

В.Я. ЗАРУБА, Т.Ю. ЧМЕРУК
МЕТОДИ УРАХУВАННЯ НЕВИЗНАЧЕНОСТЕЙ ПОПИТУ У МОДЕЛЯХ ОПЕРАТИВНОГО ПЛАНУВАННЯ ВИРОБНИЦТВА

Сучасні виробничі підприємства стикаються зі складнощами при оперативному плануванні виробництва через невизначеність, яка постійно впливає на їх діяльність. Однак, існує проблема, що керівники компаній не завжди знають переваги та недоліки тих чи інших CRM рішень та їх рівень підтримки прийняття рішень, що створює виклики для ефективного планування. В статті досліджено існуючі підходи до оперативного планування виробництва, залежно від ступеня урахування невизначеностей попиту. Запропоновано класифікацію підходів, яка включає чотири основні категорії: підходи, які враховують параметри зі змінними величинами; моделювання з невизначеними параметрами, стохастичні моделі; високорівневі стратегії, метаевристика; доказове обґрунтування. Представлено аналіз підходів, що враховують параметри зі змінними величинами, які базуються на чітких параметрах, та зазначено їх ефективність у вирішенні задач оперативного планування. Розглянуто стохастичний підхід, який охоплює широкий спектр моделей для врахування невизначеностей та максимізації результатів діяльності підприємства. Високорівневі стратегії, такі як пошук табу, алгоритм пошуку гармонії та генетичні алгоритми, є ефективними управлінськими інструментами та дозволяють підприємствам активно реагувати на зміни у виробничому середовищі та максимізувати результативність процесів виробництва. Проте, успішне впровадження цих стратегій вимагає глибокого розуміння технічних аспектів та урахування специфіки відповідної галузі промисловості. Доказове обґрунтування, ґрунтуючись на теорії функцій переконань Демпстера-Шафера, відкриває нові можливості для підприємств для розробки експертних систем підтримки прийняття рішень в умовах невизначеності. Дослідження показує, що цей підхід дозволяє зменшити ризики та збільшити точність прийнятих рішень, а також покращити стратегічне управління підприємством. Проте, для успішного впровадження доказового обґрунтування необхідно ретельно вивчити теоретичні аспекти та забезпечити високий рівень кваліфікації персоналу.

Ключові слова: оперативне планування; стохастична модель; високорівневі моделі; оптимізація; моделювання; невизначений попит

V. ZARUBA, T. CHMERUK
ADVANTAGES AND DISADVANTAGES ANALYSIS OF PRODUCTION PLANNING APPROACHES UNDER UNCERTAINTY CONDITIONS

Modern manufacturing enterprises face difficulties in operational production planning due to the uncertainty that constantly affects their activities. However, there is a problem that company leaders do not always know the advantages and disadvantages of certain CRM solutions and their level of decision support, which creates challenges for effective planning. The article examines the existing approaches to operational planning of production, depending on the degree of considering the uncertainties of demand. A classification of approaches has been proposed, which includes four main categories: approaches that consider parameters with variables; simulation with uncertain parameters, stochastic models; high-level strategies, metaheuristics; evidentiary justification. An analysis of approaches that consider parameters with variables, which are based on clear parameters, is presented, and their effectiveness in solving problems of operational planning is indicated. The stochastic approach, which covers a wide range of models for considering uncertainties and maximizing the results of enterprise activities, is considered. High-level strategies, such as taboo search, harmony search algorithm and genetic algorithms, are effective management tools and allow enterprises to actively respond to changes in the production environment and maximize the effectiveness of production processes. However, the successful implementation of these strategies requires a deep understanding of the technical aspects and consideration of the specifics of the relevant industry. Evidence-based reasoning based on the Dempster-Schafer theory of belief functions opens new opportunities for enterprises to develop expert decision support systems under uncertainty. The study shows that this approach can reduce risks and increase the accuracy of decision-making, as well as improve the strategic management of the enterprise. However, for the successful implementation of evidentiary justification, it is necessary to carefully study the theoretical aspects and ensure a high level of personnel qualification.

Keywords: operational planning; stochastic model; high-level models; optimization; modeling; uncertain demand

Вступ. Оперативне планування виробництва - це процес формування детальних планів та розпоряджень для виробничих операцій на короткий період часу, зазвичай від декількох днів до кількох місяців вперед. Його основна мета полягає в ефективному розподілі ресурсів, таких як сировина, обладнання, фінансових та трудових ресурсів, для досягнення встановлених цілей виробництва в умовах підвищеної нестабільності та змінних ринкових умов. Оперативне планування враховує поточні обмеження та можливості підприємства, такі як попит, обсяги виробництва, час виготовлення продукції, запаси та логістику, з метою оптимізації виробничих процесів та забезпечення високої ефективності виробництва. Сучасні виробничі підприємства стикаються зі складнощами в оперативному плануванні виробництва через невизначеність, яка постійно впливає на їх діяльність. Це проявляється у невизначеності ринкового попиту, вартості сировини, наявності кваліфікованого

персоналу. Пошук оптимального підходу до управління цими невизначеностями стає ключовим завданням для забезпечення ефективності виробництва та конкурентоспроможності підприємства на ринку. Існують різні підходи та методи, які допомагають враховувати та долати ці проблеми, але їх ефективність та застосування в реальних умовах залишаються викликом для виробничих підприємств. Стаття присвячена аналізу методів урахування невизначеностей попиту у моделях оперативного планування виробництва з метою виявлення їх переваг та недоліків, а також визначення оптимального рішення для кожного конкретного підприємства.

Аналіз стану питання. Виробничі підприємства використовують різноманітні підходи, які допомагають враховувати та долати проблеми невизначеності при оперативному плануванні

виробництва. Це можуть бути власні розробки або CRM рішення сторонніх компаній. Ці рішення, у свою чергу, ґрунтуються на практичній реалізації певного теоретичного методу щодо оперативного планування виробництва в умовах невизначеності. Зокрема можна виділити методи лінійного програмування, стохастичні моделі, методи теорії черг та метаевристики. Однак, керівники компаній не завжди знають переваги та недоліки тих чи інших систем та їх рівень підтримки прийняття рішень, що створює виклики для ефективного планування. Відсутність категоризації та недостатня інформація щодо переваг і недоліків існуючих підходів може призвести до неправильного вибору системи оперативного планування. Що, у свою чергу, може негативно вплинути на рівень продажів, якості, собівартості продукції та операційну ефективність підприємства в цілому.

Отже, існує необхідність у систематизації існуючих підходів оперативного планування в умовах невизначеності з метою покращення їх практики застосування. Це має стати ключовим чинником для підвищення ефективності підприємства та оптимізації його виробничих планів. Детальний аналіз переваг та недоліків кожного методу планування дозволить краще визначити їх область застосування та обрати оптимальне рішення для компанії.

Мета роботи. Мета дослідження полягала в класифікації моделей оперативного планування виробництва залежно від рівня врахування невизначеності попиту та аналізі їх переваг і недоліків.

Аналіз основних досягнень і літератури. Галанкаші М., Мададі Н., Хелмі С.А. [1] у своєму дослідженні аналізують результати практичного застосування моделі оперативного планування виробництва для трьох компаній виробників електроніки, проте не приділяють значної уваги ринковим невизначеностям.

Ф. Гударзян і Х. Хоссейні-Насаб [3] розробили модель оперативного планування для компанії, яка займається виробництвом товарів для дому. Вони аналізували один продукт і мали три змінні параметри: попиту, запасів і наявності робочої сили в кожному періоді.

Гмис Дж., Мезмаз М., Мелаб Н., Туйттенс Д. [4] аналізують ієрархічне планування виробництва, як основу для планування і складання графіків виробництва, мотивуючи це бажанням створити базову структуру для розробки ефективних систем оперативного планування.

Протягом останніх років зростає кількість досліджень, які включають невизначеність до моделей планування виробництва, Гангамманавар Х., Лю Ю., Чень С. [2], Басифтчі Б., Ахмед С., Шен С. [5]. Дослідження присвячені застосуванню стохастичної оптимізації, зокрема методів стохастичного моделювання для цілей оперативного планування виробництва. З постійно зростаючою обчислювальною потужністю та вдосконаленням алгоритмів оптимізації, з'явилось більше досліджень щодо можливості використання стохастичного програмування для планування виробництва. Гасемі

А., Ашурі А., Хеві С. [6] розробили багатоступінчасту стохастичну модель для оперативного планування виробництва з невизначеним попитом та якістю продукції та дослідили її застосування.

Бхосале К. К., Павар П. Дж. [7] приділяють увагу невизначеностям при плануванні оперативних витрат виробництва. Проте також представили невизначеність у вигляді змінних параметрів вартості сировини.

Викладення основного матеріалу дослідження. Існуючі підходи щодо оперативного планування виробництва, залежно від рівня врахування невизначеностей, можна класифікувати на чотири основні категорії:

1. Підходи що враховують параметри зі змінними величинами;
2. Моделювання з невизначеними параметрами, стохастичні моделі;
3. Високорівневі стратегії, метаевристика;
4. Доказове обґрунтування.

Підходи що враховують параметри зі змінними величинами - це моделі, які базуються на чітких, відомих параметрах та залежностях, без врахування випадкових або невизначених факторів. Вони передбачають, що всі вхідні дані і параметри визначаються завчасно і не зазнають змін під час процесу прийняття рішень. У таких моделях невизначеність присутня у вигляді змінних ринкового попиту, цільових значень обсягів виробництва, констант та різноманітних коефіцієнтів виробництва.

До переваг даного методу слід віднести можливість врахування невизначеності попиту за допомогою представлення його як змінної величини. Це, наприклад, включає експертні судження та міркування з точки зору значень параметрів. Відносна нескладність математичних розрахунків, можливість інтуїтивно пояснити вибір тих чи інших значень керівникам організації. Більша гнучкість і спрощені припущення у порівнянні з стохастичною оптимізацією. Ця категорія моделей включає методи лінійного програмування і багаточільової оптимізації. Головним завданням є пошук ефективного розподілу ресурсів, задовольняючи при цьому вимоги клієнтів і ринковий попит. Часто, ці методи не можуть досягти максимальної ефективності одночасно з т.з. задоволення попиту та ефективного використання наявних ресурсів, що призводить до необхідності вибору пріоритетної цілі для завдань моделювання. За способом реакції на зміни, такі моделі є реактивними та добре справляються із ситуативними коливаннями на ринку.

Щодо недоліків, то параметри моделей є результатом суджень експертів, які можуть відрізнятися від одного до іншого. А це в свою чергу, може зробити результати моделювання елементом дискусій в середині компанії і затримати реакцію на зміни. Запропоновані рішення нездатні врахувати невідомі параметри або події з неточною інформацією. Також, як правило, забезпечити точний опис рівнянь і формул взаємозв'язків між компонентами моделі складніше, ніж провести самі розрахунки.

Стохастичний підхід оперативного планування виробничої діяльності охоплює широкий спектр математичних моделей та програмних рішень для врахування невизначених параметрів. У цьому наборі моделей невизначеність присутня у вигляді випадкових величин ринкового попиту, якості продукції, інших параметрів притаманних галузі діяльності підприємства. Можна виділити три ситуації неповної проінформованості щодо випадкових величин попиту:

1. зі стохастичною визначеністю, коли обсяг попиту розглядається як випадкова величина з відомою функцією розподілу ймовірностей її значень;

2. з неповною стохастичною визначеністю, коли відомий інтервал можливих значень обсягу попиту і окремі властивості функції розподілу ймовірностей її значень;

3. з інтервальною визначеністю, коли відома лише область можливих значень необхідної величини.

Безумовно, сучасне бізнес-середовище є нестабільним за своєю природою, і методи що враховують невизначеність як змінну величину або як параметр в моделі оцінки, навряд чи можуть впоратися з усіма викликами, які стають перед підприємством. Стохастичні моделі побудовані таким чином, щоб враховувати невизначеності та максимізувати результати діяльності компанії. Такі моделі дозволяють прогнозувати різні сценарії розвитку подій і розробляти стратегії щодо планування виробництва. За способом реакції на зміни, стохастичні підходи є проактивними.

До недоліків можна віднести все ще присутній суб'єктивізм щодо значень ймовірностей подій або ринкових показників. Оскільки, вони визначаються керівниками бізнесу з огляду на їх історичний досвід, що впливає на точність результатів і не завжди експерти мають достатню інформацію для визначення функції розподілу ймовірностей. Також існує багато дискусій серед науковців, що всі обмеження, пов'язані з різними сценаріями, мають однакову загальну ймовірність «1». Кількість сценаріїв може бути значна і потребуватиме великих обчислюваних потужностей або складних та дорогих програмних комплексів. Що в кінцевому етапі впливає на витрати та швидкість прийняття рішень компанією.

Високорівневі стратегії виникли у відповідь на сучасні виклики оперативного планування виробництва для великих корпорацій із диверсифікованою діяльністю та комплексних виробництв. Серед високорівневих підходів можна виділити оптимізацію рою частинок (PSO), пошук табу (TS), алгоритм пошуку гармонії (HS) та генетичні алгоритми (GA).

В останнє десятиліття спостерігається зростання інтересу до біологічно мотивованих підходів, таких як еволюційні стратегії та генетичні алгоритми (GA), які застосовуються до багатьох складних задач оптимізації при оперативному плануванні виробництва. Еволюційні стратегії та GA побудовані на основі спостереження за еволюційними процесами в біологічних системах. Еволюційні процеси, такі як адаптація, відбір, розмноження, мутація і конкуренція,

ретельно вивчаються і переводяться у форму комп'ютерного моделювання. Незважаючи на те, що ці алгоритми є грубим спрощенням природних процесів, вони були успішно застосовані для побудови моделей машинного навчання (ML) та комбінаторної оптимізації. Перевагами PSO підходу є те що він добре працює з глобальним пошуком. Масштабування змінних мало впливає на його продуктивність роботи, а реалізація паралельного розрахунку не є складним завданням.

Метаевристичні методи та високорівневі стратегії використовуються для розв'язання задач в умовах безперервного оперативного планування виробництва в реальному часі, зокрема планування навантаження виробничої лінії, оптимізації логістики та складських площ. Перевагами є простота концепції та відносна надійність отриманих рішень, а також стійкість при зміні параметрів управління і обчислювальна ефективність в порівнянні із стохастичними моделями. Високорівневі стратегії вдалі для масштабування, а зміна дизайну мало впливає на їх продуктивність.

З іншого боку, вони вимагають високого технічного рівня навичок програмування. Користувачі мають мати глибоке розуміння математичних основ досліджуваних моделей і вміти представляти процес рішення в алгоритмічній формі. GA підходить погано справляються з локальним пошуком та можуть потрапити в пастку неоптимальних рішень. Основним недоліком алгоритму TS є те, що він сильно залежить від вхідних значень, а процес пошуку рішення є послідовним та ітераційним.

Підхід доказового міркування (ER), заснований на теорії функцій переконань Демпстера-Шафера, має справу з інформацією та знаннями, які включають різні рівні невизначеності. ER використовує матрицю прийняття рішень. Результати моделювання також включають нижню і верхню оцінку діапазонів альтернативних значень та показують вплив невизначеностей на розподіл результатів моделювання. В умовах оперативного планування виробництва, ER застосовується для розробки експертних систем підтримки прийняття рішень.

Структура «переконання-правило» є зрозумілою та дозволяє особі, яка приймає рішення, легко вдосконалювати модель, безпосередньо регулюючи вагу правил. Основна перевага цього підходу, що він полегшує моделювання як відомих, так і невизначених параметрів та представляє результати моделювання при різних видах невизначеностей в уніфікованому форматі. Основним недоліком ER підходу є те, що він знаходиться на початковій стадії, і, ймовірно, більшість його сильних і слабких сторін при застосуванні до оперативного планування та контролю виробництва невідомі. Необхідні подальші дослідження, щоб переконатися в узгодженості між правилами та суб'єктивними судженнями.

Висновки. Недостатнє розуміння та неправильний вибір підприємством моделі оперативного планування, призводить до прийняття неоптимальних рішень, що може вплинути на ефективність підприємства в умовах невизначеного попиту. Визначено чотири основні підходи щодо оперативного планування обсягів

виробництва в умовах ринкових невизначеностей: підходи, які враховують параметри зі змінними величинами; моделювання з невизначеними параметрами, стохастичні моделі; високорівневі стратегії, метаевристика; доказове обґрунтування. Проведений аналіз сильних та слабких сторін кожного підходу та окремих методів. Подальші дослідження доцільно спрямувати на аналіз практичного застосування підприємствами CRM систем, які відносяться до кожного з 4-х підходів. Доцільно провести опитування користувачів, щодо їх досвіду використання стохастичних моделей з урахуванням невизначеного попиту.

Список літератури

- Galankashi M., Madadi N., Helmi S.A.. "A multiobjective aggregate production planning model for lean manufacturing: insights from three case studies". IEEE Transactions on Engineering Management. 2022. Vol. 69, No. 5, p. 1958-1972.
- Gangammanavar H., Liu Y., Sen S. Stochastic decomposition for two-stage stochastic linear programs with random cost coefficients. *Inform Journal on Computing*. 2021; 33(1), 51–71.
- F. Goodarzian and H. Hosseini-Nasab, "Applying a fuzzy multi-objective model for a production–distribution network design problem by using a novel self-adoptive evolutionary algorithm," *International Journal of Systems Science: Operations & Logistics*, pp. 1–23, 2022.
- Gmys J., Mez maz M., Melab N., Tuytens D. A. computationally efficient branch-and-bound algorithm for the permutation flow-shop scheduling problem. *European Journal of Operational Research*. 2023, 284(3), 814–833.
- Basciftci B., Ahmed S., Shen S. Distributionally robust facility location problem under decision-dependent stochastic demand. *European Journal of Operational Research*. 2022; 292(2), 548–561.
- Ghasemi A., Ashoori A., Heavy C.. Evolutionary Learning Based Simulation Optimization for Stochastic Job Shop Scheduling Problems. *Applied Soft Computing*. 2021; 106.
- Bhosale K. C., Pawar P. J. Integrated production planning and scheduling for parallel production lines. In Venkata Rao R., Taler J. (Eds.). *Advanced in Intelligent Systems and Computing*, 2020, Vol. 949. Singapore: Springer.
- Viktor Zaruba, Iryna Parfentenko, Risk management models in operative planning at an industrial enterprise. Published in: *International Conference on Problems of Infocommunications*.

Science and Technology (PIC S&T), IEEE, October 2020. P. 33-38. Risk Management Models in Operative Planning at an Industrial Enterprise | IEEE Conference Publication | IEEE Xplore. DOI: 10.1109/PICST51311.2020.

- Pelphrey, M.W."Directing the ERP Implementation: A Best Practice Guide to Avoiding Program Failure Traps While Tuning System Performance". CRCPress. 2015. P. 92–111.

References (transliterated)

- Galankashi M., Madadi N., Helmi S.A.. "A multiobjective aggregate production planning model for lean manufacturing: insights from three case studies". *IEEE Transactions on Engineering Management*. 2022. Vol. 69, No. 5, p. 1958-1972.
- Gangammanavar H., Liu Y., Sen S. Stochastic decomposition for two-stage stochastic linear programs with random cost coefficients. *Inform Journal on Computing*. 2021; 33(1), 51–71.
- F. Goodarzian and H. Hosseini-Nasab, "Applying a fuzzy multi-objective model for a production–distribution network design problem by using a novel self-adoptive evolutionary algorithm," *International Journal of Systems Science: Operations & Logistics*, pp. 1–23, 2022.
- Gmys J., Mez maz M., Melab N., Tuytens D. A. computationally efficient branch-and-bound algorithm for the permutation flow-shop scheduling problem. *European Journal of Operational Research*. 2023, 284(3), 814–833.
- Basciftci B., Ahmed S., Shen S. Distributionally robust facility location problem under decision-dependent stochastic demand. *European Journal of Operational Research*. 2022; 292(2), 548–561.
- Ghasemi A., Ashoori A., Heavy C.. Evolutionary Learning Based Simulation Optimization for Stochastic Job Shop Scheduling Problems. *Applied Soft Computing*. 2021; 106.
- Bhosale K. C., Pawar P. J. Integrated production planning and scheduling for parallel production lines. In Venkata Rao R., Taler J. (Eds.). *Advanced in Intelligent Systems and Computing*, 2020, Vol. 949. Singapore: Springer.
- Viktor Zaruba, Iryna Parfentenko, Risk management models in operative planning at an industrial enterprise. Published in: *International Conference on Problems of Infocommunications*. Science and Technology (PIC S&T), IEEE, October 2020. P. 33-38. Risk Management Models in Operative Planning at an Industrial Enterprise | IEEE Conference Publication | IEEE Xplore. DOI: 10.1109/PICST51311.2020.
- Pelphrey, M.W."Directing the ERP Implementation: A Best Practice Guide to Avoiding Program Failure Traps While Tuning System Performance". CRCPress. 2015. P. 92–111.

Надійшла (received) 02.04.2024

Відомості про авторів / About the Authors

Заруба Віктор Яковлевич (Zaruba Viktor) – доктор економічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3796-7544>; e-mail: victor.zaruba@khp.edu.ua

Чмерук Тарас Юрійович (Chmeruk Taras) – аспірант кафедри маркетингу, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-4833-5774>; e-mail: taras.chmeruk@emmb.khpi.edu.ua