

М.Л. Рябчиков^[0000-0002-9382-7562], С.П. Шимчук^[0000-0002-1293-560X], Т.П. Зайчук, С.В. Пилипчук

Луцький національний технічний університет

СИНЕРГЕТИКА ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ: ФІЛОСОФСЬКО-ТЕХНОЛОГІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ УНІВЕРСАЛЬНИХ ПРИНЦИПІВ ВИРОБНИЦТВА

У статті здійснено філософсько-технологічне осмислення синергетичних принципів організації виробничих процесів. Показано, що сучасний етап розвитку промисловості характеризується інтеграцією цифрових, автоматизованих та екологічно орієнтованих технологій, що вимагає пошуку універсальних підходів до моделювання виробництва. Обґрунтовано доцільність застосування синергетики як міждисциплінарної методології, здатної поєднати теоретичні концепції самоорганізації та нелінійної динаміки з інженерними моделями. Виділено універсальні принципи технологічних процесів — різання, формування, температурної обробки та збирання — і доведено їх спільність у різних галузях промисловості. Запропоновано бачення виробничих систем як відкритих, багаторівневих та адаптивних структур, здатних до самовідновлення. Показано стратегічне значення синергетичного підходу для відбудови індустріальної інфраструктури України, зокрема у напрямках гнучкості, стійкості, ресурсоефективності та технологічного суверенітету.

Ключові слова: синергетика, технологічні процеси, виробництво, самоорганізація, моделювання, адаптивність, відбудова промисловості.

M.L. Riabchykov, S.P. Shymchuk, T.P. Zaychuk, S.V. Pylypchuk

SYNERGETICS OF TECHNOLOGICAL PROCESSES: PHILOSOPHICAL AND TECHNOLOGICAL MODELING OF UNIVERSAL PRINCIPLES OF PRODUCTION

The article presents a philosophical and technological analysis of synergistic principles in the organization of production processes. It is demonstrated that the current stage of industrial development is characterized by the integration of digitalization, automation, and environmentally oriented technologies, which requires the search for universal approaches to production modeling. The feasibility of applying synergetics as an interdisciplinary methodology is substantiated, enabling the combination of theoretical concepts of self-organization and nonlinear dynamics with engineering models. Universal principles of technological processes — cutting, forming, thermal treatment, and assembling — are identified, and their cross-industry similarity is confirmed. Production systems are proposed to be viewed as open, multi-level, and adaptive structures capable of self-recovery. The strategic importance of the synergistic approach for the reconstruction of Ukraine's industrial infrastructure is emphasized, particularly in ensuring flexibility, resilience, resource efficiency, and technological sovereignty.

Keywords: synergetics, technological processes, production, self-organization, modeling, adaptability, industrial reconstruction.

Постановка проблеми в загальному вигляді. Сучасний етап розвитку виробничих систем характеризується глибокою інтеграцією науково-технічних досягнень, цифровізації, автоматизації та необхідністю екологічно збалансованого використання ресурсів. В умовах глобальних викликів — від енергетичних криз до воєнних руйнувань — особливого значення набуває пошук універсальних принципів організації технологічних процесів, що здатні забезпечити гнучкість, відновлюваність та ефективність виробництва.

Синергетичний підхід, що ґрунтується на ідеї самоорганізації, нелінійності та взаємодії елементів складних систем, відкриває нові можливості для моделювання технологічних процесів як цілісних, адаптивних і здатних до самовідновлення систем. Це особливо актуально для України, яка перебуває у фазі відбудови критичної інфраструктури, промисловості та життєво важливих галузей після масштабних руйнувань. Використання синергетики дозволяє не лише відновити виробництво, а й закласти основи його стійкого, інноваційного та конкурентоспроможного розвитку.

Проблема полягає у відсутності єдиного універсального підходу до моделювання та організації технологічних процесів, здатного враховувати взаємодію технічних, економічних і соціальних факторів у складних виробничих системах. Традиційні методи управління процесами орієнтовані на лінійні моделі та жорстко задані алгоритми, що обмежує можливість швидкої адаптації до непередбачуваних викликів.

Для України ця проблема набуває особливої гостроти у зв'язку з потребою: масштабної реконструкції промислових об'єктів та інфраструктури; створення високотехнологічних виробництв на основі принципів сталого розвитку; забезпечення технологічного суверенітету в умовах глобальної конкуренції та нестабільності.

Таким чином, виникає необхідність у філософсько-технологічному осмисленні синергетичних принципів, що дозволяють будувати універсальні моделі організації виробництва, здатні забезпечити одночасно стабільність і динамічну адаптацію до змін.

Аналіз стану питання. Виділення нерозв'язаних частин проблеми. Теоретичні основи синергетики — полягають у концепціях самоорганізації, біфуркацій, макровпливу «керуючих параметрів» та виникнення порядку в відкритих нелінійних системах (класичні роботи Г. Хакена [1])

© М.Л. Рябчиков, С.П. Шимчук, Т.П. Зайчук, С.В. Пилипчук

та подальші філософські інтерпретації). Ця база формує логічний каркас для перенесення ідей на технічні/виробничі системи.

Існують роботи, що розглядають синергетичний розвиток продукту й процесу в промислових підприємствах, а також побудову «синергетичних систем» інновацій і технологічного оновлення. Вони дають методологічні інструменти, але часто залишаються концептуальними та локальними за застосуванням [2].

Відомі прикладні дослідження в процесному контролі, а також мультимодельні підходи, поєднання різних моделей для управління технологічними процесами (механістичні + дані), дослідження саморегуляції й адаптації в автоматизованих виробничих лініях. Тут помітна тенденція до гібридизації моделей (фізичні моделі + машинне навчання) для підвищення стійкості та продуктивності [3].

Філософсько-методологічні роботи — праці, що зв'язують синергетику з новою «природною філософією» та методологічними підходами в науці, пропонують рамки для інтердисциплінарних досліджень (філософія науки + інженерія). Однак такі роботи інколи відстають від практичних кейсів [4].

Виходячи з аналізу стану питання слід відзначити Сильні сторони існуючих підходів.

Наявна солідна теоретична база (синергетика як міждисциплінарна теорія самоорганізації). [1]. Розвиток гібридних моделей (механістичні + дані) дає практичні інструменти для підвищення точності та адаптивності управління технологічними процесами [5]. Зростаючий практичний попит у відбудові та модернізації в Україні створює політичні/фінансові можливості для реалізації нових методів.

В процесі аналізу стану питання були виділені Нерозв'язані, слабо опрацьовані або суперечливі питання, зокрема відсутність узгодженої філософсько-технологічної рамки, яка поєднувала б синергетичні концепти з інженерними методами проектування виробництва (тобто як перенести абстрактну ідею самоорганізації у конкретні алгоритми та архітектури виробничих систем). Бажано провести масштабування та мульти-рівневе моделювання, при цьому необхідно узгодити поведінку на рівні елементів (агенти, верстати) із макроповедінкою фабрик, кластерів і національних ланцюгів постачання — питання міжскалярної узгодженості залишається відкритим. (практичні кейси — поодинокі). Мало стандартизованих показників (як кількісно виміряти «синергію» в промисловому процесі, технологічну стійкість, здатність до самоорганізації). Нові інформаційно-теоретичні підходи з'являються, але ще не увійшли в практику. Обмежена кількість публікацій, що поєднують синергетику та конкретні сценарії відбудови української промисловості; є запит на дослідження «синергетичних» стратегій реконструкції в умовах обмежених ресурсів і ризиків.

Мета дослідження: розробити філософсько-технологічне моделювання універсальних принципів організації виробництва на основі синергетики, що забезпечує адаптивність, стійкість і можливість масштабної реалізації в умовах реконструкції індустріальної інфраструктури України.

Поєднання теоретичної зрілості синергетики та практичної потреби у гнучких, стійких виробничих рішеннях створює унікальну можливість для впровадження універсальної моделі виробництва. Для України це має стратегічне значення: відбудова — шанс не лише відновити старі потужності, а й запровадити інноваційні, адаптивні та ресурсоефективні виробничі системи, що посилять технологічний суверенітет.

Методологія дослідження. Об'єкт дослідження - Технологічні процеси як складні відкриті системи, що функціонують у виробничому середовищі та підлягають впливу технічних, соціально-економічних та природних чинників. Предмет дослідження - Філософсько-технологічні принципи моделювання та організації виробничих процесів на основі синергетики, спрямовані на досягнення стійкості, адаптивності та універсальності виробництва.

Методологічною основою дослідження можуть бути синергетична парадигма — концепції самоорганізації, біфуркацій, нелінійної динаміки та формування порядку в складних системах, філософія науки та техніки — для осмислення універсальних закономірностей розвитку виробництва й трансляції синергетичних ідей у технологічні моделі, системний підхід — розгляд виробничих процесів як ієрархії взаємопов'язаних рівнів (елемент — підсистема — система — надсистема), інтердисциплінарність — інтеграція методів філософії, інженерії, економіки, управління та соціології.

Методи дослідження включають аналітико-теоретичні методи — аналіз і синтез наукових джерел, узагальнення сучасних підходів до синергетики у виробничих системах, філософське

модельовання — концептуалізація універсальних принципів виробництва у вигляді абстрактних схем і категорій, системне моделювання — використання структурно-функціональних моделей для опису багаторівневої взаємодії у технологічних процесах, порівняльний аналіз — зіставлення традиційних та синергетично орієнтованих підходів до організації виробництва.

Обґрунтування основних універсальних принципів виробництва. Універсальними елементами будь-якого технологічного процесу є операції, що змінюють стан матеріалу чи об'єкта праці. До базових етапів належать:

Різання — механічне відокремлення частини матеріалу для досягнення необхідної форми та розмірів (токарна обробка металу, розкрій тканини, різання тіста у харчовій промисловості).

Формування — надання матеріалу нової конфігурації під дією тиску, деформації або хімічних перетворень (штампування металів, прядіння ниток, формування макаронних виробів).

Температурна дія — зміна властивостей або структури матеріалу під впливом тепла чи холоду (термічна обробка сталі, прасування тканин, випікання хліба).

Збирання — поєднання елементів у цілісний виріб (монтаж деталей машини, пошиття одягу, пакування харчових продуктів).

Кожен із цих етапів є проявом універсального принципу «перетворення матеріалу на форму» і повторюється в різних галузях виробництва.

Рисунок 1 Демонструє можливості використання принципів різання в різних галузях. Зокрема, Рис.1, а демонструє схему різання металу, рис.1,б різання текстильних матеріалів на стрічкових машинах, рис.1,в – різання харчових продуктів. Більшість сучасних принципів різання базується на використанні принципів дії інструмента, як клину, що заглиблюється в матеріал.

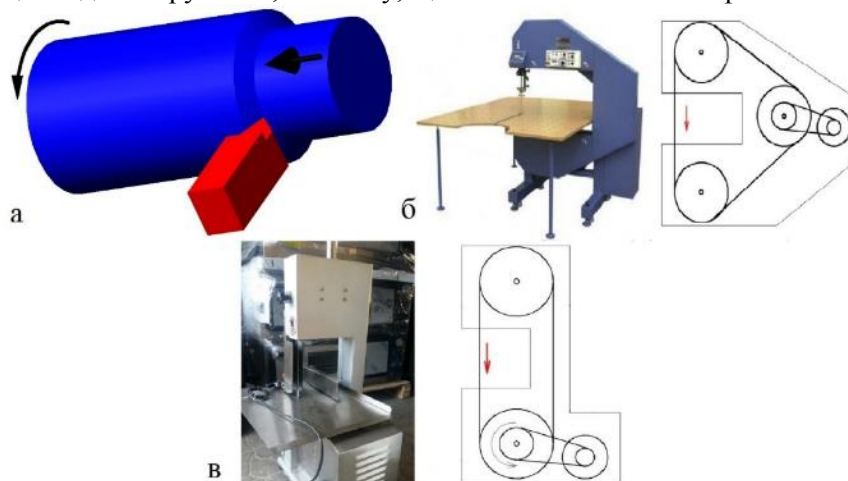


Рис.1. Процеси різання в різних галузях а-металообробка, б – легка промисловість, в – харчова промисловість.

Моделювання процесу різання має подібні підходи у різних галузях. Зокрема, сила різання з врахуванням геометрії клину може бути визначена за рівнянням [6]

$$\frac{F_c}{w} = \tau \cdot t(\cos \varphi + \operatorname{tg}(\varphi + \beta)),$$

де φ — кут площини зрізу (shear plane angle), β — кут тертя на контактні стружка–інструмент ($\beta = \arctan \mu$), t — товщина шару, який зрізається (mm), w — ширина різання (mm), τ — середній зсувний опір на площині зрізу (MPa), F_c — радіальна/горизонтальна сила різання (cutting force),

Загальний підхід до процесу різання в різних галузях підтверджується рядом публікацій [7-9]. Сучасні синергетичні тенденції в процесах різання ведуть до паралельного курсу впровадження автоматизованих ліній для різання (рис.2).

Процеси, направлені на зміну форми, також характерні для різних галузей промисловості. Частіше всього вони зв'язані з переведенням матеріалу, що обробляється, до іншого фізичного стану (пластичного, в'язко текучого або рідкого) з наступним поверненням до пружного становища.

Рис. 3, а демонструє процеси формування в машинобудуванні, рис. 3, б – подібні процеси в легкій промисловості, рис. 3, в – в харчовій галузі.

Підхід до моделювання процесів формування має також загальний підхід і описується рівняннями теорії пластичності.

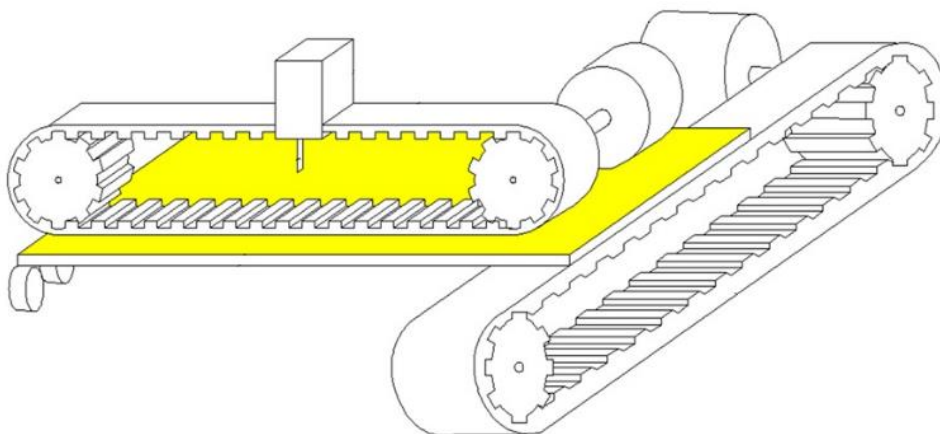


Рис.2. Загальна модель автоматизованого різання в різних галузях

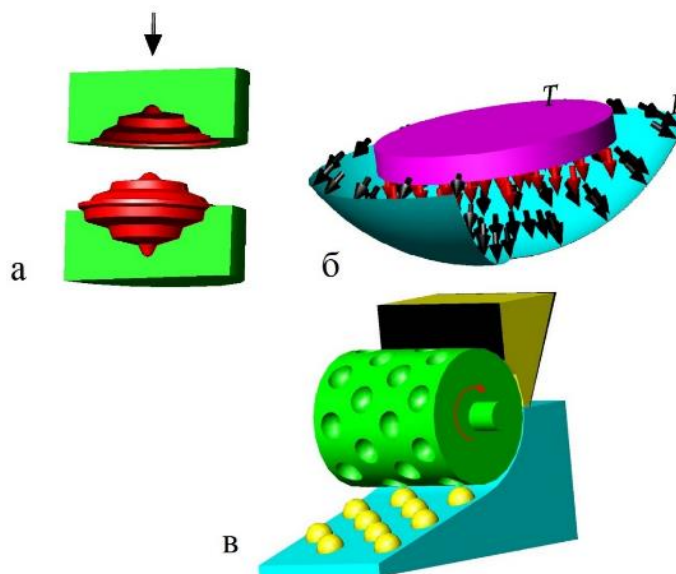


Рис.3. Процеси формування в різних галузях, а-машинобудування, б-легка промисловість, в – харчова промисловість

При цьому рівняння залежності реального напруження σ від реальної деформації ϵ може бути записана у вигляді

$$\sigma = K \epsilon^n$$

де K, n – константи матеріалу.

В процесі штампування / плоского пресування сили формування приблизно можуть бути розраховані, як

$$F \approx \sigma_f A_\Sigma,$$

де σ_f - межа плинності матеріалу,

A_Σ - сумарна площа, що деформується в даний момент (площа контакту матеріалу, який підлягає формуванню).

Для випадку глибокої витяжки класична оцінка для питомої сили має вигляд [10]

$$F \approx \pi \cdot D_a \cdot t \cdot \sigma_f (1 + f(\mu, geom)),$$

де D_a середній діаметр, t товщина, $f(\mu, geom)$ поправка на тертя та на формоутворювальні втрати (може бути виражена через логарифмічні відношення радіусів або число проходів).

Процеси формування в різних галузях мають подібні основи. Для легкої промисловості такі процеси описані, зокрема, в [11-12], для харчової промисловості – в [13-14].

Розвиток процесів формування в більшості галузей відбувається паралельно і передбачає активне впровадження 3D принтерів [14-15], рис.4.

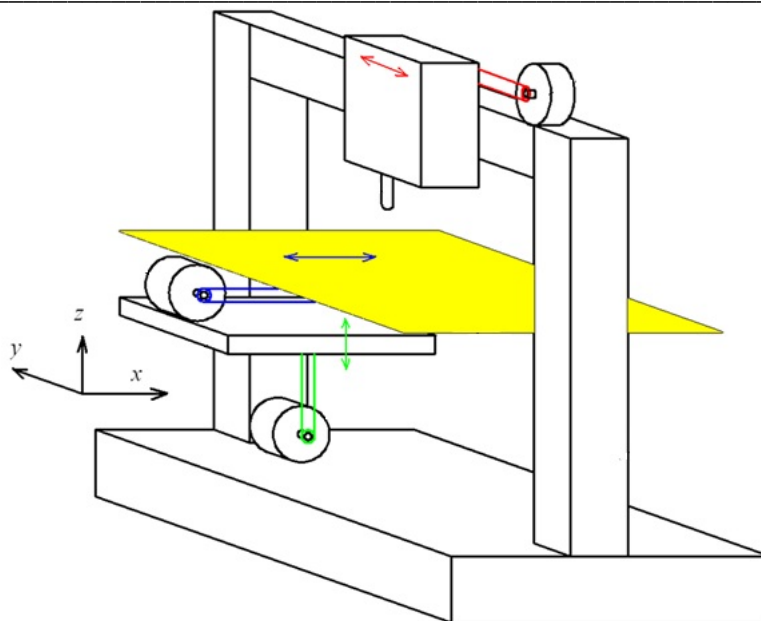


Рис.4. Загальна модель автоматизованого формування в різних галузях

Обробка матеріалів температурною дією також є типовим процесом у більшості галузей (Рис.5). До таких процесів відноситься, зокрема, термообробка металів [16], волого-теплова обробки текстильних матеріалів і виробів [17], теплова обробки при приготуванні і зберіганні їжі [17]

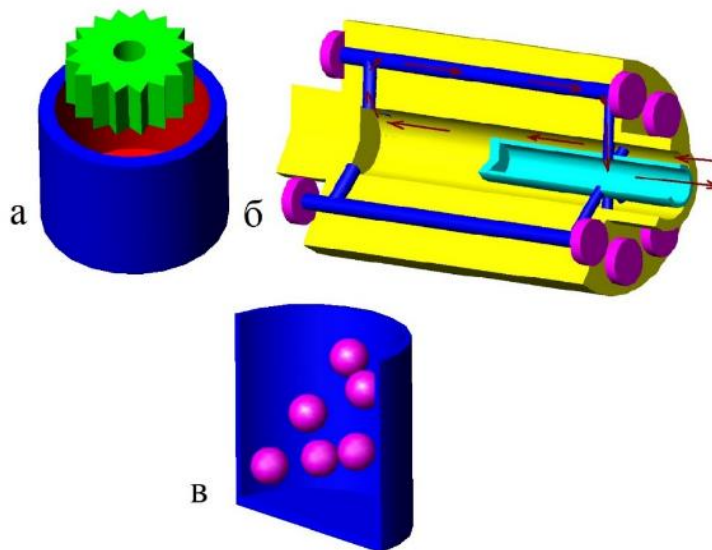


Рис.5. Теплові процеси в різних галузях промисловості а-машинобудування, б-легка промисловість, в – харчова промисловість

Моделювання процесів теплової обробки відбувається за допомогою аналітичних або чисельних методів. До аналітичних методів моделювання можна віднести рішення рівняння теплопровідності для простих форм, методи Фур'є – розкладання температурних полів у ряди, методи інтегральних перетворень. Чисельні методи використовуються для складних деталей та реальних умов обробки. При цьому найбільш розповсюдженими є метод скінченних різниць та метод скінченних елементів [19].

Сучасні універсальні автоматизовані рішення для процесів теплової обробки мають спільну тенденцію і структуру (рис.6).

Процеси складання і збирання також можуть бути розглянуті, як спільні для різних галузей виробництва.

У машинобудуванні збирання є завершальною стадією виготовлення виробу, коли окремі деталі та вузли поєднуються в єдину конструкцію [20-21].

У легкій промисловості (швейне, взуттєве виробництво) збирання має інший характер – це поєднання окремих текстильних, шкіряних чи синтетичних елементів у готовий виріб [22-23]. У харчовій промисловості під збиранням часто мається на увазі формування готових продуктів із напівфабрикатів або компонентів [24-25].

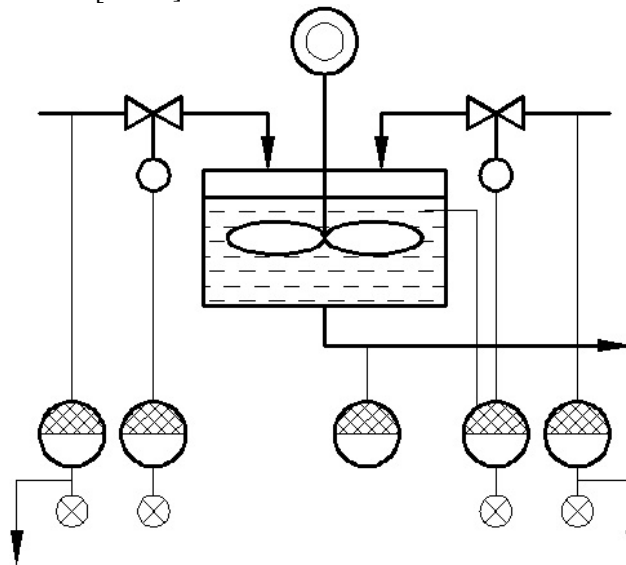


Рис.6. Універсальні технологічні рішення процесів теплової обробки

На рис.7 показані типові підходи до збирання в різних галузях. Зокрема Рис.7,а демонструє процеси збирання в стапелях, зокрема в авіаційному виробництві, рис.7.б – швейне обладнання для збирання деталей в легкій промисловості, рис.7,в – автоматизовану лінію по збиранню вареників.

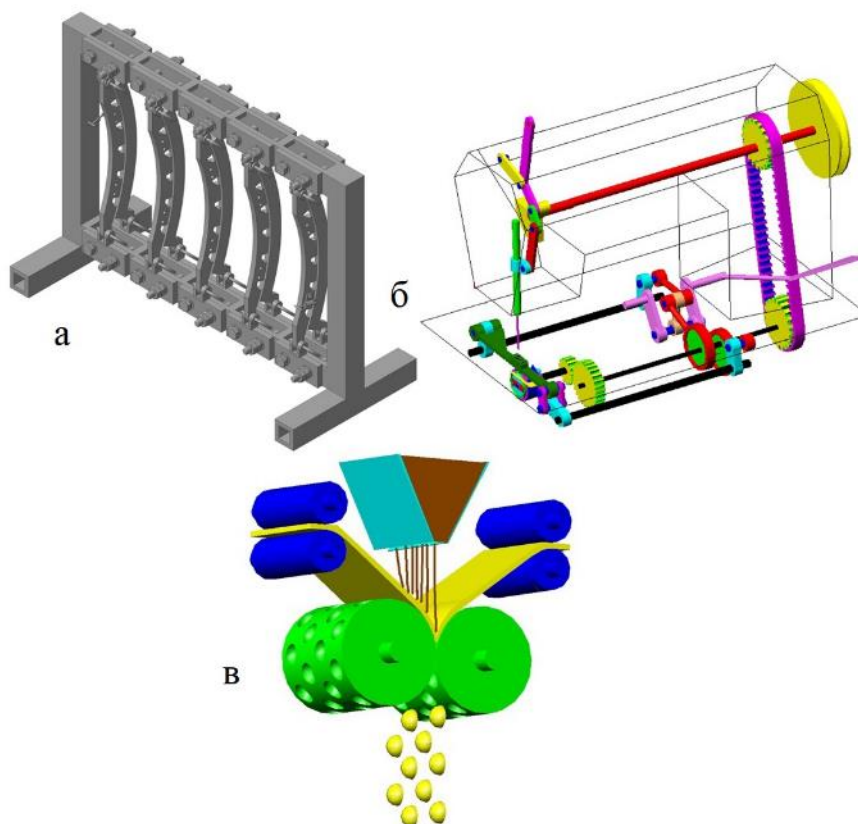


Рис.7. Процеси збирання в різних галузях а-машинобудування, б-легка промисловість, в – харчова промисловість

Отже: у машинобудуванні збирання – це точне поєднання механічних вузлів. у легкій промисловості – це технологічне поєднання деталей з тканин і шкіри, у харчовій – це формування готового продукту та його пакування. Порівняння напрямків збирання в різних галузях наведено в таблиці 1.

Табл. 1

Порівняння підходів до збирання у різних галузях

Галузь	Основні етапи збирання	Методи та обладнання	Особливості
Машинобудування	- Підготовка деталей - Складання вузлів - Загальне збирання - Регулювання і випробування	Ручне, механізоване, автоматизоване, конвеєри, складальні стенди	Висока точність, контроль зазору і сумісності, випробування працездатності
Легка промисловість	- Розкрій матеріалу - Попереднє з'єднання - Основне зшивання/склеювання - Фінальне збирання - Оздоблення	Швейні машини, клеєві преси, в'язальні автомати	Велика кількість дрібних деталей, акцент на естетиці й ергономіці виробу
Харчова промисловість	- Дозування і підготовка інгредієнтів - Формування продукту - Пакування - Контроль якості	Автоматизовані лінії, фасувальне й пакувальне обладнання	Високі вимоги до стерильності, швидкості, безпеки, контроль герметичності тари

Основною вимогою до процесів збирання є забезпечення взаємозамінності окремих елементів, що вимагає використання або створення в окремих галузях системи допусків, посадок і побудови розмірних ланцюгів.

Автоматизація і сучасні підходи демонструють загальні напрямки розвитку процесів збирання у різних галузях у вигляді роботизації виробництва [25]. Таким чином, можна стверджувати, що більшість галузей промисловості мають спільні підходи до виробництва, що дозволяє розробляти синергетичні оптимізаційні схеми з використанням досягнень в суміжних галузях.

Висновки. У ході дослідження було показано, що синергетичний підхід відкриває нові можливості для осмислення та організації технологічних процесів як цілісних систем, здатних до самоорганізації, адаптації та відновлення. Узагальнення універсальних принципів виробництва (різання, формування, температурна дія, збирання) дозволило встановити їх спільність для різних галузей промисловості, що підтверджує наявність єдиних закономірностей трансформації матеріалу у форму незалежно від сфери застосування.

Аналіз традиційних і синергетично орієнтованих моделей показав, що сучасні тенденції розвитку виробництва пов'язані з:

- переходом від лінійних до нелінійних і гібридних моделей управління процесами;
- інтеграцією методів філософії, інженерії та інформаційних технологій;
- масштабуванням процесів від рівня окремої операції до рівня виробничих кластерів і національних ланцюгів постачання;
- універсалізацією підходів до автоматизації та роботизації в різних галузях.

Особливого значення ці результати набувають для України, яка перебуває у фазі відбудови індустріальної інфраструктури. Синергетичне моделювання дозволяє не лише відновлювати виробничі потужності, але й формувати нову філософію промисловості — гнучкої, стійкої, ресурсоефективної та конкурентоспроможної.

Таким чином, синергетика технологічних процесів виступає методологічною основою для створення універсальної моделі організації виробництва, що поєднує стабільність і адаптивність. Її практичне застосування може стати стратегічним інструментом у забезпеченні технологічного суверенітету України та розвитку промисловості майбутнього.

Список використаних джерел

1. Haken H. Visions of synergetics // Journal of the Franklin Institute.-Vol.- 334.- Issues 5–6.- 1997. [https://doi.org/10.1016/S0016-0032\(97\)00032-X](https://doi.org/10.1016/S0016-0032(97)00032-X).

2. Ke-xin B., De-hua S., Ren-feng Z., Bai-zhou L. The Construction of Synergetic Development System of Product Innovation and Process Innovation in Manufacturing Enterprises.// *2006 International Conference on Management Science and Engineering.*- Lille, France -2006.-628-636. <https://doi.org/10.1109/ICMSE.2006.314020>.
3. Beregi R., Szaller Á., Kádár B. Synergy of multi-modelling for process control// *IFAC-PapersOnLine.*-2018.-Vol.51.-Issue 11.- 1023-1028. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.473>.
4. Skakun I. Philosophical and methodological prospects for the future of synergetics in the scientific picture of the world. *Futurity// Philosophy.*-2022.- Vol.1.- No. 4. <https://doi.org/10.57125/FP.2022.12.30.04>
5. Ellis J.L., Jacobs M., Dijkstra J., van Laar H., Cant J.P., Tulpan D., Ferguson N. Review: Synergy between mechanistic modelling and data-driven models for modern animal production systems in the era of big data//*Animal.*-2020.-Vol.14.-Supplement 2.-s223-s237. <https://doi.org/10.1017/S1751731120000312>.
6. Molinari A., Moufki A. The Merchant's model of orthogonal cutting revisited: A new insight into the modeling of chip formation// *International Journal of Mechanical Sciences.*-2008.-Vol. 50.- Iss.2,-124-131. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2007.07.015>.
7. Li B., Wang X., Hu Y. Li C.. Analytical prediction of cutting forces in orthogonal cutting using unequal division shear-zone model.// *The International Journal of Advanced Manufacturing,- Technology.*-2011.- 54.- 431–443. <https://doi.org/10.1007/s00170-010-2940-8>.
8. Hainan Z., Shen Z., Cao Z., Hou D., Jiang T. Ye X. Evaluation and Characterization of Ultrasonic Cutting of Monofilament Nylon//*Coatings.*- 2024.-14.- No. 4.- 462. <https://doi.org/10.3390/coatings14040462>.
9. King M.J. Slicing frozen meat with an oscillating knife.//*Meat Sci.*-1999.- 51(3).-261-269. [https://doi.org/10.1016/s0309-1740\(98\)00132-6](https://doi.org/10.1016/s0309-1740(98)00132-6). PMID: 22061861.
10. Dixit P.M., Dixit U.S. Modeling of Metal Forming and Machining Processes. -London: Springer-Verlag.- 2008.- 590p. <https://doi.org/10.1007/978-1-84800-189-3>.
11. Zhang Y., You M., Guo Q., Li C., Zhang D., Shi D., Zhang J., Sun Z., Zhang P., Wang T., Chen Li. A review of the formability of woven fabrics for composite materials.// *Polymer composites.*-2024.- Volume45.-Iss.16.-14498-14520. <https://doi.org/10.1002/pc.28837>.
12. Rozant O., Bourban J.-A., Månson E., Drapability of dry textile fabrics for stampable thermoplastic preforms.// *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing.*-2000.-Vol.31.-Iss.11.-1167-1177, [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(00\)00100-7](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(00)00100-7).
13. Janowicz M., Galus S., Szulc K., Ciużyńska A., Nowacka M. Investigation of the Structure-Forming Potential of Protein Components in the Reformulation of the Composition of Edible Films//*Materials.*- 2024.-17.- No. 4.- 937. <https://doi.org/10.3390/ma17040937>.
14. Neamah H.A., Tandio J. Towards the development of foods 3D printer: Trends and technologies for foods printing// *Heliyon.*- 2024.-Vol.10.-Iss.13.-e33882. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e33882>.
15. Li X. Multiscale computational modeling of 3D printed continuous Fiber reinforced polymer composites.//*Science Reports.*- 2025.-15.-17596. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-01556-4>
16. Laleh M., Sadeghi E., Revilla R.I., Chao Q., Haghdadi N., Hughes A.E., Xu W., De Graeve I., Qian M., Gibson I., Tan M.Y. Heat treatment for metal additive manufacturing.//*Progress in Materials Science.*-2023.-Vol.133.-101051. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2022.101051>.
17. Riabchykov M., Vilkov S., Nechipor S., Popova T. Two-dimensional studies of thermomechanical properties of textile materials for 3D formation.// *Vlakna a Textil.*- 2018.-25(2).-87-92.
18. Tsykhanovska I., Stabnikova O., Riabchykov M., Lazarijeva T., Korolyova N. Effect of Partial Replacement of Wheat Flour by Flour from Extruded Sunflower Seed Kernels on Muffins Quality Plant Foods for Human// *Nutrition.*- 2024.-79(4).-769-778.<https://doi.org/10.1007/s11130-024-01232-4>
19. Fatemi Mehrabani M., Aghaie-Khafri M., Esmaeilzadeh M. Computational Modeling of Phase Transformation in 15-5PH Stainless Steel Under Rapid Induction Heating Using FEM–JMAK Framework. In: Mirzazadeh, A., Molamohamadi, Z., Erdebilli, B., Babaee Tirkolae, E., Weber, G.W. (eds) *Science, Engineering Management and Information Technology. SEMIT 2025. Communications in Computer and Information Science.*- 2025.-vol 2651.- Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-032-04225-5_24
20. Rubidinov Sh. G. Automation of Assembly and Installation Processes in Mechanical Engineering. // *American Journal of Engineering , Mechanics and Architecture.*- 2023.- (2993-2637).-1(10).- 141-145. <https://grnjournal.us/index.php/AJEMA/article/view/1941>

21. Yunxi Z., Wang G., Zhang D., Zhang Q. Research on Assembly Process Simulation of Construction Machinery Arm Based on Digital Twin//*Engineering Proceedings*.- 2021.-10.-No.1.-52. <https://doi.org/10.3390/ecsa-8-11331>
22. Ewnetu M., Gzate Y. Assembly operation productivity improvement for garment production industry through the integration of lean and work-study, a case study on Bahir Dar textile share company in garment, Bahir Dar, Ethiopia// *Heliyon*.-2023.- Vol.9.- Iss.7.-e17917. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e17917>.
23. Teshome M.M., Meles T.Y., Yang C.-L. Productivity improvement through assembly line balancing by using simulation modeling in case of Abay garment industry Gondar//*Heliyon*.-2024.-Vol.10.-Iss.1.- e23585, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e23585>.
24. Savsar M., Kamel Elsaadany A., Hassneiah R., Alajmi A. Analysis of an Assembly Line in Food Processing Industry: A Case Study.// *Journal of Management & Engineering Integration*. -2017.-Vol.10.-Iss.1.-94-105.
25. Tsykhanovska I., Tovma L., Yevlash V., Lazarieva T., Blahyi O., Alexandrov A., Riabchykov M., Svidlo K., Korolyova N., Gontar T. Development of technology of crackers wuth increased food value to improve the food supply to military servants during a special period.// *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*.-2024.- 2(11-122).- 24-37. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.276429>.
26. Barasa S., Etene Y. Robotics in Food Manufacturing Industry in the Industry 4.0 Era. // *International Journal of Computer Science and Mobile Computing*. IJCSMC.-2023.-Vol.12.-Iss.8.-72 – 77. <https://doi.org/10.47760/ijcsmc.2023.v12i08.009>.

Дата надходження статті до видання: 14.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.03.2026

Дата оприлюднення 14.04.2026