

ШЕЛКОВИЙ О. М., ФЕДЕНЮК Д. В., ЛЕТЮК В. М., МІРОНЕНКО С. О., ІЩЕНКО М. Г.

АЛГОРИТМ ПОШУКУ В УМОВАХ СЕРІЙНОГО ВИРОБНИЦТВА ВАРІАНТІВ СТРУКТУРИ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ МЕХАНООБРОБКИ НА ЗАДАНИЙ МНОЖИНІ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ

У статті описано алгоритм формування множини варіантів структур технологічних процесів (ТП) обробки металів різанням на заданій множині технологічного обладнання та послідовності виконання операцій в умовах серійного виробництва. Варіанти технологічних процесів представлені у вигляді граф-дерева, що враховує послідовність виконання операцій та можливості використання для цього основного технологічного обладнання. Алгоритм генерації варіантів ТП призначений для формування у системі імітаційного моделювання виробничого процесу найбільш раціонального поєднання послідовності технологічних операцій та обладнання, на яких вони реалізуються. Як критерій відбору варіантів ТП використано сумарний час їх виконання. Алгоритм вбудовується у програмне забезпечення системи імітаційного моделювання виробничих систем GPS. Він реалізований серед пакету Mathcad 15, а як приклад розрахунків представлено формування організаційно-технологічної структури ділянки механічної обробки лопаток турбін парової турбіни в ВАТ «ТУРБОАТОМ».

Ключові слова: обробка металів різання, структура технологічного процесу, основне технологічне обладнання, сумарний час обробки, варіанти обробки, оптимізація структури технологічного процесу.

SHELKOVYI O. N., FEDENYUK D. V., LETYUK V. M., MIRONENKO S. A., ISHCHENKO M. G.

SEARCH ALGORITHM UNDER THE CONDITIONS OF SERIAL PRODUCTION OF STRUCTURE OPTIONS OF THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF MACHINING ON A GIVEN SET OF TECHNOLOGICAL EQUIPMENT

The article describes the algorithm for the formation of a set of options for the structures of technological processes (TP) of metal cutting on a given set of technological equipment and the sequence of operations in mass production. Variants of technological processes are presented in the form of a graph-tree, taking into account the sequence of operations and the possibility of using the main technological equipment for this. The algorithm for generating TP options is designed to form the most rational combination of the sequence of technological operations and the equipment on which they are implemented in the system of simulation of the production process. As a criterion for selecting TP options, the total time for their implementation was used. The algorithm is built into the software of the simulation system for production systems "GPS". It is implemented in the environment of the Mathcad 15 package, and as an example of calculations, the formation of the organizational and technological structure of the section for machining turbine blades of steam turbines in PJSC "TURBOATOM" is presented.

Keywords: metal cutting, the structure of the technological process, the main technological equipment, the total processing time, processing options, optimization of the structure of the technological process.

1. Вступ. В умовах серійного виробництва коефіцієнт закріплення технологічних операцій (ТО) за металорізальним обладнанням (Кз) набагато більше одиниці і, залежно від номенклатури випуску виробів, досягає значень (10 ÷ 25) (приклад, рис. 1). Це спричиняє необхідність проектування структур технологічного процесу (ТП) залежно від виробничої ситуації, що виникає на ділянці металообробки, тобто. майже реальному часу роботи обладнання. При цьому необхідно враховувати обмеження, що накладаються на процес обробки як з боку технічної та організаційної підсистем виробничої системи, наприклад, одному верстаті не можна послідовно виконувати кілька технологічних операцій, так як це суперечить визначенню поняття «Технологічна операція» [6], а процес проектування структури ТП перетворюється на перебір варіантів його структур. За такого підходу «ручне проектування» варіантів можливих структур ТП практично неможливо, так як воно трудомістке і не дозволяє отримати найбільш раціональні результати і завжди лімітоване часом виконання планового завдання з проектованого ТП та інших ТП, що знаходяться у виробничому процесі.

2. Аналіз літератури. Розглянемо технологічні, технічні та організаційні фактори цього процесу (рис. 2) [1 - 5, 7, 8 - 26, 31 - 33]:

- *Технологічні фактори* : зниження припусків та їх рівномірний розподіл поверхнею заготовок (1); багатоінструментальні налагодження з послідовним виконанням переходів (2); застосування комбінованого інструменту (3); багатоінструментальна (паралельна) обробка (4); багатопозиційне оброблення (5); застосування безперервної обробки (6);

- *Технічні фактори* : автоматизація робочого циклу обладнання (7); автоматизація циклу виготовлення деталей - транспортування, контроль тощо. (8); використання активних методів контролю (9); використання автоматизованого та автоматичного обладнання (10); автоматизація операцій установки-зняття, завантаження-розвантаження заготовок та деталей (11); автоматизація процесу забезпечення інструментом (12); автоматизація транспортно-складських операцій (13); скорочення участі людини у виробничому процесі (14); підвищення коефіцієнта змінності обладнання та збільшення річного фонду часу (15); оптимізація та стабілізація технологічних режимів та процесів (16); скорочення тривалості виробничого циклу (17); автоматизація організаційних та керуючих функцій (18); автоматизація управління верстатами, автоматизованою транспортно-накопичувальною системою (АТНС), автоматизованою системою інструментального забезпечення (АСІО) та ДПС загалом (19); скорочення чисельності управлінського апарату (20); підвищення рівня безперервності, пропорційності, ритмічності (21); автоматизація процесів підготовки виробництва (технологічної, конструкторської, організаційної) (22); скорочення чисельності ІТП (23); підвищення якості проектування (24);

- *Організаційно-технічні та експлуатаційні фактори* : структурна оптимізація (концентрація, диференціація, інтеграція операцій), поточність обробки (25); використання групових налагоджень верстатів та групової технології (26); формування (оптимізація) регламентів обслуговування устаткування (27); планово-економічні розрахунки (формування графіків запуску, оптимізація партійності тощо) (28).

© О. М. Шелковий, Д.В. Феденюк, В.М. Летюк, С.О. Міроненко, М.Г. Іщенко 2023

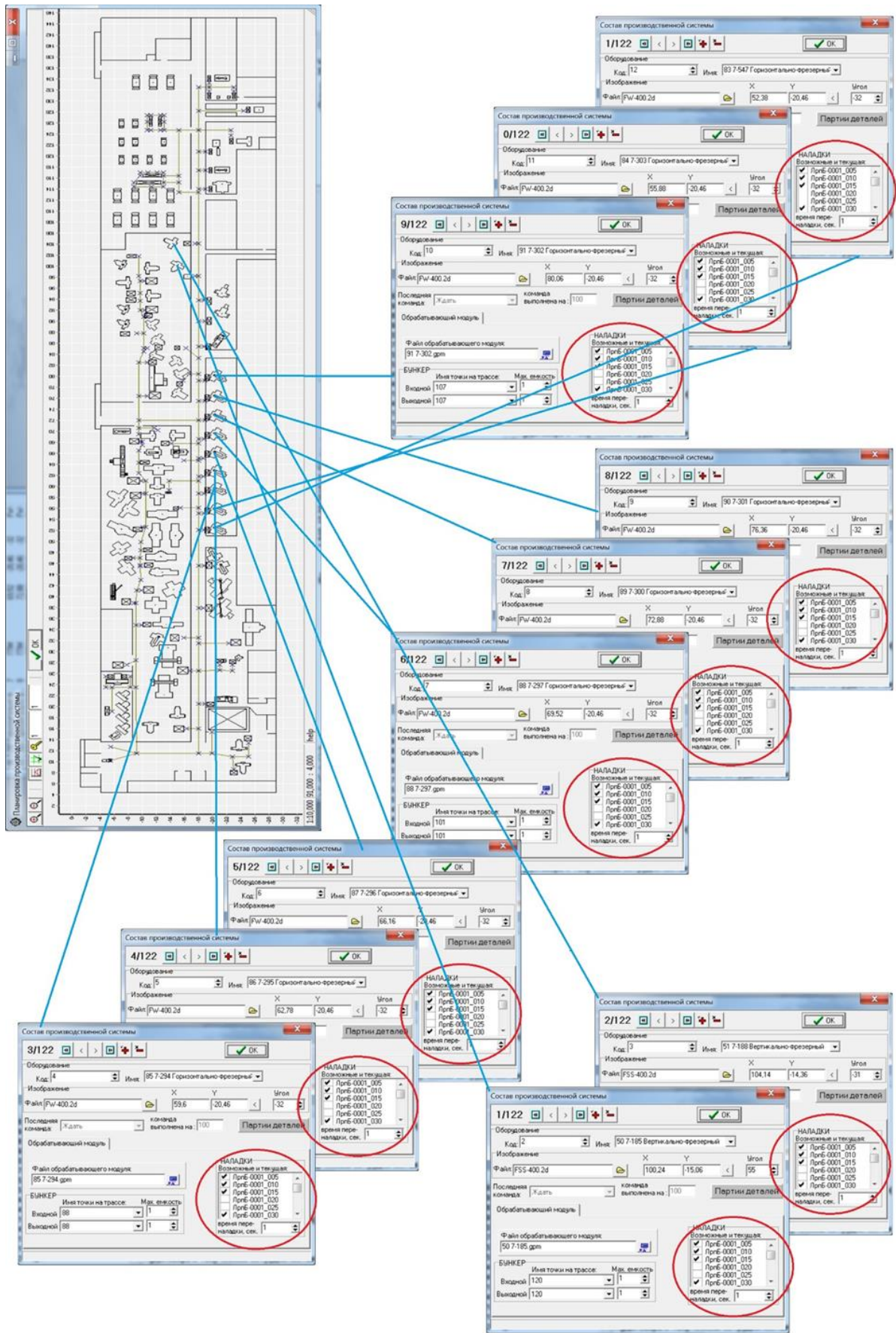


Рис. 1 – Приклад структури даних імітаційної моделі планування МСП ділянки обробки лопаток парової турбіни в ВАТ «ТУРБОАТОМ» [35, 36]

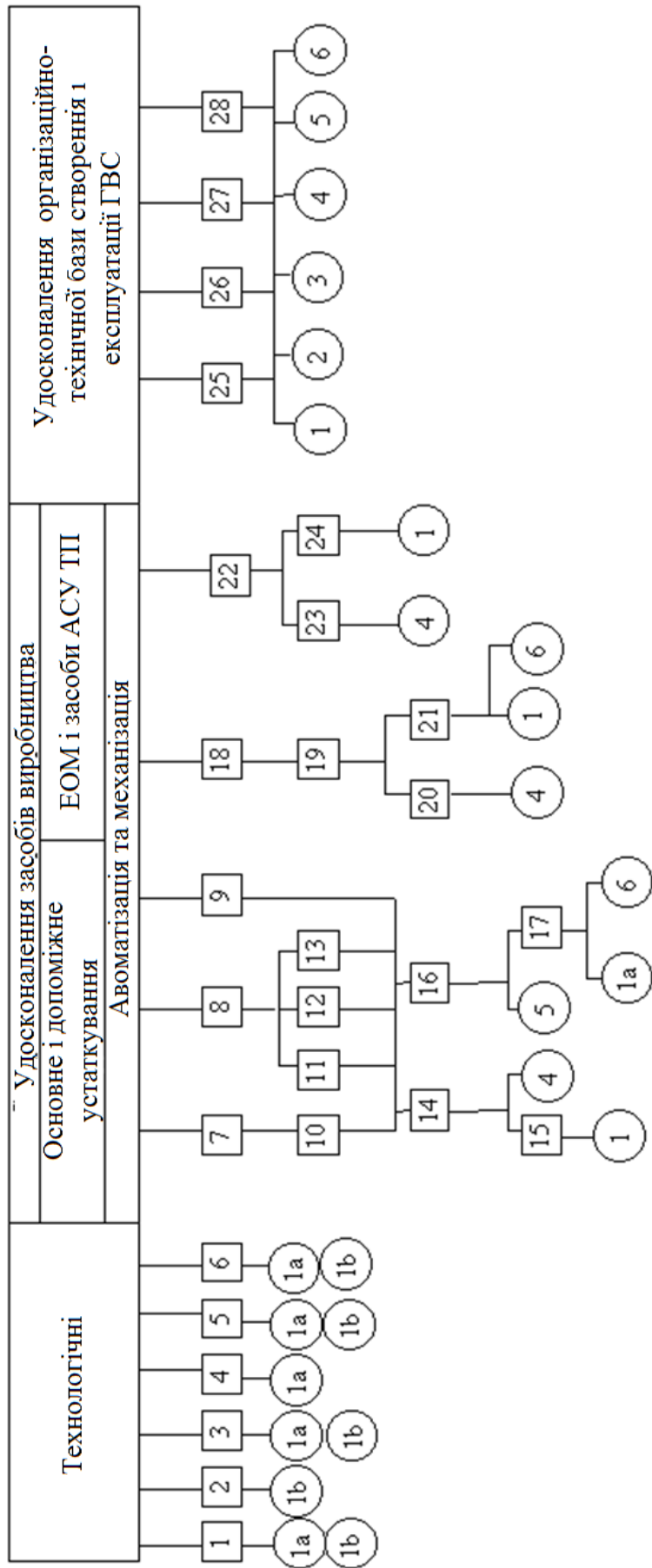


Рис.2 – Напрями підвищення ефективності ДПС технічними, технологічними та організаційними засобами: - фактори, що визначають зміну ефективності створення та експлуатації ДПС; - складові аналітичної оцінки ефективності ДПС

Вплив різних факторів, що визначають зміну ефективності створення та експлуатації виробничих систем, враховується через складові аналітичної оцінки ефективності ДПС (рис. 2): 1a – скорочення основного часу; 1b – скорочення допоміжного часу за рахунок скорочення внутрішньоциклових витрат та простоїв; 2 – зміна капітальних вкладень у устаткування; 3 – зменшення експлуатаційних витрат; 4 – скорочення чисельності працюючих; 5 – скорочення величини шлюбу; 6 – скорочення незавершеного виробництва.

3. Методи дослідження. Розглянемо алгоритм формування варіантів структур ТП на заданій множині металорізальних верстатів.

Метод аналізу продуктивності по типовій деталі практично не застосовується через труднощі достовірного підбору типового представника.

При розрахунку продуктивності за інтегральними характеристиками вважають, що на РМ опрацьовується певна номенклатура деталей з різними значеннями характеристик:

$$Q = \frac{1}{t_{cp1} \cdot S + t_{x1} + t_{x2} \cdot S + t_{Tz} + t_{oprz} + \frac{(t_1 + t_2 \cdot S)}{k}} \gamma, \quad (1)$$

де t_{cp1} - Середній час обробки одного виробу; S - середня кількість робочих ходів інструменту в процесі обробки; t_{x1} - середній час установки (знімання) деталі при несуміщених холостих переміщеннях; t_{x2} - середній час заміни інструментів.

Основним недоліком методу є використання усереднених величин, що дозволяє штучно вилучити з аналізу всі екстремальні режими функціонування обладнання. Однак залежність (1) зручна для формального аналізу закономірностей у побудові системи, урахування впливу зміни різних параметрів номенклатури та обробної системи на продуктивність.

Найбільш складним у визначенні продуктивності є аналіз ПС, коли обчислення Q у явній формі неможливе, тому що в ній здійснюється спільне виробництво деталей різного найменування. Це зумовлює поєднання реалізації кількох технологічних процесів у часі та просторі, т. е. кілька технологічних послідовностей, що відбивають порядок проходження заготовок через різні робочі місця, перетинають одне одного при використанні одного й того ж обладнання. Внаслідок цього перетину утворюється черговість проходження різних заготовок (партій заготовок різного найменування) через кожне робоче місце. Отримані послідовності прийнято називати організаційними, їхнє призначення є актом управління виробництвом. Таким чином, продуктивність ПС слід оцінювати по виходу придатної продукції із системи та спільно з цим аналізувати ефективність використання обладнання по робочих місцях.

У цьому випадку велике значення набувають простой з організаційних причин, обумовлені тим, що перехід з одного робочого місця на інше може супроводжуватися або очікуванням партією заготовок, поки звільниться наступне робоче місце, або простоем верстата, що чекає на заготовку з попередньої позиції.

Отже, завдання формування структури ПС на основі розрахунку продуктивності зводиться до формування оптимальних технологічних та організаційних послідовностей за критерієм мінімальних витрат, що відповідає максимальному завантаженню обладнання або мінімальній кількості необхідного обладнання. Розрахунки у разі проводяться чисельними методами з допомогою аналітичного чи імітаційного моделювання. Оптимізація наводиться шляхом послідовних ітерацій. При отриманні даних вихідного (базового) варіанта розглядаються можливі варіанти перерозподілу обробки. До цих варіантів відносяться або генерація нових (коригування старих) маршрутів обробки, або генерація нових послідовностей обробки за можливої наявності системних обмежень (кількості та виду ОУ). Далі проводиться новий цикл обчислень, і так продовжується до отримання необхідного результату.

За наявності явного зв'язку між продуктивністю та технічними, технологічними та структурними параметрами ДПС може бути використаний відносний показник (ϕ_i), який є відношенням продуктивності поточного (Q_i) і базового (Q_6) варіантів:

$$\phi_i = \frac{Q_i}{Q_6}. \quad (2)$$

При цьому оцінку резервів підвищення продуктивності за складовими, а також вплив різних змін у ПС або її функціях на результат доцільно проводити за балансом продуктивності (рис 3).

З малюнка слід, основні резерви підвищення продуктивності полягають у скороченні частки безпосередньої участі людини у виробничому процесі, тобто. у комплексній автоматизації виробничого процесу. Тоді коефіцієнт підвищення продуктивності ДПС можна подати у вигляді:

$$\phi_i = \frac{Q_i}{Q_6} = \frac{t_{cp1} S + t_{x1} + t_{x2} S + t_{Tz} + t_{oprz} + t_{перз}}{\frac{t_{cp1} S}{\beta_1} + \frac{t_{x1}}{\beta_2} + \frac{t_{x2} S}{\beta_3} + \frac{t_{Tz}}{\beta_4} + \frac{t_{oprz}}{\beta_5} + \frac{t_{перз}}{\beta_6}} \cdot \frac{1}{\beta_7}. \quad (3)$$

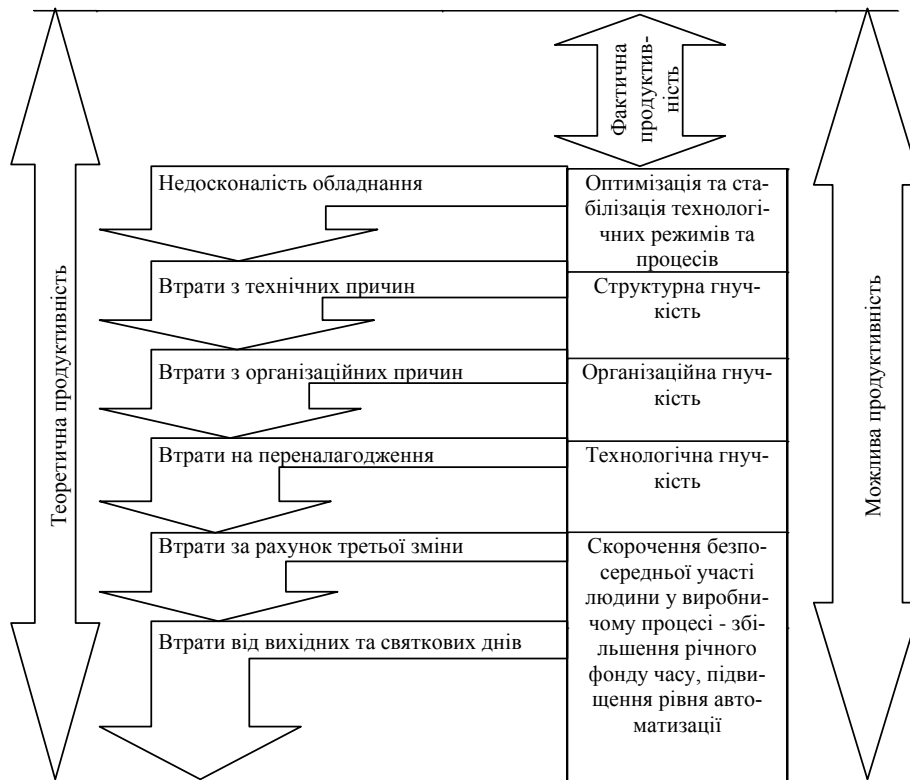


Рис. 3 – Формування балансу продуктивності ДПС [15]

Представимо у вигляді матриці (S) структуру ТП, що складається з ($N_{оп}$) операцій, що виконуються на $M_{ст}$ верстатах (4).

$$S = \left. \begin{matrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ \text{ТП} \in j = \overline{1, (N_{оп} = 4)}, \\ \text{СТ} \in i = \overline{1, (M_{ст} = 4)}. \end{matrix} \right\} \quad (4)$$

де i, j – номери ВП та верстатів (СТ), що беруть участь у формуванні ТП;

0 - на i -му верстаті не може виконуватися j -а ОП;

1 - на i -му верстаті може виконуватися j -а ОП.

Кожен із рядків матриці S (1) відповідає можливому варіанту виконання всього ТП варіанту на заданому верстаті. У нашому випадку жоден із верстатів не дозволяє повністю виконати обробку по заданому ТП.

1. Визначимо пари послідовно наступних один за одним операцій з номерами (n і $n+1$) (матриця S), які можуть бути виконані на двох різних верстатах: (st_m^n) і одним із верстатів ($st_f^{n+1}, st_k^{n+1}, st_l^{n+1} \dots$), запис (5):

$$\begin{aligned} & 1\text{-а операція} - 2\text{-а операція} \\ & 1[2 \ 4]; 3[2 \ 4]; 4[2]. \\ & 2\text{-а операція} - 3\text{-а операція} \\ & 2[1 \ 3]; 4[1 \ 2 \ 3]. \\ & 3\text{-а операція} - 4\text{-а операція} \\ & 1[3 \ 4]; 2[1 \ 3 \ 4]; 3[1 \ 4]. \end{aligned} \quad (5)$$

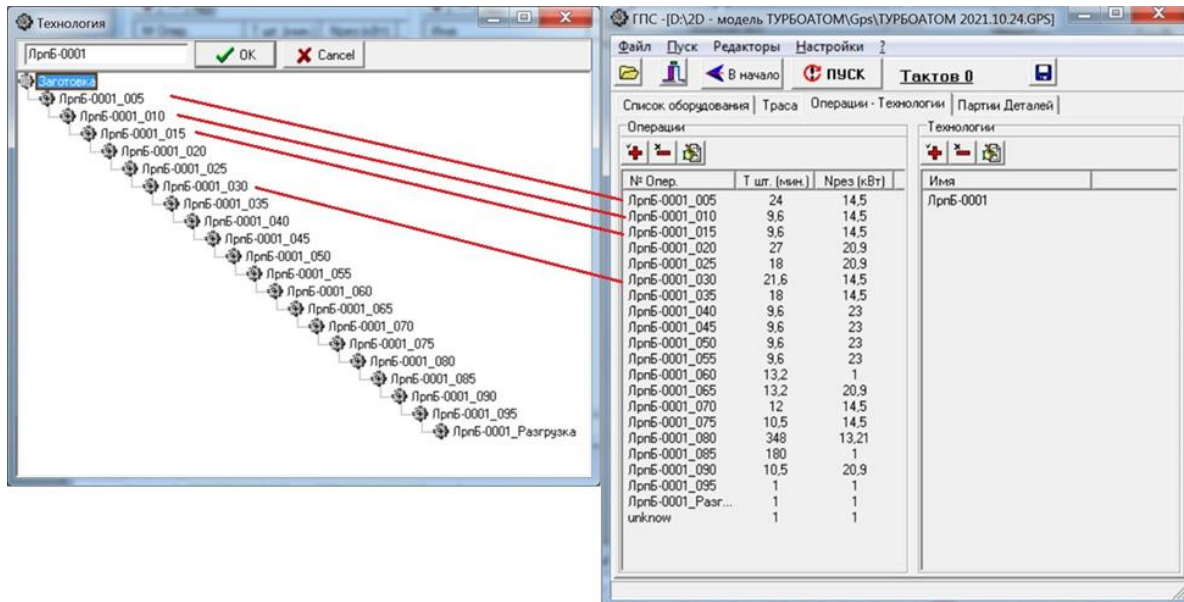


Рис. 4 – Приклад структури та параметрів ТП, який використовується при імітаційному моделюванні виробничого процесу МСП дільниці обробки лопаток парової турбіни в ВАТ «ТУРБОАТОМ»

Цим матрицям у загальному вигляді відповідає структура виду (6)

$$m[f, k, \dots, 1] \equiv st_m^n \rightarrow \begin{pmatrix} st_f^{n+1} \\ st_k^{n+1} \\ \vdots \\ st_1^{n+1} \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Де \rightarrow знак перехід від виконання n – операції на m -му верстаті до виконання $n+1$ – номер наступного операції на одному з допустимих для її виконання верстатів.

2. Визначаємо зв'язки між матрицями (2) на основі затвердження (7)

$$\forall_{C_m}^{m=1, N_{cr}} \forall_{C_f}^{f=1, M_{cr}} (f \neq m) \exists_{CT \in (st_m^n, st_f^{n+1})} (st_m^n, st_f^{n+1}) \Rightarrow (st_m^n \rightarrow st_f^{n+1}). \quad (7)$$

Формування зв'язків між операціями, що виконуються на верстатах ($st_m^n, st_f^{n+1}; st_m^n, st_f^{n+1}; st_m^n, st_f^{n+1}; \dots$), починається з 1-ї операції ТП і закінчується останньою відповідно до затвердження (7). Отримане рішення подано у вигляді графа (рис. 1), формульний запис якого представлений у вигляді (8)

$$1.1 \times (2.2 \times (3.1 \times (4.3 + 4.4)) + 3.3 \times (4.1 + 4.4)) + 2.4 \times (3.1 \times (4.3 + 4.4) + 3.2 \times (4.1 + 4.3 + 4.4) + 3.3 \times (4.1 + 4.4)) + \dots \\ \dots + 1.3 \times (2.2 \times (3.1 \times (4.3 + 4.4)) + 3.3 \times (4.1 + 4.4)) + 2.4 \times (3.1 \times (4.3 + 4.4) + 3.2 \times (4.1 + 4.3 + 4.4) + 3.3 \times (4.1 + 4.4)) + \dots \\ \dots + 1.4 \times 2.2 \times (3.1 \times (4.3 + 4.4) + 3.3 \times (4.1 + 4.4)). \quad (8)$$

де: $n.m$ – позначення номера операції (n) та номера верстата (m), де він може бути використаний; знак " \times " - послідовність проходження операцій у технологічному процесі (рис. /); знак "+" - перехід на інший варіант використання верстатів (m) на операції з номером (n).

Варіант обробки виробу в даному прикладі описується записом (5) починаючи з номера **1.m** - перша операція та закінчується записом з номером **4.f**. – остання операція з цього ТП:

Наприклад:

$$\left. \begin{matrix} 1.1 \times 2.2 \times 3.1 \times 4.3 \\ 1.1 \times 2.2 \times 3.1 \times 4.4 \\ \vdots \\ 1.3 \times 2.2 \times 3.3 \times 4.4 \\ \vdots \\ 1.4 \times 2.2 \times 3.3 \times 4.4 \end{matrix} \right\}. \quad (9)$$


```

TP(Sto) := Kop ← rows(Sto)
Kst ← cols(Sto)
op ← 1
var ← 1
while op < Kop
  if op = 1
    Flvar,1 ← op
    Flvar,2 ← 0
    var1 ← 4
    for st ∈ 1,2..Kst
      if Sto1,st ≠ 0
        Flvar,var1 ← st
        zapvar1-3 ← st
        Kzap ← var1 - 3
        var1 ← var1 + 1
    Flvar,3 ← Kzap
    var ← var + 1
  for nzap ∈ 1,2..Flvar-1,3 otherwise
    break if zapnzap = 0
    Flvar,1 ← op
    Flvar,2 ← zapnzap
    var1 ← 4
    for st ∈ 1,2..Kst
      continue if Stoop,st = 0 ∨ zapnzap = st
      for i ∈ 1,2..Kst - 1
        continue if zapi = st ∨ zapi = 0
        zapvar1-3 ← st
    Flvar,var1 ← st
    Kzap ← var1 - 3
    var1 ← var1 + 1
    Flvar,3 ← Kzap
    var ← var + 1
  op ← op + 1
Fl

```

ORIGIN := 1

$$Sto := \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Б. Програма формування граф-дерева
варіантів маршруту обробки

В. Результати
формування графу ТП

$$TP(Sto) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 3 & 1 & 3 & 4 \\ 2 & 1 & 2 & 2 & 3 & 0 \\ 2 & 3 & 1 & 2 & 0 & 0 \\ 2 & 4 & 2 & 2 & 3 & 0 \\ 3 & 2 & 3 & 1 & 3 & 4 \\ 3 & 3 & 2 & 1 & 4 & 0 \end{pmatrix}$$

А. Вхідні дані для
розрахунків (структура
та зміст

Рис. 5 – Вхідні дані, програма та результати формування варіантів ТП

Знак "+" із запису виключається, тобто. кожен із записів (6) є запис «безваріантної обробки по заданому ТП».

Даний алгоритм реалізований у вигляді програми формування структури ТП у середовищі пакета MathCad 14, яка представлена на рис. 5, б, а вхідні дані і результати розрахунків – на рис. 5, а та 5, в. Графічна інтерпретація результатів розрахунків наведена на рис. 6.

Наведений алгоритм реалізовано у вигляді підсистеми генерації варіантів ТП системи імітаційного моделювання роботи багатоменклатурного серійного виробництва «GPS» [28 - 30].

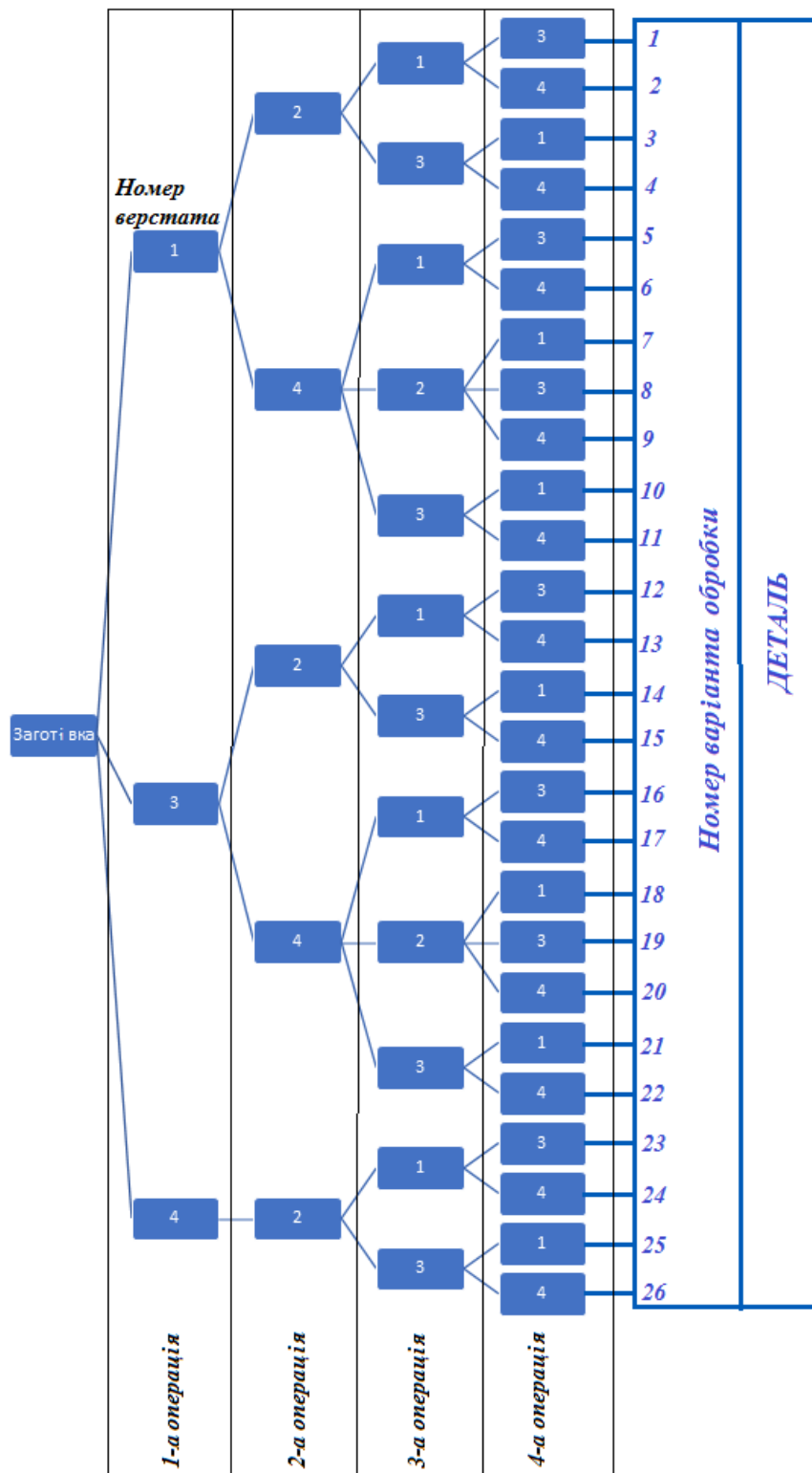


Рис. 6 - Граф-дерево варіантів ТП, згенерованих за пропозованим алгоритмом

4. Результати дослідження. Головною відмінністю ДПС від відомого устаткування є можливість швидкої автоматичної переналадження, тобто. гнучкість, можливість роботи протягом запланованого часу з мінімальною участю обслуговуючого персоналу, здатність оперативної зміни ходу технологічного процесу

при змінах вихідного стану виробничої системи, а також цілеспрямована автоматична робота модулів, агрегатів та пристроїв.

Разом з тим, процес створення організаційно-технічних та технологічних структур ВС, як і раніше, ділиться на два етапи: технологічну та організаційну підготовку виробництва. Це, при гнучкості проектування, що здається, призводить до жорстких схем організаційно-технологічних структур ВС, в яких варіювати процеси обробки можливо тільки на етапі технологічної підготовки виробництва, а її організаційне проектування орієнтується на задані технологічні схеми. Це суттєво зменшує виробничий потенціал ДПС та у багатьох випадках призводить до тривіального копіювання технологічних процесів з використанням ручної праці.

Проблеми підвищення ефективності експлуатації ГПС, які виникають при цьому, вже не можна вирішити тільки за рахунок підвищення ефективності використання основного часу технологічного обладнання, так як воно становить лише 6 - 20% від загального часу завантаження виробництва. При цьому частка допоміжного часу разом з іншими втратами знаходиться в діапазоні 50 - 60%. Тому основний наголос зроблено на автоматизації допоміжних операцій, забезпеченні автоматичного функціонування обладнання у вечірні та нічні зміни, різкому скороченні часу переналадження, переоснащення, зміни інструменту, автоматизації управління матеріальними та інформаційними потоками. Сьогодні стало очевидним, що для реалізації такого підходу необхідно створити методологічні засади організаційно-технологічного перепроєктування, що враховує швидку зміну умов виробництва виробів.

Тому створення наукових засад підвищення ефективності виробничої системи обробки металів різанням шляхом її перепроєктування з допомогою розробки раціональних структур технологічних процесів з урахуванням інтеграції автоматизованих систем технологічної підготовки виробництва з автоматизованими системами управління є актуальною народно-господарською проблемою.

Аналіз тенденцій автоматизації основних та допоміжних операцій дозволяє зробити висновок про те, що останніми роками цей процес орієнтований на "інтелектуалізацію" систем управління ДВС, яка дозволяє реалізувати адаптивне управління основними та допоміжними операціями.

Враховуючи той факт, що в загальному обсязі витрат на створення ДПС витрати на обладнання займають не менше 50%, як і раніше, актуальним є повніше використання його функціональних ресурсів, до яких належать пропускну здатність, організаційна та технологічна гнучкість.

Вони визначають значну ресурсомісткість цього перспективного устаткування як у процесі створення, і у процесі експлуатації. Крім того, структурна складність ДВС визначає можливість прийняття не кращих рішень, помилок та прорахунків при традиційних методах роботи на всіх етапах їх проектування. Як інструмент, що певною мірою обмежує творців та користувачів ГПС від невиправданого витрачання людських, матеріальних та інших ресурсів, використовуються методи автоматизованого проектування.

Тому об'єктом дослідження є технічна, технологічна та організаційна структури ПС, в рамках якої, як предмет дослідження розглядаються закономірності формування та методи управління організаційно-технологічним компонуванням гнучкої виробничої системи обробки металів різанням на рівні ділянки та цеху з метою отримання виробів заданої якості у строки, обумовлені планом випуску.

Аналіз методів проектування організаційних та технологічних структур ДВС показав, що імітаційне моделювання дискретних систем у режимі реального часу є ефективним засобом їх оптимізації. Як базовий метод проектування обраний блочно-модульний метод, що інтегрує у собі переваги методів моделювання, орієнтованих процеси.

5. Висновки. Таким чином, метою роботи є підвищення ефективності виробничої системи обробки металів різанням шляхом розробки організаційно-технологічних основ її функціонування, що включає проектування багатоваріантної технології обробки та організаційної структури виробничої системи в умовах серійного виробництва.

Для цього вирішені такі завдання:

1. Обґрунтування принципів управління параметрами та структурою ВС на основі аналізу середньої пропускну спроможності та енергетичних витрат на виробничий процес;
2. Приписання механізму формування структури багатоваріантного технологічного процесу на основі аналізу імітаційної моделі ВС ЗМР.
3. Теоретичне обґрунтування можливості спрямованої зміни структур та параметрів технологічних процесів та організаційної структури ВС відповідно до заданих характеристик партій обробки та календарного плану випуску виробів.
4. Розробка методики перепроєктування організаційно-технологічного компонування виробничих систем різного рівня інтеграції.
5. Перевірка основних положень методології проектування багатоваріантних технологій в умовах серійного виробництва.

Список литературы

- Автоматизация проектирования технологии в машиностроении / Б.Е. Челищев, И.В. Бобров, А. Гонсалес-Сабатер и др. // Под ред. акад. Н.Г. Бруевича.- М.: Машиностроение, 1987.- 264с.
- Арнольд В. И. Дополнительные главы теории дифференциальных уравнений. —М.: Наука, 1978. —304 с.
- Белянин П.Н., Лещенко В.А. Гибкие производственные системы. - М.: Машиностроение, 1984.- 360с.
- Гибкие производственные комплексы //Под ред. П.Н. Белянина, В.А. Лещенко. - М.: Машиностроение, 1984.- 384с.
- Гибкое автоматическое производство //В.О. Азбель, В.А. Егоров, А.Ю. Звоницкий и др.: Под общ. ред. С.А. Майорова. - Л.: Машиностроение, 1985.-

- Гнучкі виробничі системи: навчальний посібник для студентів напрямку 131- Інженерна механіка /Е. Яковенко, О.А. Пермяков, О.М. Шелковий – Харків: Діса плюс, 2019. – 246 с.
- Довбня Н.М., Кондратьев А.Н., Юревич Е.И. Роботизированные тех-нологические комплексы в ГПС. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1990. – 303с.
- Жданов Б.И. Концепція та інженерна методологія проектування віртуального техпроцесу механообробки в машинобудуванні : Автореф. дис. канд. техн. наук (05.02.08 ; 05.13.05) / Національний технічний ун-т України "Київський політехнічний ін-т". — К., 1997. — 25с.
- Имитационное моделирование производственных систем //Под общ. ред. А.А. Вавилова. - М.; Берлин: Машиностроение: Техника, 1983. - 416с.
- Котов В.Е. Сети Петри. - М.: Наука, 1984. - 158с.
- Лещинский Л.Ю. Структурный и параметрический синтез гибких производственных систем. – М. Машиностроение, 1990. – 312с.
- Лобанов Л.А. Исследование влияния размерной структуры вариантов базирования деталей на количество технологических переходов. - Московский текстильный институт. - М., 1986.- 10с.
- Митрофанов С.П., Гульнов Ю.А., Куликов Д.Д. Применение ЭВМ в технологической подготовке серийного производства. - М.: Машино-строение, 1981.- 287с.
- Морев Димитр. Математичні моделі за описання на структура та технологичнете процесі при автоматизированото им проектиране //Машиностроене.- 1985.- 34, № 11. - С.497-499.
- Организационно-технологическое проектирование ГПС /В.О. Азбель, А.Ю. Звоницкий, В.Н. Каминский и др.; Под общ. ред. С.П. Митрофанова. Л.: Машиностроение, Ленингр. Отд-ние, 1986.-294с.
- Петров Ю.П. Вариационные методы теории оптимального управления. - 2-е изд. перераб. и доп. - Л.: Энергия, 1977. - 280с.
- Полужков М.В., Курников С.В. Построение системы автоматизированного проектирования технологических процессов (АПТП) для ГАП //Материалы межотраслевой конференции "Прогресс 84". - М.: ВИМИ, 1985. - 186с.
- Потейко А.Д., Тимофеев Ю.В., Мазур Л.Е. Эффективность процессов механической обработки в массовом производстве. - К.: Техніка, 1980.- 157с.
- Робототехника и гибкие автоматизированные производства. В 9-и кн. Кн. 6. Техническая имитация интеллекта: Учеб. Пособие для вту-зов/В.М. Назаретов, Д.П. Ким; Под общ. ред. И.М. Макарова. - М.: Высш. шк., 1986.-144с.
- Робочі процеси високих технологій в машинобудуванні: Навч. Посіб-ник / За редакцією А.І. Грабченка. - Харків, ХДПУ, 1999р. - 436с.
- Системное проектирование интегрированных производственных комплексов //Под общ. ред. В.М. Пономарева. - Л.: Машиностроение, Ленингр. Отд-ние, 1986. - 319 с.
- Слепцов А.И., Юрасов А.А. Автоматизация проектирования управляющих систем гибких автоматизированных производств //Под ред. Б.Н. Малиновского. - К.: Техніка, 1986. - 110с.
- Технологическая подготовка гибких производственных систем /С.П. Митрофанов, Д.Д. Куликов, О.Н. Миляев, Б.С. Падун; Под общ. ред. С.П. Митрофанова. –Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1987. – 352с.
- Тилипалов В.Н., Веремеев А.Н. Алгоритм качественной оценки синтезируемых вариантов маршрутных технологических процессов по критерию производительности. - Деп. рукопись в ВНИИТЭМР 17.03.86. - № 126-МШ86. - Могилевский машиностроительный институт. - Могилев, 1986. - 5с.
- Цветков В.Д. Система автоматизации проектирования технологических процессов. - М.: Машиностроение, 1972. - 240с.
- Цветков В.Д. Формализация построения маршрутов обработки корпусных деталей для ГАП //Автоматизация технологической подготовки производства. - Свердловск, 1986. - С.122-134.
- Шелковий О.М., Гасанов М.І., Заковоротній О.Ю., Главчева Ю.М., Летюк В.І., Феденюк Д.В. Модель формування допоміжних машинноручних технологічних операцій // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні = Bul-letin of the National Technical University "KhPI". Series: Techniques in a machine industry: зб. наук.пр. / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». – Харків : НТУ «ХПІ», 2022. – № 2 (6) 2022. – С. 31–42. – ISSN 2079-004X, DOI: 10.20998/2079-004X.2022.2(6).05
- Шелковий О.М., Скоркін А.О. Компьютерна програма "GPM-3D" //Свідетство про реєстрацію авторського права на твір № 47545 від 31.01.2013.
- Шелковий О.М., Феденюк Д.В. Постановка задачі підвищення ефективності систем механо-складального виробництва на основі тривимірного моделювання //Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут": Збірка наукових праць. Тематичний випуск Технології в машинобудуванні. - Харків: НТУ "ХПІ". - 2010. - №24. - С.95 -111.
- Шелковой А., Ключко А., Набока Е. Имитационное моделирование в задачах механо-сборочного производства /Авторы: Шелковой А., Ключко А., Набока Е. □ Saarbrücken, Ger-many: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015. - 528 с.
- Яковлев Е.И. Машинная имитация. - М.: Наука, 1975. - 158с.
- Ямпольский Л.С., Полищук М.Н. Оптимизация технологических процессов в гибких производственных системах К.: Тэхника, 1988. - 175с.
- Янг С. Системное управление организацией. - М.: Сов. Радио, 1972. - 456с.
- Adamszyk, P., Ernst, G.: Macro-Anwendung in EXAPT. Nutzung der Gruppentechnologie zur rationalen NC - Teileprogrammierung. tz für Metallbearbeitung 76 (1982) 8/12, S. 32-40.
- Dobrotvorskij, S., Basova, Y., Yepifanov, V., Letiuk, V., Dobrovolska, L., Shelkoviy, O. (2023). Natural Vibrations of a Turbine Blade During Milling. In: Ciobotă, D.D. (eds) International Conference on Reliable Systems Engineering (ICoRSE) - 2022. ICoRSE 2022. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 534. pp 57–69. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-15944-2_6
- Sergey Dobrotvorskij, Yevhenia Basova, Vitalii Yepifanov, Valerii Letiuk, Ludmila Dobrovolska and Oleksandr Shelkoviy. Natural Vibrations of a Turbine Blade During Milling. In: Ciobotă D.D. (eds) International Conference on Reliable Systems Engineering (ICoRSE) - 2022. ICoRSE 2022. Lecture Notes in Networks and Systems. Springer, Cham.

References (transliterated)

1. Avtomatizatsiya proyektirovaniya tekhnologii v mashinostroyenii / B.E. Chelishchev. IV. Bobrov. A. Gonsales-Sabater i dr. // Pod red. akad. N.G. Bruyevicha- M.: Mashinostroyeniye. 1987.- 264s.
2. Arnold V. I. Dopolnitelnyye glavy teorii differentsialnykh uravneniy. —M.: Nauka. 1978. —304 s.
3. Belyanin P.N., Leshchenko V.A. Gibkiye proizvodstvennyye sistemy. - M.: Mashinostroyeniye. 1984.- 360s.
4. Gibkiye proizvodstvennyye komplekсы //Pod red. P.N. Belyanina. V.A. Leshchenko. - M.: Mashinostroyeniye. 1984.- 384s.
5. Gibkoye avtomaticheskoye proizvodstvo //V.O. Azbel. V.A. Egorov. A.Yu. Zvonitskiy i dr.; Pod obshch. red. S.A. Mayorova. - L.: Mashinostroyeniye. 1985.- 454s.
6. Gnuchki virobniichi sistemi: navchalniy posibnik dlya studentiv napryamku 131- Inzhenema mekhanika /E. Yakovenko, O.A. Pemyakov, O.M. Shelkoviy— Kharkiv: Disa plyus. 2019. – 246s.
7. Dovbnya N.M., Kondratyev A.N., Yurevich E.I. Robotizirovannyye tekhnologicheskiye komplekсы v GPS. – L.: Mashinostroyeniye. Leningr. otd-niye. 1990. – 303s.
8. Zhdanov B.I. Kontseptsiya ta inzhenema metodologiya proyektuvannya virtualnogo tekhnoprotsesu mekhanooobrobki v mashinobuduvanni : Avto-ref. dis. kand. tekhn. nauk (05.02.08 ; 05.13.05) / Natsionalniy tekhnichniy un-t Ukraini "Kiivskiy politekhnichniy in-t". — K., 1997. — 25s.
9. Imitatsionnoye modelirovaniye proizvodstvennykh sistem //Pod obshch. red. A.A. Vavilova. - M.; Berlin: Mashinostroyeniye: Tekhnika. 1983. - 416s.
10. Kotov V.E. Seti Petri. - M.: Nauka. 1984. - 158s.
11. Lishchinskiy L.Yu. Strukturnyy i parametricheskyy sintez gibkikh proizvodstvennykh sistem. – M. Mashinostroyeniye. 1990. – 312s.
12. Lobanov L.A. Issledovaniye vliyaniya razmemoy struktury variantov bazirovaniya detaley na kolichestvo tekhnologicheskikh perekhodov. - Moskovskiy tekstilnyy institut. - M. 1986.- 10s.
13. Mitrofanov S.P., Gulnov Yu.A., Kulikov D.D. Primeneniye EVM v tekhnologicheskoy podgotovke seriynogo proizvodstva. - M.: Mashino-stroyeniye. 1981.- 287s.
14. Morev Dimitr. Matematichni modeli za opisaniye na struktura ta tekhnologichnete protsesi pri avtomatizirano im proyektirane //Mashinostroyene.- 1985.- 34, № 11. - S.497-499.
15. Organizatsionno-tekhnologicheskoye proyektirovaniye GPS /V.O. Azbel. A.Yu. Zvonitskiy, V.N. Kaminskiy i dr.; Pod obshch. red. S.P. Mitrofa-nova. L.: Mashinostroyeniye. Leningr. Otd-niye. 1986.-294s.
16. Petrov Yu.P. Variatsionnyye metody teorii optimalnogo upravleniya. - 2-e izd. pererab. i dop. - L.: Energiya. 1977. - 280s.

17. Poluektov M.V., Kumikov S.V. Postroyeniye sistemy avtomatizirovannogo proyektirovaniya tekhnologicheskikh protsessov (APTIP) dlya GAP //Materialy mezhotraslevoy konferentsii "Progress 84". - M.: VIMI. 1985. - 186s.
18. Poteyko A.D., Timofeyev Yu.V., Mazur L.E. Effektivnost protsessov mekhanicheskoy obrabotki v massovom proizvodstve. - K.: Tekhnika. 1980. - 157s.
19. Robototekhnika i gibkiye avtomatizirovannyye proizvodstva. V 9-i kn. Kn. 6. Tekhnicheskaya imitatsiya intelekta: Ucheb. Posobiye dlya vtu-zov/V.M. Nazaretov, D.P. Kim; Pod obshch. red. I.M. Makarova. - M.: Vyssh. shk. 1986.-144s.
20. Robochi protsesi visokikh tekhnologiy v mashinobuduvanni: Navch. Posib-nik / Za redaktsiyu A.I. Grabchenka. - Kharkiv, KhDPU. 1999r. - 436s.
21. Sistemnoye proyektirovaniye integrirovannykh proizvodstvennykh kom-pleksov /Pod obshch. red. V.M. Ponomareva. - L.: Mashinostroyeniye. Leningr. Otd-niye. 1986. - 319 s.
22. Sleptsov A.I., Yurasov A.A. Avtomatizatsiya proyektirovaniya upravlyayushchikh sistem gibkikh avtomatizirovannykh proizvodstv //Pod red. B.N. Malinovskogo. - K.: Tekhnika. 1986. - 110s.
23. Tekhnologicheskaya podgotovka gibkikh proizvodstvennykh sistem /S.P. Mitrofanov, D.D. Kulikov, O.N. Milyayev, B.S. Padun; Pod obshch. Red. S.P. Mitrofanova. -L.: Mashinostroyeniye. Leningr. otd-niye. 1987. - 352s.
24. Tilpalov V.N., Verneyev A.N. Algoritm kachestvennoy otsenki sinteziruyemykh variantov marshrutnykh tekhnologicheskikh protsessov po kri-teriyu proizvoditel'nosti. - Dep. rukopis v VNIITEMR 17.03.86.- № 126-MSh86.-Mogilevskiy mashinostroitel'nyy institut. -Mogilev. 1986.- 5s.
25. Tsvetkov V.D. Sistema avtomatizatsii proyektirovaniya tekhnologicheskikh protsessov. - M.: Mashinostroyeniye. 1972.- 240s.
26. Tsvetkov V.D. Formalizatsiya postroyeniya marshrutov obrabotki korpusnykh detaley dlya GAP //Avtomatizatsiya tekhnologicheskoy podgotovki proizvodstva. - Sverdlovsk. 1986.- S.122-134.
27. Shelkoviy O.M., Gasanov M.I., Zakovorotniy O.Yu., Glavcheva Yu.M., Letyuk V.I., Fedenyuk D.V. Model formuvannya dopomizhnikh mashinoruchnykh tekhnologicheskikh operatsiy // Visnik Natsionalnogo tekhnichnogo universitetu «KhPI». Seriya: Tekhnologii v mashinobuduvanni = Bul-letin of the National Technical University "KhPI". Series: Techniques in a machine industry: zb. nauk.pr. / Nats. tekhn. un-t «Kharkiv. politekhn. in-ty». - Kharkiv : NTU «KhPI». 2022. – № 2 (6) 2022. – S. 31-42. – ISSN 2079-004Kh. DOI: 10.20998/2079-004X.2022.2(6).05
28. Shelkoviy O.M., Skorkin A.O. Kompyuterna programa "GPM-3D" //Svidostvo pro registratsiyu avtorskogo prava na tvir № 47545 vid 31.01.2013.
29. Shelkoviy O.M., Fedenyuk D.V. Postanovka zadachi pidvishchennya efektyvnosti sistem mekhanoskladal'nogo virobnytstva na osnovi trivimimogo modelyuvannya //Visnik Natsionalnogo tekhnichnogo universitetu "Kharkivskiy politekhnichnyy institut". Zbirka naukovikh prats. Tema-tichnyy vipusk Tekhnologii v mashinobuduvanni. - Kharkiv: NTU "KhPI". - 2010. - №24. - S.95-111.
30. Shelkovoy A., Klochko A., Naboka E. Imitatsionnoye modelirovaniye v zadachakh mekhanosborochnogo proizvodstva /Avtory: Shelkovoy A., Klochko A., Naboka E. ? Saarbr?cken, Ger-many: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015. - 528s.
31. Yakovlev E.I. Mashinaya imitatsiya. - M.: Nauka. 1975. - 158s.
32. Yampolskiy L.S., Polishchuk M.N. Optimizatsiya tekhnologicheskikh protsessov v gibkikh proizvodstvennykh sistemakh K.: Tekhnika. 1988. - 175s.
33. Yang S. Sistemnoye upravleniye organizatsiyey. - M.: Sov. Radio. 1972. - 456s.
34. Adamszyk, P., Ernst, G. Macro-Anwendung in EXAPT. Nutzung der Gruppentechnologie zur rationalen NC - Teileprogrammierung. tz für Metallbearbeitung 76 (1982) 8/12, S. 32-40.
35. Dobrotvorskiy, S., Basova, Y., Yepifanov, V., Letiuk, V., Dobrovolska, L., Shelkoviy, O. (2023). Natural Vibrations of a Turbine Blade During Milling. In: Ciobaatǎ, D.D. (eds) International Conference on Reliable Systems Engineering (ICoRSE) - 2022. ICoRSE 2022. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 534, pp 57–69. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-15944-2_6
36. Sergey Dobrotvorskiy, Yevheniia Basova, Vitalii Yepifanov, Valerii Letiuk, Ludmila Dobrovolska and Oleksandr Shelkoviy. Natural Vibrations of a Turbine Blade During Milling. In: Ciobaatǎ D.D. (eds) International Conference on Reliable Systems Engineering (ICoRSE) - 2022. ICoRSE 2022. Lecture Notes in Networks and Systems. Springer, Cham.

Поступила (received) 15.02.2023

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Шелковий Олександр Миколайович (Shelkoviy Oleksandr Mykolaiovych) – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри інтегрованих технологій машинобудування ім. М.Ф. Семка; м. Харків, Україна; тел.: +380 50 945 28 93, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7414-4854>; e-mail: alnikshelk@gmail.com.

Феденюк Дмитро Віталійович (Dmytro Fedenyuk) – : зам. начальника цеху, Науково виробниче об'єднання "Павлоградський хімічний завод", Дніпропетровська обл. м. Павлоград, тел.: _066-720-39-28, e-mail: fedenyuk@gmail.com,

Летюк Валерій Іванович (Letiuk Valerii) – аспірант кафедри «Інтегровані технології машинобудування ім. М.Ф. Семка» Навчально-наукового інституту механічної інженерії і транспорту Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», заступник начальника цеху в АТ "Українські енергетичні машини", м. Харків, тел. 0999512396, e-mail: spirit.nrg.13@gmail.com, ORCID: 0000-0002-9600-2371

Мироненко Сергій Олександрович (Myronenko Serhii) – аспірант кафедри інтегрованих технологій машинобудування ім. М.Ф. Семка, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; тел. +380 95 135 55 40, e mail: serg1prime@gmail.com, ORCID: 0009-0005-8076-459X

Ищенко Михайло Григорович (Ishchenko Mykhailo) – кандидат технічних наук, АТ Укренергомашини, Начальник технологічного відділу - Головний технолог; м. Харків, Україна; тел.: +380999441270, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2251-5104>; e mail: ischenko-mg@ukrenergymachines.com.