

Є. В. БАСОВА, С. С. ДОБРОТВОРСЬКИЙ, І. Е. ЯКОВЕНКО

## МОДЕЛЮВАННЯ ЗМІНИ У ЧАСІ ВИРОБНИЧОЇ КОМПОНЕНТИ ГНУЧКОСТІ МАШИНОБУДІВНИХ МАЛИХ І СЕРЕДНІХ ПІДПРИЄМСТВ В УМОВАХ РІЗКОГО КОЛИВАННЯ ПОПИТУ І ПРОПОЗИЦІЇ РИНКУ

У роботі запропоновано укрупнену модель у вигляді інтегрального функціоналу гнучкості підприємства, яка описує стабільність малого і середнього машинобудівного підприємства в умовах стресового фактору - коливань попиту та пропозицій ринку. Ця модель дозволяє скоротити час реакції керівництва підприємства на негативні зовнішні фактори та спрогнозувати необхідність управлінських рішень по розподілу ресурсів та інновацій для мінімізації часу для відновлення сталості функціонування машинобудівного підприємства в нових виробничих реаліях, відповідно до змін на ринку. На підставі аналізу моделі проведено її декомпозицію та виділення чотирьох основних факторів, пов'язаних безпосередньо з виробничим процесом, які впливають на оптимізацію запропонованого функціоналу. Особливу увагу було приділено детальному аналізу кожного з розглянутих факторів: продуктивності, якості виробів, ефективного управління запасами та ресурсами, а також нового важливого чинника у сучасних умовах, такого як відповідальність стандартам і регуляторним документам. Такий аналіз дозволив запропонувати математичні моделі впливу кожного з факторів на загальний функціонал гнучкості. Запропоновані математичні моделі було проаналізовано з використанням методу планування на основі переваг. Це дало можливість проаналізувати, як буде реагувати мале та середнє машинобудівне підприємство на стресову ситуацію, пов'язану із зміною попиту на ринку, виконати оптимізацію загального інтегрального функціоналу гнучкості малих і середніх підприємств у часі та запропонувати варіанти антистресових рішень, для нівелювання впливу стресових факторів на сталість підприємства в часі.

**Ключові слова:** гнучкість підприємства; форс-мажорні обставини; антистресові рішення; сталість підприємства; оптимізація виробничого процесу

Y. BASOVA, S. DOBROTVORSKIY, I. YAKOVENKO

## MODELLING CHANGES IN THE PRODUCTION COMPONENT OF FLEXIBILITY OF MANUFACTURING SMALL AND MEDIUM-SIZED MACHINE-BUILDING ENTERPRISES UNDER CONDITIONS OF SHARP FLUCTUATIONS IN MARKET SUPPLY AND DEMAND

The paper proposes an enlarged model in the form of an integral functional of enterprise flexibility, which describes the stability of small and medium-sized machine-building enterprises in the conditions of stress factor - fluctuations in supply and demand. This model allows the reduction of the reaction time of enterprise management to negative external factors and to predict the need for management decisions on resource allocation and innovation to minimize the time to restore the stability of machine-building enterprise functioning in new production realities under changes in the market. Based on the analysis of the model, its decomposition has been carried out, and four main factors related directly to the production process that affect the optimization of the proposed function have been identified. Special attention was paid to the detailed analysis of each factor: productivity, product quality, efficient inventory and resource management, and a new important factor in modern conditions, such as responsibility to standards and regulatory documents. This analysis allowed us to propose mathematical models of the influence of each of the factors on the overall flexibility functionality. The proposed mathematical models were analyzed using the benefits-based planning method. This made it possible to analyze how a small and medium-sized engineering enterprise would react to a stress situation associated with changes in market demand, to optimize the overall integral function of small and medium-sized machine-building enterprises flexibility over time, and to propose variants of anti-stress solutions to offset the impact of stress factors on the sustainability of the enterprise over time.

**Keywords:** enterprise flexibility; force majeure circumstances; anti-stress solutions; sustainability of the enterprise; optimization of the production process

**Вступ.** Основною тенденцією функціонування для сучасної машинобудівної галузі є швидка зміна ринкового попиту на продукцію, що випускається. Серед найбільших проблем забезпечення сталості вітчизняного машинобудування можна виділити невідповідність пропозиції підприємства до поточного попиту на ринку, що обумовлено здебільшого повільним процесом реакції вітчизняних машинобудівних компаній на сучасні потреби ринку, та повільним проектуванням-виготовленням виробів внаслідок постійно зростаючих досягнень науково-технічного прогресу і, відповідно, виходу на ринок більш ефективних виробів конкурентів. У сучасних умовах зростаючої світової конкуренції скорочення часу відповідної реакції вітчизняних машинобудівних виробництв на зміну умов ринку є основним показником стабільності підприємства. Особливо це важливо для малих і середніх підприємств (МСП), здатних досить швидко організувати перехід виробництва на випуск нових виробів. У такому разі загальне завдання забезпечення стабільності підприємства та скорочення часу реакції на вплив зовнішніх ринкових факторів полягає в тому, щоб знайти такий

розподіл ресурсів та управлінських рішень, який дозволить на підприємстві (МСП) мінімізувати загальний час виконання всіх необхідних для випуску продукції операцій, та при цьому зберегти чи підвищити продуктивність та ефективність використання ресурсів (персоналу, технологій, фінансів) при безумовному забезпеченні необхідного рівня якості та собівартості продукції.

На рівень стабільності підприємства впливають різні чинники: технологічні, виробничі, економічні, екологічні, управлінські та ін.

**Мета дослідження.** Розробити та проаналізувати математичну модель забезпечення сталості машинобудівних МСП України, яка описує стабільність машинобудівного підприємства в умовах зовнішніх стресових факторів типу різких коливань попиту та пропозиції на ринку.

Для досягнення поставленої мети авторам необхідно вирішити такі завдання:

- сформувати у загальному вигляді математичну модель сталого розвитку МСП

© Є.В.Басова, С.С. Добротворський, І.Е. Яковенко, 2024

машинобудівної галузі України;

- виділити фактори та ступінь їх впливу на результат оцінки сталості МСП в умовах стресу;

- проаналізувати розвиток впливу розглянутих факторів на сталість вітчизняних МСП у часі.

У цій статті автори аналізують комплекс параметрів виробничого характеру, що впливають на рівень сталості машинобудівних МСП в умовах стресу зумовленого зміною попиту та пропозиції на ринку.

#### **Аналіз основних досягнень та літератури.**

Питанням забезпечення стабільності та конкурентоспроможності підприємств присвячено велику кількість досліджень. Зокрема, у роботі [1] наголошується, що процес забезпечення стабільності підприємства не є простим і характеризується потенційними проблемами, особливо для малих та середніх підприємств (МСП). До таких проблем можуть належати обмежена доступність фінансових ресурсів, обмежені знання та дефіцитні технологічні компетенції, нерозуміння необхідності нових управлінських рішень в умовах форс-мажорних обставин. Основна проблема підготовки та функціонування організацій у надзвичайних ситуаціях полягає у тому, як приймати ефективні та дієві рішення [2]. Складність і непередбачуваність надзвичайних ситуацій мають на увазі обробку великих обсягів інформації різної якості в короткі одиниці часу, що вимагає нового підходу до моделювання системи підтримки прийняття рішень у надзвичайних ситуаціях на основі оцінки ризиків.

У роботах [3–5] розглядаються різні моделі та стратегії спрямовані на оптимізацію управління компанією для забезпечення стабільності МПС за рахунок маркетингових стратегій, заснованих на факторах підвищення безпеки продукції, постачання та гарантійного обслуговування [3]; оптимізації проектування з урахуванням прогнозування запитів споживачів [4]; економіко-математичного моделювання, що дозволило формалізувати моделі планування витрат на збут та попит продукції підприємства та стало передумовою для прогнозування відповідних напрямів [5]. У роботі [6] автори розглядають процеси, характерні для технологічної підготовки виробництва для машинобудівних підприємств та пропонують методи їх автоматизації за рахунок бездрукової цифрової обробки даних.

Однак, розглянуті дослідження пов'язані в основному з вирішенням статичних проблем на підприємстві і не торкаються питань, пов'язаних із необхідністю підприємства реагувати на різні зовнішні стресові фактори, типу зміни попиту на ринку, чи іншими форс-мажорними обставинами.

У роботі [7] представлено підхід до стратегічного узгодження на великому багаторівневому підприємстві та всеохоплюючу модель стабільної корпоративної досконалості, стійкості та надійності. Серед чинників, що сприяють розвитку, згадуються більш соціальні ніж виробничі фактори, такі як: знання ланцюгів постачання, вертикальна довіра на підприємстві, розподілене лідерство та нейропсихологічні

вимірювання. Але такий фактор, як гнучкість визнана критичним фактором стійкості МСП [8], що дозволяє підприємствам швидко адаптуватися до коливань ринку та вимог клієнтів без ушкодження для ефективності роботи. Аналіз факторів та декомпозиція гнучкості, яка передбачає розбиття окремих вимог на керовані елементи, надає МСП структурований метод адаптації до змін у пропозиції та попиті. Однак цей підхід вимагає ретельної координації ресурсів і технологій у виробничих процесах і ланцюга постачання [9], що є складним завданням для МСП з обмеженими ресурсами для підтримки стабільного рівня виробництва, особливо в ситуаціях високого стресу, такого як стрибки попиту, порушення в ланцюгах поставок, релокації підприємства або інших стресових чи форс-мажорних обставин [10]. У [11] розглянуто базові принципи моделювання роботи підприємства за методами ABC при оптимізації «ланцюга постачання», які перетворюють цей підхід на потенційно чудовий інструмент для моніторингу економічної ефективності на дуже оперативному рівні та забезпечення стабільності підприємства.

К. Hausman у роботах [12,13] розглядає безперервність бізнесу та відновлення підприємства (аварійне відновлення), як реакцію на масштабну форс-мажорну подію, таку як ураган чи землетрус. Також розглядаються загальні технології, задіяні в операціях аварійного відновлення, щоб включити повернення всіх служб до операційної функції. Ці технології стосуються в основному використання альтернативного обладнання, ефективних засобів зв'язку між учасниками відновлення та соціальних питань.

У роботі [14] розглянуто методи відновлення та модернізації об'єктів важкого машинобудування України в післявоєнний період з точки зору сталості підприємств, які націлені на виконання таких робіт.

Проаналізована література підкреслює важливість гнучкості МСП для досягнення сталого розвитку у стресових умовах. Причому, концепція декомпозиції гнучкості МСП з виділенням різноманітних компонентів, що залежать від факторів стресу (таких як зміна попиту та пропозиції на ринку, а також і при релокації) і впливають на стабільний розвиток підприємства, стає одним з компонентів розробки структурованого підходу при моделюванні методів досягнення необхідної сталості МСП.

**Матеріали дослідження.** У загальному випадку математично процес забезпечення стабільності підприємства можна подати у вигляді інтегрального функціоналу гнучкості

$$F = \int_0^{T_0} \sum \sigma_i \cdot W_i(t) dt \rightarrow \min;$$

$$FC(t) < FC(t)_{\text{markt}},$$

де  $W_i(t)$  – багатофакторна функція, яка описує відповідні чинники, що впливають на різні аспекти виробничого процесу та можливість підприємства реагувати на поточні зміни на ринку;

$\sigma_i$  – вагові коефіцієнти, які відображають ступінь впливу відповідної функції на аналізований функціонал;

$PC(t)$ ,  $PC(t)_{mkt}$  – відповідно собівартість і ринкова вартість продукції, що випускається.

Розглянемо чинники виробничого характеру, які впливають запропонований функціонал. До таких чинників ми відносимо продуктивність, якості виробу, управління запасами та ресурсами, а також відповідність стандартам і регуляторним документам внутрішнім та країн імпортерів і експортерів.

Відповідно до визначення *продуктивності*, то вона є характеристикою ефективності використання ресурсів, в тому числі матеріальних, інформаційних, капітальних тощо, що супроводжують процес виробництва різних товарів і надання послуг. Для математичного вираження функції продуктивності виробничих процесів  $P(t)$  використаємо множинні показники, які відображають ефективність використання різних ресурсів під час виробництва:

$LP(t)$  – продуктивність праці в часі,

$KP(t)$  – продуктивність капіталу в часі,

$MP(t)$  – продуктивність використання матеріалів в часі,

$EP(t)$  – продуктивність використання енергії в часі,

$ImP(t)$  – продуктивність використання інформаційних ресурсів в часі,

$NP(t)$  – кількість виробленої продукції або наданих послуг у часі.

Тоді функція продуктивності виробничих процесів  $P(t)$  може бути представлена як матричне вираження взаємозв'язків між використаними ресурсами і кількістю виробленої продукції:

$$P(t) = NP(t) \cdot R(t)^{-1} = \begin{bmatrix} NP_1(t) \\ NP_2(t) \\ \vdots \\ NP_n(t) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} r_{11}^{-1}(t) & r_{12}^{-1}(t) & \dots & r_{15}^{-1}(t) \\ r_{21}^{-1}(t) & r_{22}^{-1}(t) & \dots & r_{25}^{-1}(t) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1}^{-1}(t) & r_{n2}^{-1}(t) & \dots & r_{n5}^{-1}(t) \end{bmatrix},$$

де  $NP(t)$  – вектор продуктивності машинобудівного МСП;

$R(t)^{-1}$  – обернена матриця ресурсів, використаних МСП для виготовлення продукції або надання послуг, що є зворотно пропорційною до матриці використаних ресурсів  $R(t)$ .

$$R(t) = \begin{bmatrix} LP_1(t) & KP_1(t) & MP_1(t) & EP_1(t) & ImP_1(t) \\ LP_2(t) & KP_2(t) & MP_2(t) & EP_2(t) & ImP_2(t) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ LP_n(t) & KP_n(t) & MP_n(t) & EP_n(t) & ImP_n(t) \end{bmatrix}.$$

Продуктивності виробничих процесів для  $i$ -го виду продукції може бути виражена наступним чином:

$$P_i(t) = \sum_{j=1}^5 NP_j(t) \cdot r_{ij}^{-1}(t), \quad i = 1, 2, \dots, n,$$

де  $NP_i(t)$  – обсяг виготовленої продукції  $i$ -го зразка в часі;

$r_{ij}^{-1}(t)$  – обернене значення ресурсу  $j$  для об'єкту виробництва  $i$ -го зразка в часі.

Як складова інтегрального функціоналу *якості* МСП функція ефективного управління *запасами та ресурсами* дуже впливає на виробничий процес та продуктивність і є одним з вагомих елементів виробничої гнучкості машинобудівного підприємства, що направлена на зменшення часу на переналагодження виробництва, скорочення втрат від простоїв і забезпечення високої якості продукції. Управління запасами включає в себе оптимізацію рівнів запасів сировини, матеріалів і готової продукції, що дозволяє мінімізувати витрати на зберігання і водночас забезпечити безперервність виробництва та своєчасне його переналагоджування на виготовлення нового виду продукції відповідно до поточної зміни попиту на ринку. Рациональне використання ресурсів на всіх етапах виробничого процесу сприяє підвищенню продуктивності і зменшенню витрат на виробництво машинобудівної продукції. Для раціоналізації процесу управління запасами і ресурсами машинобудівних МСП перспективним є широке впровадження цифровізації виробничого процесу, інформатизації та візуалізації об'єкта виробництва, що може значно вплинути на сталість та суцільності машинобудівного виробництва через функцію ефективного управління запасами та ресурсами.

Таким чином управління запасами та ресурсами МСП – це багатофакторний процес, який враховує різні аспекти (закупівлю, зберігання, обробку замовлень, контроль якості тощо). Функція ефективного управління запасами та ресурсами може бути представлена за допомогою математичної моделі, яка враховує принципи АВС-аналізу, базованого на правилі Парето (принципі 80/20), та цифровізацію управління запасами. В такому випадку МСП має виконати розподіл існуючих  $N$  найменувань об'єктів виробництва на три групи за принципами АВС-аналізу у відповідності до питомої ваги в загальних витратах на виробництво.

$$A(t) = \begin{bmatrix} a_1(t) \\ a_2(t) \\ \vdots \\ a_n(t) \end{bmatrix}, \quad B(t) = \begin{bmatrix} b_1(t) \\ b_2(t) \\ \vdots \\ b_n(t) \end{bmatrix}, \quad C(t) = \begin{bmatrix} c_1(t) \\ c_2(t) \\ \vdots \\ c_n(t) \end{bmatrix},$$

де  $A(t)$  – запаси з високою вартістю (20% товарів, що складають 80% вартості);

$B(t)$  – запаси з середньою вартістю (30% товарів, що складають 15% вартості);

$C(t)$  – запаси з низькою вартістю (50% товарів, що складають 5% вартості).

У загальному вигляді функція управління запасами МСП у часі  $E(t)$  може бути представлена як інтеграл:

$$E(t) = \int_0^T (w_{\text{скп}} P_{\text{скп}}(t) + w_{\text{зд}} S_{\text{зд}}(t) + w_{\text{обр}} O_{\text{обр}}(t) + \dots)$$

$$+ w_{зм} N_{зм}(t) + w_{дф} T_{дф}(t) + w_{як} Q_{як}(t) + w_{цв} D_{цв}(t) dt,$$

де  $P_{зкп}(t)$  – функція закупівлі запасів в часі, що залежить від попиту на об’єкт виробництва;

$S_{зб}(t)$  – функція зберігання запасів в часі;

$O_{обр}(t)$  – функція обробки замовлень в часі, що залежить від кількості замовлень відповідно до попиту;

$N_{зм}(t)$  – кількість товарів, що підлягають замовленню в часі, що характеризує кількість замовлень певного об’єкту виробництва відповідної групи запасів;

$T_{дф}(t)$  – функція дефіциту товарів в часі;

$Q_{як}(t)$  – функція контролю якості в часі;

$D_{цв}(t)$  – функція цифровізації управління виробничими і логістичними процесами підприємства в часі;

$w_{зкп}, w_{зб}, w_{обр}, w_{зм}, w_{дф}, w_{як}, w_{цв}$  – вагові коефіцієнти.

Відповідно до правила Парето та аналізу ABC:

$$P_{зкп}(t) = P_{зкпA}(t) + P_{зкпB}(t) + P_{зкпC}(t),$$

$$P_{зкпA}(t) = \sum_{i=1}^m P_{зкпAi}(t),$$

$$P_{зкпB}(t) = \sum_{i=1}^n P_{зкпBi}(t), \quad P_{зкпC}(t) = \sum_{i=1}^p P_{зкпCi}(t),$$

$$S_{зберг}(t) = S_{збA}(t) + S_{збB}(t) + S_{збC}(t),$$

$$S_{збA}(t) = \sum_{i=1}^m s_{збAi}(t), \quad S_{збB}(t) = \sum_{i=1}^n s_{збBi}(t),$$

$$S_{збC}(t) = \sum_{i=1}^p s_{збCi}(t),$$

$$O_{обр}(t) = O_{обрA}(t) + O_{обрB}(t) + O_{обрC}(t),$$

$$O_{обрA} = \sum_{i=1}^m o_{обрAi}(t),$$

$$O_{обрB} = \sum_{i=1}^n o_{обрBi}(t), \quad O_{обрC} = \sum_{i=1}^p o_{обрCi}(t),$$

$$N_{зм}(t) = N_{змA}(t) + N_{змB}(t) + N_{змC}(t),$$

$$N_{змA}(t) = \sum_{i=1}^m n_{змAi}(t),$$

$$N_{змB}(t) = \sum_{i=1}^n n_{змBi}(t), \quad N_{змC}(t) = \sum_{i=1}^p n_{змCi}(t),$$

$$T_{дф}(t) = T_{дфA}(t) + T_{дфB}(t) + T_{дфC}(t),$$

$$T_{дфA}(t) = \sum_{i=1}^m t_{дфAi}(t),$$

$$T_{дфB}(t) = \sum_{i=1}^n t_{дфBi}(t), \quad T_{дфC}(t) = \sum_{i=1}^p t_{дфCi}(t),$$

де  $P_{зкпA}(t), P_{зкпB}(t), P_{зкпC}(t)$  – закупівля запасів відповідно до попиту на товари категорій А, В, С;

$S_{збA}(t), S_{збB}(t), S_{збC}(t)$  – запаси товарів категорій А, В і С відповідно;

$O_{обрA}(t), O_{обрB}(t), O_{обрC}(t)$  – обсяги замовлень товарів категорій А, В і С відповідно;

$N_{змA}(t), N_{змB}(t), N_{змC}(t)$  – кількість товарів категорій А, В і С, що підлягають замовленню відповідно;

$T_{дфA}(t), T_{дфB}(t), T_{дфC}(t)$  – дефіцит товарів А, В і С у поточний момент часу, що залежить від поточного попиту на ринку і відповідає за формування передумови для швидкого відгуку підприємства на поточну ситуацію.

Відповідно до правила Парето, пріоритет за товарами категорії А, що мають найбільший вплив на загальну вартість виробничих запасів машинобудівного підприємства. Тому управління запасами для категорії А може бути більш детальним та включати більш часті перевірки та оновлення інформації про об’єкт виробництва на різних рівнях, що може потребувати додаткових цифрових сервісів.

Тоді МСП може контролювати рівень запасів категорії А наступним чином:

$$S_{збA}(t) = S_{збA}(t-1) + O_{обрA}(t) - P_{зкпA}(t),$$

де  $S_{збA}(t-1)$  – рівень запасів категорії А, що зберігалися на підприємстві у попередній період;

$O_{обрA}(t)$  – обсяг замовленого товару категорії А в заданий період часу;

$P_{зкпA}(t)$  – кількість матеріалу закупленого для виготовлення товару категорії А зумовлений попитом на відповідний товар.

$$O_{обробкаA}(t) =$$

$$- \begin{cases} N_{замовлA}(t), \text{ якщо } S_{збергA}(t) < \text{допустиме значення} \\ 0, \text{ якщо } S_{збергA}(t) \geq \text{допустиме значення} \end{cases}$$

де допустиме значення визначається мінімальним пороговим значенням рівня запасів категорії А.

$$Q_{як}(t) = Q_{якA}(t) + Q_{якB}(t) + Q_{якC}(t),$$

$$Q_{якA}(t) = \sum_{i=1}^m q_{якAi}(t),$$

$$Q_{якB}(t) = \sum_{i=1}^n q_{якBi}(t), \quad Q_{якC}(t) = \sum_{i=1}^p q_{якCi}(t),$$

З урахуванням правила Парето та аналізу ABC у функції цифровізації управління виробничими та логістичними процесами, як складової функції управління запасами МСП, цифровізація має бути інтегрована в управління різними типами запасів – А, В, С, кожен з яких, в свою чергу, характеризується своєю вартісною структурою. Тоді функцію цифровізації управління виробничими і

логістичними процесами підприємства в часі може бути представлено формулою:

$$D_{\text{цв}}(t) = D_{\text{цв}_A}(t) + D_{\text{цв}_B}(t) + D_{\text{цв}_C}(t),$$

$$D_{\text{цв}_A}(t) = \sum_{i=1}^m d_{\text{цв}_A i}(t),$$

$$D_{\text{цв}_B}(t) = \sum_{i=1}^n d_{\text{цв}_B i}(t), \quad D_{\text{цв}_C}(t) = \sum_{i=1}^p d_{\text{цв}_C i}(t),$$

де  $D_{\text{цв}_A}(t)$  – рівень цифровізації для А-запасів у часі  $t$ , де необхідною умовою стабільності МСП стає впровадження найсучасніших технологій управління на різних рівнях управління цифровою інформацією, таких як автоматизовані системи управління складом (глобо- та макрорівень), аналітика великих даних для прогнозування потреб виробництва (мезо- та макро рівні), IoT для відстеження місцезнаходження та стану запасів та/або готових виробів (глобо- макро-, мезо-, мікро-, нанорівень) тощо;

$D_{\text{цв}_B}(t)$  – рівень цифровізації для В-запасів, де достатньою умовою забезпечення сталості МСП може стати базова аналітика виробничих і технологічних процесів на макро- та мікрорівні, часткова автоматизація процесів поповнення запасів та контроль витрат на мезо- та макрорівні;

$D_{\text{цв}_C}(t)$  – цифровізація для С-запасів, характеризується мінімальним застосуванням простіших методів моніторингу та управління виробничими і технологічними процесами на базі первинної автоматизації, регулярної перевірки запасів матеріалів, інструментів тощо на мікро- і макро рівнях.

Таким чином прості інструменти контролю якості продукції та базова автоматизація виробничих та технологічних процесів задовольняють вимоги ефективного управління цими запасами.

Слід зазначити, що  $d_{\text{цв}_A i}(t), d_{\text{цв}_B i}(t), d_{\text{цв}_C i}(t)$  є загальними членами послідовності окремих компонентів цифровізації відповідної категорії запасів: цифровізації управління виробничими процесами в часі  $t$ , цифровізації управління логістичними процесами, цифрових систем моніторингу і контролю процесів, використання аналітичних систем та великих даних, автоматизації різних виробничих і логістичних процесів. Урахування кожного компонента дає підставу стверджувати, що загальна цифровізація управління виробничими і логістичними процесами підприємства в часі – це сума всіх цих компонентів, де кожний має перемінне значення в часі залежно від рівня технологічного впровадження, що відображає динаміку цифрових змін у підприємстві.

Таким чином, функція ефективного управління запасами та ресурсами є критично важливою для забезпечення виробничої гнучкості машинобудівного підприємства.

Слід зазначити, що *якість* продукції впливає на довіру клієнтів та партнерів, є фактором створення

нових перспектив для налагодження зв'язків із європейськими ринками (так званий good will). Для опису функції якості продукції в часі  $Q(t)$ , необхідно врахувати її багатокомпонентну природу. Таким чином якість продукції визначається сукупністю різних властивостей об'єкту виробництва: технічних, технологічних, економічних, екологічних та інших. Кожна складова сукупності властивостей продукції, що відповідає її кінцевій якості, може бути оцінений за допомогою певних показників, які, в свою чергу, також можуть змінюватися в часі.

$$Q(t) = \sum_{i=1}^n k_i \cdot q_i(t) - k_{\text{тх}} \cdot q_{\text{тх}}(t) + k_{\text{тех}} \cdot q_{\text{тех}}(t) + k_{\text{екн}} \cdot q_{\text{екн}}(t) + k_{\text{екл}} \cdot q_{\text{екл}}(t) + \dots + k_n \cdot q_n(t),$$

де  $k_{\text{тх}}, k_{\text{тех}}, k_{\text{екн}}, k_{\text{екл}}, k_n$  – вагові коефіцієнти, що відображають зміну важливості кожної складової функції якості продукції у певний момент часу;

$q_{\text{тх}}(t), q_{\text{тех}}(t), q_{\text{екн}}(t), q_{\text{екл}}(t), q_n(t)$  – функції сукупності складових кінцевої якості об'єкту виробництва, які характеризують:

$q_{\text{тх}}(t)$  – ступінь відповідності технічних характеристик продукції в часі до базового технічного рівня деталі-представника, що потребує отримання та аналізу цифрової, геометричної, технологічної, фізико-технічної інформації про об'єкт виробництва в масштабі реального часу;

$q_{\text{тех}}(t)$  – ступінь технологічної зрілості виробництва, що потребує аналізу, симбіозу та інтеграції 2D та 3D геометричної, фізико-технічної та технологічної цифрової та фізичної інформації про виріб для забезпечення ефективності виробничих процесів, використання передових технологій та інновацій для отримання нових або оновлених характеристик поверхонь виробів, або виробів в цілому;

$q_{\text{екн}}(t)$  – економічну ефективність продукції, що потребує отримання, аналізу та синтезу цифрової, геометричної, фізико-технічної, технологічної та інших видів інформації для оцінки витрати на виробництво, ціну продукції, економічну вигідність для споживача тощо;

$q_{\text{екл}}(t)$  – ступінь екологічної свідомості виробництва, що потребує урахування, аналізу, синтезу та інтеграції щонайменше геометричної, фізичної, цифрової та технологічної інформації про об'єкт виробництва для оцінки впливу виробничих процесів МСП на навколишнє середовище відповідно до принципів Lean-green виробництва;

$q_n(t)$  – додаткові складові кінцевої якості продукції, які безпосередньо залежать від комплексу зв'язків між різними видами інформації про об'єкт виробництва.

Дослідження показують, що гнучкість МСП значною мірою залежить також і від здатності підприємства та його продукції відповідати *стандартам і регуляторним документам* прийнятим у країнах ЄС. Це зумовлене постійним ростом вимог до якості та екологічності продукції,

безпеки її виготовлення та використання. Відповідність вітчизняної продукції стандартам розвинених країн ЄС забезпечує доступ до їх ринків, підвищує конкурентоспроможність та знижує ризики юридичних санкцій. Таким чином МСП, які здатні швидко адаптувати свої виробничі і технологічні процеси відповідно до нових вимог світових лідерів виробництва, можуть зберігати стабільність або навіть підвищувати свою ринкову частку та стійкості, в той час як несумісність зі стандартами ISO може призвести до значних фінансових втрат, зупинок у виробництві та погіршення репутації. Серед шляхів підвищення гнучкості та стабільності машинобудівних МСП у відповіді на зміни у вимогах стандартів є інтеграція сучасних технологій виготовлення продукції, таких як автоматизація, роботизація та цифрові платформи з метою оптимізації процесів проектування, виготовлення та контролю якості номенклатури продукції.

Представимо функцію відповідності продукції стандартам і регуляціям у часі для МСП України, орієнтованих на ринок ЄС як  $CR(t)$ , що описує рівень відповідності продукції вітчизняного підприємства стандартам і регуляціям, прийнятим в країнах ЄС, у певний момент часу  $t$ . Така функція може бути виражена через комплекс складових, що включають відповідність технічним стандартам ( $\gamma_{ТХ}(t) \cdot CR_{ТХ}(t)$ ), екологічним нормам ( $\gamma_{ЕКЛ}(t) \cdot CR_{ЕКЛ}(t)$ ), сертифікаційним вимогам ( $\gamma_{СРТ}(t) \cdot CR_{СРТ}(t)$ ) та регуляторним змінам ринків ЄС ( $\gamma_{РЕГ}(t) \cdot CR_{РЕГ}(t)$ ):

$$CR(t) = \sum_{i=1}^n \gamma_i(t) \cdot CR_i(t) =$$

$$= \gamma_{ТХ}(t) \cdot CR_{ТХ}(t) + \gamma_{ЕКЛ}(t) \cdot CR_{ЕКЛ}(t) + \\ + \gamma_{ЕКЛ}(t) \cdot CR_{ЕКЛ}(t) + \gamma_{СРТ}(t) \cdot CR_{СРТ}(t) + \\ + \gamma_{РЕГ}(t) \cdot CR_{РЕГ}(t),$$

де  $\gamma_{ТХ}(t), \gamma_{СРТ}(t), \gamma_{ЕКЛ}(t), \gamma_{РЕГ}(t)$  – вагові коефіцієнти важливості кожної складової у певний момент часу  $t$ .

Важливо розуміти, що кожна складова функції  $CR_i(t)$  є динамічною і буде залежати від швидкості оновлення стандартів або вимог до продукції у межах ЄС, від швидкості адаптації вітчизняних машинобудівних МСП до цих змін та ступеня впровадження змін на підприємстві в тому числі за рахунок впровадження цифрових сервісів та інформаційної підтримки виробничих та технологічних процесів (швидкості та ефективності процесу адаптації). Мета наявності такої складової інтегрального функціоналу гнучкості МСП є опис процесу адаптації підприємства до стандартів і регуляцій, показуючи, як змінюються різні складові відповідності у часі.

Оптимізація загального інтегрального функціоналу гнучкості МСП має виконуватися із урахуванням варіативності рішень, для нівелювання впливу стресових факторів на сталість підприємства в часі. Для дослідження розглянутих залежностей ми користувались можливостями автоматичних планувальників на основі ієрархічних мереж завдань з використанням методу планування на основі переваг (PPLAN). Ця методика передбачає можливість представити задачу забезпечення сталості МСП в умовах стресу як завдання пріоритетного рівня, яке в процесі планування може рекурсивно розбиватись на менші завдання. Результат такого дослідження приведено на рис. 1.

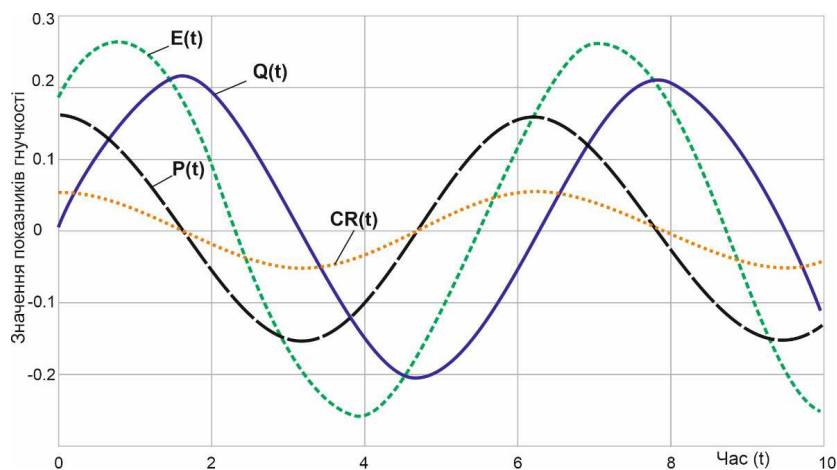


Рисунок 1 – Аналіз поведінки компонентів виробничого характеру на функціонал гнучкості в часі

Із аналізу графіків (див. рис.1) видно, що першими на стресові умови в часі реагують продуктивність  $P(t)$ , що демонструє спад темпів виробництва, та показник  $CR(t)$ , який у даному випадку пов'язаний з появою нових вимог до продукції та нових нормативних документів. А потім вже на стресові умови реагують такі показники, як ефективності управління запасами та

ресурсами  $E(t)$  і характеристики якості продукції  $Q(t)$  демонструють високі коливання. Із детального аналізу графіків видно, що в той період часу, коли у відповідь на стресову ситуацію підприємство починає тимчасово втрачати здатність підтримувати ефективності управління запасами та ресурсами  $E(t)$  та починає втрачати якість продукції  $Q(t)$ . Причому показник  $E(t)$  реагує на стресову ситуацію

або релокацію підприємства швидше та з більшою амплітудою впливу на інтегральний показник гнучкості МСП (перебудова логістичних ланцюжків, втрата та переформатування частини людських та енергетичних ресурсів), ніж показник якості продукції  $Q(t)$  (деякий час ще робота на старих запасах та технологіях). Що стосується показника  $CR(t)$ , то він має найменшу амплітуду впливу і в часі повторює підйоми та спади з показником продуктивності у зв'язку з тим, що зазвичай зміни в документах, що регламентують, припускають наявність перехідних періодів на перебудову роботи підприємства. Однак динаміка цих показників у часі вказує на важливість розглянутих компонентів для забезпечення стабільності МСП в умовах форс-мажорних обставин.

### Висновки.

1. Запропоновано математичну модель забезпечення сталості машинобудівних МСП та обґрунтовано чинники виробничого характеру, які впливають на інтегральний функціонал гнучкості МСП у вигляді багатофакторної функції. Це дозволило проаналізувати різні аспекти виробничої гнучкості машинобудівного підприємства та його здатність адаптуватися до поточних змін на ринку у часі. Особливу увагу приділено аналізу впливу стресових факторів, таких як швидка зміна попиту та пропозицій (що не обмежує можливі форс-мажорні обставини), на забезпечення сталості МСП.

2. Оптимізація запропонованих параметрів загального функціоналу гнучкості дозволила зробити висновок, що зовнішні ринкові умови, зумовлені його нестабільністю (стресом) вимагають від підприємств гнучкості на різних рівнях: якості продукції, продуктивності, управління запасами та ресурсами та відповідності стандартам для забезпечення стабільності підприємства. Важливим результатом оптимізації методом на основі переваг стало визначення послідовності впливу компонентів функціоналу, як серії кроків (планів) для вирішення проблеми сталості МСП на базі його гнучкості.

3. Виконано оптимізацію загального інтегрального функціоналу гнучкості МСП на основі чинників виробничого характеру методом автоматичного планування на основі переваг (планування PPLAN), що дозволило урахувати варіативність антистресових рішень, для нівелювання впливу стресових факторів, типу зміни попиту і пропозиції, на сталість підприємства в часі.

### Список літератури:

- Orzes, G.; Rauch, E.; Bednar, S.; Poklemba, R. Industry 4.0 Implementation Barriers in Small and Medium Sized Enterprises: A Focus Group Study. In *Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), Bangkok, Thailand*, 16–19 December 2018; pp. 1348–1352.
- Komazec, Nenad & Božanić, Darko & Mihajlovic, Ljiljana. (2014). Aspects of Decision-making in Emergency Situations. *6th International Conference - ICT Forum*: pp. 64–67.
- Burhan, G. F., & Mansur, A. (2021). Marketing Strategy Planning Based on Customer Value. *PROZIMA (Productivity, Optimization and Manufacturing System Engineering)*, 4(2), 29–40. <https://doi.org/10.21070/prozima.v4i2.1309>

- Zhao, Yan Ling, and Su Chang Ma. "Research on the Flexible Product Platform Technology of Machining Center." *Advanced Materials Research* 842 (November 2013): 596–601. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.842.596>.
- Olefirenko, Oleg. "Methodic tools to optimize marketing expenses of the innovatively active industrial enterprises in Ukraine." *Problems and Perspectives in Management* 14, no. 1 (March 2, 2016): 44–50. [http://dx.doi.org/10.21511/ppm.14\(1\).2016.05](http://dx.doi.org/10.21511/ppm.14(1).2016.05).
- Ivanov V., · Evtuhov A., Dehtiarov I., Trojanowska J. *Fundamentals of Manufacturing Engineering Using Digital*. Springer *Tracts in Mechanical Engineering*. 119p. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-74360-3>.
- Edgeman, R., Neely, A., & Eskildsen, J. (2016). Paths to sustainable enterprise excellence. *Journal of Modelling in Management*, 11(4), 858–868. <https://doi.org/10.1108/jm2-12-2014-0097>
- De Toni, A., Tonchia, S.: Definitions and linkages between operational and strategic flexibilities. *Omega* 33(6), 525–540 (2005).
- Basova, Y., Dobrotvorskiy, S., Balog, M. at all. Increasing sme supply chain resilience in the face of rapidly changing demand with 3d model visualisation. *International Journal of Mechatronics and Applied Mechanics*, 2023, 14, pp. 35–47 [dx.doi.org/10.17683/ijomam/issue14.5](http://dx.doi.org/10.17683/ijomam/issue14.5).
- Zhang, X., & Lin, Y.: Impact of Industry 4.0 Technologies on Supply Chain Resilience and Risk Management. *Journal of Manufacturing Systems*, 58, 348–359 (2021).
- The Process of Product and Service Production. (2019). In *Sustainable Enterprise Performance* (pp. 111–133). *John Wiley & Sons, Inc.* <https://doi.org/10.1002/9781119618287.ch3>
- Hausman, K. (2011). Recovering from Disaster. In *Sustainable Enterprise Architecture*. pp. 247–255. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b10793-13>
- Hausman, K. (2019). *Sustainable Enterprise Architecture*. Taylor & Francis Group. 304p. <https://doi.org/10.1201/b10793>
- Яковенко І.Е. Перспективи малих і середніх підприємств у відновленні і модернізації об'єктів енергетичного комплексу України / І.Е. Яковенко, О.А. Пермяков, С.В. Басова, В.М. Дергоусов, Т.Ю. Ткаченко // *Синергія науки і бізнесу у повосному відновленні регіонів України : матеріали ІІ Міжнародної науково-практичної конференції (ХНТУ, 24–26 квітня 2024 року) у 3-х т. ; Т. 2 / за ред. О. В. Чепелюк. Одеса : Олді+, 2024. С.341–345*

### References (transliterated)

- Orzes, G.; Rauch, E.; Bednar, S.; Poklemba, R. Industry 4.0 Implementation Barriers in Small and Medium Sized Enterprises: A Focus Group Study. In *Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), Bangkok, Thailand*, 16–19 December 2018; pp. 1348–1352.
- Komazec, Nenad & Božanić, Darko & Mihajlovic, Ljiljana. (2014). Aspects of Decision-making in Emergency Situations. *6th International Conference - ICT Forum*: pp. 64–67.
- Burhan, G. F., & Mansur, A. (2021). Marketing Strategy Planning Based on Customer Value. *PROZIMA (Productivity, Optimization and Manufacturing System Engineering)*, 4(2), 29–40. <https://doi.org/10.21070/prozima.v4i2.1309>
- Zhao, Yan Ling, and Su Chang Ma. "Research on the Flexible Product Platform Technology of Machining Center." *Advanced Materials Research* 842 (November 2013): 596–601. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.842.596>.
- Olefirenko, Oleg. "Methodic tools to optimize marketing expenses of the innovatively active industrial enterprises in Ukraine." *Problems and Perspectives in Management* 14, no. 1 (March 2, 2016): 44–50. [http://dx.doi.org/10.21511/ppm.14\(1\).2016.05](http://dx.doi.org/10.21511/ppm.14(1).2016.05).
- Ivanov V., · Evtuhov A., Dehtiarov I., Trojanowska J. *Fundamentals of Manufacturing Engineering Using Digital*. Springer *Tracts in Mechanical Engineering*. 119p. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-74360-3>.
- Edgeman, R., Neely, A., & Eskildsen, J. (2016). Paths to sustainable enterprise excellence. *Journal of Modelling in Management*, 11(4), 858–868. <https://doi.org/10.1108/jm2-12-2014-0097>

8. De Toni, A., Tonchia, S.: (2005). Definitions and linkages between operational and strategic flexibilities. *Omega* 33(6), 525–540
9. Basova, Y., Dobrotvorskiy, S., Balog, M. at all. Increasing sme supply chain resilience in the face of rapidly changing demand with 3d model visualisation. *International Journal of Mechatronics and Applied Mechanics*, 2023, 14, pp. 35–47 dx.doi.org/10.17683/ijomam/issue14.5.
10. Zhang, X., & Lin, Y.: Impact of Industry 4.0 Technologies on Supply Chain Resilience and Risk Management. *Journal of Manufacturing Systems*, 58, 348-359 (2021).
11. The Process of Product and Service Production. (2019). In Sustainable Enterprise Performance (pp. 111–133). *John Wiley & Sons, Inc.* <https://doi.org/10.1002/9781119618287.ch3>
12. Hausman, K. (2011). Recovering from Disaster. In *Sustainable Enterprise Architecture*. pp. 247–255. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b10793-13>
13. Hausman, K. (2019). *Sustainable Enterprise Architecture*. Taylor & Francis Group. 304p. <https://doi.org/10.1201/b10793>
14. Yakovenko I.E. Perspektyvy malych i serednikh pidpriemstv u vidnovlenni i modernizatsii ob'ektiv enerhetychnoho kompleksu Ukrainy / I.E. Yakovenko, O.A. Permiakov, Ye.V. Basova, V.M. Derhousov, T.Iu. Tkachenko *Synerhiia nauky i biznesu u povoiennomu vidnovlenni rehioniv Ukrainy : materialy II Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii* (KhNTU, 24–26 kvitnia 2024 roku) u 3-kh t. ; T. 2 / za red. O. V. Chepeliuk. – Odesa : Oldi+, 2024. P.341-345

*Надійшла (received).* 12.11.2024

#### *Відомості про авторів / About the Authors*

**Басова Євгенія Володимирівна / Basova Yevheniia** – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Технологія машинобудування та металорізальні верстати» Навчально-наукового інституту механічної інженерії та транспорту Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8549-4788>, e-mail: e.v.basova.khpi@gmail.com

**Доброворський Сергій Семенович / Sergey Dobrotvorskiy** – доктор технічних наук, професор кафедри «Технологія машинобудування та металорізальні верстати» Навчально-наукового інституту механічної інженерії та транспорту Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1223-1036>; e-mail: sdrobro50@gmail.com

**Яковенко Ігор Едуардович / Yakovenko Ihor** – кандидат технічних наук, професор кафедри «Технологія машинобудування та металорізальні верстати» Навчально-наукового інституту механічної інженерії та транспорту Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8344-996X>; e-mail: igor.dych59@gmail.com