (Field Level), на другому рівні (Control Level) та на операційному рівні (Operation Level). Наприклад, САК складається з контрольновимірювальних приладів, датчиків, технічних засобів, що виконують функції автоматичних блокувань і захисту, комутації керуючих сигналів на виконавчі механізми (Actuators),

обладнання для ручного керування, місцеві панелі керування. Два нижніх рівні, в більшості випадків, поєднують мехатронні пристрої (системи) [25].

Для системи автоматизації виберемо централізовану систему керування (рис. 2.7), в якій передбачена можливість керування процесом зі щита керування через мультифункціональний дисплей (Multi-Function Display – MFD) та автоматизоване робоче місце (APM) оператора (the automated workplace of the operator – AWP) із встановленим на ньому SCADA.

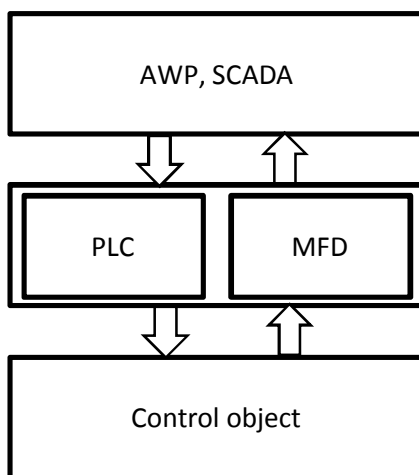


Рисунок 2.7 – Ієрархічна структура нижніх рівнів цифрового виробництва – (CAK)

Більш детально параметризовану (із обладнанням, протоколами) структурну схему CAK, на трьох нижніх рівні архітектури RAMI 4.0, представлено на рисунку 2.8. Тут представлено два нижніх рівні, які є базовими для отримання даних для SCADA, цифрового двійника, машинного навчання. Також з цих рівнів поступає оброблена в Хмарних сервісах інформація для системи управління якістю, яка відноситься до верхніх рівнів, згідно стандарту ISA S95.

На рисунку 2.9 зображений приклад керування та управління компонента цифрового виробництва Siemens.

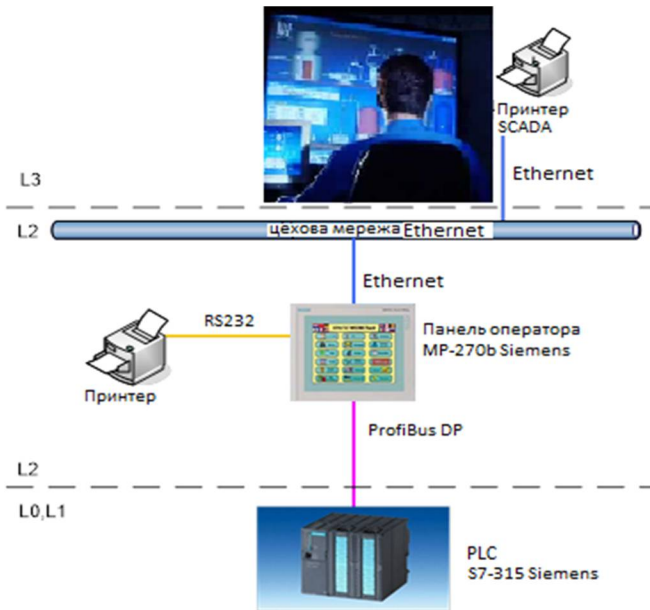


Рисунок 2.8 – Структурна схема САК як компонента цифрового виробництва Siemens

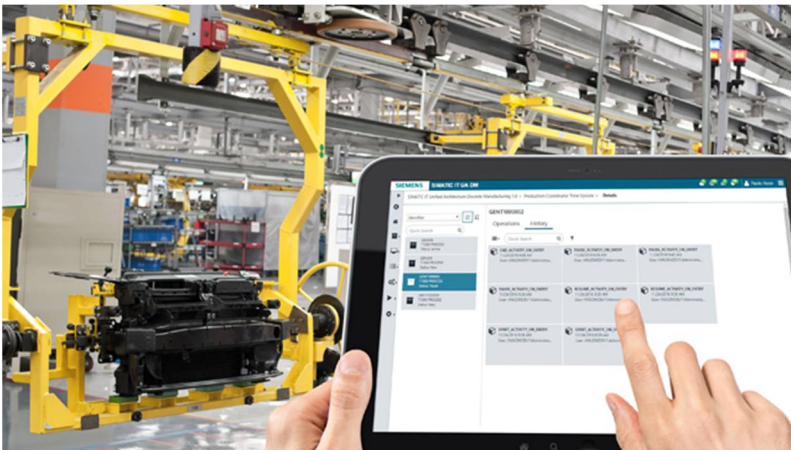


Рисунок 2.9 – Огляд і контроль у режимі реального часу на виробничих операціях на платформі Siemens

2.6 Висновки по розділу

При впровадженні нових підходів менеджменту якості необхідно враховувати, що програмне забезпечення Система управління якістю (QMS) є однією з кібер-надбудов цифрового виробництва, яке є кібер-фізичною системою, тому QMS інтегровані як із іншими надбудовами (цифровими платформами), наприклад із MES та ERP, так і з виробничими активами, через датчики та технології збору, обробки та аналізу даних.

Отже, функції QMS цифрового виробництва не тільки розширені порівняно із виробництвом «3.0», але й нерозривно поєднані із функціями інших цифрових платформ та апаратного забезпечення всіх рівнів прийнятої моделі цифрового виробництва задля забезпечення його ефективної роботи як єдиної «екосистеми».

Моделі впровадження QMS можуть бути різними. Вони можуть бути виокремлені, як в моделі цифрового виробництва Siemens Digital Enterprise, або існуючі цифрові платформи MES та ERP/SAP можуть частково виконувати їхні функції, це залежить від моделі та масштабу цифрової трансформації виробництва.

Наразі в світі активно розробляються моделі і стандарти управління автоматизованим виробництвом згідно концепції I4.0, але є необхідність враховувати тренди I5.0, напрями розвитку технологій (оцінити переваги машинного навчання порівняно із Цифровими двійниками) і цифрових платформ (розширення функціоналу, злиття та поглинання), задля впровадження найбільш актуальних та гармонійних моделей і підходів управління під час цифрової трансформації.

3 ПЕРСПЕКТИВИ УПРАВЛІННЯ ЦИФРОВИМ ВИРОБНИЦТВОМ

Розвиток цифрового виробництва йде двома шляхами: революційно та еволюційно. Перший шлях передбачає революційні зміни, які стосуються впровадження нових концепцій, методологій тощо. Наприклад, концепція Індустрії 5.0, хоча і базується на досягненнях Індустрії 4.0, означає зміну підходів до побудови виробництва в цілому, тобто вимагає системних змін. Поява розумних датчиків також призвела до революційних змін в архітектурі керування активами.

В другому варіанті, це відбувається через розвиток кожної зі складових цифрового виробництва як CPPS: впровадження новітніх матеріалів, наприклад для адитивного виробництва/Additive Manufacturing, приладів і пристроїв (апаратна, «фізична» складова), засобів керування та платформ для управління (кібер-складові). З точки зору апаратного забезпечення, покращуються можливості датчиків, контролерів та інших пристроїв та технологій передачі даних в IoT мережах. Можливості віддаленого моніторингу та керування поліпшуються при використанні нових стандартів та технологій, наприклад, стандарту стільникового зв'язку, створеного для приладів телеметрії з низьким об'ємом передачі даних NB-IoT [51], сенсорних мереж. Основне призначення сенсорних мереж, це обмін даними між вузлами по децентралізованій мережі, збір інформації, що передається від датчиків (температури, тиску, вологості, рівня радіації, акустичних коливань тощо) в центральний вузол з метою аналізу та обробки. Технологія NB-IoT розглядається як еволюція від стільникового зв'язку до IoT.

Як було зазначено раніше, термін «керування» пов'язаний із фізичною складовою (активами/Assets): з методами, процесами та способами використання датчиків, контролерів, обчислювальної техніки і систем зв'язку для створення, збору, передачі, оброблення, моніторингу та візуалізації значимих даних (інформації). Термін управління (менеджмент) пов'язаний із питаннями загального нагляду та управління процесами виробництва, бізнесу, матеріальними ресурсами та персоналом.

Менеджмент якості включає багато аспектів, це, фактично,

комплексна оцінка якості виробу та виробництва в цілому, тому розвиток всіх складових CPPS беззаперечно впливає на якість.

Розширення можливостей систем менеджменту якості відбувається за рахунок:

- підвищення якості продукції та організації виробництва за рахунок контролю виробничих процесів в реальному часі (моніторингу та контроль виробництва);

- впровадження предикативного контролю [79];

- збільшення пропускну здатності шляхом швидкого виявлення та вирішення проблемних областей (невідповідні процеси, логістичні проблеми або нестача матеріалів);

- приведення до відповідності нормативним вимогам, підтримка простежуваності та звітності;

- управління генеалогією та автоматизованим збором даних;

- підвищення гнучкості та адаптивності, для відповідності вимог ринку та задоволення конкретних вимог замовника, можливість зміни виробництва, щоб задовольнити різноманітний попит;

- перехід на безпаперове виробництво (паперові звіти та інша документація повністю диджиталізується на основі електронних систем);

- повної прозорості, спостереження в реальному часі всіх виробничих циклів, моніторингу та швидкого усунення нештатних ситуацій та аварій, що забезпечить стабільну якість продукції;

- полегшення технічного обслуговування та мінімізація час простою забезпечить безперебійне виробництво;

- збільшення рентабельності активів та загальної ефективності обладнання тощо.

Нарощуються можливості існуючих цифрових платформ, та з'являються нові програми для контролю якості виробництва, наприклад, з 1994 по 2004 рік з'явилися такі інформаційні системи:

- Advanced Planning & Scheduling (APS) – вирішують задачі складання виробничих розкладів в рамках всього підприємства;

- Enterprise Asset Management (EAM) – відповідають за управління технічним обслуговуванням і ремонтами.

Ці програми обмінюються даними із платформами MES, які також зазнають змін. Розробка нової моделі MES (Collaborative Manufacturing Execution System, c-MES) була викликана тим фактом, що при управлінні процесними виробництвами і ланцюгами поставок надійний обмін інформацією між декількома системами необхідний набагато частіше, ніж обмін між кількома рівнями однієї системи. У попередньому поколінні MES основна увага приділялася забезпеченню інформацією користувачів з числа оперативного персоналу, таких як диспетчери, оператори або менеджери. Нова модель c-MES дає можливість отримати повну картину того, що відбувається, необхідну для прийняття рішень і на верхньому рівні менеджменту. Зокрема, при управлінні ланцюгами постачання й прийнятті рішень c-MES [80] надає інформацію про можливості виробництва («що»), продуктивності («скільки»), розклади («коли») і якості («доступний рівень»). Функції, що відносяться до складання виробничих розкладів (ODS), технічного обслуговування та ремонту (MM), а також документообігу (DOC) були виключені з базової моделі MES.

3.1 Інтеграція цифрових платформ

Одним з трендів розвитку систем менеджменту якості є їх інтеграція із іншими цифровими платформами, яка йде також двома шляхами: цифрові платформи розширюються та поглинають одна одну, або одна з них розвивається окремо, доповнює свої функції та стає повноцінною системою менеджменту цифрового виробництва. PLM, ERP та MES об'єднуються, щоб створити основу для сучасної інтерпретації ощадливого виробництва.

В статті [80] описані переваги впровадження інтегрованих цифрових платформ, зокрема, SAP ME:

- управління та контроль виробництва та виробничих цехів;
- інтеграція бізнес-систем на виробничих ділянках (в цехах);
- повна відстежуваність компонентів і процесів у глобальних операціях.

Процеси під керівництвом SAP ME оптимізовані для конкретних вимог підтримки ІТ-процесів виробництва. Рішення MES, як правило, розширює конфігурацію. SAP Manufacturing Execution у поєднанні з SAP ME (Виробнича інтеграція та розвідка) та SAP ERP пропонує інтегроване рішення c-MES для управління та контролю виробничих процесів у всій компанії [81,82].

Більшість даних ERP, що надходять до MES, містять зміни або реструктуризовані дані від PLM. Крім того, системи PLM дозволяють моделювати виробництво та логістику, здійснювати цифрову та віртуальну оптимізацію. Звідси потреба в тому, щоб цикл зворотного зв'язку MES-ERP поширювався далі і до PLM, замикаючи цикл менеджменту. Змінюються і принципи проєктування для виготовлення та складання (Design for Manufacturing and Assembly – DFMA [83]).

Інтерфейси східного (спадного, Downstream) проєктування PLM-MES включають переліки матеріалів та процесів (Bills of Materials and Process, BoM and BoP), компоненти, списки процесів, робочі інструкції, технічні замовлення на зміни, сертифікати робіт, типи ресурсів, ресурси управління тощо. Інтерфейси висхідного (Upstream) проєктування MES-PLM включають дані про продукти та процеси із замкнутим циклом, запити на зміну з розміткою, оновлені робочі інструкції, режими відмов, невідповідності тощо.

Інтеграція PLM-MES дозволяє постійно реагувати на зміни вимог ринку/попиту, поширюючи найновіші конструкції виробів та методи монтажу до більш логічно послідовного та ефективного виробничого ланцюга. В [84] показано, що в реаліях сучасного ринку, тільки поєднанням традиційних (і окремих раніше) програм та систем, що забезпечують життєвий цикл виробу (PLM, MES, ERP тощо), забезпечується перехід до повністю (тотально) автоматизованого виробництва (Virtual, Digital Manufacturing, Total Industrial Automation).

Інтеграція між PLM та MES дозволить реалізувати синхронізовану систему, де проєктування та виробництво продукції жорстко пов'язані. PLM містить інформацію, необхідну для визначення властивостей кінцевої деталі, що виготовляється, MES містить інформацію, необхідну для перетворення продукту,

визначеного в PLM, у фізичний об'єкт, такий як маршрутизація та параметри процесу. PLM також містить дані щодо характеристик, необхідних для забезпечення належної якості продукції, тоді як MES містить оперативні етапи, необхідні для оцінки якості продукції. Таким чином, MES має містити лише інформацію про процес, тоді як інформація про товар повинна зберігатися в PLM; однак у багатьох випадках MES також містить інформацію про товар. Це може призвести до дублювання інформації, з можливим ризиком помилок.

Якщо рухатися в зворотному напрямку (від виробництва до проектування), MES є сховищем кінцевої інформації, зібраної для поставок. Ця роль MES посилюється парадигмою I4.0: ресурси все більше будуть оснащуватися датчиками та пристроями для збору даних, і необхідний структурований підхід до їх аналізу та збору.

Зв'язок між PLM та MES дозволяє менеджерам та розробникам продуктів у будь-який момент виявити можливі критичні ситуації, оцінити їх вплив та розробити можливі рішення. Це може призвести до загального поліпшення якості продукції: як тільки критичність виявляється, проєктувальники можуть приймати рішення щодо її вирішення на основі даних, зібраних в MES, тобто формуються шаблони для пришвидшення проєктування та випуску оновлень [85].

Таким чином, інтеграція PLM, MES та ERP забезпечує полегшення обміну даними між функціональними областями техніки, цехами та офісом. Мета інтеграції полягає в забезпеченні прозорості, яка допоможе впорядкувати цикли доставки продукції, усунути зайві «ручні» процеси, допомогти попередньо визначити та виправити проблеми якості. Отже, мета глобальної автоматизації, перш за все – забезпечення попиту за рахунок підвищення якості / зменшення собівартості виробів та підвищення гнучкості виробництва (швидкості реагування на зміну попиту та ситуації на ринках сировини, збуту тощо).

Інтеграція ERP-в-MES стає дедалі стандартною практикою для синхронізації системи обліку для клієнтів, даних про замовлення та інвентаризації з цехом для підготовки до реальних виробничих потреб, а також для узгодження споживання матеріалів для кращого планування. Оскільки виробники

прагнуть пришвидшити час випуску продукції та встановити цикл зворотного зв'язку між проектуванням та виробництвом задля забезпечення якості продукції, створення зв'язків між усіма системами залишається довготерміновою перспективою, але експерти вважають, що це має бути обов'язковою умовою для виробників, які рухаються вперед. Без такої інтеграції обмін даними здійснюється вручну (що призводить до помилок та затримок), одночасно ускладнюючи аналіз та досягнення повної видимості основних бізнес-процесів. Навпаки, інтегрована платформа MES-PLM-ERP створює замкнутий цикл, що робить процес більш впорядкованим і призводить до отримання більш якісних продуктів.

Залежно від характеру, масштабу і особливостей виробничих структур і самих систем, існують різні комбінації поєднань корпоративних систем ERP, APS, MES, QMS в загальній структурі інформаційних систем управління підприємством.

Технічні можливості інтегрованих цифрових платформ:

- провадження виробництва на основі замовлення;
- відстеження та генеалогія WIP (замовлення, партія та серійний номер);
- контроль виробничого процесу;
- автоматизований збір даних;
- відстеження та управління робочою силою;
- відстеження та усунення дефектів;
- мобільні програми для бездротових сканерів штрих-коду;
- вбудована оптимізація записів для виробленої продукції;
- підтримка HANA DB;
- підтримка декількох браузерів тощо.

3.2 Технології Big Data в цифровому виробництві

Величезні обсяги інформації, що накопичуються в результаті «оцифрування» фізичного світу, можуть бути ефективно оброблені тільки комп'ютерами (в майбутньому, можливо, квантовими), із застосуванням хмарних обчислень і технологій штучного інтелекту (Artificial Intelligence). В результаті людина, яка контролює той чи інший процес, ситуацію, обстановку має

отримувати оброблені дані, максимально зручні для сприйняття, аналізу і ухвалення рішення.

Data Science – наука про методи аналізу даних і вилучення з них цінної інформації та знань. Вона перетинається з такими галузями, як машинне навчання і наука про мислення (Cognitive Science), а також із технологіями для роботи з великими масивами даних (Big Data). Результатом роботи Data science є проаналізовані дані і знаходження правильного підходу для подальшої обробки, сортування, вибірки, пошуку даних [86].

Великі дані (Big Data) – це сукупність технологій, покликаних:

- обробляти більші, у порівнянні зі «стандартними» сценаріями, об'єми даних.

- вміти працювати з даними, що швидко надходять у дуже великих об'ємах. Тобто даних не просто багато, а їх постійно стає все більше й більше.

- вміти працювати зі структурованими і мало структурованими даними паралельно та у різних аспектах.

Вважається, що ці «вміння» дозволяють виявляти приховані закономірності, що необхідно, наприклад, для предиктивного контролю.

Визначальними характеристиками для великих даних є, окрім їх фізичного об'єму, й інші, які підкреслюють складність задачі обробки і аналізу цих даних. Набір даних «VVV» (volume, velocity, variety – фізичний об'єм, швидкість приросту даних і необхідність їх швидкої обробки, здатність обробляти дані різних типів) був розроблений компанією Meta Group у 2001 році з метою вказати на рівну значимість управління даними по всім трьом аспектам. У подальшому з'явилась інтерпретація з чотирьох V (додалась veracity – достовірність), п'ятьма V (viability – життєздатність і value – цінність), семи V (variability – змінність та visualization – візуалізація).

Міжнародна консалтингова компанія McKinsey, що спеціалізується на розв'язанні задач, пов'язаних зі стратегічним управлінням, виділяє 11 методів і технік аналізу, що застосовуються до великих даних [51].

1. Методи класу Data Mining (видобуток даних, інтелектуальний аналіз даних, глибинний аналіз даних) –

сукупність методів виявлення у даних раніше невідомих, нетривіальних, практично корисних знань, необхідних для прийняття рішень. До таких методів, зокрема, належать: навчання асоціативним правилам (association rule learning), класифікація (розгалуження на категорії), кластерний аналіз, регресійний аналіз, виявлення і аналіз відхилень тощо.

2. Краудсорсінг – класифікація і збагачення даних силами широкого, неозначеного кола осіб, що виконують цю роботу без вступу у трудові стосунки.

3. Змішування та інтеграція даних (data fusion and integration) – набір технік, що дозволяють інтегрувати різноманітні дані з різних джерел з метою проведення глибокого аналізу.

4. Машинне навчання, включаючи навчання з учителем і без учителя – використання базових моделей, побудованих на базі статистичного аналізу для отримання комплексних прогнозів.

5. Штучні нейронні мережі, мережевий аналіз, оптимізація, у тому числі генетичні алгоритми.

6. Розпізнавання образів.

7. Прогнозна аналітика.

8. Імітаційне моделювання (simulation).

9. Просторовий аналіз (spatial analysis) – клас методів, що використовують топологічну, геометричну і географічну інформацію, що вилучається із даних.

10. Статистичний аналіз – аналіз часових рядів, A/B-тестування (A/B testing, split testing).

11. Візуалізація аналітичних даних – подання інформації у вигляді малюнків, діаграм, анімації тощо.

Технології Big Data можуть бути корисними при вирішенні наступних задач [87-90]:

- прогнозування ринкової ситуації;
- маркетинг і оптимізація продажів;
- вдосконалення продукції;
- ухвалення управлінських рішень;
- підвищення продуктивності праці;
- підвищення якості продукції;
- ефективна логістика;
- моніторинг стану основних фондів.

3.3 Штучний інтелект в цифровому виробництві

Штучний інтелект (Artificial intelligence, AI) – різні технологічні та наукові рішення і методи, які допомагають зробити програми за подобою інтелекту людини. AI охоплює безліч інструментів, алгоритмів і систем, серед яких також усі складові Data science і Machine learning (ML). AI – сукупність різних технологій, таких як машинне та глибоке навчання, аналітика, комп’ютерне бачення, які працюють і розвиваються разом, що дає можливість машинам імітувати людський інтелект. Як саме і на яких рівнях цифрового виробництва використовується AI, представлено на рисунку 3.1 [91].

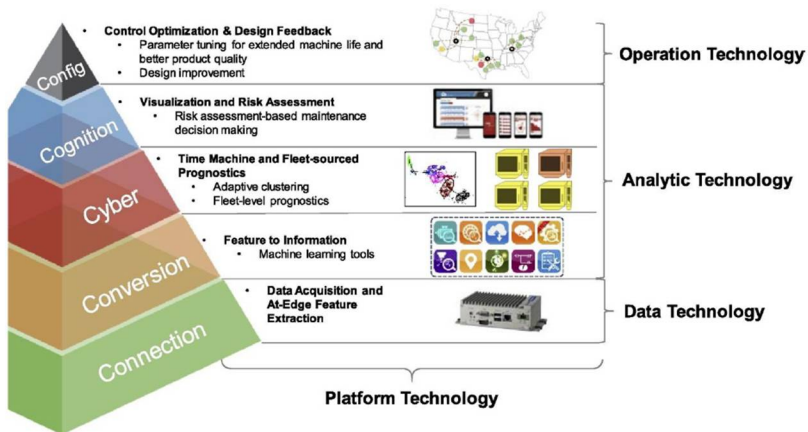


Рисунок 3.1 – Модель застосування штучного інтелекту в цифровому виробництві

Технології, пов’язані із даними /Data Technology (отримання та моніторинг даних) використовуються на рівні Connection. Технології аналізу інформації/Analytic Technology використовуються на рівнях Conversion (перетворення даних для машинного навчання); Cyber (прогнозне керування); Cognition (прийняття рішень). Операційні технології/Operation Technology на рівні Configuration цієї моделі використовуються для оптимізації діяльності, як в галузі досліджень і проєктування (R&D), так і в галузі виробництва.

Штучний інтелект широко використовується в технологіях кібер-фізичних систем, в тому числі цифрового виробництва, зокрема для реалізації машинного бачення, мислення (machine reasoning) та навчання, в робототехніці тощо. Ціль AI – отримання інформації з неструктурованих даних, розробка експертних систем, прийняття оптимальних рішень як поточних, так і стратегічних. В робототехніці завдяки AI посилюється інтелектуальна складова мехатронних систем.

Поєднання промислового штучного інтелекту та великих даних є базою для створення цифрового двійника, що допомагає виробникам швидко усунути неполадки у безперервному, дискретному або пакетному виробничому процесі шляхом аналізу наявних даних датчиків та виробництва. Ця технологія, яка використовує прогностичну аналітику, дозволяє користувачам аналізувати сценарії роботи, визначаючи вплив операційних змін на ключові показники продуктивності (KPIs) та виявляючи причини зміни ефективності. Наразі спостерігається збільшення використання AI та ML для прискорення фінансових процесів, оптимізації запасів, покращення і кастомізації обслуговування тощо. AI має бути вбудований і готовий до роботи з іншими системами, інакше підприємства зіткнуться з важким і дорогим проєктом інтеграції [92].

Швидка еволюція штучного інтелекту дає потенціал для розвитку цифрового виробництва. Замінюючи трудову діяльність швидшою та точнішою інтелектуальною автоматизацією, збільшуючи кількість працівників, які виконують завдання з більшою вартістю, роблячи запаси більш продуктивними, AI, безсумнівно, принесе нове зростання цій галузі. Дослідження Accenture показує, що AI додасть виробничому сектору приблизно 3,7 трильйона доларів до 2035 року [93].

3.4 Цифрові двійники як фактор підвищення якості продукції та ефективності виробництва

Цифровий двійник, це віртуальна копія машин, або заводу, яка створюється з використанням тривимірного моделювання, фізичних правил і математичних рівнянь. У реальному часі дані датчиків від реальної машини передаються цифровому

двійникові, постійно підвищуючи точність моделювання. Використовуючи аналіз великих даних, цифровий двійник може розпізнавати аномальні дані датчиків і генерувати попередження про можливу відмову.

Цифровий двійник має також і низку мінусів: його створення вимагає значних витрат часу і ресурсів, участі керівників підприємств, інженерів-технологів і експертів з моделювання в електричних, механічних та інших доменах, для розгортання цифрового двійника повинні бути доступні всі фізичні креслення, щоб можна було створювати віртуальні моделі. На жаль, заводські креслення не завжди оновлюються, що ускладнює розгортання цифрового двійника та його постійне оновлення.

Крім того, впровадження цифрового двійника потребує дуже високих швидкостей передачі та обробки даних, що в свою чергу потребує надсучасного апаратного та програмного забезпечення. Цифровий двійник варто розгортати там, де цифрові платформи уніфіковані (як приклад, Siemens Digital Enterprise), або є прості засоби передачі та перетворення даних як від інженерних систем до систем менеджменту виробництва і бізнес-процесів, так і в зворотному напрямку.

Сучасні Digital Twins використовують нейронні мережі, машинне навчання та штучний інтелект, які обробляють виробничі дані, отримані датчиками, для отримання уявлення про процес без безпосереднього тестування у виробничому цеху. Таким чином, між штучним інтелектом та цифровими двійниками існує міцний зв'язок, оскільки велика кількість даних останніх може підживити та навчити моделі AI, щоб вони могли робити точні прогнози.

Впровадження Digital Twins та AI у виробництво дозволяє:

1. полегшити збір виробничих даних завдяки датчикам IoT (Smart sensors);
2. вдосконалити людино-комп'ютерну взаємодію шляхом використання доповненої реальності, віртуальних помічників, чат-ботів тощо;
3. отримати нові знання, моделі [94].

Однією з головних переваг використання цифрових двійників і штучного інтелекту у виробництві є збільшення часу безперебійної роботи, оскільки можна краще передбачити

майбутні збої та підтримувати безперебійну роботу обладнання та зниження витрат на планування та проектування. Крім того, цифровий двійник, що використовує штучний інтелект, може передбачити, коли певне обладнання вийде з ладу, дозволяючи планувати технічне обслуговування з прогнозуванням, що, крім скорочення часу простою, може істотно зменшити витрати на технічне обслуговування. Інтеграція цифрових двійників та AI дає синергетичний ефект.

Однак, оскільки Digital Twins – це віртуальні копії реального процесу чи продукту, не завжди вдасться отримати ідеальні дані про виробництво, особливо з хімічними та біологічними реакціями, які мають змінні, які важко або дорого виміряти в режимі реального часу. Це означає, що необхідно подивитися на інші параметри, робити додатково різні вимірювання, щоб отримати проксі-дані, які можна використовувати в Digital Twins. Навіть якщо ці виробничі дані доступні, також важливо перевірити їх якість. Якщо в них є великі прогалини, може бути складно отримати адекватні імітаційні моделі.

Імітаційна модель показує в реальному часі статус свого фізичного двійника на основі даних, зібраних з датчиків у обладнанні. Крім того, завдяки інтеграції віртуального помічника на базі штучного інтелекту співробітники можуть взаємодіяти з цифровим близнюком абсолютно природним чином, як ніби вони розмовляють з колегою, наприклад, запитати: «Які частини цієї машини найбільше пошкоджені?», на що буде надано голосову, або текстову відповідь, наприклад: «підсистема турбіни може вийти з ладу, якщо її не перевірити». Ефект від впровадження AI (у потенційній економії коштів) не тільки в інтеграції технологій, але і в упорядкуванні навчання працівників.

General Electric використовувала технологію Digital Twin із підтримкою штучного інтелекту в різних секторах, щоб заощадити 1,5 мільярда доларів у всьому світі. Завод важкої промисловості виявив проблему з двошпиндельним токарним верстатом з ЧПК, заощадивши майже 100 тисяч доларів. Chevron також використовує цю технологію на своїх заводах, щоб зменшити проблеми в ланцюжку постачання та контролювати обладнання в режимі реального часу. Великі фірми, такі як IBM, Siemens та Microsoft, також розробляють рішення Digital Twins.

Альтернативами цифровий двійників можуть стати сучасні SCADA, підсилені можливостями AI в прийнятті рішень, та машинне навчання (ML) із емпіричним моделюванням.

3.5 Предикативний контроль та машинне навчання

Головними проблемними ланками, які визначають подальші тенденції розвитку предикативної аналітики в Україні є необхідність обробки великих обсягів неструктурованих даних в режимі реального часу, для чого необхідно використовувати вищезгадані технології Big Data та Artificial Intelligence.

В статті [95] окреслено ринкові та технологічні тенденції розвитку предикативної аналітики з точки зору трансформації основних можливостей даного виду аналітики для потреб бізнесу в середньостроковій перспективі.

Елементи предикативної аналітики показані на рисунку 3.2.



Рисунок 3.2 – Елементи предикативної аналітики [96]

Статистичний моніторинг та контроль (SPC) [97] інтегрує та керує різними розумними технологіями, які можуть оптимізувати

взаємодію між людьми, стандарти, процеси та технології для досягнення бажаних результатів, кращого задоволення клієнтів та більшої рентабельності виробничої компанії. Програмне забезпечення SPC має збирати дані з метрологічних пристроїв та формувати базу даних для їх аналізу [98].

Українська промисловість впроваджує новітні системи управління активами. Так, на промислових активах ІНТЕРПАЙП впроваджений модуль ТОРО (Технічного обслуговування і ремонту обладнання) на базі прикладного програмного забезпечення EAM (Enterprise Assets Management) [99], це передбачає новий підхід до обслуговування згідно методології предиктивного контролю (Predictive Maintenance) та RCM (Reliability Centered Maintenance); впровадження повної електронної картотеки обладнання; аналіз Big Data для планування ремонтів, обслуговування обладнання, закупівлі запчастин тощо. Впроваджено Smart.EAM Mobile App для організації обходів, оглядів та формування заявок. Цікавим варіантом є здійснення технічного огляду за допомогою дронів, які мають машинний зір та алгоритми виявлення критичних несправностей, що реалізовано на фірмі ДТЕК [100].

Що стосується впровадження системи управління продуктивністю активів (Assets Performance magement – APM), то згідно презентації онлайн-конференції [100], більшість підприємств все ще використовують APM, які відповідають рівню третьої промислової революції (APM3.0) (рисунк 3.3)

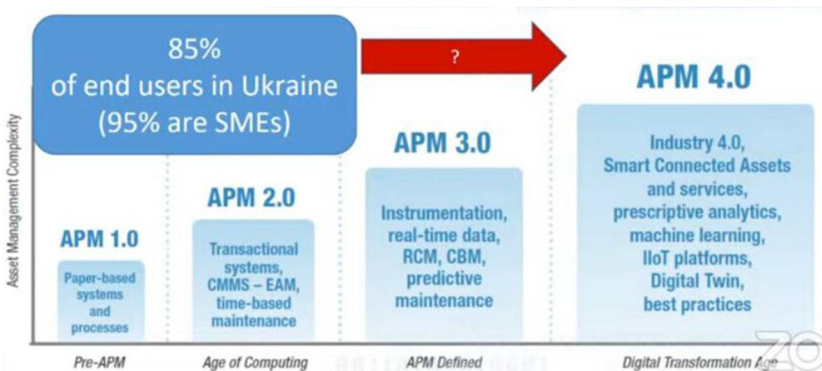


Рисунок 3.3 – Еволюція систем менеджменту активів

Машинне навчання (Machine Learning, ML) є синергетичною системою (як і більшість «гравців» І4.0), в якій реалізована інтеграція між характеристиками/вхідними вимогами /ознаками/умовами (Features), поточними даними (Data) та алгоритмами (Algorithms) через інтелектуальний аналіз зібраних даних (Data Mining, Data Science) та програмування (Programming).

Схема зв'язку цих технологій та методологій показана на рисунку 3.4.

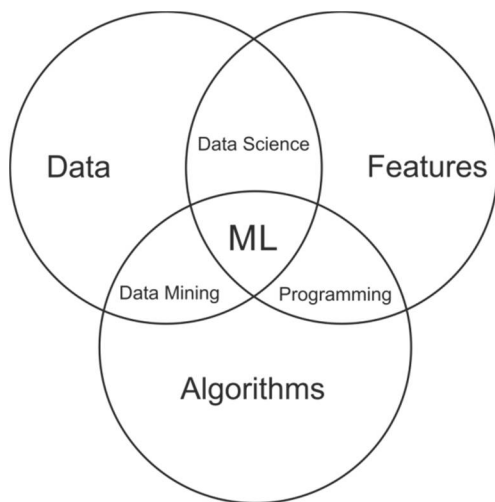


Рисунок 3.4 – Внесок «гравців» 4.0 в концепцію ML

Машинне навчання, це практичне застосування штучного інтелекту в різних галузях, зокрема в кібер-фізичних системах, що вивчає методи побудови алгоритмів, здатних навчатися. Результатом машинного навчання є евристичні моделі, тобто закономірності, побудовані наприклад засобами регресії на отриманих в ході багаторазових дослідів даних. Машинне навчання є альтернативою цифрового двійника [101].

Терміни «машинне навчання» і «навчання по прецедентах» можна вважати синонімами [102]. Розрізняють «навчання з учителем» (supervised learning), «навчання без учителя»

(unsupervised learning) та навчання з підкріпленням (reinforcement learning). Розрізняють також індуктивне навчання, і дедуктивне навчання. В першому випадку надаються базові емпіричні моделі (вхід-вихід, «чорна скринька»), в другому комп'ютер має самостійно виявити приховані закономірності між вхідними та вихідними даними, тобто побудувати емпіричні моделі на статистично значимій виборці даних. Результати навчання, тобто емпіричні моделі та алгоритми виявлення подібностей наповнюють експертні бази даних для подальшого використання (навчання).

Підхід «навчання без вчителя» аналізує дані датчиків в режимі реального часу з використанням передових алгоритмів штучного інтелекту. Ціль такого навчання: знаходження зв'язків, класифікація та упорядкування даних, виявлення закономірностей, розробка шаблонів, структур, емпіричних моделей. Така технологія не вимагає створення цифрового двійника, фактичної участі людини або креслень, але автоматично розробляє емпіричні моделі виробу та устаткування, тому її можна вважати більш економічною альтернативою цифрового двійника і рекомендувати до впровадження на українських виробництвах.

Математичним забезпеченням машинного навчання є дискримінантний аналіз, ланцюги/мережі Байєса та Петрі, нейронні мережі тощо, методи оптимізації, статистичної математики, «машинний зір» (системи розпізнавання образів), програмні засоби та алгоритми для забезпечення самостійного навчання, прогнозування та прийняття рішень (тобто без керування та явного програмування дій).

3.6 Загрози Індустрії 4.0 та Індустрія 5.0

Незважаючи на досягнення, які демонструє І4.0, перехід до цифрових виробництв не може відбутися, доки компанії не зможуть виділити необхідні ресурси та робочу силу. Впровадження І4.0 також може потенційно спричинити значні зміни у робочій силі, хоча до цих пір втрата робочих місць була низькою. В умовах агресивного сценарію автоматизації світовий

запас роботів збільшиться в чотири рази з 2017 до 2025 року. Це відповідало б у 5,25 більше роботів на тисячу працівників у Сполучених Штатах, що призвело б до зниження рівня зайнятості та росту заробітної плати. У Німеччині прогноуються збитки у виробництві через втрату робочих місць до 4% у виробництві, 8% у контролі якості та до 7% у технічному обслуговуванні. Сучасні тенденції вказують на те, що автоматизація буде продовжувати зростати, але тренди варіації робочих місць завдяки І4.0 поки що збігаються із тими, що встановлені попередніми промисловими революціями [103,104].

Розвитком І4.0 є Industry 5.0 (Індустрія 5.0, І5.0), яку вважають результатом конвергенції штучного та людського інтелекту, ця концепція декларована з 2013 року [105,106]. Автором ідеології І5.0 вважають Michael Rada, який показав, що тотальна (екстремальна) автоматизація створює вразливі місця, які на сьогоднішній день мало враховувалися [107,108].

Можне вважати, що І5.0 є еволюцією концепції INDUSTRIAL UPCYCLING (повторного використання викинутих предметів або матеріалу таким чином, щоб створити продукт вищої якості або цінності, ніж оригінал), яка народилася ще наприкінці минулого сторіччя [109]. Більшість сучасних галузей орієнтована на прибуток та обсяг, що призводить марнотратства та до зростання обсягів відходів, що утворюються в процесі виробництва, як і в ланцюгу поставок.

В автомобільній промисловості, яку приймають за ROLE MODEL ефективності, один автомобіль виробляється за 47–54 секунди на виробничій лінії (з урахуванням часу додавання вартості), при цьому час без додавання вартості компонентів становить майже 90 днів. Цей приклад наочно показує, наскільки значним може бути вплив запобігання відходам на загальну картину.

В INDUSTRIAL UPCYCLING виділено чотири типи відходів.

- PHYSICAL WASTE (фізичні відходи/сміття);
- SOCIAL WASTE (соціальні відходи/люди які не можуть реалізувати свій потенціал);
- URBAN WASTE (міські відходи/неефективна інфраструктура);
- PROCES WASTE (відходи процесів/неефективна

логістика, перевантаження, перевиробництво).

Проекти, реалізовані відповідно до пропозиції Industry 5.0 / INDUSTRIAL UPCYCLING, підтверджують вплив на багато сфер, зокрема на:

1. послуги та бізнес-моделі;
2. рентабельність бізнесу;
3. надійність і постійне підвищення ефективної продуктивності;
4. IT-безпеку;
5. безпеку машин і людей;
6. подовження життєвого циклу продукції;
7. зменшення впливу на навколишнє середовище ланцюга створення вартості;
8. підвищення рівню освіти працівників;
9. покращення соціально-економічних факторів.

Незважаючи на те, що перший проєкт запобігання виникненню відходів був реалізований ще у 2010 році, перша повномасштабна заявка відбулася в кінці 2013 року. З 2014 року INDUSTRIAL UPCYCLING стає єдиним систематичним засобом запобігання виникненню відходів, застосовним до промислового середовища у світі (рис.3.5).



Рисунок 3.5 – Запобігання відходів (Upcycling) краще, ніж переробка відходів

Які є небезпеки та ризики впровадження І4.0?

По-перше, високоінтегровані системи вразливі до системних ризиків, таких як повний колапс мережі в разі відмови однієї з її частин, наприклад, через злом або інтернет-віруси.

По-друге, екстремальна інтеграція/пов'язаність створює нові соціальні та політичні структури влади. Якщо їх не зупинити, вони можуть призвести до авторитарного управління однією особою, яка повністю контролює мережу, безпосередньо або через її/його пов'язаних сурогатів.

Натомість, І5.0 може демократизувати спільне виробництво знань із великих даних, спираючись на нову концепцію інновацій. І5.0 також використовує ІоТ, але відрізняється від попередніх систем автоматизації тривимірною (3D) симетрією в дизайні інноваційної екосистеми та має вбудовану стратегію безпечного виходу на випадок загибелі гіперзв'язаних мереж цифрових знань.

Важливо, що такі безпечні системи дозволяють «цифрову детоксикацію» шляхом використання шляхів, на які не впливають автоматизовані мережі. І5.0 має однаковий акцент як на прискоренні, так і на уповільненні інновацій; використовує дослідження соціально-гуманітарних наук нового покоління (social science and humanities, SSH) для глобального управління новими технологіями.

Таким чином, Індустрія 5.0 – це створення складних і гіперзв'язаних цифрових мереж без шкоди для довгострокової безпеки та стійкості інноваційної екосистеми та її складових. І5.0 готова використовувати екстремальну автоматизацію та великі дані, але безпечно, із використанням інноваційної технологічної політики та відповідальної науки впровадження [107].

І5.0 базується на вирішенні проблеми відсутності «симетрії» екосистеми І4.0 за допомогою «інноваційних гальм», технологій наступного покоління та досліджень суспільства, де альтернативні витрати та аналітичні рамки чітко викладені, та розробки ортогональних безпечних виходів, які незалежні від гіперзв'язаних систем, що автоматизують виробництво та виробництво (рис.3.6).

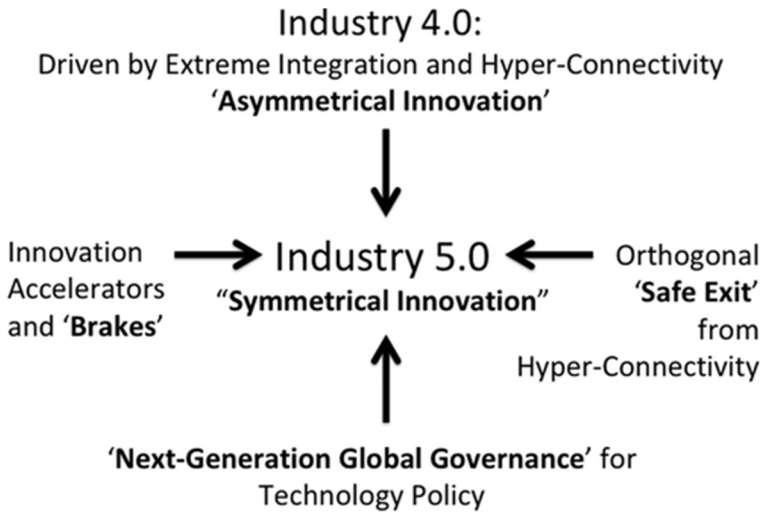


Рисунок 3.6 – Відновлення симетрії в концептуальній моделі I5.0

Розгляд вбудованих ортогональних безпечних виходів із цифрових мереж, визнання необхідності як прискорення, так і уповільнення, інновацій у глобальному управлінні для технологічної політики, все це є заходами для досягнення тривимірної симетрії в майбутніх застосуваннях I5.0.

Незважаючи на складність, I5.0 заснована на простих, але ефективних інструментах, таких як 6R Methodology та L.E.D. принципи [108]. Принцип 6R визначає порядок дій, і це надбудова існуючих, але не функціонуючих принципів 3R, що застосовуються головним чином у галузі управління відходами.

Порядок і кроки впровадження 6R:

1. RECOGNIZE (розпізнати);
2. RECONSIDER (зробити висновки);
3. REALIZE (реалізувати);
4. REDUCE (знизити відходи, викиди тощо);
5. REUSE (використовуйте повторно);
6. RECYCLE (утилізуйте).

Принципи 6R застосовуються не лише в одному сегменті, наприклад, у сегменті «ЗМЕНШЕННЯ ВІДХОДІВ», але майже у всіх життєвих та ділових циклах.

L.E.D. принципи (Дизайн ефективності логістики) були запроваджені кількома роками раніше у проєктах, спрямованих на підвищення ефективності глобальної ланцюга поставок.

L.E.D. принципи:

1. TRANSPARENCY (прозорість);
2. PROFIT SHARING (участь у прибутках);
3. EFFICIENCY (ефективність).

L.E.D. принципи, аналогічно до 6R, можуть застосовуватися і за межами I5.0.

Незважаючи на те, що засновник (Майкл Рада) назвав свою роботу спочатку INDUSTRIAL UPCYCLING, клієнти перейменували її на Industry 5.0, головним чином завдяки можливості негайних змін без необхідності значних капітальних вкладень.

Деякі джерела намагаються порівняти принципи INDUSTRIAL UPCYCLING / Industry 5.0 із принципами CIRCULAR ECONOMY, але для реалізації CIRCULAR ECONOMY спочатку потрібні значні капіталовкладення, і саме це віддаляє її реалізацію.

Більш точним є порівняння Industry 5.0 із SUSTAINABILITY TOOL (інструментами стійкості), оскільки в обох випадках це означає безперервний процес розвитку (еволюції), до того ж, інструменти та принципи запобігання відходів та витрат у цих поняття однакові.

Ефекти застосування принципів Industry 5.0 проявляються на трьох рівнях:

1. економічному;
2. екологічному;
3. соціальному.

Основний вплив на економіку через запобігання відходам і марнотратству дозволяє знизити вартість матеріалів та продуктів, включаючи пов'язані логістичні витрати. Досягнення рівня ZERO WASTE (безвідходне виробництво) означає скорочення всіх витрат, пов'язаних із поводженням з відходами. Вплив на довкілля є результатом тієї ж діяльності та може призвести до відсутності необхідності подальшої експлуатації природних ресурсів.

Третій вплив на соціальне середовище концентрується на людину, про що майже не згадується в концепції І4.0. Ефективна співпраця між людиною та машиною, використовуючи її унікальні навички та вміння, створює високоефективне робоче середовище для виробництва високоякісних продуктів. Отже, І5.0. не концентрується лише на «робочій силі в потрібній віковій групі», а визначає можливості для всіх гравців.

Проблеми, які потрібно вирішити для розвитку І5.0:

- правові проблеми, спричинені диспропорцією між розвитком технологій, соціальною еволюцією та змінами, що відображаються в суспільстві та діловому середовищі;
- старіння суспільства;
- перевиробництво;
- відсутність прозорості багатьох процесів та галузей;
- застосування «неправильних інструментів», які «прикидаються добром, але роблять зло»;
- залежність від ІТ та електроенергії;
- загальне небажання зацікавлених сторін змінюватися.

Таким чином, проєктування систем менеджменту нового цифрового виробництва має враховувати і тренди І5.0.

3.7 Аналіз стану підтримки руху Індустрія 4.0 в Україні

В Україні четверта промислова революція [110] підтримується на державному рівні шляхом впровадження Концепції розвитку цифрової економіки та суспільства України та Концепції розвитку цифрових компетентностей [111,112]. Створено навіть Міністерство цифрової трансформації, яке поки що зосередилось на кількох сервісних та операційних функціях публічних послуг та е-урядування. Розроблено Стратегію розвитку «Індустрія 4.0» [113], яка орієнтує основних стейкхолдерів цього напрямку за головними пріоритетами та ініціативами 4.0.

В 2021 році прийнято Національну економічну стратегію на період до 2030 року (НЕС 2030) [114]. Стратегія визначає такі орієнтири, принципи та цінності в економічній політиці, як

розвиток підприємництва, інновацій і талантів. Аналіз цього документа вказує на посилену увагу до політичних, соціальних та правових аспектів розвитку України, багато обговорюється аграрна політика, але саме цифровому виробництву майже не приділено уваги. В НЕС 2030 пропонуються наступні загальні заходи: стимулювання інноваційної діяльності підприємств; гармонізація норм у сфері стандартизації та сертифікації з міжнародними та європейськими; стимулювання підприємств до заходів системного підвищення ефективності роботи; сприяння створенню максимально повного циклу виробництва. На думку [67], всі ці заходи мали б об'єднуватися під егідою концепції цифрового виробництва.

Хоча в документі [114] вказано, що промисловість є каталізатором економічного зростання та опора сталого розвитку України, серед стратегічних цілей немає чіткої вказівки на необхідність розвитку саме цифрового виробництва. Натомість, пропонуються наступні заходи: стимулювання інноваційної діяльності підприємств; гармонізація норм у сфері стандартизації та сертифікації з міжнародними та європейськими; стимулювання підприємств до заходів системного підвищення ефективності роботи; сприяння створенню максимально повного циклу виробництва. В документі означені бар'єри на шляху досягнення цих цілей, зокрема розрив у технологічному та інноваційному розвитку, низький рівень автоматизації виробництва, відсталість в галузі стандартизації [115].

За стратегічною ціллю «Створення нових виробничих потужностей через стимулювання інноваційної діяльності підприємств у всіх регіонах країни із використання конкурентних переваг кожного з них» пропонується впровадження Індустрії 4.0 через популяризацію концепції як обов'язкового фактору підвищення конкурентоспроможності промислових підприємств на міжнародних ринках; інституціоналізація Індустрії 4.0; запровадження відповідних змін за рахунок коштів фондів ЄС; перенесення передового досвіду з сектору ІТ до промислових секторів; формування нових компетенцій персоналу в промисловості для впровадження цифрових технологій тощо.

Впровадження інноваційних технологій пропонується здійснювати через просвітницьку діяльність, удосконалення

механізму комерціалізації науково-технічних розробок, науково-дослідних робіт, створення науково-технічних кластерів за участю базових підприємств та впровадження кращих доступних технологій відповідно до EU Best Available Techniques reference documents [116].

За стратегічною ціллю «Забезпечення функціонування розумної, модернізованої та надійної енергосистеми, яка повністю задовольняє вимоги та потреби кінцевих споживачів» пропонується запровадження «розумних» енергетичних мереж (Smart Grids) [117].

В розділі «Цифрова економіка» зазначено, що запровадження Індустрії 4.0 не входить до пріоритетів розвитку національної економіки, оскільки стратегія розвитку і дорожні карти відсутні, а Україна все ще не інтегрована до міжнародного середовища високотехнологічних виробництв, розвивається на персонально-приватних ініціативах, не містить усіх компонентів для її успішного функціонування (кластери, промисловий інжиніринг, центри експертизи, лабораторії, наукові парки, інкубатори, акселератори тощо). Зазначено, що Індустрія 4.0 все ще не стала пріоритетом економічної політики через відсутність національного плану розвитку, стимулів щодо цифровізації та модернізації галузей економіки, відповідної правової бази.

Забезпечення розвитку Індустрії 4.0 пропонується через створення структурних елементів екосистеми І4.0 (центрів експертизи, лабораторій R&D, технологічних центрів, наукових парків, інкубаторів та акселераторів стартапів 4.0), нормативних документів. Зазначимо, що це більше орієнтовано на малий та середній бізнес (МСБ).

Серед результатів досягнення стратегічних цілей немає конкретної вказівки на створення із державною підтримкою зразкових (дослідних) підприємств на засадах концепції тотальної інтегрованої автоматизації (Totally Integrated Automation, TIA), приводяться лише загальні фрази, на кшталт «підвищення рівня зростання високотехнологічних промислових сегментів до 30 відсотків на рік», натомість більше говориться про ІТ галузь: «утворення 15 нових індустрій (технологічні (techs), bigdata, швидкісний Інтернет, так звані «проривні» індустрії).

За стратегічним курсом напряму «Інформаційно-комунікаційних технологій» декларується, що цифрові технології – основа добробуту України; світ, де створюються наші нові можливості; сфера, що визначає суть трансформацій у країні для кращого життя, роботи, творчості, навчання.

В розділі про забезпечення розвитку інновацій пропонується впровадження програм підтримки малого та середнього бізнесу, які спрямовані на підготовку кадрів, освоєння та впровадження технологій І4.0; програм підтримки експорту та інтеграції українських розробників у глобальні ланцюги доданої вартості, зокрема створення торгової місії І4.0; надання пріоритету у просуванні через експортний офіс для компаній, які використовують технології І4.0; розроблення проєкту закону щодо впровадження податкових пільг для компаній, які запроваджують високотехнологічні рішення, що допомагають робити виробництво більш екологічним; розширення переліку цифрових професій та оновлення державного замовлення в закладах вищої освіти відповідно до нових професій.

Асоціація підприємств промислової автоматизації України (АППАУ) та представники спільноти Industry4Ukraine надали свої пропозиції до НЕС 2030 [118]. На думку експертів АППАУ, в НЕС 2030 є радше традиційні індустрії, які не забезпечують «цифровий стрибок» до 2030 року, тому було рекомендовано спиратися на напрацювання, які відображені в українській стратегії І4.0, Хартії 4.0 [18] та методичних роботах Industry4Ukraine, які в свою чергу базуються на роботах таких світових агенцій, як UNIDO [119]. Industry4Ukraine, UNIDO та Міністерство економіки розпочали серію експертних дискусій, спрямованих на вдосконалення промислової аналітики, а також на надання національним органам влади обґрунтованих рекомендацій щодо політики відновлення економіки [120].

Таким чином, серед ключових цілей розвитку промисловості України немає тезису про перехід на цифрове виробництво, хоча саме це є опорою сталого розвитку та конкурентоспроможності держав в сучасних реаліях. АППАУ та спільнота Industry4Ukraine наразі займаються питаннями формулювання концепцій і дорожніх карт в галузі І4.0 та закликають науковців долучатися до цієї роботи.

3.8 Рух цифрової трансформації виробництва в Україні

В [19] запропоновано створити на платформі Industry4Ukraine комітет, який об'єднує та координує споріднені та близькі до Індустрії 4.0 технології (Tech4.0), а саме Energy 4.0, Logistic 4.0, Mobility 4.0, Utility 4.0, MilTech, MedTech та AgTech.

Основні методичні питання щодо можливостей та форм впровадження «Рухів4.0» (рядки) та «Технологій 4.0» (стовпці) представлені на рисунку 3.7.

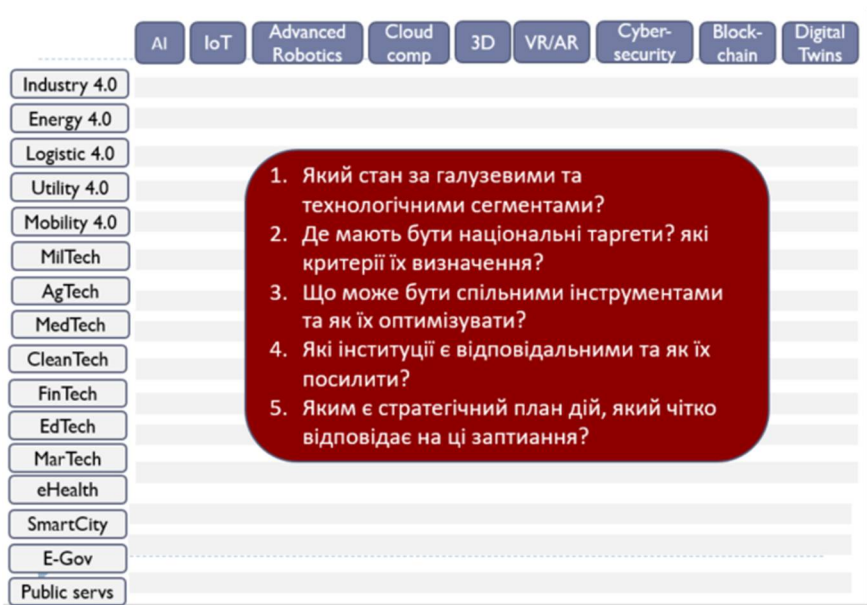


Рисунок 3.7 – Методичні засади цифрової трансформації

Таким чином, Рух 4.0 для успішного впровадження має бути забезпечений базовими компонентами (технологіями), які лежать в основі І4.0 [121,122], серед яких: штучний інтелект (AI), інтернет речей (IoT), Advanced Robotics (робототехніка), Cloud Computation (хмарні обчислення), адитивні технології (3D printing/Additive Manufacturing), кібер-безпека (Cyber-security), технології блокчейну (Block chain), цифрові двійники (Digital Twins).

Насправді, список можна продовжити, додавши технології доповненої реальності (AR) та машинного навчання (ML). Сучасне цифрове виробництво має базуватися на більшості з цих технологій.

Цифрове підприємство, як CPPS, із підтримкою всіх базових технологій І4.0 забезпечує скорочення [106]:

- виробничих витрат (Production costs) на 10–30%;
- логістичних витрат (Logistic costs) на 10–30%;
- витрат на управління якістю (Quality management costs) на 10–20%.

Заходами з розвитку промисловості та впровадження Індустрії 4.0 в Україні є вирішення низки завдань [123]:

- завершення роботи над формуванням промислової політики уряду;
- покращення умов для розвитку промисловості та економіки загалом, зокрема боротьба з корупцією, реформа судів, оновлення освітньої системи, розвиток фінансового сектору, поліпшення інвестиційного клімату тощо;
- створення національної та регіональних платформ 4.0 за прикладом країн-членів ЄС, які об'єднували б державні інституції, бізнес і науковців;
- відповідність державної допомоги суб'єктам господарювання міжнародним зобов'язанням;
- розширення джерел фінансування для інноваційних проєктів у промисловості;
- підтримка створення нових підприємств і технологічне оновлення промислових активів;
- нарощення освітньо-наукового потенціалу та ін.

3.9 Методики впровадження технологій І4.0 у виробництво

Цифрова трансформація/цифровізація є одним з основних векторів розвитку світової економіки і характеризується глобальним впровадженням в усі сфери діяльності людства (виробництво, бізнес, освіта, державні та суспільні комунікації) інтернет-технологій, хмарних обчислень, Big Data аналізу тощо, що потребує відповідної інфраструктури.

Вона здатна забезпечити зростання української економіки на 10-12% на рік [124,125]. В Україні тотальна цифровізація гальмується через відсутність достатнього матеріально-технічного забезпечення, відповідно підготовлених інженерно-технічних робітників, стандартів та методик, обмеженість державної підтримки.

Оскільки більшість підприємств в Україні мають низьку ступінь готовності до «цифровізації», в деяких випадках можна запропонувати так звану «м'яку» (меншу за масштаб) цифровізацію, яка, проте, має спільну із І4.0 задачу: зробити виробництво/бізнес більш гнучким, керованим, прозорим, максимізувати прибуток, покращити конкурентоспроможність, при цьому об'єкт цифровізації не стає повномасштабною CPPS [126], хоча і може мати CPS-підсистеми.

Всі розглянуті вище засоби підвищення якості на базі предиктивного контролю (системи на основі правил SCADA, цифрові двійники, штучний інтелект [127], машинне навчання) виконують подібні задачі (раннє виявлення збоїв машин і устаткування, виявлення простою, попередження аварій тощо), але використовують різні технології. Тому вибір засобу реалізації менеджменту і контролю залежить від можливостей і потреб виробництва, від історії його автоматизації [128] та цифровізації. Найбільш вигідною, з огляду на економічність та з урахуванням сучасних тенденцій на інтеграцію функціоналу цифрових платформ, є машинне навчання та використання емпіричних моделей.

Набір технологій, об'єктів та програмного забезпечення рівня 4.0 визначає модель і масштаб цифровізації виробництва. Вибір моделі визначається двома факторами: бажанням виробника трансформувати виробництва до певного рівня, і ступеню відповідності, «зрілості», готовності об'єкта до такої трансформації.

АППАУ надає загальну методіку цифровізації виробництва, формалізація якої представлена на рисунку 3.8. Тут показані етапи та опції цифрової трансформації (переходу від фази «Відсталі» до фази «Послідовники»). Визначені необхідні кроки з боку держави: розробка стратегій; надання преференцій; створення інкубаторів, інноваційних кластерів та центрів

експертизи; впровадження відповідних стандартів; розробка та впровадження необхідних освітніх програм тощо).



Рисунок 3.8 – Засади для впровадження технологій І4.0 у виробництво

Готовність до впровадження технологій І4 залежить від так званої «цифрової зрілості», схильності до впровадження інформаційних систем/цифрових платформ та забезпечення можливості їх інтеграції. Більшість компаній впроваджують програмне забезпечення CRM (Customer Relationship Management) [129]. Другим за популярністю інформаційним інструментом є ERP, після цього – продукти CAD, PDM, MES та PLM. Тільки кілька компаній використовують інтеграції між означеними платформами.

Згідно зі статистикою, в 2018 р. в Україні 10660 підприємств мали спеціалістів у сфері технологій, 4135 підприємств користувалися послугами «хмарних» обчислень. Це свідчить про те, що в Україні впровадження концепції І4.0 перебуває на початковому етапі, але має потенціал для подальшого розвитку [130]. Наразі в Україні темп впровадження інноваційних технологій І 4.0 вкрай низький. Це пов'язано із тим, що більшість підприємств мислять виключно короткостроковими термінами й

ігнорують світові тенденції, не мають гнучкого (agile) стилю в стратегуванні, який базуються на глибокій аналітиці, розумінні глобальних трендів та фіксації довгострокових орієнтирів [131].

Підсумовуючи досвід впровадження ініціативи І4.0 у багатьох країнах-членах ЄС, можемо виділити такі фактори успіху для реалізації «цифрової» політики в Україні [132-134]:

1. затвердження урядом національної програми розвитку І4.0, встановлення чітких цілей з вимірювальними результатами, етапів і основних здобутків, які оцінюватимуться якісними та кількісними показниками, а також запровадження суворого моніторингу та чітко встановлених оціночних механізмів;

2. співфінансування політики І4.0 – вищий ступінь співфінансування з боку суб'єктів промисловості забезпечує більшу ефективність ініціатив і стійкість промислового бізнесу;

3. надання ширших повноважень представникам промисловості;

4. залучення більш інноваційних і наближених до ринку інструментів фінансування (наприклад, бізнес-кредитів і податкових пільг);

5. більш спеціалізований підхід, зокрема шляхом надання спеціалізованих інструментів фінансування, для ефективного залучення МСП;

6. швидкість реалізації проєктів; створення великих багатосторонніх платформ, де розглядаються ініціативи, орієнтовані на збільшення технологічного потенціалу та впровадження програм цифрової трансформації потреб промислових компаній.

Малий і середній бізнес ще до прийняття в березні 2021 року НЕС 2030 [114], в якій в тому числі вказано шляхи розвитку України в реаліях четвертої промислової революції, вже успішно займався автоматизацією виробничих процесів і управління та комплексною цифровою трансформацією в реальному секторі економіки. Фактично, багато з них є реальними (але не формальними) учасниками руху І4.0.

Пошук способів та засобів професійного росту та можливостей для обміну досвідом в рамках І4.0 вимагає постійного аналізу ринків програмного та апаратного

забезпечення, нормативної документації, наукових досліджень тощо. Постановою кабінету міністрів прийняте Положення [135], яке визначає основні засади впровадження технологічного підходу І4.0 в Україні, зокрема, через центри І4.0 (інноваційні хаби), основними завданнями яких є консультації, координація, проведення конкурсів проєктів та здійснення заходів щодо надання державної підтримки впровадження інновацій у реальному секторі економіки.

Такі центри за підтримки стейкхолдерів відкриваються в великих ЗВО України, зокрема в Національному університеті «КПІ» (Київ), Національному університеті «Запорізька політехніка» [136,137]. Вони могли б стати регіональними осередками АППАУ, або їхніми аналогами, що буде більш відповідати основним завданням створення таких центрів.

Одна з головних причин «цифрового розриву» в Україні – відсутність середньо-довгострокових цифрових стратегій та намагання вирішити нові виклики в рамках старої бізнес-культури.

Завдання стратегічного планування виникають в разі створення нових або модернізації існуючих виробництв. Основною метою є оцінка функціонування виробничої системи на великих часових інтервалах (зазвичай від кварталу до року) і обчислення основних виробничих показників. За результатами дослідження (моделювання) приймається рішення про типи і кількості одиниць обладнання, про топології системи і правила організації матеріалопотоків. Імітаційна модель виступає основою прийняття інвестиційних рішень і вибору варіанту модернізації виробничої системи, оцінки можливостей розвитку системи або впровадження сучасних концепцій управління виробництвом і ресурсозберігаючих технологій, таких як «Just in Time», «Just in Sequence», інструментом програвання безлічі сценаріїв без втручання в реальний процес, наприклад, при переході на новий тип виробу або в умовах розширення номенклатури випуску, нарощування виробничої потужності або заміни існуючого обладнання на більш технологічне.

Тактичне планування призначено для наступних задач:

– оцінки поточного стану та ефективності функціонування діючої виробничої системи;

- аналізу «вузьких місць» на виробництві;
- вибору раціональної організаційно-технологічної структури, включаючи формування і синхронізацію основних матеріальних потоків в межах виробничої системи;
- вибору необхідного складу устаткування і робочих ресурсів для виконання технологічного процесу.

Для вирішення цих завдань може можна використовувати імітаційні моделі виробничих систем різного ступеню деталізації. Наприклад, для стратегічних завдань треба мати часові характеристики процесів, задані за допомогою усереднених параметрів (статистична модель). Для оперативного планування замість аналізу надійності та статистичного розподілу параметрів треба використовувати дані цифрових двійників, або фактичні дані, отримані від датчиків на виробничих підсистемах, із аналізом ресурсів.

3.9.1 Шляхи і масштабування цифрової трансформації

Визначимо основні «внутрішні» принципи впровадження I4.0 у виробництво:

1. автоматизація на всіх етапах життєвого циклу виробу, розробка CPS, CPPS;
2. залучення Model-Based Design, VR/AR, розробка Digital Twin;
3. використання індустріального Інтернету речей (IIoT);
4. використання «цифрових» платформ (MES, CAM, ERP, PLM тощо);
5. використання високотехнологічного обладнання, xxxTech, хмарних технологій, машинного навчання, штучного інтелекту, Big Data тощо.

Визначимо основні «зовнішні» ознаки впровадження I4.0:

1. глобалізація, віддалений доступ;
2. підвищена прозорість, гнучкість, керованість, інформативність;
3. автономність, здатність до самоаналізу, навчання та самонавчання, прийняття рішень;
4. ергономічність, екологічність;
5. замкненість циклу проектування-виробництва.

На наш погляд, використання хоча б двох «внутрішніх» принципів І4.0 можна назвати «м'якою» цифровізацією, що особливо актуально при намаганнях впровадити підходи І4.0 у виробництво із застарілою матеріально-технічною базою. При цьому таке виробництво отримує більшість базових «зовнішніх» ознак цифровізації [138].

Прикладом «м'якої» цифровізації є проекти, які розробляє та впроваджує українська фірма «АСУ Інжиніринг» [139]. Фірма розробляє автоматизовані системи керування технологічними процесами (АСК ТП), які мають в собі підсистеми віддаленого моніторингу та контролю. Для функціонування АСК ТП встановлюється необхідне апаратне та програмне забезпечення, наприклад, «розумні» датчики, які передають дані через технології IoT NB. Системи охоплюють як нове обладнання (верстати, системи перетворення енергії, інші машини), так і застаріле, що особливо важливо в українських реаліях. За результатами моніторингу є можливість розробки «Цифрових двійників» різного масштабу, що дозволяє ефективно та превентивно контролювати обладнання/процеси/виріб.

Інформація, яка отримується в ході моніторингу, наповнює структуровані бази даних. Керування даними та вбудовані інструменти аналізу дозволяють будувати графіки, екстраполювати їх для стратегічного та тактичного планування. Крім того, є можливість автоматичного формування звітів, в тому числі для ДФС України через систему М.Е.Дос. На базі отриманих даних можна оцінювати ефективність роботи виробництва, або його частини. Такі проекти несуть на собі характерні ознаки концепції І4.0.

Успішними прикладами реалізації «м'якої цифровізації» підприємства є впровадження системи менеджменту від IT-Enterprise [140] на Харківському машинобудівному заводі «ФЕД» [141], який є передовим українським виробником у сфері авіаційного та залізничного агрегатобудування (рис.3.9).

Для підвищення ефективності виробництва і економії коштів підприємства фахівці корпорації IT-Enterprise використовують ERP-систему із розширеними можливостями, яка, окрім стандартних функцій, допомагає оптимізувати витрати дорогого виробничого інструменту.



Рисунок 3.9 – Польовий рівень моделі автоматизованого виробництва на заводі «ФЕД»

Виробничі підприємства поступово відмовляються від універсальних верстатів і переходять до використання сучасних обробних центрів. Таке обладнання здатне обробляти високоякісні вироби з високою точністю при оптимізованих за часом циклах виробництва. Це обладнання не потребує втручання людини, а працює під управлінням програм. Програмується це обладнання інженерами-наладчиками, а найчастіше програма генерується по 3D-моделями виробів і лише вивіряється і затверджується наладчиком. При використанні такого підходу, пріоритетною проблемою стає забезпечення виробництва інструментом для цього обладнання. Виходячи із зазначених факторів, у підприємств виникає потреба в новій методології планування забезпеченості виробництва інструментом.

Для виконання планування необхідний перспективний календарний план, який є підставою для формування замовлень на закупівлю інструменту. Для реалізації методик нормування та планування потреби в інструменті необхідно класифікувати весь інструмент і оснащення за категоріями впливу на виробництво,

тобто виконати ABC-аналіз. Завдяки впровадженій ERP-системі IT-Enterprise, на заводі «ФЕД» реалізована унікальна система контролю і планування потреби в інструменті, яка оперативно відображає фізичну наявність інструменту, а також готовність інструменту до роботи.

3.9.2 Модифікація апаратного забезпечення

Цифровізація, в тому числі «м'яка», неможлива без використання сучасної елементної бази, особливо розумних датчиків, які лежать в основі сучасного моніторингу та автоматизації технологічних процесів, їхні можливості представлені на рисунку 3.10. Як бачимо, smart сенсори є вбудованими системами (Embedded System), або ж міні-CPS, не дарма їх називають Sensors 4.0.

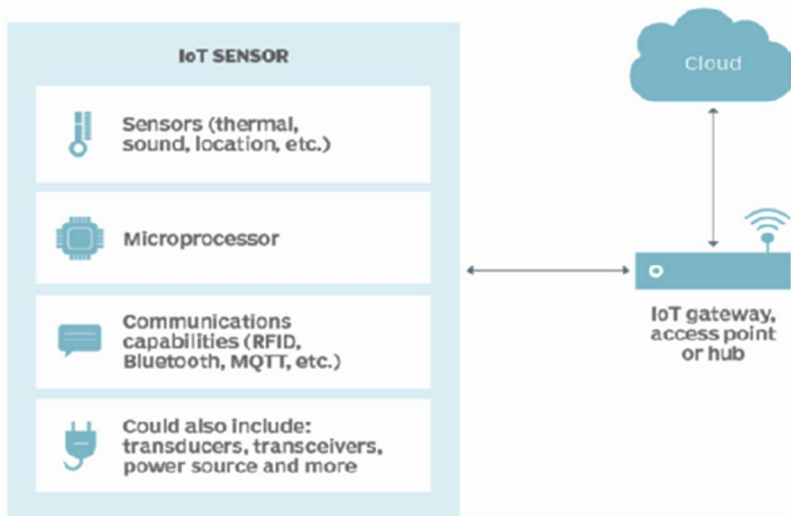


Рисунок 3.10 – Можливості і підсистеми smart сенсорів

В Україні розробкою систем моніторингу на базі розумних сенсорів та хмарних сервісів займається фірма Smart MAIC [142]. Розумні лічильники smart-MAIC можуть у простий візуальній формі контролювати споживання електроенергії, води, газу, тепла, аналізувати температуру, вологість, тиск, CO₂, TDS, pH

тощо. Вони встановлюються на din-рейку, що зручно для монтажу та підключення у шафах. Всі ресурси та події візуалізуються за допомогою WEB-додатку smart-MAIC Dashboard (аналог хмарної SCADA), який доступний для усіх платформ (Windows, Android та iOS) (рис.3.11). Користувачеві доступне гнучке налаштування віджетів індикаторів і графіків, велика кількість інформаційних панелей та підключених пристроїв до одного облікового запису. Всі зібрані дані зберігаються на хмарному сервері з хвилинною деталізацією. При роботі в режимі реального часу показання з лічильників оновлюються з інтервалом 5 с. Для інтеграції з іншими системами використовується протокол MQTT та API інтерфейс.



Рисунок 3.11– Зв'язок розумних датчиків, лічильників та Dashboard із Хмарними сервісами

Як бачимо, навіть використання розумних датчиків вже дозволяє зрушити з рівня 3.0. Модифіковане таким чином апаратне забезпечення та впроваджене програмне (цифрові платформи) створює засади для «м'якої цифровізації» об'єктів господарювання.

3.10 Висновки по розділу

Розвиток елементів цифрового виробництва триває.

Можливості, які пропонують сучасні QMS/СУЯ:

- прозорість всіх технологічних операцій;
- забезпечення відповідності;
- моніторинг подій та рання ескалація тенденцій;
- глобальне управління ризиками;
- автоматичне стримування та попередження;
- розумний аналіз першопричин засобами AI;
- автоматичне забезпечення якості;
- масштабованість виробництва.

При інтеграції із іншими цифровими платформами, QMS/СУЯ дозволяють:

- забезпечити дотримання норм та стандартів;
- впровадити методики Lean та Six Sigma;
- зменшити кількість побічних явищ;
- підвищити ефективність аналізу та прийняття рішень;
- зменшити матеріальні відходи та мінімізувати діяльність,

яка не додає вартості.

В перспективі, системи менеджмента якості виробу (та виробництва) будуть будуватися на ідеології предиктивного контролю, який здійснюється або через створення цифрового двійника, або через машинне навчання. Прийняття рішень для такого контролю базується на аналізі Big Data засобами штучного інтелекту із використанням хмарних сервісів.

Розробка систем управління також мають бути орієнтовані на цілі I5.0, зокрема на зменшення відходів та викидів, створення «замкненого циклу» виробництва (безвідходне виробництво). Роль людини на виробництві буде змінюватися, але не буде ліквідованою. Основна роль переходить від оператора машин до стратегічного директора та гнучкого вирішувача проблем.

В умовах застарілого апаратного забезпечення і неможливості повної трансформації виробництва, можлива «м'яка» цифровізація, шляхом впровадження окремих цифрових платформ та сучасного апаратного забезпечення, наприклад, розумних датчиків, які відносяться до об'єктів 4.0. Системи управління якості в такому випадку інтегруються із функціями ERP та (або) MES. При проектуванні систем менеджменту слід враховувати, що нове апаратне забезпечення змінює архітектуру як керування, так і управління.

ВИСНОВКИ

Впровадження нових підходів у менеджмент якості неможливо без усвідомлення, що цифрове виробництво є кібер-фізичною системою, синергетичним поєднанням концепцій Industry 4.0, Energy 4.0, Logistic 4.0 та пов'язано із багатьма технологіями xxxTech. Таким чином, менеджмент рівня 4.0 вимагає аналогічного ступеню зрілості і від інших базових компонент цифрового виробництва, розглянутих в даній роботі. Щоб можна було відслідкувати тренди розвитку кібер-надбудов (цифрових платформ) для менеджменту бізнесу та виробничих процесів, програмне забезпечення автоматизованого проектування та автоматизованого виробництва надано в історичному контексті.

Менеджмент якості на цифровому підприємстві здійснюється або окремою програмою (наприклад, QMS від Siemens), або інтегрується із функціями планування ресурсів в ERP та/або із системами контролю виконання виробничих процесів MES. Крім того, системи SCADA, які використовують для контролю технологічних процесів та в якості людино-машинного інтерфейсу [143], та системи предиктивного контролю також слугують функціям менеджменту та моніторингу якості виробів. Все це в комплексі дозволяє оптимізувати виріб та виробничий процес згідно критеріям якості (час виходу на ринки, екологічність, економічність, ергономічність тощо).

Архітектурні та функціональні моделі цифрового виробництва проектуються на ідеології забезпечення конкурентоспроможності виробництва та виробу, отже цифрове виробництво в цілому оптимізовано з огляду максимізації функціоналу в управлінні якістю. З урахуванням тенденції на злиття та поглинання цифрових платформ, мінімізації їх кількості, всі функції менеджменту якості в майбутньому будуть вбудовані в єдину систему менеджменту виробництвом та бізнесом. В подальшому це призведе до створення тотально інтегрованих «цифрових екосистем».

Оскільки системи прийняття рішень людиною все більше змінюються системами прийняття рішень машиною на основі аналізу Big Data засобами штучного інтелекту із використанням

хмарних сервісів, системи якості виробу (та виробництва) будуть переходити на предиктивний контроль, який здійснюється або через створення цифрового двійника, або через машинне навчання.

Якщо фізична складова виробництва відноситься до рівня третьої промислової революції, у впровадженні цифрових платформ пропонується підхід «м'якої» цифровізації. Оскільки повноцінну промислову кібер-фізичну систему в такому разі побудувати неможливо, має сенс впроваджувати кібер-фізичні підсистеми, децентралізувавши таким чином керування (але не менеджмент!). Такий підхід дозволяє досягнути проміжних значень функціоналів виробництва між I3.0 та I4.0, що вже здатно підвищити конкурентоспроможність підприємства. В такому разі кібер-надбудову «Цифровий двійник», яка реалізує глибокий зворотний зв'язок між даними поточного виробництва та фізичними моделями рівня проєктування, уточнюючи останні, рекомендовано замінювати Машинним навчанням із залученням емпіричних моделей в прийнятті рішень. Використання сучасного апаратного обладнання для вимірювання та обробки інформації, зокрема вбудованих та мехатронних систем, розумних датчиків та Хмарних сервісів, також дозволяють зрушити з рівня 3.0.

Виробники, які в повному обсязі використовують системи управління якістю, можуть суттєво зменшити час виходу продукції на ринок, мінімізувати брак, знизити витрати на продукт та зменшити відходи, що важливо в світлі тренду не екологічності виробничої діяльності. З огляду на положення Індустрія 5.0, системи менеджменту виробництвом та бізнесом мають бути оптимізовані з огляду на мінімізацію відходів та викидів. Майбутнє екологічне виробництво має бути замкнутого циклу, із автоматизованим циклом утилізації в тому числі.

При переході виробництва до цифрового (цифровізації різного масштабу), необхідно використовувати стандарти, зокрема [144,145] та оновлювати базу стандартів, в тому числі за рахунок тих, які перекладають консорціями руху Індустрія 4.0 та АППАУ.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Технології індустрії 4.0 [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://edu.asu.in.ua/course/view.php?id=4#section-9>
2. Т. В. Запорожець, Індустрія 4.0: генезис цілей і завдань держави від першої промислової революції // Public Administration: Theory and Practice – №1, 2019. – С.21-32.
3. Сучасні системи управління якістю, що застосовуються в Україні [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://mihrda.gov.ua/index.php/2725-suchasni-sistemi-upravlinnya-yakistyushcho-zastosovuyutsya-v-ukrajini>
4. Управління якістю : [навч. посіб.] / І. В. Сирохман, Т. М. Лозова, О. Я. Давидович, М.-М. В. Калимон; Укоопспілка, Львів. комерц. акад. - Львів : Растр-7, 2015. – 427 с. – Бібліогр.: с. 354-359.
5. K.Schwab. The fourth industrial revolution. / Proc. Geneva Switzerland: World Economic Forum, 2016. [Electronic resource]. – Access mode: https://law.unimelb.edu.au/__data/assets/pdf_file/0005/3385454/Schwab-The_Fourth_Industrial_Revolution_Klaus_S.pdf,
6. PLM, ERP and MES: The holy trinity of manufacturing [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.automationmag.com/plm-erp-and-mes-the-holy-trinity-of-manufacturing-7488/>, 2017.
7. B. Stackpole. PLM + MES + ERP = Closed-Loop Product Lifecycle. [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.automationworld.com/products/software/article/13314943/plm-mes-erp-closedloop-product-lifecycle>, 2021.
8. Штеден Ф., Кірхнер Р. Індустрія 4.0 – огляд та наслідки для політики. Німецька консультативна група. Берлін/Київ, 2018. 36 с.
9. Industry 4.0: Fourth Industrial Revolution – SMLease Design [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.smlease.com/entries/technology/fourth-industrial-revolution-industry-4-0/>
10. Cyber-Physical Systems [Electronic resource]. – Access mode: <https://ptolemy.berkeley.edu/projects/cps/>
11. Cyber Physical System [Electronic resource]. – Access mode: https://2b1stconsulting.com/wp-content/uploads/2018/01/Cyber-Physical-Systems_CPS.png
12. CPS Concept Map [Electronic resource]. – Access mode: <http://CyberPhysicalSystems.org/CPSConceptMap.xml>
13. Cyber-Physical Systems: A Fundamental Intellectual Challenge,

College de France, Paris, France, Dec. 11, 2013. [Electronic resource]. – Access mode: <https://ptolemy.berkeley.edu/projects/chess/pubs/1045.html>.

14. Gianluca D'antonio, Lisa Macheda, Joel Sauza Bedolla, Paolo Chiabert. PLM-MES Integration to Support Industry 4.0 // Proc. 14th IFIP International Conference on Product Lifecycle Management (PLM). – Seville, Spain, Jul 2017. – Pp.129-137, 10.1007/978-3-319-72905-3_12 . hal-01764194

15. What is Digital Manufacturing? [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-digital-manufacturing>. (28 July 2021).

16. Cyber-Physical Systems. [Electronic resource]. – Access mode: <https://ptolemy.berkeley.edu/projects/cps/>. (29 July 2021).

17. The Fourth Industrial Revolution: what it means, how to respond. [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.weforum.org/agenda/2016/01/the-fourth-industrial-revolution-what-it-means-and-how-to-respond>

18. «Хартія «Індустрія 4.0 в Україні» [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://appau.org.ua/publications/hartiya-industriya-4-0-v-ukrayini/>.

19. Пропозиції АППАУ та руху 4.0 до Національної економічної стратегії 2030. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.industry4ukraine.net/publications/propozyciyi-appau-ta-ruhu-4-0-do-nacjonalnoyi-ekonomichnoyi-strategiyi-2030>.

20. J. Teresco, The Dawn Of E-Manufacturing. [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.industryweek.com/leadership/companies-executives/article/21947698/the-dawn-of-emanufacturing> (30 July 2021).

21. CPPS. [Electronic resource]. – Access mode: <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1283333/1283333.pdf>.

22. O. Vasylenko, G. Snizhnoi. End-to-end design in the concept of Virtual Manufacturing // Матеріали V міжнар. наук.-практ. конф. „Прикладні науково-технічні дослідження”. – Івано-Франківськ, 2021. – С.190-192.

23. CALS – Computer Aided Logistics Support [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.lean-manufacturing-japan.com/scm-terminology/cals-computer-aided-logistics-support.html>

24. Цифрове виробництво [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://stud.com.ua/121116/informatika/tsifrove_virobnitstvo

25. Vasylenko O.V. Mechatronics as a basis for cyber-physical systems / O.V. Vasylenko, G. V. Snizhnoi, Yu. S. Yamnenko // V Міжнародна науково-практична конференція «Мехатронні системи: інновації та

інжиніринг». – «MSIE-2021», 4 листопада 2021. – м. Київ, Україна, 2021 – С. 7-8.

26.SIMATIC HMI WinCC V7.0 System description Electronic resource]. – Access mode: https://www.plm.automation.siemens.com/media/global/it/Siemens-PLM-Smart-manufacturing-for-electronics-wp_tcm56-57766.pdf

27.Василенко, О.В. Повышение качества моделирования динамических систем выбором оптимальных алгоритмов симуляции [Текст] / О.В. Василенко, Я.И. Петренко // Радиоэлектроника, информатика, управление, – 2016, №4.– С.11-18.

28.Mats Winroth, Jörgen Frohm, Veronica Lindström, Johan Stahre. Levels of automation in manufacturing // International Journal of Ergonomics and Human Factors Vol.30, Issue 3, 2008

29.OrCAD Cadence PCB Solutions [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.orcad.com/orcad-academic-program>

30.CADAM [Electronic resource]. – Access mode: <https://en.wikipedia.org/wiki/CADAM>

31.Smart Everything Starts with Silicon [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.synopsys.com/silicon-design.html>

32.Cadence Allegro X Design Platform [Electronic resource]. – Access mode: https://www.cadence.com/en_US/home/tools/pcb-design-and-analysis/allegro-x-design-platform.html

33.SiemensEDA formerly Mentor Graphics [Electronic resource]. – Access mode: <https://semiengineering.com/entities/mentor-a-siemens-business/>

34.Industry's First Integrated System Design Platform [Electronic resource]. – Access mode: https://www.cadence.com/en_US/home.html

35.Cunha, Luciano. Manufacturing Pioneers Reduce Costs By Integrating PLM & ERP. onwindows.com. Archived from the original on 11 February 2017. Retrieved 7 February 2017 [Electronic resource]. – Access mode:

<https://community.dynamics.com/ax/b/toincreaseblogax/posts/manufacturing-pioneers-reduce-costs-by-integrating-plm-amp-erp>

36.Projects Past. Brian's Blog. Enterprise Strategy, Architecture and Management. [Electronic resource]. – Access mode: <https://briankseitz.wordpress.com/tag/rockwell-international/>

37.Dassault Groupe [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.dassault.fr/innovation-0>

38.CATIA V5, V6, 3DEXPERIENCE... is it all still CATIA? [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.technia.co.uk/blog/catia->

v5-v6-3dexperience-is-it-all-still-catia/

39. Die Fabrik der Zukunft. Die Welt der Fertigung verändert sich ständig. Halten Sie mit diesen Veränderungen Schritt? [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.3ds.com/de/produkte-und-services/delmia/>

40. Process Simulation Analyst (MAE) DELMIA Roles [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.inflow-tech.com/solutions/delmia/roles/process-simulation-analyst-mae/>

41. Tecnomatix [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/ru/products/tecnomatix/>.

42. Material flow analysis [Electronic resource]. – Access mode: https://uk.wikiquibe.net/wiki/Material_flow_analysis.

43.5 Ways ERP and MES Integration Makes Manufacturers Agile [Electronic resource]. – Access mode: www.optiproerp.com/blog/erp-and-mes-the-relationship-explained/

44. Product lifecycle [Electronic resource]. – Access mode: https://www.wikiwand.com/en/Product_lifecycle

45. MES [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/ru/products/manufacturing-operations/manufacturing-execution-system.html>

46. MES to SAP solution SAP transactions [Electronic resource]. – Access mode: <https://mes-to-sap.com/transactions>

47. Key differences between ERP and MES [Electronic resource]. – Access mode: <https://intraratio.com/post/key-differences-between-erp-and-mes>

48. MOM vs MES [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.ordinal.fr/en/mom-vs-mes-manufacturing.htm>

49. Промисловий Інтернет речей стимулює впровадження цифрових технологій для інтуїтивного керування промисловими об'єктами [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.se.com/ua/uk/work/campaign/innovation/industries.jsp>

50. IoT, IIoT, Industry 4.0 attributes and the common concepts [Electronic resource]. – Access mode: https://www.researchgate.net/figure/IoT-IIoT-Industry-40-attributes-and-the-common-concepts_fig1_339124137

51. Технології Інтернету речей. Навчальний посібник [Електронний ресурс]: навч. посіб. Для студ. спеціальності 126 «Інформаційні системи та технології», спеціалізація «Інформаційне забезпечення робототехнічних систем» / Б. Ю. Жураковський, І.О. Зенів; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 12,5 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 271 с.

52. Reference Architecture Model for Industry 4.0 [Electronic resource]. – Access mode: https://www.researchgate.net/figure/Reference-Architecture-Model-for-Industry-40-RAMI-40-13_fig2_337026815
53. Ioan Ungurean, Nicoleta Cristina Gaitan. A Software Architecture for the Industrial Internet of Things – A Conceptual Model [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/19/5603/htm>
54. Birth of Industry 5.0: Making Sense of Big Data with Artificial Intelligence, “The Internet of Things” and Next-Generation Technology Policy [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.liebertpub.com/doi/10.1089/omi.2017.0194>
55. Designer’s Guide to Industrial IoT Sensor Systems [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.eetimes.eu/designers-guide-to-industrial-iot-sensor-systems/>
56. Smart Sensors Bring Home the Benefits of the Industrial Internet of Things [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.digikey.be/nl/articles/smart-sensors-bring-home-the-benefits-of-the-industrial-internet-of-things>
57. Schütze, A., Helwig, N., and Schneider, T. Sensors 4.0 – smart sensors and measurement technology enable Industry 4.0 // Journal of sensors and sensor system. – No 7. – Pp. 359–371. [Electronic resource]. – Access mode: <https://doi.org/10.5194/jsss-7-359-2018>, 2018. <https://jsss.copernicus.org/articles/7/359/2018/>
58. Malakooti, Behnam. Operations and Production Systems with Multiple Objectives. John Wiley & Sons. ISBN 978-1-118-58537-5 – 2013. – 1114 p.
59. Програмний комплекс Digital Enterprise для галузей дискретного виробництва Siemens [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://new.siemens.com/ua/uk/kompaniya/klyuchovityemy/tsifrovaya-promyshlennost/diskretnoye-proizvodstvo.html>
60. SPC for predictive quality control [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.canadianmetalworking.com/canadianmetalworking/article/measurement/spc-for-predictive-quality-control>
61. SAP-ME [Electronic resource]. – Access mode: <https://en.t-h.de/portfolio/sap-me.html>
62. MES Demo [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.sap.com/products/execution-mes.html>
63. ДСТУ ISO 9001:2015 (ISO 9001:2015, IDT) Системи управління якістю. Вимоги. [Електронний ресурс] – Режим доступу:

<http://khoda.gov.ua/image/catalog/files/%209001.pdf>

64. Створення системи управління якістю. Впровадження системи менеджменту якості [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.viconsult.com/ua/stvorennia-systemy-upravlinnia-yakistiu.-vprovadzhenia-systemy-menedzhmentu-yakosti/>

65. Reference Architectural Model Industrie 4.0 (RAMI 4.0) – An Introduction [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/EN/Downloads/Publikation/rami40-an-introduction.html>

66. RAMI 4.0 [Electronic resource]. – Access mode: https://www.researchgate.net/figure/OPC-UA-in-the-reference-architecture-model-Industrie-40-RAMI40_fig3_320035806

67. Василенко О.В., Сніжної Г.В., Ямненко Ю.С. Технології цифрового виробництва VI міжнародна науково-технічна конференція «SMART-технології в енергетиці та електроніці – 2021» (STEE-2021), Лазурне, 15 – 21 серпня 2021 р.

68. Міжнародні технічні стандарти та українська Індустрія 4.0 [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://appau.org.ua/tk-185/mizhnarodni-tehnichni-standarty-ta-ukrayinska-industriya-4-0/>.

69. The Industrial Internet of Things Volume G1: Reference Architecture [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.iiconsortium.org/pdf/IIRA-v1.9.pdf>

70. Технічний комітет з питань промислової автоматизації [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://tk185.appau.org.ua/>

71. European standards [Electronic resource]. – Access mode: www.en-standard.eu

72. Менеджмент якості. Система менеджменту якості на базі концепції "шість сигм". [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://www.info-library.com.ua/books-text-9797.html>

73. Digital transformation of operating models of business organizations under the influence of modern technological trends // Management: strategic imperatives and trends of transformations: monograph / Sahaidak M., Sobolieva T. and all / Edited by Mykhailo Sahaidak and Tetiana Sobolieva: Kyiv National Economic University named after Vadym Hetman, 2020. – 230 p. – Pp. 50-60.

74. Осокіна А.В., Лізанець І.Р. Досвід застосування інструментів методології lean six sigma в процесі трансформації бізнес-моделей сучасних компаній // International Electronic Scientific Journal “Science Online” [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://nauka-online.com/wp-content/uploads/2020/11/Osokina-Lizanets.pdf>

75. Lean & Six Sigma. What is six sigma? [Electronic resource]. –

Access mode: <https://asq.org/quality-resources/six-sigma>.

76. A Brief Introduction To Lean, Six Sigma And Lean Six Sigma [Electronic resource]. – Access mode: https://www.greycampus.com/blog/quality-management/a-brief-introduction-to-lean-and-six-sigma-and-lean-six-sigma?sscid=71k5_k5re

77. MES for Electronics [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.automationworld.com/products/software/product/13319658/mes-for-electronics>

78. Quality Management Systems (QMS) [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/ru/our-story/glossary/quality-management-systems-qms/38124>

79. Online Conference of Eastern Partnership countries, 9 November, 2021, Asset Performance Management. [Electronic resource]. – Access mode: <https://industry40-conference.online/about> Огляд рішення SAP MES [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://uk.t-h.de/portfolio/sap-me.html>

80. Огляд рішення SAP MES [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://uk.t-h.de/portfolio/sap-me.html>

81. What is SAP Manufacturing Execution? [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.sap.com/products/execution-mes.html>

82. ERP-MES Integration (PP-MES) [Electronic resource]. – Access mode: <https://help.sap.com/doc/flc7efaf63e44a35b0fle67556d047b6/3.6/en-US/frameset.htm?da6a78ae807f47fabd9db81e3ebb5534.html>

83. Design for Manufacturing and Assembly – DFMA [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/ru/our-story/glossary/design-for-manufacturing-and-assembly-dfma/53982>

84. Stackpole, Beth. PLM + MES + ERP = Closed-Loop Product Lifecycle [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.automationworld.com/products/software/article/13314943/plm-mes-erp-closedloop-product-lifecycle>

85. Gianluca D'antonio, Lisa Macheda, Joel Sauza Bedolla, Paolo Chiabert. PLM-MES Integration to Support Industry 4.0. // Proc. 14th IFIP International Conference on Product Lifecycle Management (PLM), Jul 2017. – Seville, Spain. – Pp.129-137, doi:10.1007/978-3-319-72905-3_12.

86. Штучний інтелект, машинне навчання та нейронні мережі: в чому різниця і для чого їх використовують [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://evergreens.com.ua/ua/articles/machine-learning-overview.html>

87. Ohlhorst Frank J. A Cloudy Year for Big Data. eWeek [Electronic

resource]. – Access mode: <http://www.eweek.com/c/a/Cloud-Computing/2012-A-Cloudy-Year-for-Big-Data-102807>.

88.«Big Data» Brighten BI Future. eWeek [Electronic Resours]. – Access mode: <http://www.eweek.com/c/a/Data-Storage/TBA-Hadoop-Yahoo-BigData-Brightens-BIFuture-254079>.

89.BigData [Електронний ресурс] Режим доступу: <https://intellect.ml/big-data-6821/>

90.Gartner Says Solving «Big Data» Challenge Involves More Than Just Managing Volumes of Data. [Electronic Resours]. – Access mode: <http://www.gartner.com/newsroom/id/1731916>.

91.Jay Lee, Jaskaran Singh, Moslem Azamfar. Industrial Artificial Intelligence [Electronic Resours]. – Access mode:<https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1908/1908.02150.pdf>

92.Why Should Manufacturers Adopt AI and Big Data? [Electronic resource]. – Access mode: <https://manufacturingglobal.com/ai-and-automation/why-should-manufacturers-adopt-ai-and-big-data>

93.Manufacturing the future [Electronic resource]. – Access mode: https://www.accenture.com/_acnmedia/PDF-74/Accenture-Pov-Manufacturing-Digital-Final.pdf

94.Digital Twins and AI for manufacturers [Electronic resource]. – Access mode: <https://nightingalehq.ai/blog/digital-twins-and-ai-for-manufacturers/>

95.Я. В. Бахарева Розвиток предикативної аналітики як пріоритетного напрямку бізнес-аналітики // Ефективна економіка [Електронний ресурс] – Режим доступу: http://www.economy.nayka.com.ua/pdf/5_2018/152.pdf

96.Data Mining and Predictive Analytics. Dean Abbott. Електронний ресурс. – Режим доступу: <http://abbottanalytics.blogspot.com/2014/07/predictive-analytics-and-business.html?m=1>

97.Statistical Process Control [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/ru/our-story/glossary/statistical-process-control-spc/38121>

98.SPC for predictive quality control [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.canadianmetalworking.com/canadianmetalworking/article/measurement/spc-for-predictive-quality-control>

99.INTERPIPE [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://industry40-conference.online/exhibitors/interpipe>

100. Industry4.0. Online-conference [Електронний ресурс] – Режим

доступу: <https://industry40-conference.online/>

101. Eitan Vesely Will Digital Twin Replace SCADA? Will Anything Else? [Electronic resource]. – Access mode: <https://reliabilityweb.com/articles/entry/will-digital-twin-replace-scada-will-anything-else>

102. Machine Learning – Машинне навчання [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.it.ua/knowledge-base/technology-innovation/machine-learning>.

103. Acemoglu, Daron, and Pascual Restrepo. "Robots and Jobs: Evidence from US Labor Markets." // MIT Department of Economics Working Paper 17/ – no. 4 (March 25, 2017): – 36. doi:10.3386/w23285.

104. DeAngelis, Stephen. "Industry 4.0: How Long Will the Revolution Take." Industry 4.0: How Long Will the Revolution Take? November 2, 2016. [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.enterrasolutions.com/industry-4-0-how-long-will-the-revolution-take/>.

105. Gauri Malhar Bhandurje, Mrunmayi Shirish Bhide Industry 5.0: The Convergence of AI and HI (Human Intelligence) [Electronic resource]. – Access mode: https://assets.researchsquare.com/files/rs-693806/v1_covered.pdf?c=1631873850

106. Saied Nahavandi Industry 5.0 – A Human-Centric Solution // Sustainability, 2019 – no 11. – Pp.4371 [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.mdpi.com/2071-1050/11/16/4371/htm>

107. A world of waste with Michael Rada [Electronic resource]. – Access mode: <https://drdianehamilton.com/a-world-of-waste-with-michael-rada/>

108. Michael Rada Industry 5.0 definition [Electronic resource]. – Access mode: <https://michael-rada.medium.com/industry-5-0-definition-6a2f9922dc48>

109. Kyungeun Sung. A Review on Upcycling: Current Body of Literature, Knowledge Gaps and a Way Forward // Venice, Italy. – Apr 13-14, 2015. – 17 (4), Part I – Pp.28-40.

110. Індустрія 4.0 – що це таке та навщо це Україні. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://appau.org.ua/publications/industriya-4-0-shho-tse-take-ta-navishho-tse-ukrayini/>

111. Про схвалення Концепції розвитку цифрової економіки та суспільства України на 2018-2020 роки та затвердження плану заходів щодо її реалізації [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/67-2018-p#Text>.

112. Про схвалення Концепції розвитку цифрових

компетентностей та затвердження плану заходів з її реалізації. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/167-2021-%D1%80>.

113. Національна стратегія «Індустрія 4.0», проєкт для кабінету міністрів України. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://www.ism.kiev.ua/images/strategy.pdf>.

114. Про затвердження Національної економічної стратегії на період до 2030 року [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.kmu.gov.ua/npas/pro-zatverdzhennya-nacionalnoyi-eko-a179>

115. Міжнародні технічні стандарти та українська Індустрія 4.0 [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://appau.org.ua/tk-185/mizhnarodni-tehnichni-standarty-ta-ukrayinska-industriya-4-0/>

116. BAT reference documents [Electronic resource]. – Access mode: https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/Advancing_economic_competitiveness [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.unido.org/our-focus/advancing-economic-competitiveness>.

117. Електричні мережі стануть “розумними”. В Україні завершують роботу над Концепцією впровадження Smart Grid на період до 2035 року [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://ua-energy.org/uk/posts/elektrychni-merezhi-stanut-rozumnymi>

118. Пропозиції АППАУ та руху 4.0 до Національної економічної стратегії 2030. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.industry4ukraine.net/publications/propozyciyi-appau-ta-ruhu-4-0-do-nacjonalnoyi-ekonomichnoyi-strategiyi-2030>

119. United nations Industrial Development organization [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.unido.org/>

120. Віртуальні дискусії Industry4Ukraine надають імпульс для відновлення економіки України [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.unido.org/stories/virtualni-diskusii-industry4ukraine-nadayut-impuls-dlya-vidnovlennya-ekonomiki-ukraini>.

121. Advancing economic competitiveness [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.unido.org/our-focus/advancing-economic-competitiveness>

122. Extreme automation and connectivity: the global, regional, and investment implications of the Fourth Industrial Revolution; UBS White Paper for the World Economic Forum Annual Meeting 2016. [Electronic resource]. – Access mode: http://www.tadviser.ru/images/b/b7/Extreme_automation_and_connectivity_The_global%2C_regional%2C_and_investment_implications_of_the_Fourth_Industrial_Revolution.pdf

123. Про схвалення Стратегії розвитку промислового комплексу

України на період до 2025 року: проєкт розпорядження Кабінету Міністрів України від 17.04.2018 р. Ліга Закон: сайт. [Електронний ресурс] – Режим доступу: http://search.ligazakon.ua/l_doc2.nsf/link1/NT4284.html

124. Ривак Н. О., Керницька А. В. Ініціативи Індустрії 4.0 у країнах ЄС: досвід для України // socio-economic problems of the modern period of Ukraine – 2020 – Випуск 4 (144) – С.65-70.

125. Федоров, Михайло. Цифровізація забезпечить зростання української економіки на 10-12% на рік [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.kmu.gov.ua/news/mihajlo-fedorov-cifrovizaciya-zabezpechit-zrostannya-ukrayinskoyi-ekonomiki-na-10-12-na-rik>

126. Al-Ali, A.R. & Gupta, Ragini & Al Nabulsi, Ahmad. (2018). Cyber physical systems role in manufacturing technologies. AIP Conference Proceedings. 1957. 050007. Doi.:10.1063/1.5034337. [Electronic resource]. – Access mode: <https://aip.scitation.org/doi/pdf/10.1063/1.5034337>

127. Fei Tao, Qinglin Qi, Lihui Wang. Digital Twins and Cyber-Physical Systems toward Smart Manufacturing and Industry 4.0: Correlation and Comparison [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.engineering.org.cn/en/10.1016/j.eng.2019.01.014>

128. Control systems Software Development [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://asu.net.ua/>

129. Результати дослідження ринку CRM в Україні [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.bitrix24.ua/crmresearch2018/>

130. Тимошенко Е. В. Проблемы и угрозы четвертой промышленной революции: последствия для Украины // Бизнес Информ, 2019. – № 2. – С. 21–29.

131. Михайло Федак. 10 міфів про цифрові інновації для промисловості [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://industry4-0-ukraine.com.ua/2019/04/23/10-m%d1%96f%d1%96v-pro-cifrov%d1%96-%d1%96nnovac%d1%96%d1%97-dlya-promi/>

132. Україна в умовах Індустрії 4.0: можливості та бар'єри [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://ape.fmm.kpi.ua/article/view/205842>

133. Ангел С., Кравчук В. Яка промислова політика потрібна Україні для переходу до Індустрії 4.0? Громадська синергія: сайт. 08.04.2019. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.civic-synergy.org.ua/articles-in-the-media/yaka-promyslova-polityka-potribna-ukrayini-dlya-perehodu-do-industriyi-4-0>

134. Федоров, Михайло. Цифровізація забезпечить зростання української економіки на 10-12% на рік [Електронний ресурс]. – Режим

доступу: <https://www.kmu.gov.ua/news/mihajlo-fedorov-cifrovizaciya-zabezpechit-zrostantnya-ukrayinskoyi-ekonomiki-na-10-12-na-rik>.

135. Постанова № 750 кабінету міністрів України від 21 липня 2021 р «Щодо сприяння впровадженню технологічного підходу “Індустрія 4.0” в Україні» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/750-2021-%D0%BF?#n13>

136. Центр 4.0 КІП ім. Ігоря Сікорського Електронний ресурс]. – <https://science.kpi.ua/news/tsentr-4-0-kpi-im-igorya-sikorskogo-2/>

137. Центр Індустрія 4.0 в НУ «Запорізька політехніка» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zr.edu.ua/?q=node/7660>

138. Василенко О.В. «М'яка» цифровізація підприємств в українських реаліях / О.В. Василенко, Г.В. Сніжної, В.І. Рева, С.А.Івченко // Матеріали VII Міжнар. наук.-техн. конф. Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем, 3-5 лист. 2021 р. – Дніпро: УДХТУ, 2021. – С. 126-128.

139. АСУ Інжиніринг [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://asu.net.ua/uk/realizovani-proekty>

140. Ефективне використання високовартісного інструменту під контролем у АТ «ФЕД» [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.it.ua/cases/article/effektivnoe-ispolzovanie-dorogostojaschego-instrumenta-pod-kontrolem-it-enterprise>

141. Харківський машинобудівний завод «ФЕД» [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://fed.ua/>

142. Моніторинг ресурсів на всі випадки! [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://smart-maic.com/uk/>

143. Михайло Паламар, Михайло Стрембіцький, Андрій Паламар. Проектування комп'ютеризованих вимірювальних систем і комплексів. Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2018. – 150 с.

144. Л. П. Клименко, Л. В. Пізінцалі, Н. І. Александровська, В. Д. Євдокимов. Метрологія, стандартизація та управління якістю. – Миколаїв : Вид-во ЧДУ ім. Петра Могили, 2011.

145. Метрологія, стандартизація, управління якістю і сертифікація : Підруч. для вищ. навч. закл. / Р. В. Бичківський, П. Г. Столярчук, П. Р. Гамула; Нац. ун-т "Львів. політехніка". – Л., 2002. – 560 с. – Бібліогр.: с. 556-559.

Додаток А
Стратегічні органи ЄС, які розробляють
міжнародні підходи до стандартизації Industry 4.0

Технічний комітет	Сфера стандартизації	Стандарти
ISO / SMCC Координаційний комітет Ініціативи Індустрії 4.0	Забезпечення координації Ініціативи Індустрії 4.0 та розробка рекомендацій щодо реалізації спільного міжнародного підходу, надання платформи для роботи на міжнародному рівні	Серія стандартів <i>IEC 62443</i>
IEC / SyC Комітет системи «розумного» виробництва. Робоча група IEC / SEG 7	Оцінювання стандартів у відповідних організаціях стандартизації та організаціями, що розробляють стандарти та розробка концепції для «розумного» виробництва	Серія стандартів розумного виробництва
ISO / TC 184 Системи автоматизації та інтеграції	Інформаційні системи, системи автоматизації та управління, інтеграційні технології	Серія стандартів для автоматизації
IEC/TC 65 Вимір., контроль та автоматизація промислових процесів	Електричні, пневматичні, гідравлічні, механічні або інші вимірювання, контроль систем	Серія стандартів для побудови ІВС та САК
ISO/IEC/JWG 21 Еталонна модель розумного виробництва	Розробка інтелектуальних еталонних виробничих моделей, різних аспектів, пов'язаних з життєвим циклом, технічними та / або організаційними ієрархіями активів. Розробка базової архітектури для виробничих компонентів I4.0	Серія стандартів еталонного моделювання «розумного» виробництва
SemAnz401 Семантичний альянс 4.0	Розробка стандартів для структурування інформації та створення семантичної бази для обміну інформацією в I4.0	Серія стандартів для обміну інформацією