

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

МОДЕЛЮВАННЯ ЧАСОВОЇ ДИНАМІКИ ІНФОРМАЦІЙНОЇ КОМПОНЕНТИ ГНУЧКОСТІ МАШИНОБУДІВНИХ МСП В УМОВАХ ХВИЛЬОВИХ КОЛИВАНЬ РИНКУ

У даній статті розглядається роль цифрової трансформації, зокрема концепції Industry 4.0, у підвищенні стійкості та гнучкості малих і середніх машинобудівних підприємств (МСП). Визначено, що технології Industry 4.0, засновані на використанні 3D-інформації, є ключовими факторами інтенсифікації технологічної підготовки виробництва та підвищення адаптивності МСП до динамічних ринкових змін, геополітичних і зовнішніх стресових факторів. Увагу приділено підходу планування на основі пріоритетів (PPLAN), що оптимізує розподіл ресурсів, скорочує виробничі цикли та підвищує економічну ефективність підприємств. Запропоновано унікальний підхід до декомпозиції гнучкості, який дозволяє МСП стратегічно адаптуватися до коливань попиту і пропозиції, а також до стресових ситуацій. Доведено, що багаторівнева 3D-інформація відіграє важливу роль у забезпеченні стабільності підприємств у кризових умовах, сприяючи швидкому реагуванню на хвильові коливання ринку. Інтегрований підхід до цифровізації дозволяє МСП підтримувати продуктивність, ефективно управляти ресурсами та сприяти сталому розвитку. Отримані результати підкреслюють потенціал цифрових інструментів, структурованої гнучкості та багаторівневої 3D-інформації у забезпеченні довгострокової конкурентоспроможності МСП в умовах нестабільного глобального ринку.

Ключові слова: гнучкість підприємства; 3D-інформація; антистресові рішення; сталість підприємства; оптимізація виробничого процесу, хвильові коливання ринку.

Y. BASOVA, S. DOBROTVORSKIY, I. YAKOVENKO

MODELING THE TEMPORAL DYNAMICS OF THE FLEXIBILITY INFORMATION COMPONENT OF MANUFACTURING SMES UNDER CONDITIONS OF WAVE MARKET FLUCTUATIONS

This article explores the impact of digital transformation, specifically within the framework of Industry 4.0, on the flexibility and resilience of small and medium-sized manufacturing enterprises (SMEs) in volatile market conditions. The study highlights the role of 3D information-based technologies in enhancing the technological preparedness of production and improving SMEs' adaptability to external disruptions, including geopolitical challenges and economic fluctuations. A key focus is placed on the preference-based planning approach (PPLAN), which facilitates efficient resource allocation, shortens production cycles, and enhances overall economic performance. The research introduces a novel decomposition approach to flexibility, allowing SMEs to adjust to market fluctuations and stress-inducing conditions strategically. The findings demonstrate that multilayered 3D information is crucial in ensuring enterprise stability during crises and enabling swift reactions to market changes. By integrating digitalization, SMEs can sustain productivity, optimize resource management, and foster long-term development despite external uncertainties. A mathematical model is proposed for optimizing SMEs' overall integral flexibility function, considering variability in decision-making to mitigate the effects of stress factors over time. The application of automated planning methods, specifically hierarchical task networks (HTN) and simple temporal networks (STN), is examined to enhance decision-making efficiency under time constraints. The study illustrates that in response to stress situations, 3D visualization technologies (3DI(t)) serve as a pivotal factor in maintaining production efficiency, compensating for declines in product quality (Q(t)), and resource management effectiveness (E(t)). The research further emphasizes that 3D technologies peak in their impact between three and five-time units following a market disturbance, making them a critical tool for stabilizing SME operations.

Keywords: enterprise flexibility; 3D information; anti-stress solutions; enterprise sustainability; production process optimization; market wave fluctuations

Вступ. У розвинених країнах малі та середні підприємства (МСП) є основою економіки. Наприклад, у Європейському Союзі вони становлять 99% усіх підприємств і забезпечують роботою 65 млн осіб [1]. У Німеччині 68,3% працівників, які підлягають соціальному страхуванню, зайняті саме в МСП [2]. Гнучкість МСП дозволяє їм швидко адаптувати виробництво до ринкових коливань. Особливо це актуально для машинобудування — ключової галузі, яка визначає економічний рівень країни. Автоматизація виробничих процесів і застосування сучасних технологій, таких як математичне моделювання, ІТ, мехатроніка, інтелектуальні системи, є основою концепції Індустрія 4.0. Це сприяє підвищенню конкурентоспроможності, гнучкості та стійкості підприємств. У країнах ЄС рівень автоматизації бізнес-процесів у МСП становить 70-80%, тоді як в Україні цей показник сягає 50-60% (найвищий рівень автоматизації характерний для виробництва компонентів обчислювальної техніки) [3]. Тому однією з головних стратегій розвитку машинобудівних МСП є впровадження новітніх технологій та автоматизація виробництва

Мета дослідження. Розробити математичну модель, яка оцінює вплив цифрових технологій на

стабільність машинобудівних МСП у періоди криз, спричинених ринковими змінами та форс-мажорними обставинами.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити низку завдань: визначити основні фактори, що підвищують стабільність МСП машинобудівної галузі; розробити математичну модель впливу цих факторів на стабільність підприємства; проаналізувати рівень впливу встановлених чинників на основні показники роботи МСП машинобудівної галузі.

Аналіз основних досягнень і літератури. У сучасній літературі значна увага приділяється питанням забезпечення стабільності машинобудівних підприємств. Вважається, що ключовим фактором стійкості та конкурентоспроможності МСП є їхня здатність гнучко реагувати на коливання ринкового попиту [4]. Велика кількість досліджень присвячена стабілізації підприємств за допомогою управлінських та технологічних рішень. Наприклад, у роботі [5] пропонується забезпечити стабільний

© Є. В. Басова, С. С. Добротворський,
І. Е. Яковенко, 2025

розвиток підприємства через маркетингові стратегії, орієнтовані на підвищення ергономічності та безпеки продукції, з урахуванням побажань клієнтів. У дослідженні [6] детально розглядається модель корпоративної стійкості, яка базується переважно на соціальних факторах (розподілене лідерство, вертикальна довіра у прийнятті рішень, нейропсихологічний вимір поведінки тощо), а не на виробничо-технологічних аспектах.

Розглянуті вище підходи до забезпечення стабільності підприємства орієнтовані переважно на соціальні та маркетингові фактори в умовах поступового розвитку компанії. Водночас вони не враховують стресові чинники, такі як зміни ринкової кон'юнктури чи форс-мажорні обставини.

Питання підвищення конкурентоспроможності підприємств за рахунок сучасних методів оптимізації виробничих процесів також отримало значну увагу. У роботі [7] розглядається загальний підхід до автоматизації виробничих процесів та методів їх удосконалення через концентрацію операцій, автоматизацію процесів завантаження-вивантаження деталей, а також управління безпосередньо процесом обробки. Проте запропоновані рекомендації мають загальний характер і здебільшого стосуються масового та багатосерійного виробництва. Фундаментальні роботи [8, 9] містять детальний аналіз типів автоматизації (програмна, гнучка, жорстка), що безпосередньо пов'язані з типами виробництва. У цих дослідженнях також наведено приклади застосування кожного виду автоматизації як у ретроспективі, так і в сучасних виробничих умовах, з урахуванням концепції «Індустрія 4.0» та досягнень мехатроніки. У роботі [10] основну увагу приділено автоматизованим системам управління технологічними процесами, які розглядаються як складні системи з інтегрованими алгоритмами обміну та обробки інформації, а також численними функціональними підсистемами. Стаття [11] аналізує перспективи цифрової інтеграції інформації про життєвий цикл товару, зокрема роль цифрових 3D-моделей. Запропоноване рішення може підвищити ефективність постачання та планування завдяки постійному моніторингу кожного етапу життєвого циклу продукції. Втім, ці дослідження зосереджені на поступовому розвитку підприємств і не враховують ринкові коливання чи форс-мажорні обставини.

У роботі [12] запропоновано розглядати максимальну гнучкість підприємства у найкоротші терміни як один із ключових чинників стабільності в умовах ринкових коливань, стресових ситуацій та форс-мажорних обставин. Представлена математична модель у вигляді інтегральної функції гнучкості враховує різні аспекти виробничої гнучкості як реакції підприємства на зовнішні впливи в часі (продуктивність виробничих процесів, якість продукції, ефективність управління виробничими запасами та незавершеним виробництвом, відповідність продукції стандартам і регламентам). Додатково враховано аспекти,

пов'язані з автоматизацією та цифровізацією виробничих процесів, які допомагають підприємству оперативно адаптуватися до змін ринку. Як обмежувальний чинник розглянуто ринковий показник собівартості продукції, який не повинен перевищувати ринкову вартість товару. Методика, викладена в роботі [12], лягла в основу аналізу динаміки розвитку підприємства з урахуванням стресових ситуацій.

У статті [13] розглянуто методи автоматизації виробничих процесів як засіб підвищення ефективності МСП у машинобудівній галузі в умовах форс-мажорних обставин (зокрема, військових дій і післявоєнного відновлення енергетичних підприємств). У роботі [14] детально проаналізовано вплив стресових факторів на ключові показники діяльності підприємства: продуктивність, якість, рівень виробничих запасів, незавершене виробництво, а також державну політику у сфері регулювання та оподаткування. Запропоновано інтегральну модель, що відображає вплив ринкової кон'юнктури та стресових ситуацій на динамічні взаємозв'язки між цими показниками. Проте існуючі математичні моделі не дають вичерпного уявлення про рівень впливу автоматизації та цифровізації виробничих процесів на стійкість підприємств у кризових ситуаціях.

Матеріали дослідження. Як зазначалося, у загальному випадку математично процес забезпечення стабільності підприємства можна подати у вигляді інтегрального функціоналу гнучкості

$$Fst = \int_0^{T_0} \sum \sigma_i \cdot Wi(t) dt \rightarrow \min; \quad PC(t) < PC(t)_{mrkt},$$

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

σ_i – вагові коефіцієнти, які відображають ступінь впливу відповідної функції на аналізований функціонал;

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

Зміни основних характеристик виробничого процесу, викликані зміною зовнішніх факторів, розглянуті у [14].

Розглянемо фактори, які дозволяють прискорити процес адаптації підприємства до умов ринку, що змінилися, або інших зовнішніх впливів. До них слід віднести функцію цифровізації підприємства, візуалізації даних та процесів у часі, представлення об'єкта у вигляді 3D моделі та функції, що враховує можливість і швидкість розглянутих інноваційних перетворень на підприємстві. Детальний аналіз кожної складової інтегрального функціоналу гнучкості МСП, як єдиної складної багатовимірної системи, дозволяє оцінити здатність підприємств адаптуватися до мінливих умов ринку, технологічних інновацій та

вимог споживачів у часі. Такий комплексний підхід до адаптації малих і середніх підприємств до динамічних змін у зовнішньому середовищі є основою для швидкого реагування машинобудівними МСП на технологічні, економічні та соціальні виклики, що здатне забезпечити підвищення їх конкурентоспроможності на глобальному ринку через оптимізацію внутрішніх процесів, покращення якості продукції виробництва, підвищення ефективності ресурсокористування, зниження ризиків та збільшення інвестиційного потенціалу, розширення ринків збуту та підвищення адаптивності до змін у вимогах споживачів.

Функція цифровізації підприємства в часі $ID(t)$ є важливою складовою інтегрального функціоналу гнучкості МСП, оскільки сприяє підвищенню ефективності бізнес-процесів вітчизняних машинобудівних виробництв, зниження витрати і підвищенням конкурентоспроможності Українських МСП. Цифрова трансформація дозволяє машинобудівним підприємствам швидко адаптуватися до миттєвих змін на ринку, запроваджувати інновації та відповідати поточним вимогам ринку. Особливо важливою цифровізація є для МСП, оскільки виконує функцію забезпечення доступу до нових технологій і дозволяє змагатися з більшими конкурентами в регіональному та глобальному бізнес-середовищі. Функція цифровізації підприємства в часі $ID(t)$ може бути представлена сукупністю компонентів цифровізації, що охоплюють такі аспекти, як автоматизацію виробничих і технологічних процесів ($ID_{au}(t)$), впровадження цифрових платформ для управління виробництвом ($ID_{vi}(t)$), інтеграцію нових технологій (IoT, Big Data, штучний інтелект) ($ID_{in}(t)$), і оптимізацію логістичних та виробничих ланцюгів через цифрові інструменти та сервіси ($ID_{opt}(t)$). Важливим фактором при впровадженні компонентів цифровізації є також собівартість продукції, яка повинна залишатися конкурентоспроможною.

$$ID(t) = \sum_{i=1}^n ID_i(t) = ID_{au}(t) + ID_{vi}(t) + ID_{in}(t) + ID_{opt}(t).$$

Зазначимо, що цифровізація безпосередньо впливає на конкурентоспроможність продукції виробничих підприємств, а особливо це стосується МСП, завдяки зниженню виробничих витрат та підвищенню ефективності процесів. МСП, які впроваджують цифрові інструменти, можуть скоротити витрати на логістику (як на мікро-, макро-, так і на глобальні), зменшити втрати на виробництво продукції через людський фактор та прискорити адаптацію підприємства до змін попиту, що особливо важливо в умовах нестабільних економічних умов (*force majeure*). Тому граничну умову для функції цифровізації також можна визначити як забезпечення конкурентоспроможної собівартості продукції, яку можна записати як:

$$CP_{pr}(t) \leq CP_{con},$$

де $CP_{pr}(t)$ – собівартість продукції у часі,

CP_{con} – гранично допустима собівартість продукції, що формується конкурентами, та дозволяє залишатися МСП конкурентоспроможними на ринку.

Очевидним є, що рівень цифрової трансформації економіки країни є і буде важливим фактором інвестиційної привабливості в період післявоєнної відбудови країни, це пояснюється тим, що країни з високим рівнем цифровізації економіки мають більший доступ до сучасних технологій підготовки та реалізації виробничих та технологічних процесів. Звідси витікає, що рівень цифровізації МСП $D(t)$, є не лише характеристикою його внутрішньої ефективності, а й ключовим фактором у залученні зовнішніх інвестицій, розвитку та стабільності такого підприємства. Окрім того цифровізація сприяє інтеграції машинобудівних МСП у глобальні ланцюги постачання, що позитивно впливає на розвиток як самої машинобудівної галузі, так і промислових регіонів України загалом. Підприємства, які швидко впроваджують цифрові рішення, мають більшу гнучкість, що дозволяє їм оперативно реагувати на зміни ринку, підвищувати якість продукції і оптимізувати витрати.

Таким чином, функція цифровізації підприємства в часі описує динаміку впровадження нових технологій і цифрових процесів, які підвищують ефективність роботи МСП та їх конкурентоспроможність. Завдяки цифровим інструментам підприємства можуть знижувати собівартість продукції до конкурентоспроможного рівня, а високий рівень цифровізації економіки сприяє залученню інвестицій і розвитку підприємства.

Функція візуалізації. Наступною ключовою складовою інтегрального функціоналу гнучкості МСП є функція візуалізації даних та процесів у часі ($V(t)$), що забезпечує можливість швидкого і точного прийняття рішень на основі складної інформації, роблячи її зрозумілою і доступною для користувачів. Візуалізація даних перетворює складні масиви цифр і фактів на графічні зображення, що дозволяє побачити зв'язки між різними процесами проєктування-виготовлення продукції, інтерпретувати результати аналізу попиту і пропозицій і виявляти тенденції руху МСП, які могли б залишитися непомітними при роботі з необробленими даними.

Зокрема, на машинобудівних підприємствах візуалізація промислових процесів є необхідною для керування обладнанням, технологічними операціями, локальними ланцюжками постачання та умовами на виробничих майданчиках. Візуалізація полегшує робітникам взаємодію з автоматизованими системами, допомагаючи краще використовувати переваги автоматизації. Без належної візуалізації підприємство може втратити можливості для

оптимізації великої кількості супровідних процесів, наприклад, зниження витрат енергії чи підвищення загальної ефективності обладнання, що пропорційне вплине на зниження стабільності такого підприємства.

Візуалізація також відіграє важливу роль в управлінні якістю продукції. Графічне відображення процесів в зоні обробки дозволяє оперативне реагувати на поточні зміни умов виконання технології, контролювати відхилення оброблюваних поверхонь від норм і підвищувати рівень якості продукції. Оскільки інформація подається у зрозумілій формі, менеджери можуть швидше ухвалювати рішення і проводити корекції технологічних умов в режимі реального часу, що підвищує загальну продуктивність підприємства.

Математично функцію візуалізації можна представити через компоненту оптимізації інформаційних потоків у часі:

$$V(t) = \sum_{i=1}^n \beta_i(t) \cdot V_i(t) = \\ = \beta_{gr}(t) \cdot V_{gr}(t) + \beta_{an}(t) \cdot V_{an}(t) + \beta_{int}(t) \cdot V_{int}(t),$$

де $V_{gr}(t)$ – візуалізація промислових процесів у вигляді графічного відображення обладнання, операцій і ресурсів, що допомагає контролювати виробництво;

$V_{an}(t)$ – аналітична візуалізація, яка дозволяє знаходити зв'язки та кореляції між різними змінними;

$V_{int}(t)$ – інтерактивні інструменти візуалізації, які забезпечують користувачів можливістю взаємодії з даними в реальному часі;

$\beta_{gr}(t), \beta_{an}(t), \beta_{int}(t)$ – вагові функції, що відображають зміну важливості кожної складової у певний момент часу t .

Важливість візуалізації для стабільності МСП зумовлена динамічним підвищення рівня інтегрованості інформації, дозволяє підприємствам краще розуміти свої процеси і оперативним чином реагувати на зміни ринкової ситуації, підвищуючи гнучкість виробництва та забезпечуючи кращий контроль над якістю продукції.

Функція представлення 3D інформації про об'єкт. Відокремленою складовою інтегрального функціоналу гнучкості МСП є функція представлення 3D інформації про об'єкт виробництва у часі ($3DI(t)$), що націлена на досягнення можливості забезпечення граничної точності опису таких об'єктів в тривимірному просторі, тобто: створення точних моделей для проектування або аналізу стану виробничих та/або технологічних систем, відтворення тривимірної карти глибин об'єктів виробництва для аналізу їх якості, використання віртуальної та/або доповненої реальності для коректного відображення об'єктів в інтерактивному середовищі тощо. Ця функція не є частиною загальної візуалізації даних та процесів, адже вона націлена на детальний опис фізичних

характеристик об'єкта, його геометрії, текстури і внутрішньої структури в просторі, з можливістю інтерактивного аналізу і реконструкції різномірної інформації про об'єкт. Окрім того функція представлення 3D інформації є динамічною та суттєвою для забезпечення стабільності МСП при інтеграції в ринок ЄС, бо за для зменшення часу виходу продукції на ринок може включати використання алгоритмів машинного навчання для генерації нових тривимірних моделей об'єктів виробництва на основі існуючих даних або відновлення моделей об'єктів з неповних даних (наприклад, відтворення повної форми об'єкта з кількох двовимірних зображень), здійснення маніпуляцій з об'єктом виробництва у реальному часі для поліпшення його розуміння, оптимізації виробничих процесів або аналізу стану об'єкта, використовувати 3D інформацію з глибинних камер, сенсорів та сканерів, для полегшення розпізнавання просторової структури і положення об'єктів.

Функцію представлення 3D інформації можна математично описати як функцію у просторі і часі, яка прагне до мінімізації похибки при відтворенні об'єкта у тривимірному просторі:

$$3DI(t) = \min \sum_{i=1}^n \|\mathbf{O}_i(t) - \hat{\mathbf{O}}_i(t)\|,$$

де $\mathbf{O}_i(t)$ – реальна форма і структура об'єкта в часі,

$\hat{\mathbf{O}}_i(t)$ – наближена (відтворена) модель об'єкта в часі.

Функція інноваційної активності та здатності до швидкого впровадження нових продуктів. При розгляді інноваційної активності малого та середнього машинобудівного підприємства та його здатності до швидкого впровадження нових видів продукції і забезпечення високої гнучкості управління виробничими процесами, що у свою чергу є прямим відображенням інтегрального функціоналу гнучкості МСП F (2.13), стає важливим пошук шляхів швидкого прийняття рішень та оперативного реагування на зміни в ринкових умовах і технологічних тенденціях. МСП безпосередньо не можуть продукувати наукові та інноваційні розробки, де стримуючим фактором здебільшого виступає необхідність залучення великих інвестицій як державних, так і приватних так і необхідність створення умов державно-приватного партнерства. Однак такі підприємства мають значний впроваджувальний потенціал, що пов'язано з органічною природою МСП, тобто в умовах великої конкурентної боротьби зумовлювати високу здатність до впровадження в виробничий процес інновацій та нововведень і готовністю підприємства до ризиків. Орієнтованість на клієнтів та співпраця із партнерами забезпечує індивідуальний підхід до потреб клієнтів та оперативне отримання зворотного зв'язку, що допомагає адаптувати об'єкти виробництва МСП під їх вимоги у реальному масштабі часу. Це стало можливим із-за

інтенсивного використання нових технологій в тому числі і ІТ, що дозволяє підвищити ефективність та конкурентоспроможність роботи машинобудівного МСП. Малі підприємства залучають молодих креативних спеціалістів, готових експериментувати та пропонувати нові ідеї, що сприяє впровадженню інновацій. Чутливість МСП до інноваційної активності (In) також обумовлена їх здатністю швидкої зміни стратегії роботи та адаптації до нових ринкових умов у відповідь на зовнішні виклики. Зосереджуючись на вузькоспеціалізованих ринках, малі підприємства створюють інноваційні продукти, які відповідають специфічним потребам клієнтів. Ці фактори забезпечують конкурентоспроможність та стійкість малого та середнього машинобудівного підприємства на ринку. Таким чином, функція інноваційної активності ($In(t)$) малого і середнього машинобудівного підприємства може бути представлена наступним чином:

$$In(t) = W \cdot \begin{bmatrix} In_{inv}(t) \\ STD(t) \\ D_{pp}(t) \\ C_{prs}(t) \\ P_{new}(t) \end{bmatrix},$$

де W – матриця вагових коефіцієнтів, яка відображає важливість кожного компонента для загальної оцінки інноваційної активності підприємства, що може бути представлена наступним чином

$$W = \begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} & w_{13} & w_{14} & w_{15} \\ w_{21} & w_{22} & w_{23} & w_{24} & w_{25} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ w_{n1} & w_{n1} & w_{n3} & w_{n4} & w_{n5} \end{bmatrix},$$

де $In_{inv}(t)$ – залучені інвестиції в інновації в часі;

$$In(t) = \begin{bmatrix} w_{11}In_{inv1}(t) + w_{12}STD_1(t) + w_{13}D_{pp1}(t) + w_{14}C_{prs1}(t) + w_{15}P_{new1}(t) \\ w_{21}In_{inv2}(t) + w_{22}STD_2(t) + w_{23}D_{pp2}(t) + w_{24}C_{prs2}(t) + w_{25}P_{new2}(t) \\ \vdots \\ w_{n1}In_{invn}(t) + w_{n2}STD_1(t) + w_{n3}D_{ppn}(t) + w_{n4}C_{prsn}(t) + w_{n5}P_{newn}(t) \end{bmatrix}.$$

Інноваційна активність МСП потребує створення багаторівневої інтегрованої цифрової інфраструктури, що сприятиме перетворенню безлічі горизонтальних і вертикальних бізнес-процесів, оптимізації операційної діяльності, зміні існуючих моделей і форматів взаємодії між учасниками ланцюжків створення доданої вартості. Тому для забезпечення стабільності і конкурентоспроможності МСП шляхом підвищення його гнучкості важливим є різномірне

$STD(t)$ – науково-технічні розробки, що виступають як проміжний результат науково-виробничого циклу та через практичне застосування у виробничому процесі МСП перетворюються в науково-технічні інновації тобто кінцевий результат;

$D_{pp}(t)$ – цифровізація виробничих процесів у часі, що направлена на скорочення обсягу роботи з документами і впливу людського фактору при формуванні кінцевої якості об'єкту виробництва;

$C_{prs}(t)$ – рівень інноваційних компетенцій персоналу в часі, що залежить від кваліфікаційних вимог, які висуваються до працівника та від ступеню відповідальності персоналу;

$P_{new}(t)$ – впровадження нових об'єктів виробництва та технологічних і виробничих процесів для їх виготовлення, що забезпечує відгук підприємства на поточну потребу на ринку.

Всі розглянуті параметри можемо записати у наступному вигляді:

$$In_{inv}(t) = \begin{bmatrix} In_{inv1}(t) \\ In_{inv2}(t) \\ \vdots \\ In_{invn}(t) \end{bmatrix};$$

$$STD(t) = \begin{bmatrix} STD_1(t) \\ STD_2(t) \\ \vdots \\ STD_n(t) \end{bmatrix}; \quad D_{pp}(t) = \begin{bmatrix} D_{pp1}(t) \\ D_{pp2}(t) \\ \vdots \\ D_{ppn}(t) \end{bmatrix};$$

$$C_{pr}(t) = \begin{bmatrix} C_{prs1}(t) \\ C_{prs2}(t) \\ \vdots \\ C_{prsn}(t) \end{bmatrix}; \quad P_{nos}(t) = \begin{bmatrix} P_{new1}(t) \\ P_{new2}(t) \\ \vdots \\ P_{newn}(t) \end{bmatrix}.$$

Тоді загальний вигляд матриці інноваційної активності машинобудівного МСП прийме вигляд:

цифровізація виробничих процесів, що полягає у автоматизації процесів і переведенні інформації в більш доступне цифрове середовище, в якому її швидше і легше аналізувати та синтезувати, щоб отримувати точні технологічні рішення направлені на забезпечення інноваційної якості об'єкту виробництва.

Функція інноваційної діяльності МСП з урахуванням рівнів набуває наступного вигляду:

$$In(t) = \int_0^T \left(\frac{w_{inv}In_{inv}(t) + w_{STD}STD(t) + w_D D_{pp}(t) + w_C C_{prs}(t) + w_P P_{new}(t)}{L_{micro} + L_{mezo} + L_{mega}} \right) dt,$$

де L_{micro} – інформація про фізико-механічні властивості матеріалів, мікроструктури, технологічні процеси тощо, що міститься на мікро- та нано рівнях;

L_{mezo} – інформація про виробничі процеси, ефективність виробничих процесів, інноваційні рішення тощо, що міститься на мезорівні;

L_{mega} – інформація про ринок, макроекономічні тенденції, стратегічні рішення тощо, що міститься на мегарівні.

Оптимізація загального інтегрального функціоналу гнучкості МСП має виконуватися із урахуванням варіативності рішень, для нівелювання впливів стресових факторів на сталість підприємства в часі. Перспективним рішенням для оптимізації запропонованого функціоналу є метод автоматичного планування, що є відгалуженням штучного інтелекту та працює за методом планування на основі переваг – планування PPLAN. З огляду на гіпотезу, що управління часом має критичний вплив на всі ключові процеси на підприємстві, то задача оптимізації загального інтегрального функціонала гнучкості МСП пов'язана із двома підлеглими задачами:

по-перше необхідною умовою стає вирішення задачі надання інформації про тимчасові переваги в плануванні (тобто визначення та ранжування компонентів функціоналу, які є найбільш перспективними для забезпечення сталості МСП в умовах стресу);

по-друге – швидка генерація плану, що задовольняє інтереси осіб, які ухвалюють рішення в стресовій ситуації, з безлічі варіативних

можливостей (тобто висвітлення компонентів функціоналу, які дозволять в найменший час подолати кризові умови стресових ситуацій як для виробника, так і для споживача).

Питаннями розроблення автоматичних планувальників на основі ієрархічних мереж завдань (hierarchical task networks – HTN) на поточний час присвячено чимало уваги [15,16]. В таких автоматичних планувальниках вираження часових обмежень стає можливим за рахунок використання можливостей простих часових мереж (simple temporal network – STN). Цінність таких планувальників проявляється в тому, що може бути виконана перевірка узгодженості простої часової мережі, пов'язаної з частковим планом, і отримати переконливе рішення щодо виконання часових обмежень плану.

Відповідно до архітектури планування на основі ієрархічних мереж завдань при оптимізації загального інтегрального функціонала гнучкості МСП, гнучкість – це прийнята проблема на вході, а на виході буде надано серію кроків (планів) для вирішення цієї проблеми. Розглянемо оптимізацію загального інтегрального функціонала гнучкості МСП можливостями автоматичних планувальників на основі ієрархічних мереж завдань, що передбачає можливість представити задачу забезпечення сталості МСП в умовах стресу як завдання пріоритетного рівня, яке в процесі планування рекурсивно розбиватиметься на менші завдання.

На рис. 1 зображено графіки поведінки функціоналів, що розглядаються, у часі.

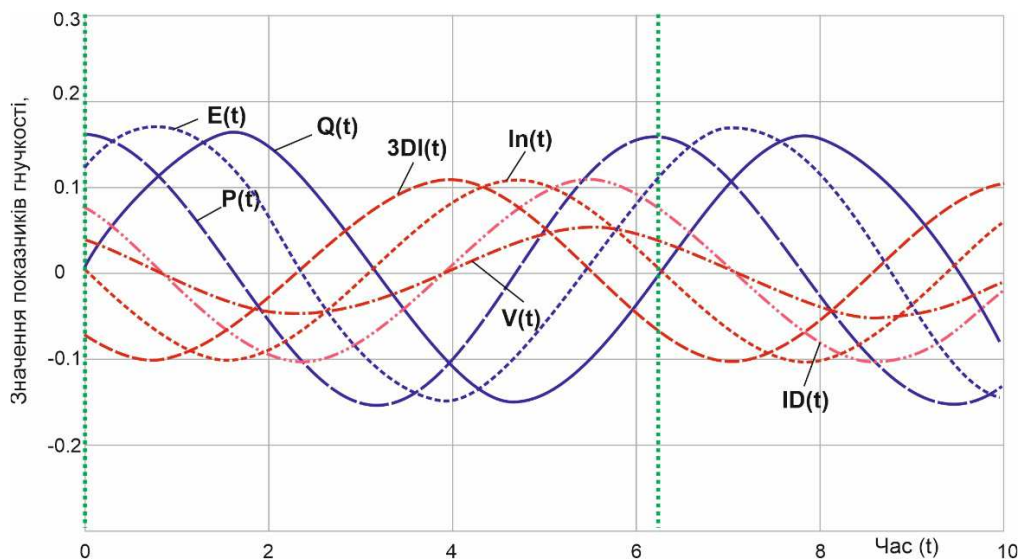


Рисунок 1. Аналіз поведінки компонентів функціонала гнучкості у часі

Ця поведінка носить циклічний характер та повторюється у часі з виникненням нової стресової ситуації. На виникнення стресової ситуації (зелена пунктирна лінія) першою реагує продуктивність виробництва ($P(t)$), вона поступово падає. Далі з невеликою затримкою падає і якість продукту ($Q(t)$). Розглянемо чинники, які є складовою

запропонованого інтегралу гнучкості і дозволяють швидко вирішувати проблеми, що виникають. Зазвичай після виникнення стресової ситуації мінує деякий час, який потрібен на обміркування того, що сталося, що ці зміни не випадковість, а закономірність. У цей проміжок керівництво підприємства планує заходи, які потрібно виконати

для вирішення проблем. Як показують дослідження моделі у першу чергу на підвищення продуктивності впливає 3D-візуалізація об'єкту $3DI(t)$, що дозволяє використовувати сучасні технології його віртуального дослідження і внесення необхідних змін або у його параметри, або у технологію виробництва. Другим вагомим чинником є інноваційна активність та швидкість впровадження нових продуктів. Функціонали цифровізації ($ID(t)$) та візуалізації ($V(t)$) інформації про об'єкт впливають на гнучкість підприємства у останню чергу. Із детального аналізу графіків видно, що в той період часу, коли у відповідь на стрес підприємство починає тимчасово втрачати здатність підтримувати ефективності управління запасами та ресурсами ($E(t)$) та починає втрачати якість продукції $Q(t)$ в протифазу відбувається зростання впливу 3D-технології $3DI(t)$ на гнучкість МСП та відповідно компенсація в наступних часових періодах здатності підприємства підтримувати необхідну якість продукції за рахунок відновлення балансу в часі та швидкого внесення змін у виробничі процеси, моделювання нових рішень, розробці та тестуванні прототипів тощо. Підкреслимо, що пік графіка $3DI(t)$ досягає максимального впливу між 3 і 5 одиницями часу, коли інші компоненти загального функціоналу гнучкості або спадають, або перебувають у перехідних станах. Це дозволяє нам стверджувати, що в цей період часу саме 3D-технології можуть значно підсилювати стійкість підприємства за рахунок компенсації слабких місць інших складових. Пояснити цей феномен можна тим, що в умовах різкої зміни попиту або пропозиції і не тільки саме 3D-технології ($3DI(t)$), що знаходяться у протифазі до $P(t)$, $E(t)$, $Q(t)$, стають найперспективнішим інструментом швидкого подолання стресу та адаптування в часі супровідних процесів МСП на всіх рівнях: від моделювання до виробництва і продаж.

Таким чином можемо зробити висновок, що 3D-технології на базі багаторівневої 3D-інформації є ключовим фактором, який є перспективним інструментом для компенсування зниження сталості МСП в часі в умовах стресу.

Висновки

1. Запропоновано математичну модель забезпечення сталого розвитку МСП в основу якої покладено аналіз ключових процесів на підприємстві на базі варіаційного числення із урахуванням м'яких обмежень. Визначено, що гнучкість МСП, як динамічна характеристика сталості підприємства, в швидкозмінних ринкових умовах та форс-мажорних обставин може бути досягнута за рахунок зменшення часу вирішення виробничих та технологічних задач шляхом впровадження сучасних технологій і цифрових сервісів.

2. Встановлено, що основними компонентами функціоналу гнучкості МСП, які впливатимуть на швидку адаптованість підприємства до зовнішніх умов та мінімізацію часу є функція цифровізації підприємства в часі ($ID(t)$), функція представлення 3D інформації про об'єкт виробництва ($3DI(t)$) та

функція візуалізації даних та процесів в часі $V(t)$, яка має трохи менший вплив на оптимізацію функціонала ніж дві попередні. Ці функції є перспективним інструментом для вирішення варіативних задач відгуку на стресові ситуації на ринку із задоволенням проблеми поточних обмежень, за рахунок існування гнучких варіантів на різних рівнях представлення інформації (нано-, мікро-, макро-, мезо-, глобальних), які працюють із м'якими обмеженнями аналогічно перевагам під час планування на основі переваг.

3. Встановлено, що функція інноваційної активності та здатності до швидкого впровадження нових продуктів або процесів ($In(t)$) надає стабільний позитивний ефект у певних критичних моментах, та здатність до швидкого повернення до позитивного балансу підприємства після впливу стресових умов.

Список літератури:

1. Annual Report on European SMEs 2022/2023. // Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2023. – 92p.
2. Key figures on European business STATISTICS ILLUSTRATED. // Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2023. – 88p.
3. Яковенко І.Е., Линник О.І., Пермяков О.А., Басова Є.В. Технологічні інновації як засіб забезпечення конкурентної переваги мікро, малих і середніх машинобудівних підприємств. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. Харків : НТУ «ХПІ», 2024. № 2 (10). С. 74-87. DOI: 10.20998/2079-004X.2024.2(10).08
4. De Toni, A., Tonchia, S.: Definitions and linkages between operational and strategic flexibilities. Omega 33(6), 525–540 (2005).
5. 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>
6. 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>
7. Yakimov OV Tehnologiya avtomatizovanogo mashinobuduvannya / OV Yakimov ta In. // Odesa: ONPU, 2005.- 410p.
8. Automation production systems and computer-integrated manufacturing / Mikell P. Groover . // Lehigh University.-Fourth edition. , 2015. - 811 p .
9. Groover , Mikell P. Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes and systems, 4th ed // John Wiley & Sons, Inc., 2010. - 1025 p .
10. Grigoryuk EN Problems of Automation and Management Principles Information Flow in Manufacturing / EN Grigoryuk , VVBulkin // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 221 (2017) 012006 doi:10.1088/1757-899X/221/1/012006
11. Yevheniia Basova et al. Increasing SME supply chain resilience in the face of rapidly changing demand with 3d model visualisation./ Dobrotvorskiy S., Balog M., Iakovets A., Chelabi M., Zinchenko A. // International Journal of Mechatronics and Applied Mechanics, 2023, 2023(14), pp. 35–47
12. Тарнавська Н.П., Демків І.О. Концептуальні положення моделі управління гнучкістю підприємства / Н.П. Тарнавська, І.О. Демків // Бізнес Інформ. – 2017. – №2. – С. 307–317.
13. Дергачова В.В., Сичевська Ю.С. Передумови та перспективи повоєнного економічного відродження малих і середніх підприємств в Україні / В.В. Дергачова, Ю.С. Сичевська // Економіка та суспільство : електронний науковий журнал. – 2023. – №56. – С. 323–328. – DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2023-56-137>.

14. Басова Є.В., Доброворський С. С., Яковенко І. Е. Моделювання зміни у часі виробничої компоненти гнучкості машинобудівних малих і середніх підприємств в умовах різкого коливання попиту і пропозиції ринку // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Машинознавство та САПР / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». – Харків : НТУ «ХПІ», 2024. № 2 С. 6-13. <https://doi.org/10.20998/2079-0775.2024.2.01>.
15. Zgurovsky, M.Z., Pavlov, A.A. (2019). Algorithms and Software of the Four-Level Model of Planning and Decision Making. In: Combinatorial Optimization Problems in Planning and Decision Making. Studies in Systems, Decision and Control, vol 173. Springer, Cham. Pp 407-518. https://doi.org/10.1007/978-3-319-98977-8_9
16. T. Hiller, L. Deipenwisch and P. Nyhuis, "Systemising Data-driven Methods for Predicting Throughput Time within Production Planning & Control," 2022 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), Kuala Lumpur, Malaysia, 2022, pp. 0716-0721, <https://doi.org/10.1109/IEEM55944.2022.9989885>
8. Groover, Mikell P. Automation Production Systems and Computer-Integrated Manufacturing. 4th ed., Lehigh University, 2015.
9. Groover, Mikell P. Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes and Systems. 4th ed., John Wiley & Sons, 2010.
10. Grigoryuk, E. N., & Bulkin, V. V. "Problems of Automation and Management Principles Information Flow in Manufacturing." IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 221, 2017, 012006. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/221/1/012006>.
11. Basova, Yevheniia, et al. "Increasing SME Supply Chain Resilience in the Face of Rapidly Changing Demand with 3D Model Visualisation." International Journal of Mechatronics and Applied Mechanics, vol. 2023, no. 14, 2023, pp. 35–47.
12. Tarnavska, N. P., & Demkiv, I. O. "Kontseptualni Polozhennia Modeli Upravlinnia Hnuchkisti Pidpriemstva." Biznes Inform, no. 2, 2017, pp. 307–317.
13. Dergachova, V. V., & Sychevska, Y. S. "Peredumovy ta Perspektyvy Povoiennoho Ekonomichnoho Vidrozhennia Malykh i Serednikh Pidpriemstv v Ukraini." Ekonomika ta Suspilstvo, no. 56, 2023, pp. 323–328. <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2023-56-137>.
14. Basova, Y. V., Dobrovorskyi, S. S., & Yakovenko, I. E. "Modeliuvannia Zminy u Chasi Vyrobnchoi Komponenty Hnuchkosti Mashynobudivnykh Malykh i Serednikh Pidpriemstv v Umovakh Rizkoho Kolyvannia Popytu i Propozytsii Rynku." Visnyk Natsionalnoho Tekhnichnoho Universytetu "KhPI". Seriya: Mashynoznavstvo ta SAPR, no. 2, 2024, pp. 6-13. <https://doi.org/10.20998/2079-0775.2024.2.01>.
15. Zgurovsky, M. Z., & Pavlov, A. A. "Algorithms and Software of the Four-Level Model of Planning and Decision Making." Combinatorial Optimization Problems in Planning and Decision Making, edited by Springer, Cham, vol. 173, 2019, pp. 407–518. https://doi.org/10.1007/978-3-319-98977-8_9.
16. Hiller, T., Deipenwisch, L., & Nyhuis, P. "Systemising Data-Driven Methods for Predicting Throughput Time within Production Planning & Control." IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), Kuala Lumpur, Malaysia, 2022, pp. 0716-0721. <https://doi.org/10.1109/IEEM55944.2022.9989885>.

References (transliterated)

1. Annual Report on European SMEs 2022/2023. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2023.
2. Key Figures on European Business Statistics Illustrated. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2023.
3. Yakovenko, I. E., Linnik, O. I., Permyakov, O. A., & Basova, Y. V. "Tekhnolohichni innovatsii yak zasib zabezpechennia konkurentnoi perevahy mikro, malykh i serednikh mashynobudivnykh pidpriemstv." Visnyk Natsionalnoho Tekhnichnoho Universytetu "KhPI". Seriya: Tekhnolohii v Mashynobuduvanni, no. 2 (10), 2024, pp. 74-87. DOI: 10.20998/2079-004X.2024.2(10).08.
4. De Toni, A., & Tonchia, S. "Definitions and Linkages Between Operational and Strategic Flexibilities." Omega, vol. 33, no. 6, 2005, pp. 525–540.
5. Burhan, G. F., & Mansur, A. "Marketing Strategy Planning Based on Customer Value." PROZIMA (Productivity, Optimization and Manufacturing System Engineering), vol. 4, no. 2, 2021, pp. 29–40. <https://doi.org/10.21070/prozima.v4i2.1309>.
6. Edgeman, R., Neely, A., & Eskildsen, J. "Paths to Sustainable Enterprise Excellence." Journal of Modelling in Management, vol. 11, no. 4, 2016, pp. 858–868. <https://doi.org/10.1108/jm2-12-2014-0097>.
7. Yakimov, O. V. Tekhnolohiya Avtomatyzovanoho Mashynobuduvannia. Odesa: ONPU, 2005.

Надійшла (received) 31.01.2025

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, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8549-4788>, e-mail: e.v.basova.khpi@gmail.com.

Доброворський Сергій Семенович / Sergey Dobrovorskiy – 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, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1223-1036>, e-mail: sdobro@gail.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, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8344-996X>; e-mail: igor.dych59@gmail.com