

Електронний журнал «Ефективна економіка» включено до переліку наукових фахових видань України з питань економіки (Категорія «Б», Наказ Міністерства освіти і науки України № 975 від 11.07.2019). Спеціальності – 051, 071, 072, 073, 075, 076, 292. Ефективна економіка. 2025. № 5.

DOI: <http://doi.org/10.32702/2307-2105.2025.5.39>

УДК 658.5

Н. В. Касьянова,

д. е. н, професор, професор кафедри економіки,

Державний університет «Київський авіаційний інститут»

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7729-2011>

С. М. Дем'яносів,

аспірант, Державний університет «Київський авіаційний інститут»

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0004-2118-9153>

СИСТЕМА ПЛАНУВАННЯ ВИРОБНИЦТВА В УМОВАХ ІНДУСТРІЇ 4.0

N. Kasianova,

*Doctor of Economic Sciences, Professor, Professor of the Department of Economics,
State University "Kyiv Aviation Institute"*

S. Demianosov,

Postgraduate student, State University "Kyiv Aviation Institute"

PRODUCTION PLANNING SYSTEM IN INDUSTRY 4.0 CONDITIONS

У статті розглядаються концептуальні засади розробки та функціонування інтегрованої багаторівневої системи планування виробництва в умовах трансформаційних викликів Індустрії 4.0. У фокусі дослідження – побудова ієрархічної моделі планування, яка охоплює стратегічний, тактичний і оперативний рівні управління з урахуванням особливостей цифрової

трансформації виробництва, впровадження IoT, великих даних, штучного інтелекту, цифрових двійників і комунікаційних технологій.

Запропонована модель базується на методології SCOR, що забезпечує стандартизоване представлення логістичних і виробничих процесів, сприяє інтеграції планування на всіх рівнях організаційної структури та забезпечує прозорість і узгодженість управлінських рішень. Основна новизна моделі полягає в її інваріантності щодо рівня ієрархії та часових горизонтів, що реалізується через варіативність агрегування вхідних параметрів, цілей і обмежень.

Адаптивність системи забезпечується завдяки механізмам реакції на зміни зовнішнього та внутрішнього середовищ, що значно підвищує її ефективність в умовах невизначеності. Висновки статті акцентують на необхідності інтеграції даної моделі з існуючими корпоративними інформаційними системами та глибокого аналізу бізнес-процесів з метою повноцінного впровадження підходів Індустрії 4.0 у сфері виробничого планування.

The article examines the conceptual principles of the development and operation of an integrated multi-level production planning system in the context of the transformational challenges of Industry 4.0. Based on the analysis of the historical evolution of industrial revolutions, the need to transition to adaptive, digitally integrated production process management systems is substantiated. The focus of the study is the construction of a hierarchical planning model that covers the strategic, tactical and operational levels of management, taking into account the features of the digital transformation of production, the implementation of IoT, big data, artificial intelligence, digital twins and communication technologies.

The proposed model is based on the SCOR methodology, which provides a standardized representation of logistics and production processes, promotes the integration of planning at all levels of the organizational structure and ensures transparency and consistency of management decisions. The main novelty of the

model lies in its invariance with respect to the level of hierarchy and time horizons, which is implemented through the variability of the aggregation of input parameters, goals and constraints.

The proposed operational part is implemented as a multi-objective optimization problem using the metaheuristic algorithm NSGA-II, optimized by the Taguchi method. Coordination of strategic and operational decisions is ensured using the TOPSIS method, which allows achieving a balance between cost, flexibility and reliability. Taking into account the multi-period nature of production and the presence of several production sites, the model allows for an adequate description of complex production systems of modern enterprises. The application of aggregated production planning at the tactical level is separately considered. The adaptability of the system is ensured by mechanisms for responding to changes in the external and internal environments, which significantly increases its effectiveness in conditions of uncertainty. The conclusions of the article emphasize the need to integrate this model with existing corporate information systems (ERP, DSS) and in-depth analysis of business processes in order to fully implement Industry 4.0 approaches in the field of production planning.

Ключові слова: *Індустрія 4.0, планування виробництва, SCOR-модель, агреговане планування, система прийняття рішень, адаптивне управління, IoT, великі дані, цифрові двійники, оптимізація ресурсів.*

Keywords: *Industry 4.0, production planning, SCOR model, aggregated planning, decision-making system, adaptive management, IoT, big data, digital twins, resource optimization.*

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями. *Історично розвиток промисловості відбувався через серію технологічних проривів, які суттєво розширювали продуктивні можливості людства. На сьогоднішній день світ пережив три промислові революції, кожна з яких ознаменувалася впровадженням*

радикально нових технологій, що трансформували процеси виробництва та управління.

Перша промислова революція (Індустрія 1.0) була започаткована комерційно успішним паровим двигуном Т. Ньюкомена, що дозволив здійснити перехід від «м'язової сили» до «машинної сили» [1]. Цей технологічний прорив став рушійною силою механізації виробництва та заклав основи для подальшого промислового прогресу.

Друга промислова революція (Індустрія 2.0) базувалася на теоретичних і практичних засадах використання електроенергії, розроблених М. Фарадеем [2]. Електрифікація виробництва дозволила значно підвищити ефективність промислових процесів та заклала основи для масового виробництва. Саме в цей період почав формуватися науковий підхід до управління виробництвом, найбільш яскраво представлений у працях Ф. Тейлора, який запропонував чітку ієрархію управління з розподілом завдань між різними рівнями – від стратегічного до оперативного [3].

Третя промислова революція (Індустрія 3.0), на відміну від попередніх, зосередилася на вдосконаленні виробничих процесів за допомогою мініатюрної електроніки та інформаційних технологій, відкривши шлях до цифровізації промисловості. Комп'ютеризація виробництва призвела до автоматизації процесів, підвищення точності та якості продукції, а також зменшення залежності від людського фактору.

Сьогодні світ переживає четверту промислову революцію (Індустрія 4.0), яка спрямована на створення нової ери інтелектуальної промисловості та безпрецедентного глобального ринку. Запропонована в Німеччині в 2011 році як частина економічної політики [4], концепція Індустрії 4.0 розвинулась як конвергенція передових технологій: Інтернету речей (IoT), цифрових двійників, великих даних, штучного інтелекту (ШІ), технологій розширеної реальності (XR) тощо. Нещодавно ці технології об'єднались у більш широку концепцію Метавсесвіту [5]. В основі Індустрії 4.0 лежить взаємозв'язок і промисловий Інтернет речей (IIoT). Комунікаційні технології (КТ) є невід'ємною частиною

Індустрії 4.0, оскільки вони поєднують операційні технології (OT) та інформаційні технології (IT) для підтримки ІоТ. Продуктивність КТ визначає стабільність, безперервність та гнучкість глобальної промисловості.

Четверта промислова революція (Індустрія 4.0) базується на тісній співпраці трьох доменів CIOT (Communication-Information-Operation Technologies) у процесі промислового виробництва. Співпраця CIOT спрямована на органічну інтеграцію всіх трьох доменів, забезпечуючи взаємодію між фізичним (OT) та цифровим (IT) світами через комунікаційні мережі (КТ). При цьому КТ-домен відіграє ключову роль, безперебійно об'єднуючи фізичний і цифровий світи, що робить «ІоТ» невід'ємним компонентом Індустрії 4.0 [6].

Індустрія 4.0 – це радикальна трансформація способу організації та функціонування виробничих систем. Це фактично створення виробничих комплексів, які здатні самостійно приймати рішення на основі поточних даних та змінних умов. І якщо раніше виробничі процеси планувалися статично, з оглядом на прогнозовані параметри, то сьогодні зростає потреба в більш гнучких, адаптивних і інтегрованих підходах до планування. Складність і динамічність сучасних виробничих ланцюгів не дозволяють «сподіватися» на ручне або локальне планування, потрібні системи, що здатні координувати різноманітні виробничі підрозділи, ресурси, постачання і логістику на різних рівнях управління - від стратегічного до оперативного.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Багаторівневе планування виробничих систем, будучи ключовим елементом управління у добу Індустрії 4.0, привертає пильну увагу низки провідних сучасних науковців. В їхніх роботах спостерігаємо різні підходи до інтеграції цифрових технологій, оптимізації та адаптивного управління. Проте кожен із цих дослідників пропонує унікальні рішення, що мають як сильні сторони, так і обмеження.

Г. Левін виділяється дослідженням з інтеграції багаторівневого планування із сучасними алгоритмами машинного навчання, однак це підвищує вимогливість до обчислювальних ресурсів, що може бути обмежуючим

фактором для виробничих підприємств [7]. І. Пападопулос (зосереджується на проблемах синхронізації багаторівневого планування в глобальних ланцюгах постачання, що дозволяє ефективно поєднати управлінські рішення на різних рівнях, що є критично важливим в умовах непередбачуваності сучасних ринків [8].

Я. Беккер пропонує гібридні методи, які поєднують евристики з точними алгоритмами для оптимізації багаторівневих виробничих систем, що може ускладнити інтерпретацію результатів персоналу, який потребує додаткового навчання та залучення експертів [9]. М. Ковальська акцентує увагу на багаторівневому плануванні в сегменті малого та середнього виробництва [10]. К. Мендес досліджує багаторівневе планування з огляду на сталий розвиток і зелені технології [11].

В Україні також накопичено чимало якісних досліджень у галузі багаторівневого планування виробничих систем. Вітчизняні вчені орієнтуються як на класичні теорії, так і на інноваційні підходи, інтегруючи цифрові технології та адаптивні методи управління. С. Кравченко робить акцент на інформаційних системах підтримки багаторівневого планування. Її дослідження допомагають покращити координацію між стратегічним і оперативним рівнями, що особливо важливо для підприємств із високим ступенем динамічності [12]. Н. Ковтун акцентує увагу на особливостях організаційної структури та специфіці виробничих процесів. Її роботи мають вагомое практичне значення, оскільки надають рекомендації з адаптації теоретичних моделей до реальних умов підприємств [13]. В. Мороз концентрується на цифровізації багаторівневого планування з використанням хмарних технологій та інтеграції із системами управління ресурсами підприємства (ERP) [14].

Вітчизняні науковці активно працюють над удосконаленням багаторівневого планування виробничих систем, створюючи теоретичні та прикладні напрацювання, що відповідають вимогам часу. Однак, більшість робіт мають певні обмеження, пов'язані із впровадженням цифрових

технологій та адаптацією до реалій індустрії 4.0. Вирішення цих проблем потребує подальшого дослідження.

Формулювання цілей статті полягає у розробці інтегрованої багаторівневої моделі планування виробництва в умовах Індустрії 4.0, що забезпечує послідовну координацію стратегічних, тактичних і оперативних рівнів управління з урахуванням сучасних цифрових технологій та адаптивного управління для підвищення ефективності, гнучкості та узгодженості виробничих процесів.

Виклад основного матеріалу дослідження. Сучасне виробництво, особливо в умовах динамічного ринку та технологічних викликів сьогодення, потребує системного підходу до організації планування. У цьому контексті актуальною є формування системи планування виробництва, що відповідає принципам Індустрії 5.0 та передбачає не лише технологічну інтеграцію, але й врахування людського фактору, екологічних аспектів та соціальної відповідальності в процесі планування та реалізації виробничих програм. В зв'язку з цим, запропоновано інтегровану багаторівневу модель планування виробництва (ІБМПВ), що являтиме собою уніфіковану систему планування з можливістю застосування на різних часових горизонтах та рівнях організаційної ієрархії (рис. 1). При побудові моделі за основу було взято стандартну модель для аналізу, оптимізації та управління ланцюгами постачання SCOR (Supply Chain Operations Reference), яка описує шість ключових процесів: планування, постачання, виробництво, доставку, повернення та підтримку [15]. SCOR має багаторівневу структуру – від загальних стратегічних процесів до конкретних операційних дій, що дозволяє інтегрувати стратегічне, тактичне та оперативне планування. Її використання сприяє стандартизації термінології, вимірюванню ефективності, виявленню «вузьких місць» та забезпеченню прозорості в усіх етапах виробництва.

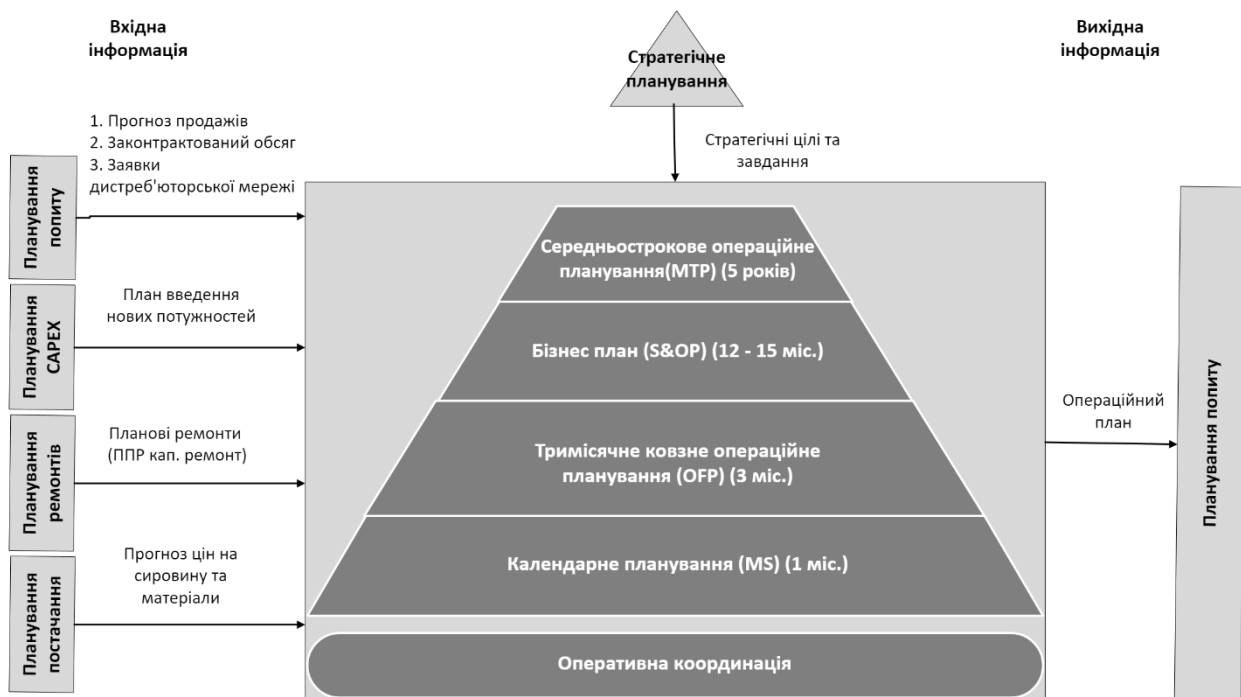


Рис. 1. Багаторівнева система планування виробництва

Джерело: Сформовано авторами на основі [15].

Основу ІБМПВ складає піраміда планування, що ілюструє послідовність рівнів, кожен із яких має чіткі функції, часові горизонти та інформаційний вплив на суміжні рівні.

1. Стратегічне планування (більше 5 років) – це вершина піраміди, де визначаються довгострокові цілі підприємства, формується загальна концепція розвитку виробництва, обираються пріоритетні продукти, масштаб інвестицій, розвиток потужностей і технологій. Цей рівень задає вектор руху усій системі планування, дає фундаментальні орієнтири, які впливають на всі подальші рішення. Стратегічне планування враховує зовнішні чинники – ринкові тенденції, конкурентне середовище, інновації – і визначає, як підприємство має адаптуватися до них.

2. Середньострокове оперативне планування (МТР, 3-5 років) трансформує стратегічні цілі у конкретні плани щодо виробничих потужностей, ресурсів та операційних процесів. Мета середньострокового планування – забезпечити збалансованість між можливостями підприємства і очікуваним попитом. Тут враховують капітальні інвестиції, потреби у робочій силі,

закупівлях, технічному обслуговуванні. Цей рівень пов'язує глобальні пріоритети з конкретними заходами, гарантує послідовність реалізації стратегії.

3. Рівень планування продажів і операцій (S&OP, 15 місяців) відповідає за інтеграцію функцій продажів та виробництва з точністю на середньостроковий період. Планування S&OP синхронізує попит з виробничими можливостями, враховуючи замовлення клієнтів, рівень запасів та операційні обмеження. Завдяки S&OP підприємство може оперативнo коригувати плани, підтримуючи баланс між обсягами реалізації і виробничою спроможністю. Важливо, що це комунікативний рівень, який об'єднує команди продажів, маркетингу та виробництва, стимулюючи спільне ухвалення рішень.

4. Тримісячне ковзне операційне планування (OFP, 3 місяці) дозволяє підприємству адаптуватися до короткострокових змін – зміни попиту, збої у постачаннях, простій обладнання. Тут детально планують виробничі завдання, раціоналізують розподіл ресурсів, готують графіки роботи. Цей рівень має характер поточного регулювання, він забезпечує гнучкість і оперативність виробничої системи, мінімізуючи ризики збоїв.

5. Календарне планування (MS, 1 місяць) найнижчий рівень піраміди – це щоденне або щотижневе розбиття завдань, де визначаються конкретні операції, закріплення робітників, графіки роботи обладнання, логістика матеріалів. Цей рівень оперує детальною інформацією і слугує інструментом реалізації всіх вищезгаданих планів. Він дає змогу чітко координувати ресурси, уникати простоїв та забезпечувати своєчасне виконання замовлень.

Паралельно з календарним плануванням функціонує оперативна координація, яка відповідає за миттєвий контроль та коригування виробничих процесів у реальному часі, відслідковує поточний стан, виявляє відхилення і здійснює швидке втручання. Багаторівнева система планування – це не набір ізольованих шарів, а динамічна система із постійною комунікацією. Стратегічні цілі спрямовують середньострокове планування, яке в свою чергу задає рамки для S&OP. План продажів і операцій трансформується у тримісячні та календарні плани, що детально реалізуються на виробничих ділянках.

Натомість інформація про виконання на нижчих рівнях піднімається вгору, даючи зворотний зв'язок: це дозволяє коригувати стратегію, переоцінювати середньострокові плани і вдосконалювати оперативні рішення. Завдяки такій ієрархічній, але гнучкій системі виробництво стає узгодженим, адаптивним і ефективним – здатним швидко реагувати на зовнішні виклики і внутрішні зміни, зберігаючи конкурентоспроможність та стабільність.

Відмінна особливість пропонованої системи – інваріантність базової математичної структури відносно часового масштабу та організаційного рівня, що уможливорює узгодженість планування на всіх ієрархічних рівнях виробничої системи. Варіативним компонентом виступатиме ступінь агрегації вхідних даних, обмежень та цільових функцій, що зберігає єдність методологічного підходу

Основна особливість представленої моделі полягає в її здатності враховувати складну структуру виробничої системи, що включає кілька постачальників, виробників і різноманітних продуктів у мультиперіодному середовищі. Така комплексність дозволяє більш точно відображати реальні умови функціонування сучасних підприємств, де одночасно опрацьовується великий обсяг інформації про ресурси, продукцію та час.

Операційна складова реалізована у вигляді багатоцільової математичної задачі, яка спрямована на оптимізацію трьох ключових параметрів: вартості, гнучкості та надійності. Це дозволяє забезпечити збалансований підхід до планування, що враховує не лише економічну ефективність, а й здатність виробничої системи швидко адаптуватися до змін та зберігати стабільність у різних умовах. Для розв'язання цієї задачі застосовується сучасний метаввристичний алгоритм NSGA-II, який додатково налаштований за допомогою методу Тагучі. Такий підхід забезпечує підвищену ефективність оптимізації, дозволяючи знаходити якісні рішення у багатовимірному просторі параметрів з мінімальними витратами часу і ресурсів.

Важливою складовою моделі є механізм узгодження стратегічних і операційних рішень, що реалізований за допомогою методу TOPSIS – одного з

популярних методів багатокритеріального аналізу. Завдяки цьому підходу модель здатна системно інтегрувати довгострокові цілі підприємства із щоденними операційними завданнями, забезпечуючи їхню гармонійну взаємодію.

Окрім того, модель підтримує адаптивне управління, що базується на аналізі подій та змін у внутрішньому й зовнішньому середовищі виробництва. Це робить систему не просто статичною, а живою та гнучкою, здатною оперативно реагувати на непередбачувані фактори і підтримувати високий рівень ефективності в умовах нестабільності. Завдяки такій структурі досягається узгоджене прийняття рішень на всіх рівнях, покращення ефективності роботи, а також гнучкість і адаптивність до змін [16].

Фундаментальна інноваційність концепції полягає у збереженні єдиної методологічної бази моделювання при диференціації рівнів агрегації даних та деталізації планів відповідно до горизонту планування та управлінських потреб. Модель поєднує стратегічні (високорівневі) рішення, які приймаються на основі людського інтелекту, з операційними (низькорівневими) рішеннями, які підтримуються машинним інтелектом через системи підтримки прийняття рішень (DSS).

При побудові багаторівневої моделі планування виробництва на різних рівнях було застосовано 16 SCR-функцій [17] та побудова ієрархічної моделі взаємозв'язків між ними за допомогою інтерпретативного структурного моделювання (ISM).

На стратегічному рівні це включає розробку дорожньої карти цифрової трансформації виробництва, визначення технологій і SCR-функцій для першочергового впровадження та оцінку інвестиційної привабливості цифрових рішень. На тактичному рівні модель ISM може бути використана для інтеграції SCR-функцій у виробничі системи, створення гнучких планів, що враховують адаптивність, ризики та видимість у ланцюгу постачання. Операційний рівень передбачає моніторинг виробничих процесів у реальному

часі з використанням IoT і великих даних, адаптацію планів до збоїв через системи передбачувального планування та автоматизації.

У контексті планування виробництва в умовах Індустрії 4.0 значний інтерес представляє модель агрегованого планування виробництва (APP) [18]. Модель лінійного програмування враховує кілька цехів, різні типи сировини, виробничі обмеження, можливість використання субпідряду та управління запасами відповідно до попиту. Цільова функція моделі спрямована на максимізацію прибутку за рахунок збільшення доходу від реалізації продукції та мінімізації витрат на сировину, виробництво, зберігання й субпідряд. Серед переваг моделі – здатність масштабуватися на великі виробничі системи, гнучкість у використанні ресурсів та можливість розширення з урахуванням додаткових обмежень, зокрема якості та технологічних нюансів.

На наш погляд, APP доцільно застосовувати на тактичному (середньостроковому) рівні планування виробництва де агрегована модель забезпечує розподіл обсягів виробництва між заводами, контроль за рівнем запасів і визначення потреби в субпідряді. На стратегічному рівні вона може слугувати основою для оцінки загального попиту, формування бюджетів і визначення ресурсної політики. На операційному рівні APP-модель може використовуватись як джерело вхідних параметрів або обмежень для деталізованого оперативного планування.

Таким чином, багаторівнева модель планування виробництва, побудована у вигляді ієрархічної структури, забезпечує послідовну і скоординовану роботу на різних часових горизонтах. Кожен рівень моделі має свої унікальні функції (рис. 2), які разом формують єдину систему, здатну ефективно реагувати на зміни внутрішнього і зовнішнього середовища. Відображені в схемі блоки логічно відповідають рівням багаторівневої моделі. Затвердження планів на кожному рівні і подальше доведення їх до виконавців створює чітку структуру відповідальності та контролю, що підвищує дисципліну і сприяє своєчасному виконанню виробничих завдань.

Елементи моделі Кроки	Середньострокове операційне планування (МТР)	Бізнес план (S&OP)	Тримісячне ковзне операційне планування (ОФР)	Календарне планування (MS)	Оперативне координування (ОС)
Актуалізація даних про попит	Актуалізація даних про попит (МТР)	Актуалізація даних про попит (S&OP)	Актуалізація даних про попит (ОФР)	Актуалізація даних про попит (MS)	Актуалізація даних про попит (ОС)
Актуалізація ресурсів ланцюга поставок	Актуалізація ресурсів ланцюга поставок (МТР)	Актуалізація ресурсів ланцюга поставок (S&OP)	Актуалізація ресурсів ланцюга поставок (ОФР)	Актуалізація ресурсів ланцюга поставок (MS)	Актуалізація ресурсів ланцюга поставок (ОС)
Балансування попиту і ресурсів ланцюга поставок	Балансування попиту і ресурсів ланцюга поставок (МТР)	Балансування попиту і ресурсів ланцюга поставок (S&OP)	Балансування попиту і ресурсів ланцюга поставок (ОФР)	Балансування попиту і ресурсів ланцюга поставок (MS)	Балансування попиту і ресурсів ланцюга поставок (ОС)
Затвердження та доведення плану до виконавців	Затвердження та доведення плану до виконавців (МТР)	Затвердження та доведення плану до виконавців (S&OP)	Затвердження та доведення плану до виконавців (ОФР)	Затвердження та доведення плану до виконавців (MS)	Затвердження та доведення плану до виконавців (ОС)

Рис. 2. Схема інтегрованого багаторівневого планування виробничої діяльності

Джерело: Сформовано авторами

Планування здійснюється відповідно до чіткої ієрархії рівнів, що забезпечує узгодженість між стратегічними, тактичними і операційними цілями підприємства:

МТР – прогнозується загальний обсяг виробництва та розробляються середньострокові стратегії розвитку на основі агрегованої інформації;

S&OP – деталізуються обсяги виробництва за товарними групами, ринками збуту та ключовими ресурсами для узгодження виробничих можливостей із прогнозованим попитом;

ОФР, MS – здійснюється розподіл конкретних замовлень, визначаються графіки завантаження агрегатів, забезпечується контроль за виконанням контрактних специфікацій і оперативне коригування планів у разі змін попиту чи ресурсних обмежень.

Рівень агрегації даних у прогнозних моделях визначається відповідно до ієрархії планування, що забезпечує адаптивність аналітичних підходів до стратегічних, тактичних і операційних потреб підприємства:

MTP – передбачає агреговане прогнозування попиту за категоріями продукції на зовнішніх та внутрішніх ринках, що використовується для формування середньострокових виробничих і фінансових стратегій;

S&OP – включає детальнішу агрегацію з розподілом попиту за товарними групами та країнами збуту, дозволяючи узгоджувати виробничі можливості з ринковими потребами;

OFP – поєднує реальні специфікації з наявних контрактів із прогнозними даними, отриманими на попередніх рівнях, що забезпечує гнучкість у короткостроковому плануванні;

MS – базується виключно на підтверджених специфікаціях продукції, що дозволяє забезпечити високий рівень точності при оперативному плануванні виробництва.

На наступному етапі, виходячи з фактичного виробничого міксу та агрегованих даних, виконується розрахунок середньозваженої собівартості відповідно до встановленого рівня агрегації:

MTP – передбачає агрегований розрахунок собівартості за категоріями продукції для оцінки середньострокових виробничо-фінансових стратегій;

S&OP – забезпечує розрахунок собівартості з деталізацією за товарними групами та країнами збуту, що дозволяє балансувати виробничі можливості та ринкові потреби;

OFP – об'єднує прогнозну та контрактну інформацію для формування актуальної собівартості у короткостроковому горизонті;

MS – виконує розрахунок собівартості виключно на основі підтверджених специфікацій продукції, що забезпечує максимальну точність при оперативному плануванні.

Ієрархічний підхід до побудови системи планування виробництвом дозволяє досягати оптимального компромісу між точністю прогнозування та ефективністю обчислювальних ресурсів.

Висновки та перспективи подальших розвідок у даному напрямі.
Індустрія 4.0 кардинально трансформує підходи до планування виробництва,

вводячи нові технології цифрової інтеграції, автоматизації і обробки великих даних. Це створює необхідність формування багаторівневих систем планування, які здатні поєднувати стратегічні, тактичні та оперативні рішення в єдину узгоджену структуру.

Необхідність переходу до нової, більш автоматизованої, циклічної та інтегрованої структури планування і управління виробництвом передбачає широке впровадження цифрових технологій, систем прогнозової аналітики, автоматизованого обміну даними між виробничими та обліковими системами, а також застосування інтелектуальних рішень для оперативного управління ресурсами.

Запропонована інтегрована багаторівнева модель планування виробництва відображає складність сучасних промислових систем, що включають множину постачальників, виробників і продуктів у мультиперіодному середовищі. Її ієрархічна структура забезпечує послідовну трансформацію стратегічних цілей у оперативні плани, що є ключовою умовою ефективного функціонування підприємства. Розроблена концепція багаторівневого планування повинна бути доповнені глибоким аналізом існуючих інтеграцій з інформаційними системами підприємства, а також детальним аналізом поточних бізнес-процесів.

Література

1. Kumar K., Zindani D., Davim J.P. Industry 4.0, Developments towards the Fourth Industrial Revolution. Springer. 2019. 59 p. DOI: 10.1007/978-981-13-8165-2
2. Evans P.C., Annunziata M. Industrial internet: Pushing the boundaries of minds and machines. 2012. URL: <http://www.cse.tkk.fi/fi/opinnot/T-109.4300/2015/luennot-files/Industrial.pdf>
3. Taylor F. W. The Principles of Scientific Management. Dover Publications. 1997. 80 p.

4. Drath R., Horch A. Industrie 4.0: Hit or hype? [Industry Forum]. *IEEE Industrial Electronics Magazine*. 2014. Vol. 8. No. 2. Pp. 56-58. DOI: 10.1109/MIE.2014.2312079
5. Park S.-M., Kim Y.-G. A Metaverse: Taxonomy, components, applications, and open challenges. *IEEE Access*. 2022. Vol. 10. Pp. 4209-4251. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3140175
6. Qiu T. et al. Edge computing in industrial Internet of Things: Architecture, advances and challenges. *IEEE Transactions on Mobile Computing*. 2024. Vol. 23. Is. 12. Pp. 2462-2488. <https://doi.org/10.1109/TMC.2024.3452502>
7. Leung H. Adaptive multi-level manufacturing planning via digital twins and machine learning. *Advanced Engineering Informatics*, 2021. Vol. 49. Pp. 101353. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2021.101353>
8. Papadopoulos I. Synchronizing strategic and operational planning in global supply chains. *International Journal of Production Research*. 2022. Vol. 60(5). Pp. 1450-1465. <https://doi.org/10.1080/00207543.2021.1952346>
9. Becker J. Hybrid methods for multi-level production system optimization. *Journal of Manufacturing Systems*. 2020. Vol. 56. Pp. 123-137. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.03.004>
10. Kowalska M. Multi-level planning models for small and medium manufacturing enterprises. *International Journal of Production Economics*. 2023. Vol. 256. Pp. 108357 <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2023.108357>
11. Mendez C. Green production planning: Multi-level approaches for sustainable manufacturing. *Journal of Cleaner Production*. 2022. Vol. 357. P. 131926. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131926>
12. Кравченко С. Системи інформаційної підтримки оперативного планування виробництва. *Автоматизація та управління*. 2022. № 74(3). С. 112-120.
13. Ковтун Н. Адаптація багаторівневих систем планування на українських машинобудівних підприємствах. *Економіка та управління*. 2023. № 1(85). С. 58-66.

14. Moroz V. Digital transformation of multi-level production planning: Cloud technologies and ERP integration. *Enterprise Digitalization*. 2023. № 7(1). C. 14-22.
15. Stewart G. Supply- chain operations reference model (SCOR): the first cross- industry framework for integrated supply- chain management. *Logistics Information Management*. 1997. Vol. 10 (2). Pp. 62–67, <https://doi.org/10.1108/09576059710815716>.
16. Rezaei M., Shirazi M. A., Karimi B. A multi-objective SCOR-based decision alignment for supply chain performance management. *Scientia Iranica*. 2018. Vol. 25. Is. 5. Pp. 2807-2823. DOI: 10.24200/SCI.2017.4463
17. Ghobakhloo M., Iranmanesh M., Foroughi B., Tseng M.-L., Nikbin D. & Khanfar A. Industry 4.0 digitaltransformation and opportunities for supply chain resilience: a comprehensive review and astrategic roadmap, *Production Planning & Control*. 2023. <https://doi.org/10.1080/09537287.2023.2252376>
18. Pradenas, L., Álvarez, C., & Ferland, J. A. A solution for the aggregate production planning problem in a multi-plant, multi-period and multi-product environment. 2009. URL: <http://journals.math.ac.vn/acta/pdf/0901011.pdf>

References

1. Kumar, K., Zindani, D. and Davim, J.P. (2019), *Industry 4.0, Developments towards the Fourth Industrial Revolution*, Springer, Singapore. DOI: 10.1007/978-981-13-8165-2
2. Evans, P.C. and Annunziata, M. (2012), “Industrial internet: Pushing the boundaries of minds and machines”, Available at: <http://www.cse.tkk.fi/fi/opinnot/T-109.4300/2015/luennot-files/Industrial.pdf> (Accessed 8 May 2025).
3. Taylor, F. W. (1997), *The Principles of Scientific Management*, Dover Publications, NY, USA.
4. Drath, R. and Horch, A. (2014), “Industrie 4.0: Hit or hype?[Industry Forum]”, *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 8, no. 2, pp. 56-58. DOI: 10.1109/MIE.2014.2312079

5. Park, S.-M. and Kim, Y.-G. (2022), "A Metaverse: Taxonomy, components, applications, and open challenges", *IEEE Access*, vol. 10, pp. 4209-4251. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3140175
6. Qiu, T. (2024), "Edge computing in industrial Internet of Things: Architecture, advances and challenges", *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 23, is. 12, pp. 2462-2488. <https://doi.org/10.1109/TMC.2024.3452502>
7. Leung, H. (2021), "Adaptive multi-level manufacturing planning via digital twins and machine learning", *Advanced Engineering Informatics*, vol. 49, p. 101353. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2021.101353>
8. Papadopoulos, I. (2022), "Synchronizing strategic and operational planning in global supply chains", *International Journal of Production Research*, vol. 60(5), pp. 1450-1465. <https://doi.org/10.1080/00207543.2021.1952346>
9. Becker, J. (2020), "Hybrid methods for multi-level production system optimization", *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 56, pp. 123-137. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.03.004>
10. Kowalska, M. (2023), "Multi-level planning models for small and medium manufacturing enterprises", *International Journal of Production Economics*, vol. 256, p. 108357. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2023.108357>
11. Mendez, C. (2022), "Green production planning: Multi-level approaches for sustainable manufacturing", *Journal of Cleaner Production*, vol. 357, p. 131926. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131926>
12. Kravchenko, S. (2022), "Information support systems for operational production planning", *Automation and control*, vol. 74(3), pp. 112-120.
13. Kovtun, N. (2023), "Adaptation of multi-level planning systems at Ukrainian machine-building enterprises", *Economics and Management*, vol. 1(85), pp. 58-66.
14. Moroz, V. (2023), "Digital transformation of multi-level production planning: Cloud technologies and ERP integration", *Enterprise Digitalization*, vol. 7(1), pp. 14-22.

15. Stewart, G. (1997), "Supply- chain operations reference model (SCOR): the first cross- industry framework for integrated supply- chain management", *Logistics Information Management*, vol. 10 (2), pp. 62-67, <https://doi.org/10.1108/09576059710815716>.
16. Rezaei M., Shirazi M. A. and B. Karim (2018), "A multi-objective SCOR-based decision alignment for supply chain performance management", *Scientia Iranica*, vol. 25, is. 5, pp. 2807-2823. DOI: 10.24200/SCI.2017.4463
17. Ghobakhloo, M., Iranmanesh, M., Foroughi, B., Tseng. M.-L., Nikbin. D. & Khanfar. A. (2023), 'Industry 4.0 digitaltransformation and opportunities for supply chain resilience: a comprehensive review and astrategic roadmap", *Production Planning & Control*, <https://doi.org/10.1080/09537287.2023.2252376>
18. Pradenas, L., Álvarez, C., & Ferland, J. A. (2004), "A solution for the aggregate production planning problem in a multi-plant, multi-period and multi-product environment", Available at: <http://journals.math.ac.vn/acta/pdf/0901011.pdf> (Accessed 10 May 2025).

Стаття надійшла до редакції 12.05.2025 р.