

УДК 517.977.58: 004.9 : 621.9

**ЗАСТОСУВАННЯ МОДЕЛІ ЛОТКИ-ВОЛЬТЕРРИ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ
АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ***Даценко О. Р., Клочко Т. Р.**Національний технічний університет України**«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна**E-mail: oliadatsenko00@gmail.com; t.klochko@kpi.ua*

У статті показано особливості організації технологічних процесів обробки деталей при застосуванні автоматизації роботи підприємства, а водночас визначено основні проблеми, пов'язані з виробничими особливостями, технологічними процесами, проблемами збереження та раціонального використання ресурсів. Показано, що ці проблеми вирішуються оптимізацією виробничих процесів, зокрема технологічного процесу виготовлення точних деталей приладів.

Оптимізація виробництва завжди була досить актуальним питанням для багатьох підприємств у різних галузях виробництва. Це не дивно, адже і держава, і приватний бізнес завжди шукають нові технології та можливі шляхи скорочення видатків, збільшення прибутків, вирішення проблеми загального підвищення ефективності виробництва. Однак, після початку повномасштабного вторгнення Росії на територію суверенної держави України й масового руйнування виробничої та критичної інфраструктури, цивільних будівель та житла, питання ефективного використання наявних та віцілих ресурсів стало надзвичайно гостро. За офіційними даними, станом на квітень 2022 року, збитки промислових активів становлять \$6,7 млрд. Отже, саме тому виникає необхідність оптимізації виробництва за умови його автоматизації.

На підставі дослідження актуального стану оптимізації автоматизованих систем механічної обробки деталей та основних наукових досліджень за цією темою розглянуто підходи до обґрунтування формалізованої оптимізаційної моделі, спрямованої на підвищення ефективності приладобудівного виробництва. Запропоновано оптимізаційне рішення, що ґрунтується на використанні математичної моделі Лотки-Вольтерри, яка дозволить оптимізувати роботу систем виготовлення точних деталей за умови автоматизації виробництва. Результати проведеного дослідження довели доцільність таких біонічних підходів до автоматизації технологічних структур виробничого підприємства, оскільки запропоновану модель здебільшого використовують у дослідженнях біологічних процесів. Отже, обґрунтовані аналогії дозволили визначити повний спектр задач виробництва, включаючи логістичні проблеми та проблеми персоналу на основі саме конкурентних моделей.

Ключові слова: технологічне обладнання; автоматизована система; оптимізація виробничих процесів; модель Лотки-Вольтерри; метод Рунге-Кутти; гнучке автоматизоване виробництво.

Вступ. Постановка проблеми

Сучасне приладобудівне виробництво має на меті створення прецизійних сенсорів, контрольно-вимірювальних приладів, модулів тощо автоматизованих систем для різних сфер діяльності, але це надточні прилади, які мають технічні параметри високої точності. Досить значний сегмент приладобудівного виробництва належить виготовленню прецизійних деталей приладів, які вимагають механічної обробки з використанням верстатного устаткування [1, 2]. Здебільшого сучасні підприємства застосовують автоматизоване обладнання, що дозволяє організувати високоєфективне виробництво за умови забезпечення необхідної точності обробки та якості продукції. Звісно, що ці вимоги до кінцевої продукції, зокрема деталей приладів, необхідно забезпечити завдяки автоматизації структурних одиниць підприємства, зокрема дільниць, цехів тощо, а також забезпечення логістики

підприємства, яка містить внутрішні та зовнішні операції.

Заміна універсальних металорізальних установок автоматизованими верстатами з ЧПК дозволяє приблизно в 5 разів скоротити трудомісткість виготовлення деталей. Незважаючи на такий прогрес, залишається досить багато ручних операцій, пов'язаних і з повторним виготовленням деталей в партії, і з переходом на обробку нової деталі. Отже, скорочення втрат допоміжного часу та підвищення ефективності роботи верстатів з ЧПК досягаються внаслідок збільшення кількості інструментів в магазині верстата, оснащенням верстатів автоматичними пристроями подачі заготовок на стіл верстата і видалення готової продукції на позицію очікування. Централізоване керування верстатами з ЧПК за командами, що надходять від центральної ЕОМ, дозволяє знизити витрати на

підготовку керувальних програм і централізувати роботу дільниць і цехів.

Технічні можливості різних видів гнучкої виробничої системи (ГВС) постійно покращуються. Гнучкий виробничий модуль (ГВМ) надає можливість здійснювати: автоматичну зміну заготовок, інструментів, вимірювальних пристроїв та автоматичний відвід стружки із зони різання. ГВМ якісно відрізняється підвищеною надійністю всіх систем, що виключає постійний контроль оператора, наявність приладів контролю якості та технічної діагностики, можливість приєднання до гнучкої виробничої системи (ГВС) внаслідок зв'язку з ЕОМ вищого рівня. У сучасному приладобудуванні переважає створення широкої гами ГВМ з високим рівнем автоматизації та надійності [3]. Розробка гнучких модулів різного вузького технологічного призначення надає змогу вирішити проблему повсюдного впровадження ГВС і принципів гнучкого виробництва. ГВС має достатньо високий рівень виробничої гнучкості, що явно виражається в потенційній можливості автоматичного переходу на обробку будь-якої заданої деталі та функціонування при відмові окремих елементів системи. ГВС може продовжувати функціонувати в другу і третю зміну автоматично та при обмеженій кількості персоналу (або взагалі без нього) та легко вбудовуватися в гнучке автоматизоване виробництво (ГАВ).

Перспективи розвитку ГАВ побудовані на потребах в усе більш масштабній інтеграції в складі однієї системи різних виробничих функцій і повній передачі цих функцій під контрольоване керування від ЕОМ. Зараз кожне велике підприємство має елементи ГАВ. Попит на виробництво по гнучкій технології є дуже великим, але необхідність великих інвестицій у впровадження ГВС стримує деякі підприємства, які, однак, охоче погоджуються на часткове покриття запиту. Впровадження тільки однієї ГВС зазвичай не здатне істотно покращити загальні економічні показники цілого підприємства, тоді як комплексне впровадження декількох ГВС в поєднанні з системою автоматизованого проектування (САПР) конструкції та технології й автоматизованою системою технологічної підготовки виробництва (АСТПВ) надасть не просте додавання їх окремих ефективностей, а багаторазове їх примноження.

Основою для створення ГВС будь-якого масштабу є технологічний процес (ТП) механічної обробки. Таким чином, початковому етапу проектування ГВС передують досить глибоке та детальне опрацювання питань автоматизації та оптимізації. При розробці ГВС достатньо часто переважає так званий конструкторський підхід, в рамках якого ГАВ зображується як сукупність виробничого устаткування, призначеного для виконання різного роду механічної обробки, транспортування заготовок та інструменту до робочих місць. Однак, під час проектування приділяється недостатня увага

проблемам базування та точності виготовлення деталей на взаємопов'язаному устаткуванні, тому трапляються випадки, коли під існуюче обладнання доводиться оптимізувати технологічний виробничий процес.

Найширшого застосування ГАВ отримали в механообробці, де сформувалися достатньо типові структури – модулі, об'єднані в дільниці або лінії з транспортно-складськими системами (АТСС). Найбільшого розвитку отримали обробка корпусних деталей, обробка тіл обертання та листових матеріалів [4, 5]. Така ситуація зумовлена тривалістю технологічного циклу, що є властивим для процесів обробки корпусних деталей, та в свою чергу забезпечує підвищення продуктивності до 200-300 % і надає можливість системі працювати без оператора протягом цілої зміни.

Якщо визначати особливості ГВС саме для механічної обробки, до них можна віднести відповідні основні типи обладнання такі, як:

- ГВС виготовлення деталей типу тіл обертання;
- ГВС виготовлення плоских деталей;
- ГВС виготовлення корпусних деталей.

Основні виклики для розвитку ГВС для обробки корпусних деталей пов'язані з розширенням номенклатури, точністю базування, створенням типових базових пристроїв і накопичувачів різної конструкції, збільшенням кількості потрібного для обробки інструменту.

Розвиток ГВС для деталей типу тіл обертання йде достатньо повільно через необхідність вирішення складнощів пов'язаних з розширенням номенклатури з боку розмірів та форм, завантаженням і розвантаженням верстатів, створенням єдиного змінного оснащення для розміщення і закріплення деталей [6, 7].

Вибір компонування ГВМ для механічної обробки в загальному вигляді здійснюється з урахуванням особливостей деталей, які підлягають механічній обробці; чинного технологічного процесу; основного технологічного обладнання з урахуванням потенціалу його автоматизації; організаційних видів виробництв (серійність, партійність, транспортування між верстатами); параметрів розподільчих приладів; техніко-економічних показників різних видів роботизації.

Характеристики гнучких виробничих систем та проблеми їх оптимізації

Розробка методів оптимізації керування гнучкими виробничими системами є досить перспективною науковою задачею, оскільки вона має важливе практичне застосування: використання оптимізаційних методів для створення оптимальної будови системи дасть змогу зменшити витрати на виробничий процес, а тому зменшити вартість виготовлення деталей або ж приладів, водночас, не потребуючи інвестицій в переоснащення технічних засобів: верстатів, транспортних модулів тощо

[8, 9]. Окрім того, оптимізація та вдосконалення ТП та технічної бази виробництва, визначення оптимального завантаження виробничого обладнання дозволить зменшити час технологічного процесу, тобто тривалість виготовлення та транспортування виробів за рахунок ефективного використання обладнання та зменшення часу простоїв.

Основні схеми ГВМ включають такі групи обладнання:

- транспортне обладнання (приймально-передавальний, приймальний пристрій);
- основне технологічне обладнання (верстати, оснащення верстатів, різальний інструмент);
- обладнання системи керування (електро-, гідро-, пневмоелементи автоматики, пульт керування);
- прилади та інструменти технічного контролю деталей (спеціальне обладнання, контрольно-вимірювальні напівавтомати);
- специфічне обладнання (кантувач, орієнтатор).

Типова структура ГВМ для механічної обробки деталей, що зображена на рис. 1, містить в собі наступні складові: 1 – магазин з інструментами; 2 – верстат з ЧПК; 3 – стіл верстату; 4 – автоматизований завантажувальний пристрій.

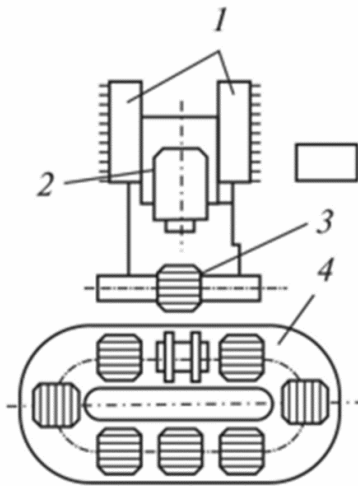


Рис. 1. ГВМ з одним верстатом з ЧПК та автоматизованим завантажувальним пристроєм [9]

Гнучкість системи керування визначається тим, що оптимізація технологічного процесу може (й повинна) продовжуватись після запуску роботи цієї системи. Гнучка система керування (ГСК) надає можливість якнайбільш оптимально побудувати маршрути обробки та транспортні потоки, спираючись на різні критерії: максимальний випуск продукції, задоволення вимог складання, одержання найвищих показників від обладнання для різання, оптимального планування обробки за номенклатурою. ГСК мусить мати теку інструкцій щодо керування процесом механічної обробки, мати змогу вдосконалюватись, записуючи в

пам'ять специфічні інструкції, що пов'язані із змінами виробничої ситуації.

Організаційна гнучкість в основному залежить від гнучкості обслуговуючого персоналу дільниці, тобто опанування суміжних спеціальностей в бригаді, чим можна досягти умов взаємозамінюваності персоналу в разі зміни типів діяльності виробництва.

Основним напрямом оптимізації системи є упорядкування виробничої бази за допомогою групових методів обробки й автоматизації проектування технологій. Також, великого значення набуває впровадження системи автоматизації проектування технології в загальну структуру ГАВ. Основними особливостями технологічної підготовки виробництва в умовах ГАВ є: деталізований опис технологічних процесів і прийомів та об'єднана автоматизація основних та допоміжних операцій, оптимізація існуючих технологій, що має на меті збільшення продуктивності та якості виробництва.

Основні моделі оптимізації автоматизованої системи обробки

При виборі моделі для оптимізації потрібно враховувати всі важливі особливості, однак, моделі, що в основному використовуються можна визначити як:

- моделі лінійного математичного програмування: методи цілочисельного програмування;
- моделі систем масового обслуговування;
- мережеві моделі, що представляють виробничу систему у вигляді графів;
- моделі класичної оптимізації;
- статистичні моделі;
- структурно-логічні моделі тощо.

Моделі, отримані внаслідок лінійного математичного програмування мають обмежуватись у розв'язанні задачі та використовувати залежності, що характеризуватимуть параметри системи. Методи цілочисельного програмування застосовуються у випадку, коли змінні приймають цілі значення. Як відомо [8, 10, 11, 12], предметом математичного програмування є способи математичного моделювання оптимізаційних задач, визначення необхідних і достатніх умов наявності екстремумів (оптимумів), розробка і дослідження методів визначення оптимальних рішень, що обминають пошук екстремальних рішень прямим перебором.

Аналіз існуючих моделей довів, що на сьогодні не існує уніфікованого методу оптимізації гнучких виробництв. Через досить складну структуру ГВС в цілому та безліч особливостей гнучких виробництв на різних підприємствах, а іноді і зовсім різних структур гнучких систем на одному виробництві, досить важко, а іноді і неможливо обрати такий метод оптимізації, що адекватно покривав би всі потреби різних систем. Тому, спираючись на такі параметри, як: кількість технологічного обладнання, кількість різних типів модулів

ГВС, характеристики обладнання, характеристики продукції, виробниче панування підприємства, можна зробити вибір методу оптимізації, що найліпше підходить для конкретної системи.

Отже, мета роботи полягає в створенні аналітичної моделі, що оптимізуватиме автоматизовану

систему обробки деталей з урахуванням необхідних параметрів виробничої дільниці (рис. 2), що надаватиме можливості підвищення ефективності роботи виробництва.

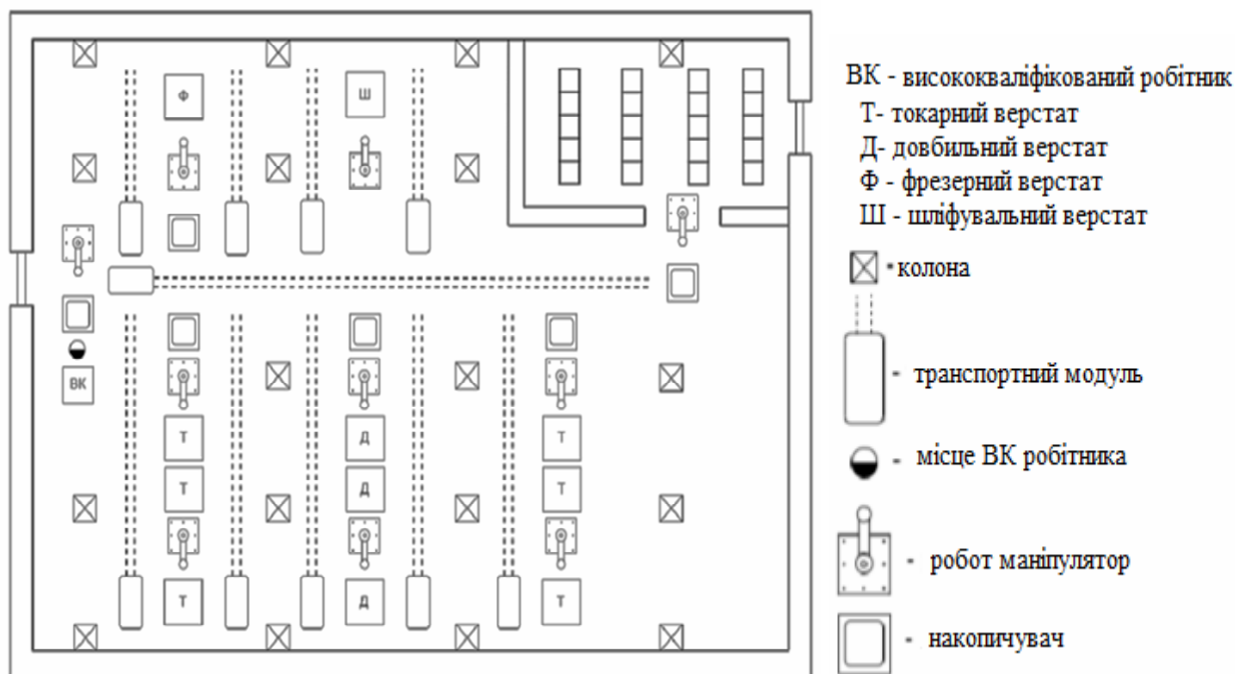


Рис. 2. Структурно-компоувальна схема автоматизованої дільниці виробництва, що моделюється

Моделювання цільової функції оптимізації функціонування автоматизованої системи обробки деталей

Формалізація завдання у математичний вигляд перетворює процес технологічного проектування та оптимізації з сукупності виду припущень і наведення аналогій у сукупність виду строгих розрахунків. Водночас, сама форма визначення технологічного процесу та його елементів має змогу бути описана на базі апарату математичної логіки: сам зміст технологічного процесу, що характеризується деякими параметрами об'єктів виробництва, може бути вираженим за допомогою засобів теорії множин, а якісні зв'язки – через кількісні залежності логічних функцій.

ТП саме механічної обробки деталей може бути розглянутим як відносно відокремлена ланка виробничого процесу, що, однак, пов'язана з іншими частинами; як функція (процес якісної і кількісної переробки об'єктів виготовлення з кондиції заготовок в стан готових деталей). Як структурна система, ТП представляє собою об'єднання взаємозв'язаних рівнів, операцій і переходів. Процеси, які описуються перерахованими вище властивостями, можуть бути розглянуті як системні. Це надає змогу для використання набору засобів кібернетики та системотехніки при опрацюванні методів аналізу ТП та змогу застосовувати засоби автоматизації технологічних процесів [13].

Використання методів системного аналізу в заданих умовах проектування та оптимізації ТП надає змогу упорядкувати вихідні дані та визначити основні шляхи одержання найбільш оптимальних рішень.

Системи, які описують ТП механічної обробки, відрізняються цілісністю взаємозв'язаних елементів, які складають систему, визначеністю структури, що, в свою чергу, дозволяє багаторівневу ієрархію елементів; перспективою взаємодії з іншими системами, що робить дану систему складовою систем більш високого рівня. Під час дослідження такого типу систем потрібно враховувати велике число змінних і обирати такі, що мають найсильніший вплив на систему.

Чутливість та стійкість являються відображенням об'єктивних характеристик динамічних систем. Універсальність досягається тоді, коли одна і та ж математична модель може бути застосована для різних систем. Таким чином, вважаємо, що математична модель побудована правильно, якщо вона відповідає раніше перерахованим вимогам, а також, коли її вивчення є набагато менш витратним з огляду на ресурси та більш простим, порівняно з реальною системою [14].

Математичних моделей, які описують конкурентні процеси існує не так багато, але враховуючи, що більшість моделей – універсальні, є достатній вибір моделей зі своїми особливостями.

Потрібно зазначити, що такі моделі не були розроблені для вирішення технічних задач, однак вони можуть застосовуватись (і досить успішно застосовуються наразі) і в технічних галузях.

Однією з таких моделей є модель Лотки-Вольтера. Вона описує тип конкуренції між видами «хижак-жертва», тобто, коли взаємодія між популяціями призводить до збільшення чисельності однієї з них (хижаки) та зменшення іншої (жертви) [15, 16].

Конкурентні процеси є важливою областю досліджень динаміки складних систем. Саме тому дослідження, створення, тестування та застосування математичних моделей є важливою складовою для вивчення конкурентних процесів у різних сферах людського життя [17].

Конкуренція в загальному сенсі може бути описана як суперництво між окремими дійовими суб'єктами системи: видами, людьми, виробництвами тощо, які зацікавлені у досягненні однієї мети.

Однак у тих випадках, коли попит практично необмежений, конкуренція між суб'єктами змінюється на їх співпрацю в процесі взаємодії.

Для створення формалізованої моделі оптимізації виробничої системи обробки деталей можна застосувати модель Лотки-Вольтерри. Потрібно звернути увагу на те, що математична модель Лотки-Вольтерри є конкурентною – описує конкуренцію видів хижаків та жертв.

У нашому випадку при розгляді виробничих ситуацій можна визначити аналогії хижак-жертва з реальними параметрами технологічної системи обробки. Здебільшого це стосується і проблем виробництва в частині забезпечення логістики (внутрішньої та зовнішньої), часових параметрів виробництва, кількості персоналу, який забезпечує роботу структури автоматизованого виробництва.

Для застосування такої моделі в галузі виробництва приладів потрібно чітко визначити взаємозалежні конкурентні процеси на виробничій дільниці (рис. 2).

Цільова функція F оптимізації роботи автоматизованої системи за умови використання класичної моделі Лотки-Вольтерри набуває вигляду:

$$f'(X) = \text{extremum} F = \begin{cases} x' = x(a - by) \\ y' = y(-d + cx) \end{cases},$$

x' – змінення робочих змін у годинах;

y' – приріст кількості транспортних модулів;

x – початкова кількість робочих змін у годинах;

y – початкова кількість транспортних модулів;

a – коефіцієнт, за яким визначаємо: чим довше робота не виконана, тим більше спливає часу;

b – коефіцієнт, за яким визначаємо: чим більше транспортних модулів, тим менше робочих годин;

c – коефіцієнт, за яким визначаємо, чим довше

транспортний модуль не використовується, тим менше у ньому потреби;

d – коефіцієнт, за яким визначаємо, чим більше невиконаної роботи, тим більше виникає потреба у транспортних модулях.

Одним із таких конкурентних співвідношень є відношення між людино-годинами та транспортними модулями у структурі дільниці, як показано на структурно-компонувальній схемі автоматизованої дільниці виробництва (рис. 2). Так, за умови більшої кількості транспортних модулів можна обслуговувати дільницю з більшою кількістю людино-годин.

Однак, одночасно з цим, при більшій кількості транспортних модулів зростає вірогідність простою даної одиниці технологічного обладнання. Отже, транспортні модулі на дільниці мають схожі властивості на вид хижаків.

Таким чином, людино-години відповідають виду жертв, адже зі зменшенням виду хижаків (транспортних модулів), збільшується кількість продукції, виготовленої за деяку кількість людино-годин, що мала б бути транспортована, але через недостатню кількість транспортних модулів накопичується на виробничому устаткуванні. Така поведінка відповідає поведінці жертв за умови зменшення популяції хижаків у біологічній моделі.

Так можна зробити біонічні аналогії математичної моделі з умовами дії біологічних об'єктів та об'єктів технічних або технологічних, що надає змогу кращого розуміння цих взаємодій. Саме такий біонічний підхід до розгляду виробничих процесів може надавати повного розуміння всебічних проблем автоматизованого виробництва в частині оптимізації структури автоматизованої дільниці, яка забезпечує виконання технологічного процесу обробки деталей точних приладів.

Найбільш ефективними методами розв'язання задачі Коші є методи Рунге-Кутти. Вони ґрунтуються на апроксимації шуканої функції у межах кожного кроку многочленом, який отримано за допомогою розкладання цієї функції в околі кроку h кожної i -ої точки в ряд Тейлора.

Для вирішення поставленої задачі обрано як найбільш доцільний для наших досліджень класичний метод Рунге-Кутти, що має четвертий порядок точності. Він є однокроковим – це означає, що для обчислення значення функції у точці x_{i+1} використовується значення попередньої точки x_i .

Метод Рунге-Кутти четвертого порядку має наступний вигляд:

$$y_{i+1} = y_i + \frac{h}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4),$$

$$x_{i+1} = x_i + h$$

де h – крок інтегрування.

Розрахунок коефіцієнтів k_i виконується за наступними формулами:

$$\begin{cases} k_1 = f(x_i, y_i), \\ k_2 = f\left(x_i + \frac{h}{2}, y_i + \frac{h}{2}k_1\right), \\ k_3 = f\left(x_i + \frac{h}{2}, y_i + \frac{h}{2}k_2\right), \\ k_4 = f(x_i + h, y_i + hk_3). \end{cases}$$

Порядок розв'язання даної системи диференціальних рівнянь виконується наступним чином:

- для x

$$\begin{cases} k_1 = x(a - by), \\ k_{21} = \left(x + \frac{h}{2}\right)\left(a - b\left(y + \frac{h}{2}k_{11}\right)\right), \\ k_{31} = \left(x + \frac{h}{2}\right)\left(a - b\left(y + \frac{h}{2}k_{21}\right)\right), \\ k_{41} = (x + h)(y + hk_{31}) \\ x_{i+1} = x_i + \frac{h}{6}(k_{11} + 2k_{21} + 2k_{31} + k_{41}) \end{cases}$$

- та для y

$$\begin{cases} k_{11} = y(-c + dx), \\ k_{21} = \left(y + \frac{h}{2}k_{11}\right)\left(-c + d\left(x + \frac{h}{2}\right)\right), \\ k_{31} = \left(y + \frac{h}{2}k_{21}\right)\left(-c + d\left(x + \frac{h}{2}\right)\right), \\ k_{41} = (y + hk_{31})(-c + d(x + h)) \\ y_{i+1} = y_i + \frac{h}{6}(k_{11} + 2k_{21} + 2k_{31} + k_{41}) \end{cases}$$

Початкові параметри для системи диференціальних рівнянь було підібрано так, щоб робота автоматизованої системи механічної обробки деталей мала можливість бути набагато більш оптимізованою. Параметри a , b , c , d відображають вірогідності, що впливають на поведінку математичної моделі Лотки-Вольтерри.

Аналіз результатів дослідження

За допомогою отриманої математичної моделі на основі моделі Лотки-Вольтерри та її обчислення чисельним методом Рунге-Кутти четвертого порядку, можна побудувати графік, що буде відображати залежності даної системи (рис. 3 та рис. 4).

Початкові умови та параметри системи диференціальних рівнянь:

$$\begin{aligned} h &= 0,1 \text{ крок обчислень;} \\ i &= 10 \text{ кількість ітерацій обчислень;} \\ x_0 &= 16 \text{ годин (2 робочі зміни);} \\ y_0 &= 10 \text{ транспортних модулів;} \\ a &= 0,64; \\ b &= 0,08; \\ c &= 0,8; \\ d &= 0,1. \end{aligned}$$

Для додаткових відомостей прикладу було підібрано наступні параметри:

$$\begin{aligned} a &= 0,36; \\ b &= 0,04; \\ c &= 0,84; \\ d &= 0,07. \end{aligned}$$

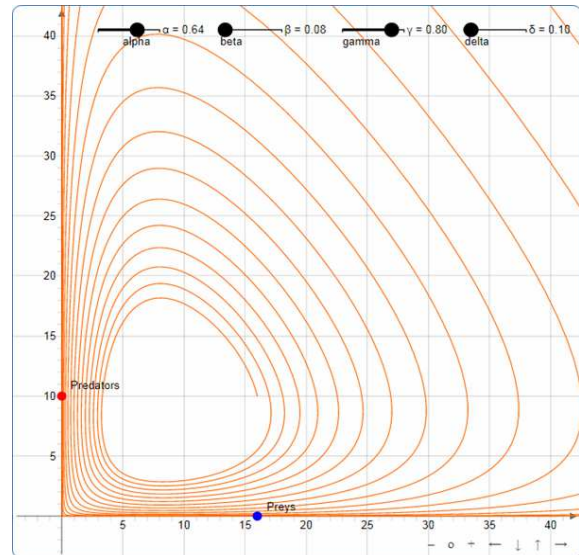


Рис. 3. Графік залежності транспортних модулів від кількості робочих змін із параметрами $a=0,64$, $b=0,08$, $c=0,8$, $d=0,1$.

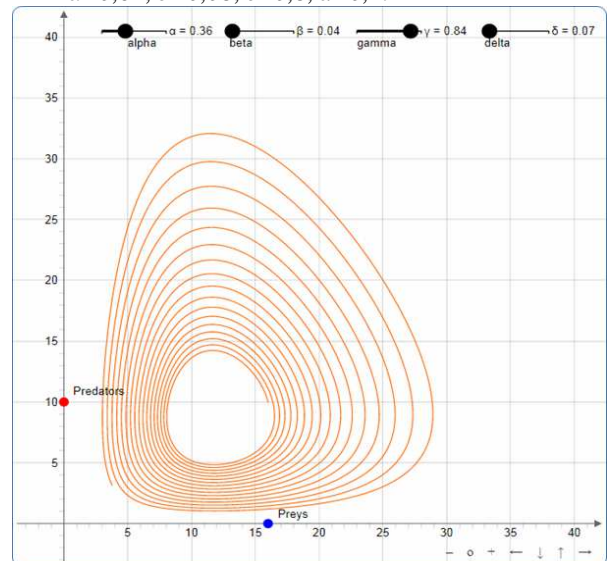


Рис. 4. Графік залежності транспортних модулів від кількості робочих змін із параметрами $a=0,36$, $b=0,04$, $c=0,84$, $d=0,07$.

Для того, щоб оптимізувати роботу автоматизованої системи механічної обробки деталей, необхідно знайти стаціонарну точку отриманої системи, що представлятиме собою стійкий вузол (рис. 5, рис. 6).

Якщо скорегувати початкові точки обох систем на (8; 8) і (9;12) відповідно, та потім побудувати нові графіки залежностей, можна побачити як системи утворюють стійкі вузли (рис. 5 та рис. 6),

які відповідають за набуття стаціонарності дії системи.

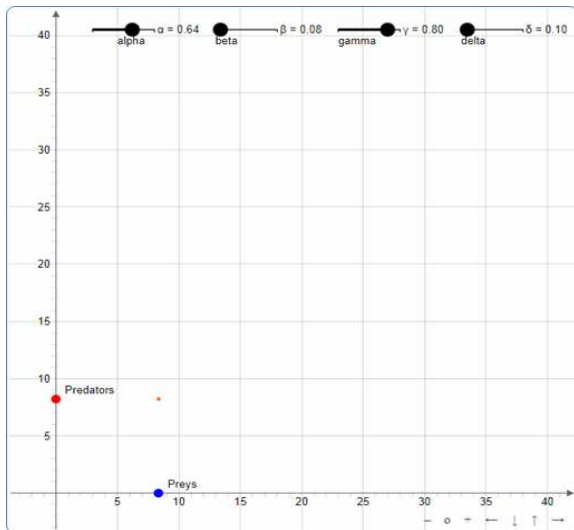


Рис. 5. Скоригований графік залежності транспортних модулів від кількості робочих змін у точці (8;8) із параметрами $a=0,64$, $b=0,08$, $c=0,8$, $d=0,1$

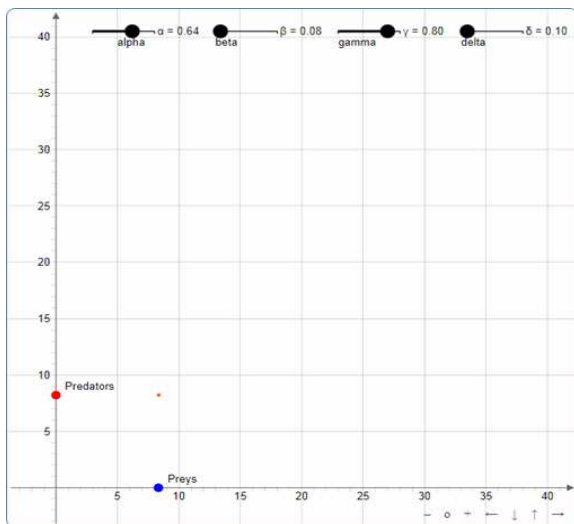


Рис. 6. Скоригований графік залежності транспортних модулів від кількості робочих змін у точці (9;12) із параметрами $a=0,36$, $b=0,04$, $c=0,84$, $d=0,07$

Адекватність математичного опису в регресійних моделях оцінюють зіставленням результатів статистичного опрацювання пробних дослідів, проведених за одних і тих самих параметрів процесу, з розрахунковими значеннями величин, обчислених на основі математичної моделі. У нашому випадку маємо спиратися на адекватність самої початкової моделі Лотки-Вольтерри, що взята за основу математичної моделі.

Виходячи з отриманих результатів, можна сказати, що роботу автоматизованої системи за визначених умов механічної обробки деталей вдалося оптимізувати з 2-х робочих змін та 10-ти

транспортних модулів до 1-ї робочої зміни та 8-ми транспортних модулів у першому випадку, і до 1,5 робочі зміни та 9-ти транспортних модулів у другому випадку відповідно.

Отже, можна дійти висновку, що параметри, які були враховані у першому випадку, є більш вдалим для оптимізації автоматизованої системи механічної обробки деталей.

Для реалізації додатку для оптимізації керування виробничою дільницею механічної обробки деталей було обрано мову програмування Java для серверної частини та мову TypeScript для клієнтської частини.

Тип архітектури додатку – монолітний, за допомогою цього типу архітектури розробка додатку є швидшою і в майбутньому легше підтримувати його роботу. Як відомо [18], монолітний тип архітектури – архітектурний стиль, що визначає додаток як одне ціле, та включає в себе високий рівень взаємозв'язку між компонентами, на відміну від мікросервісної архітектури, яка визначає кожен компонент додатку як окрему одиницю, що може існувати автономно. До переваг обраного типу архітектури можна віднести:

- швидкий початок розробки проєкту, адже не потрібно витратити час на декомпозицію логіки на окремі мікросервіси;
- простоту написання інтеграційних тестів;
- тривіальне розгортання додатку на сервері.

Взаємодія користувача з системою відбувається за допомогою графічного інтерфейсу користувача завдяки запропонованому варіанту програмного забезпечення роботи. У користувача є можливість завантажити отриманий графік у різних файлових форматах, зокрема на комп'ютер (рис. 7) для подальшого аналізу та прийняття рішень.

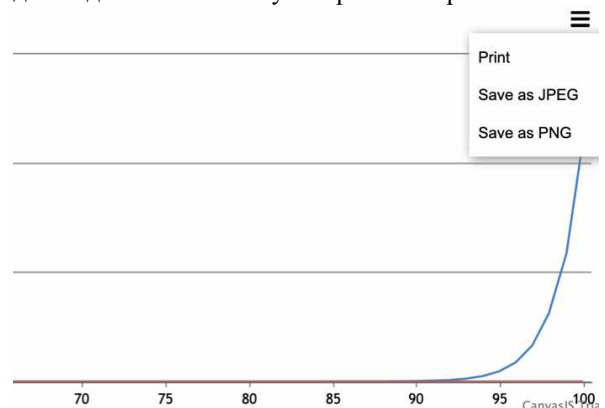


Рис. 7. Функція завантаження графіка на ПК користувача

Кінцевий графік оптимізації автоматизованої дільниці (рис. 8) надає чітке уявлення про стан роботи автоматизованої дільниці підприємства. Отже, видно: графік, що описує результат обчислення моделі оптимізації, зростає (пряма $Y(t)$), а пряма, яка описує стан системи без застосування запропонованої моделі, є сталою.

На рис. 9 зображено схему архітектури запропонованого додатку.

Таким чином, на підставі аналізу отриманих результатів можна дійти висновку, що оптимізація роботи пройшла успішно. Отже, вважаємо, що параметри після застосування запропонованої математичної моделі є оптимальними для роботи дільниці механічної обробки деталей приладів. Водночас, внаслідок проведеної оптимізації зміне-

но наступні параметри: час виробництва зменшився до однієї робочої зміни, а кількість транспортних модулів на дільниці становить до 10.

Застосування запропонованої формалізованої моделі дозволило врешті спрямувати оптимізацію на вирішення проблеми збереження енергоресурсів та витрат на виробництво.

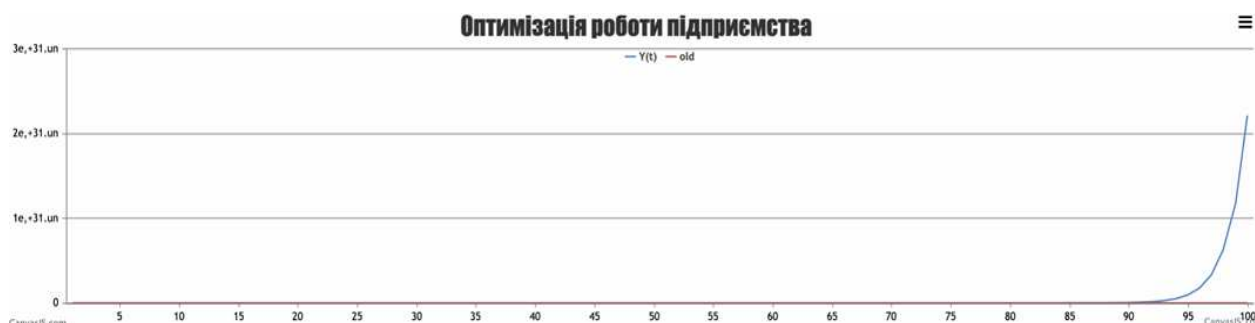


Рис. 8. Графік оптимізації роботи автоматизованої структурної одиниці підприємства

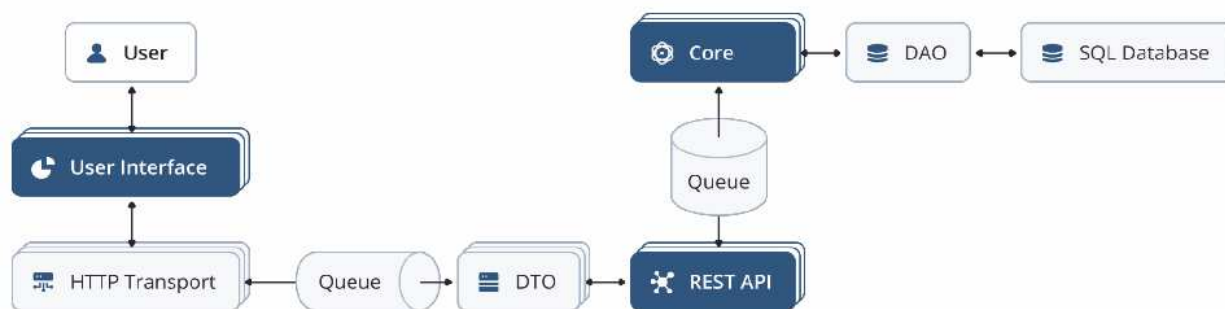


Рис. 9 Архітектура додатку

Висновки

В роботі висвітлено основні проблеми сучасного виробництва, які спрямовані на підвищення продуктивності роботи підприємства, енерго- та ресурсозбереження внаслідок застосування автоматизованого технологічного обладнання. Водночас, визначено значення можливості врахування логістичних особливостей підприємства, що сприяє забезпеченню розподілу та оптимального використання ресурсів і готової кінцевої продукції. Було досліджено основні принципи проектування внутрішньої логістики на виробництві.

Визначені основні проблеми організації роботи автоматизованого виробництва та необхідність оптимізації саме окремих сегментів та загального виробничого процесу. Водночас, виокремлено роль та місце саме автоматизації технологічного процесу механічної обробки деталей як поширеного способу отримання деталей надвисокої точності, що необхідно для створення прецизійних приладів та систем.

На підставі аналізу основних методів та моделей оптимізації виробничих систем проведено порівняння таких методів для визначення найбільш доцільного для застосування при оптимізації приладобудівного автоматизованого виробництва. Було досліджено, для яких систем краще підходять ті чи інші математичні моделі. В результаті було визначено, що наразі не існує універсальних математичних моделей для оптимізації виробничих систем виготовлення точних деталей приладів, тому для кожної конкретної системи слід визначати ключові параметри, особливості формалізації та створювати математичну модель з урахуванням параметрів об'єктів. Окрім того, було проаналізовано особливості та характеристики гнучких систем саме для механічної обробки деталей.

Обґрунтовано математичну модель системи на основі моделі Лотки-Вольтерри, вирішено її рівняння методом Рунге-Кутти та описано результати. За допомогою цих дій вдалось оптимізувати систему автоматизованої дільниці виробництва

згідно заданих параметрів. Результати моделювання надають змогу стверджувати, що застосування конкурентної моделі видів Лотки-Вольтерри для оптимізації виробничого процесу виявилось досить ефективним методом вирішення задач такого типу. Таким чином, застосування запропонованої моделі для вирішення завдання оптимізації автоматизованого приладобудівного виробництва можна вважати певною науковою новизною в питанні оптимізації керування виробничим процесом.

Розроблено програмні засоби реалізації створеної математичної моделі оптимізації гнучкої автоматизованої дільниці, яка може бути використана для різних виробничих систем та забезпечує підвищення ефективності виробництва у перспективі розвитку автоматизації виробництва точних приладів.

Створене програмне забезпечення, а саме веб-додаток, що здійснює всі необхідні розрахунки, надає можливості побудови графіків, які візуалізують результати оптимізації або загальної системи, або її окремої структурної одиниці. Це дозволяє здійснити реалізацію зміни основних параметрів технологічних процесів, наприклад механічної обробки, як найбільш поширеного способу виготовлення точних деталей приладів.

Подальші наукові дослідження можуть бути спрямовані для створення нових оптимізаційних моделей технологічного автоматизованого виробництва на підставі інтегрованих методів, які враховують повний цикл виробничих проблем з розширеними параметрами. Ці задачі стосуються саме автоматизації окремих структур підприємства в загальному спектрі конгломерату приладобудівних виробництв.

Література

- [1] G. S. Tymchyk, V. I. Skytsiouk, T. R. Klotchko, P. Komada, S. Smailova, & A. Kozbakova, “Modelling of the technological objects movement in metal processing on machine tools”, in *Mechatronic Systems II. Applications in Material Handling Processes and Robotics*, Taylor & Francis Group, CRC Press, Balkema book (2021), Boca Raton, London, New York, Leiden, pp. 267-278, DOI: 10.1201/9781003225447-24.
- [2] Г. С. Тимчик, В. І. Скицюк, М. А. Вайнтрауб, Т. Р. Клочко. *Засоби контролю процесів механообробки надточних деталей: монографія*. Київ, Україна: НТУУ «КПІ», 2011.
- [3] A. Raouf, *Flexible Manufacturing Systems: Recent Developments (Manufacturing Research and Technology)*. Elsevier Science, 1995.
- [4] E. J. A. Armarego and R. H. Brown, *The Machining of Metals*. Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, 1969.
- [5] D. Ganeshwar Rao, C. Patvardhan, Ranjit Singh, “Intelligent Tool Management Strategies for Automated Manufacturing Systems”, *Intelligent Control and Automation*, vol.2, no.4, November 3, 2011. DOI: 10.4236/ica.2011.24046.
- [6] J. Heikkala, “Determining of cutting-force components in face milling”, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 52, is. 1, May 1995, pp. 1-8. DOI: 10.1016/0924-0136(94)01429-5.
- [7] Gregory S Tymchyk, Volodymyr I Skytsiouk, Tatiana R Klotchko, Tomasz Zyska, and Saule Rakhmetullina, “Two parameter active measuring probe for objects setting detection on CNC machines workspace”, *Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2018*, SPIE, vol. 10808, pp. 1858-1864. DOI:10.1117/12.2501617.
- [8] В. Є. Карпусь, О. В. Котляр, В. О. Іванов. *Оптимізація механічної обробки тіл обертання: монографія*; за ред. В. Є. Карпуся. Харків, Україна: НТМТ, 2012.
- [9] Є. С. Пуховський, Ю. М. Малафеев, *Проектування гнучких виробничих систем машинобудування: Навч. посібник. Частина I*. Київ, Україна: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017.
- [10] А. П. Мовчан, О. В. Степанець, *Методи статистичної оптимізації: навч. посіб.* Київ, Україна: НТУУ «КПІ», 2012. 138 с.
- [11] Д. С. Яшкін, “Методи оптимізації в управлінні логістичними ризиками промислових підприємств”, *Економіка: реалії часу*, № 5 (27), с. 52-58, 2016.
- [12] Г. П. Чуйко, О. В. Дворник, О. М. Яремчук. *Математичне моделювання систем і процесів: навч. пос.* Миколаїв, Україна: Видавництво ЧДУ імені Петра Могили, 2015.
- [13] K. Young, C. G. Pickin, “Accuracy assessment of the modern industrial robot”, *Industrial Robot: An International Journal*, vol. 27, no. 6, pp. 427-436, 2000. DOI: 10.1108/01439910010378851.
- [14] В. М. Томашевський, *Моделювання систем*. Київ, Україна: Видавнична група BHV, 2005.
- [15] V. Volterra, *Lessons on the Mathematical Theory of Struggle for Life*. Paris, France: Gauthier-Villars, 1931.
- [16] Jean-Marc Ginoux, “The paradox of Vito Volterra’s predator-prey model”, *Lettera Matematica*, 5 (4), pp. 305 – 311, 2017. DOI: 10.1007/s40329-017-0200-6. URL: <https://doi.org/10.1007/s40329-017-0200-6>.
- [17] Hermann Haken, “Information and Self-Organization: A Macroscopic Approach to Complex Systems”, *American Journal of Physics* 57(10):-262, June 2006. DOI:10.1119/1.15809
- [18] Monolithic architecture vs microservices. [Online]. Available: <https://divante.com/blog/monolithic-architecture-vs-microservices/>.

UDC 517.977.58: 004.9 : 621.9

Olha Datsenko, and Tatiana Klotchko*National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine***APPLICATION OF LOTKA-VOLTERRA MODEL FOR OPTIMIZATION OF AUTOMATED PARTS PROCESSING SYSTEM**

The article shows peculiarities of the organization of technological processes of processing parts when applying automation of the enterprise and at same time defines main problems associated with production features, technological processes, problems of conservation and rational use of resources. It is shown that these problems are solved by optimizing production processes, in particular, e technological process of manufacturing precise parts of devices.

Optimization of production has always been a very relevant issue for many enterprises in various branches of production. This is not surprising, because both the state and private business are always looking for new technologies and possible ways to reduce expenses, increase profits, and solve the problem of general improvement of production efficiency. However, after beginning of the full-scale invasion of Russia on the territory of the sovereign state of Ukraine and the massive destruction of industrial and critical infrastructure, civilian buildings and housing, the issue of effective use of available and surviving resources became extremely urgent. According to official data, as of April 2022, losses of industrial assets amount to \$6.7 billion. So, this is why there is a need to optimize production under condition of its automation.

On the basis of research on the current state of optimization of automated systems for mechanical processing of parts and basic scientific research on this topic, approaches to the justification of a formalized optimization model aimed at increasing the efficiency of instrument-making production are considered. An optimization solution is proposed, based on use of Lotka-Volterra mathematical model, which will allow optimizing the operation of precision parts manufacturing systems under the condition of production automation. The results of conducted proved the expediency of such bionic approaches to the automation of technological structures of the production enterprise, since the proposed model is mostly used in research of biological processes.

So, well-founded analogies made it possible to determine full range of production problems, including logistical problems and personnel problems based on competing models.

The created software, namely a web application that performs all the necessary calculations, provides the ability to build graphs that visualize the results of the optimization of automated parts processing unit of enterprise, or the overall system, or its individual structural unit.

Key words: technological equipment; automated system; optimization of production processes; Lotka-Volterra model; Runge-Kutta method; flexible automated production.

*Надійшла до редакції**15 вересня 2022 року**Рецензовано**28 жовтня 2022 року*

© 2022 Copyright for this paper by its authors.
Use permitted under Creative Commons License Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).