

Є.С. Пуховський, д.т.н., проф.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Проектування автоматизованої системи управління гнучким виробництвом

Підвищення ефективності багатомономенклатурного виробництва пов'язане зі створенням технологічних систем машин, спроможних швидко реагувати на зміну виробничої ситуації за високої продуктивності та здатності до швидкого переналагодження. Тому надзвичайно актуальною є проблема створення гнучких виробничих систем (ГВС) на базі існуючих верстатів з числовим програмним управлінням (ЧПУ) для обробки конкретної групи деталей із заданою програмою випуску. На стадії створення структури ГВС існує можливість прогнозувати стратегію управління багатомономенклатурним виробництвом, що відрізняється великою кількістю станів та ситуацій, визначених залежно від цільових показників виробництва. Для виробництва деталей і машин широкої номенклатури велике значення має створення інтегрованих систем автоматизованого проектування ГВС (САПР ГВС), а також спеціалізованих САПР для окремих етапів проектування [1, 2, 4–7, 10, 13, 15.]. Ці проблеми можуть бути вирішені на основі системних принципів проектування [1, 2, 4, 8, 13], а також на основі математичного та імітаційного моделювання [3, 8, 9, 11, 12, 14]. Наукова новизна роботи полягає у вирішенні проблеми інтеграції задач синтезу елементів підсистем ГВС з врахуванням технологічного призначення системи та її техніко-економічної ефективності. Розроблена процедура створення автоматизованої системи управління (АСУ–ГВС), яка призначена для впорядкування та синхронізації роботи всіх елементів ГВС і виконує функції календарного планування, контролю, обліку та аналізу ходу виробництва.

Ключові слова: гнучка виробнича система; синтез; управління; математичні моделі; системне проектування.

Мета роботи – створення системи автоматизованого управління, що дозволяє об'єднати проектування технології та функціонування ГВС.

Викладення основного матеріалу. Технологічне проектування фізичної структури гнучкої виробничої структури ГВС є базою для створення систем автоматизованого управління на рівні комплексу обладнання – модуля, дільниці, цеху. Розробка систем управління – складний багатоетапний процес, виконання якого передбачає адекватне представлення об'єкта автоматизації управління. Опис ГВ системою математичних моделей дозволяє розробляти стратегію та методологію управління ГВС як об'єкта, що описаний еталонною моделлю. Вибір моделі – неформальна творча процедура, яка залежить від цільових функцій синтезу структури та елементів ГВС. Набір елементів ГВС, співвідношення між ними визначають не тільки характер та діапазон зміни параметрів моделі в часі, але і ступінь невизначеності математичної моделі ГВС. Крім того, на етапі технологічного проектування вирішуються проблеми вибору закону зворотного зв'язку або алгоритму управління, які, зазвичай, визначаються характером технологічних процесів обробки, транспортування, контролю та обслуговування елементів гнучкої системи.

Кожен варіант структури ГВС оцінюється на оптимальність. Імітаційне моделювання дозволяє оцінити кожен варіант структури ГВС з точки зору ефективності та працездатності. Складові структури ГВС представлені вектором \bar{X} [3]. Цільова функція цих параметрів визначається векторами:

$$\overline{Q}(\bar{X}) = (q_1, \dots, q_m) \quad \text{та} \quad \overline{C}(\bar{X}) = (C_1, \dots, C_i), \quad (1)$$

де $\overline{Q}(\bar{X})$ – критерії, що позначають технічні та технологічні параметри; $\overline{C}(\bar{X})$ – економічні критерії.

Технологічні критерії, такі як продуктивність, коефіцієнт завантаження верстатів з ЧПУ тощо, а також економічні – собівартість, приведені затрати, накладні витрати – є функціями від одних і тих же параметрів X . Тому на кожному етапі проектування треба застосовувати векторний критерій оптимальності:

$$\overline{U}(\bar{X}) = [\overline{Q}(\bar{X}), \overline{C}(\bar{X})], \quad (2)$$

А це означає розв'язання задачі багатокритеріальної оптимізації. Здобутий при цьому результат не буде оптимальним для жодного з критеріїв, а таким собі компромісом для вектора $\overline{U}(\bar{X})$.

Проблему можна вирішити шляхом згортання векторного критерію, тобто в деякій області компромісів (оптимальних за Парето) необхідно надати перевагу одному з параметрів.

Наприклад, для економічного ефекту така модель може бути представлена в такому вигляді [3, 8, 12]:

$$\Xi = 0.35K(\varphi - \sigma) + Z_{II}(\varphi - 1/\varepsilon) + m\varphi(1 - \delta) \quad (3)$$

де K – капітальні вклади у виробничі фонди по базовому варіанту;

φ – коефіцієнт зміни продуктивності варіанта, що аналізується порівняно з базовим (відношення об'ємів готової продукції, що випускається за однаковий період часу);

σ – коефіцієнт збільшення вартості (капітальних витрат);

Z_{II} – річний фонд виробничої зарплати;

ε – коефіцієнт скорочення кількості обслуговуючих робітників (по фонду зарплати);

m – річні витрати, пропорційні випуску виробів $m = m_1 Q_G$;

m_1 – витрати на одиницю виробу, які залежать від технологічного процесу;

Q_G – річний об'єм продукції, що випускається;

δ – коефіцієнт зміни поточних витрат, які припадають на одиницю виробу.

Варіант структури ГВС оптимізується за допомогою моделей, розроблених на методах теорії масового обслуговування та методах параметричної оптимізації, таких як числові методи математичного і стохастичного програмування, метод розрахунку по статистичним моделям на основі планування експерименту на імітаційних моделях, в тому числі симплексному методу.

Симплексний метод планування експериментів належить до методів пошуку екстремуму цільової функції з мінімально можливим числом дослідів і обчислень. Суть методу полягає в тому [8, 14], що в n -вимірному факторному просторі E_n створюється симплексний метод (багатогранник), представлений множиною $(n + 1)$ точок, які не належать одночасно ніякому $(n - 1)$ – сектору цього простору E_n . Вершини симплекса задаються матрицею D розміром $n(n + 1)$, тобто:

$$D = \begin{pmatrix} 0 & d_1 & d_2 & \dots & d_2 \\ 0 & d_2 & d_1 & \dots & d_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & d_2 & d_2 & \dots & d_1 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

$$\text{де } d_1 = \left[l / (n\sqrt{2}) \right] (\sqrt{n+1} + n - 1); \quad d_2 = \left[l / (n\sqrt{2}) \right] (\sqrt{n+1} - 1);$$

l – параметр, який характеризує відстань між двома вершинами.

Для пошуку екстремуму в кожній вершині симплекса обчислюється значення цільової функції $Y(\bar{X})$. Визначається найбільша вершина $Y(\bar{X})_{\max}$. Через цю вершину і центральну точку симплекса обраховується нова вершина з координатами

$$x^* = \frac{21}{n} (x_{1,i} + x_{2,i} + \dots + x_{s,i} + \dots + x_{n+1,i}) - x^j$$

де $x_{s,i}$ – координата змінної вершини;

J – номер вершини початкового симплексу.

Послідовне обчислення цільової функції в новій точці дозволяє симплексу послідовно переміщатися у напрямку градієнта. Оптимум досягається, якщо одна і та ж точка входить у послідовні симплекси M разів, де $M = 1.65n + 0.05n^2$, $2 \leq n \leq 30$.

Організаційно-технологічна структура ГВС складається з кількох рівнів. Верхній рівень вирішує завдання технологічної підготовки виробництва та оперативного-календарного планування, на середньому рівні виконується оперативне управління, диспетчерування та облік роботи окремих ГВС, системи управління яких знаходяться на найнижчому рівні. АСУ-ГВС призначена для впорядкування і синхронізації всіх компонентів ГВС, виконує функції оперативного-календарного планування, контролю, обліку, аналізу ходу виробництва та управління обладнанням. Таким чином, АСУ-ГВС забезпечує планово-організаційне і апаратно-технічне управління багатономенклатурним виробництвом. Організаційна структура ГВС торкається проблем роботи не тільки безпосередньо верстатів з ЧПУ, але й функціонування складів, накопичувачів, міжопераційних заділів, які компенсують різницю в продуктивності роботи верстатів та їх недостатньої надійності. Розмір заділів впливає на обсяг незавершеного виробництва і вартість транспортних засобів. При динамічному програмуванні задача оптимізації виглядає таким чином [3, 4, 8].

Нехай ГВС включає в себе N верстатів, які працюють у звичному режимі, а накопичувач кожного $(j + 1)$ -го верстата виконує роль компенсатора простоїв j -го гнучкого модуля. Розміри накопичувачів

кожного модуля підбираються таким чином, щоб його вплив на випуск продукції був мінімальним. Процес оптимізації стає N -кроковим. Тоді як цільова функція приймається [3, 6]:

$$f(\bar{z}) = \sum_{j=1}^N q_{j,N}(z_{j+1}) \rightarrow \min \quad (5)$$

де \bar{z} – вектор значень параметрів (об'єм накопичувачів); $q_{j,N}(z_{j+1})$ – величина технічних затрат при ємності $(j+1)$ -го накопичувача.

$$\sum_{j=1}^N h_j \leq H$$

При цьому приймаються обмеження на об'єм виробництва, яке ще не завершилося, де h_j – об'єм незавершеного виробництва, що належить до j -го модуля, і допустима втрата продуктивності

$$\sum_{i=1}^M q_i \leq \Delta Q_{\text{ДОП}}$$

, де q_i – величина i -х втрат продуктивності.

Організаційна структура визначає кількість операторів, які забезпечують роботу ГВС. Кількість операторів залежить в першу чергу від надійності модулів ГВС. Спочатку за допомогою спрощеної імітаційної моделі обчислюється ймовірність одночасної відмови декількох одиниць обладнання. Для цього методом ступінчастої апроксимації знаходиться щільність ймовірності $P_k(n_0)$, де n_0 – число елементів (наприклад, дільниць), що відмовили одночасно, яке змінюється в інтервалі $[a, b]$.

$$\bar{P}_k(n_0) = \begin{cases} h^{1/2} & \text{при } a + h(k-1) \leq n_0 \leq a + hk; \\ 0 & \text{при } n_0 < a + h(k-1), n_0 > a + hk. \end{cases}$$

Для цієї ГВС $a = 1, b = N_0, h = 1$, де N_0 – число модулів, які можуть відмовити.

Тоді ймовірність одночасної відмови [8, 12]

$$\bar{P}_k(n_0) = n_k(1/L_{N_0}) \quad (6)$$

На стадії технологічного проектування вирішуються завдання синтезу структури та елементів ГВС, що визначає об'єкт управління, для якого створюється АСУ–ГВС. Структура ГВС, в свою чергу, визначає структуру АСУ–ГВС, яка зазвичай складається з модулів планування, диспетчерування, групового і локального управління верстатами з ЧПУ та транспортними системами. На етапі проектування розглядаються різні ситуації функціонування окремої виробничої одиниці (дільниці, цеху). Аналіз ситуацій дозволяє шляхом моделювання визначити такі параметри [4, 5]: втрати і резерви часу, пов'язані з функціонуванням основного та допоміжного обладнання, заміною оснащення та інструменту; запізнення в виконанні інтегральних планів по дільниці, цеху; вартість незавершеного виробництва; вартість технологічного оснащення та інструменту; число аварійних ситуацій в ГВС тощо.

АСУ–ГВС належать до класу систем організаційно-технологічного типу. Такі системи, як правило, вирішують проблеми одержання та передачі інформації про об'єкт, а також переробки цієї інформації з видачею керуючих команд на об'єкт управління [6]. Структура та технічні засоби АСУ–ГВС визначаються складом математичних моделей і алгоритмів функціонування верстатних систем та їх окремих підсистем. При цьому передбачається, що конструктивно-технологічні рішення, одержані на етапі технологічного проектування ГВС, не змінюються при розробці АСУ–ГВС. Проте ітераційна процедура проектування передбачає оцінку проектних рішень з точки зору їх відображення на структуру і функціональну організацію АСУ–ГВС та корегування одержаних результатів на наступних етапах проектування. Отже, існує органічний взаємозв'язок проблем автоматизації технологічного проектування і управління верстатною системою.

Процес системного проектування АСУ–ГВС розділяється на дві стадії [7–9]: -макропроектування, коли визначається мета і критерії управління в АСУ–ГВС, її підсистемах; а також розробляється організаційна та інформаційна структура системи і характеристики її окремих підсистем; -мікропроектування, коли здійснюється вибір і проектування компонентів системи, тобто розробка її підсистем на основі математичних моделей і алгоритмів роботи елементів ГВС.

Етап макропроектування найбільш тісно пов'язаний з технологічним проектом ГВС, тому що визначає належний рівень деталізації проекту АСУ–ГВС та окремих її підсистем. Крім того, технологічне проектування дозволяє визначити ієрархію структури системи управління ГВС та її місце в системах більш високого рівня – дільниці, цеху і заводу в цілому. При цьому необхідно мінімізувати ступені ієрархії та координації задач управління.

Аналіз технологічних процесів ГВС та рівня її автоматизації визначає не тільки структуру АСУ–ГВС, але й місце оператора в цій системі, тобто технологічне проектування є базою для визначення функцій людини в автоматизованій системі управління. Тому функціональне середовище ГВС,

інформаційні та алгоритмічні моделі дозволяють розподілити і уточнити функції оператора у виробничому процесі.

Розробка проекту АСУ–ГВС виконується паралельно з розробкою технологічної частини проекту ГВС, при чому існує можливість опрацювання загальної структури системи та її програмно-математичного забезпечення. В підсумку на етапі технологічного проектування ГВС формується технічне завдання (ТЗ) на проектування структури та програмного забезпечення АСУ–ГВС. В ТЗ на основі технологічних опрацювань формуються необхідні початкові дані. У зв'язку з цим оцінюється вплив технологічного проекту на процес формування ТЗ на створення АСУ–ГВС.

Розробка «елементної технології» [8, 9] та групування технологічних об'єктів [8, 10] надають вихідні дані по номенклатурі оброблюваних деталей, технологічних характеристиках груп деталей, розмірах та черговості партій запуску деталей у виробництво, об'ємах змінних і добових завдань, верстатоемності оброблюваних деталей, характеру налаштувань технологічного оснащення тощо.

Підсистема вибору основного технологічного обладнання і транспортних засобів [1, 2, 8, 9] є джерелом інформації про якісний та кількісний склад обробного та допоміжного обладнання. Їх технічні характеристики і технологія обробки деталей дають можливість розробити циклограми роботи окремих одиниць обладнання, агрегатів та вузлів. У свою чергу структура АСУ–ГВС висуває певні вимоги до окремих характеристик обладнання ГВС: сумісність основного і транспортного обладнання, накопичувачів, агрегатів перезавантаження супутників, локальних систем ЧПУ тощо. На цьому етапі доцільно присвоїти кодові номери усім одиницям обладнання для використання їх в керуючих директивах і діагностичних повідомленнях, що їх видає АСУ–ГВС. На цьому етапі виникають задачі багатокритеріальної оптимізації [3, 7, 11]. У ГВС, як правило, для кожної групи деталей існує єдиний оптимальний варіант технологічного процесу, який зумовлює структуру системи. Параметри цього технологічного процесу не є оптимальними для іншої групи, але вони мають бути для неї прийнятними. Такі особливості мають бути враховані ще на стадії проектування для того, щоб мінімізувати втрати, викликані відхиленням параметрів від їх оптимального значення по кожному з технологічних процесів.

У цьому випадку проблема вирішується шляхом представлення її векторним критерієм оптимізації \bar{Y} [3]. Елементами цього вектора будуть критерії оптимальності по кожному з технологічних процесів, а узагальнена умова виражається залежністю

$$\bar{Y} \left[U_1(\bar{X}_1), \dots, U_n(\bar{X}_n) \right] \rightarrow opt, \quad X \in \Omega, \quad (7)$$

де \bar{Y} – вектор значень i -го процесу, що потребує оптимізації; $U_i(\bar{X})$ – критерій оптимальності по обробці i -го виробу; Ω – область визначення параметрів.

Як U_i приймаються критерії продуктивності, економічної ефективності, якості, а також специфічні критерії найбільш важливі для конкретного процесу.

Верстати з ЧПУ, включені у ГВС на етапі синтезу її структури, визначають функції системи, пов'язані з управлінням верстатами: режими роботи верстатів, взаємодія з системами подачі заготовок та інструменту, зв'язок з системами контролю якості обробки та діагностики стану обладнання, організація забезпечення верстатів керуючими програмами і засобами їх корегування та контролю.

Проблема організації матеріальних та інформаційних потоків у ГВС надзвичайно важлива для цілей управління. Тому при вирішенні питання вибору транспортних засобів на етапі технологічного проектування необхідно передбачати специфіку управління транспортними засобами різного функціонального призначення. В свою чергу раціональний вибір транспортних засобів і організація грузопотоків в ГВС впливає на побудову системи управління. Ці проблеми вирішуються [1, 2, 9] у підсистемах вибору транспортних роботів та розміщення обладнання на виробничих площах. Рішення, отримані в цих підсистемах, є вихідними даними для ТЗ на проектування АСУ–ГВС. Оптимальне розв'язання цієї задачі управління [1, 3, 8] забезпечує підвищення ефективності функціонування транспортної системи та ГВС в цілому. Система транспортування деталей має безпосередній зв'язок з системою, яка управляє верстатним комплексом, тому на цьому етапі необхідно розмежувати зони дії цих систем.

Система забезпечення обробного обладнання інструментом, яка формується на етапі технологічного проектування багато в чому визначає побудову АСУ–ГВС. Робота цієї системи тісно пов'язана з роботою верстатів, тому для системи управління важливе розмежування функцій системи інструментального забезпечення та управління верстатами. В ТЗ на розробку АСУ–ГВС впливають відомості про стратегію заміни інструменту на верстатах, можливі маршрути переміщення інструментів, критерії розв'язання конфліктних ситуацій, умови зв'язку з підсистемами управління верстатами та транспортування деталей.

Програмне забезпечення АСУ–ГВС будується залежно від технологічної структури ГВС і звичайно підрозділяється на такі підсистеми: управління організаційними функціями ГВС, управління верстатами з ЧПУ, управління транспортом деталей і управління транспортом інструменту.

Технологічне проектування ГВС постачає дані для формування інформаційної бази АСУ–ГВС, яка містить відомості організаційного, технологічного й управлінського характеру. Побудування

інформаційної бази на єдиній основі дозволяє швидко корегувати інформацію залежно від зміни виробничої ситуації.

Питання організаційного планування і управління – найбільш важливі для розв’язання задач підвищення ефективності багатомоноклітурного виробництва. Саме тому є ефективною програма-імітатор [3, 8], яка дозволяє оцінити організаційне планування і управління на етапі технологічного проектування. Допустимо, що для кожного i -го виробу з їх загального числа n визначені оптимальні значення вектора параметрів ВС \bar{X}_i і характеризує його ефективність $Y_i^*(\bar{X}_i)$ (продуктивність та інші характеристики мають бути в заданих межах). Ці характеристики \bar{X}_i та $Y_i^*(\bar{X}_i)$ окреслюють межі області Парето, де можна шукати оптимальне рішення. Для кожного i -го варіанта ГВС визначаються технологічні характеристики і ефективність при кожному з векторів параметрів $\bar{X}_l, l = (1, 2, \dots, n; l \neq i)$

Через c_{il} позначають міру, яка символізує відносне відхилення від оптимального значення ефективності:

$$c_{il} = \frac{Y_i^*(\bar{X}_i) - Y_i(\bar{X}_l)}{Y_i(\bar{X}_i)} \quad (8)$$

Далі будується квадратна матриця розмірністю $n \times n$ виду:

	\bar{Y}_1^*	\bar{Y}_2^*	...	\bar{Y}_n^*	
\bar{X}_1	0	c_{12}	...	c_{1n}	
\bar{X}_2	c_{21}	0	...	c_{2n}	(9)
...	
\bar{X}_n	c_{n1}	c_{n2}	...	0	

$$g_i = \sum_{l=1}^n c_{il}$$

Сума мір по кожному рядку матриці g_i дає можливість оцінити сумарні відносні втрати ефективності за всіма варіантами при умові, що вони мають сукупність параметрів \bar{X}_i [3].

$$g_i \xrightarrow{\bar{X} \in \Omega} \min$$

Далі визначається такий X , для якого

Компромісне рішення знаходиться таким чином: із отриманих значень g_i знаходять мінімальне $g_{i\min}$ та відповідний йому вектор \bar{X}_i^0 , що є головним при пошуку в заданій області Парето. Потім обчислюється ваговий коефіцієнт для кожного з варіантів за формулою $v_i = c_{il}/g_i$ та будується їх ранжування відповідно до цих коефіцієнтів по мірі зростання. Таким чином [4, 7], є втрати ефективності по i -му варіанту, оцінювані за допомогою співвідношення (10), що виражає в цьому випадку наведені поступки, які необхідно мінімізувати.

Таким чином виконується метод мінімізації поступок і стосовно до розглянутого випадку функція, яка підлягає мінімізації, матиме вигляд:

$$F(g) = g \rightarrow \min, \bar{X} \in \Omega_n, \quad (10)$$

де Ω_n – область Парето.

Відомо [3, 8, 14], що існує кілька рівнів планування, які дозволяють формувати плани шляхом поетапного підвищення ступеня конкретизації від об’ємного планування до календарного та оперативного планування.

Задачі об’ємного планування є початковими для підсистем планування більш низького рівня ієрархії. Вони розв’язуються зазвичай на рівні формування вихідних даних для технологічного проектування ГВС. При формуванні ТЗ для створення АСУ–ГВС основними є задачі оперативного календарного планування та управління. Моделювання і оптимізація структури ГВС [11, 12, 14] дозволяють на етапі технологічного проектування запропонувати вихідні дані для складання субоптимальних планів-графіків запуску деталей і є методичною базою для формування підсистеми оперативного календарного планування та управління ГВС.

Висновки. Існуючий взаємозв’язок задач автоматизації технологічного проектування і управління дозволяє зробити висновок про те, що одержані проектні рішення у вигляді математичних моделей, які відображають структуру основного та допоміжного обладнання ГВС і засобів їх технологічного та інструментального забезпечення, є базою для створення автоматизованих систем управління проектованих верстатних комплексів. Запропонована процедура багатокритеріальної оптимізації,

основана на спрощенні векторного критерію до скалярної цільової функції на деякій області компромісів. Імітаційне моделювання на етапі проектування ГВС сприяє підвищенню ефективності не тільки проектування, але й експлуатації ГВС. При цьому доведено, що при проектуванні ГВС первинною має бути технологія обробки деталей, яка формує основні показники для вибору всіх складових ГВС, починаючи з основного технологічного обладнання і закінчуючи технічним його обслуговуванням. Розроблено методичні положення формування технічного завдання на створення автоматизованої системи управління ГВС. Отже, створено передумови для цільової розробки інтегральної системи автоматизованого управління технологічними процесами та функціонування ГВС.

Список використаної літератури:

1. Системы управления гибким автоматизированным производством / А.А. Краснопрошина, В.В. Крижановский, Л.Ф. Компанец и др. ; под общей ред. А.А. Краснопрошиной. – К. : Вища школа, 1987, – 383 с.
2. Скурихин В.И. Автоматизированные системы управления гибкими технологиями / В.И. Скурихин, А.А. Павлов, С.Н. Гриша. – К. : Техника, 1987. – 166 с.
3. Meng Chu Zhou Modeling, Simulation and Control of Flexible Manufacturing Systems / Meng Chu Zhou, Kurapati Vencatesh. – USA : New Jersey Institute of Technology, 1999. – 428 p.
4. Tolio T. Design of Flexible Production Systems. Methodologies and Tools / T.Tolio. – Berlin : Springer, 2009.
5. Hary Gunarto An Industrial FMS Communication Protocol UMI / Hary Gunarto. – Michigan, 1988. – 166 p.
6. Козырев Ю.Г. Гибкие производственные системы / Ю.Г. Козырев // Book.ru. – М. : Кнорус, 2017. – 288 с.
7. Chryssolouris G. Manufacturing Systems. Theory and Practice. – 2nd edition / G.Chryssolouris. – NY: Springer Verlag, 2005. – 233 p.
8. Пуховский Е.С. Проектирование станочных систем многономенклатурного производства / Е.С. Пуховский, А.Б. Кукарин. – К. : Техника, 1997. – 222 с.
9. Пуховский Е.С. Технологические основы гибкого автоматизированного производства / Е.С. Пуховский. – К. : Вища школа, 1989. – 240 с.
10. Выжигин А.Ю. Гибкие производственные системы / А.Ю. Выжигин. – М. : Машиностроение, 2009. – 288 с.
11. Azab A. Mathematical Modelling for reconfigurable process planning / A.Azab, H.A. El Maraghy // CIRP Annals – Manufacturing Technology. – 2007. – № 56 (1). – P. 467–472.
12. Guash A. Automatic warehouse modelling and simulation. Process modelling / A.Guash, M.Piera, J.Figueras // International Journal of Simulation. – 2011. – № 6 (4). – P. 228–296.
13. Matta A. Design of advanced manufacturing systems / A.Matta, Q.Samerato. – The Netherlands : Springer, 2005.
14. Rezail K. A Mathematical Model for optimal and phased implementation of flexible manufacturing systems / K.Rezail, B.Ostadi // Applied Mathematics and Computation, 2007. – № 184 (2). – pp. 729–736.
15. Shivanaud H. Flexible manufacturing system / H.Shivanaud, M.Benal, V.Koti. – Banglador : New Age International Publishers, 2006.

References:

1. Krasnoproshina, A.A., Krizhanovskii, V.V., Kompanets, L.F. et al. (1987), *Sistemy upravleniya gibkim avtomatizirovannym proizvodstvom*, by Krasnoproshinoi, A.A. (ed.), Vyshha shkola, K., 383 p.
2. Skurikhin, V.I., Pavlov, A.A. and Grisha, S.N. (1987), *Avtomatizirovannye sistemy upravleniya gibkimi tekhnologiyami*, Tekhnika, K., 166 p.
3. Meng Chu Zhou and Kurapati Vencatesh (1999), *Modeling, Simulation and Control of Flexible Manufacturing Systems*, New Jersey Institute of Technology, USA, 428 p.
4. Tolio, T. (2009), *Design of Flexible Production Systems. Methodologies and Tools*, Springer, Berlin.
5. Hary Gunarto (1988), *An Industrial FMS Communication Protocol UMI*, Michigan, 166 p.
6. Kozyrev, Yu.G. (2017), *Gibkie proizvodstvennye sistemy*, Book.ru., Knorus, M., 288 p.
7. Chryssolouris, G. (2005), *Manufacturing Systems. Theory and Practice*, 2nd edition, Springer Verlag, NY, 233 p.
8. Pukhovskii, E.S. and Kukarin, A.B. (1997), *Proektirovanie stanochnykh sistem mnogonomenklaturnogo proizvodstva*, Tekhnika, K., 222 p.
9. Pukhovskii, E.S. (1989), *Tekhnologicheskie osnovy gibkogo avtomatizirovannogo proizvodstva*, Vyshha shkola, K., 240 p.
10. Vyzhigin, A.Yu. (2009), *Gibkie proizvodstvennye sistemy*, Mashinostroenie, M., 288 p.
11. Azab, A. and El Maraghy, H.A. (2007), «Mathematical Modelling for reconfigurable process planning», *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, No. 56 (1), pp. 467–472.
12. Guash, A., Piera, M. and Figueras, J. (2011), «Automatic warehouse modelling and simulation. Process modelling», *International Journal of Simulation*, No. 6 (4), pp. 228–296.
13. Matta, A. and Samerato, Q. (2005), *Design of advanced manufacturing systems*, Springer, The Netherlands.
14. Rezail, K. and Ostadi, B. (2007), «A Mathematical Model for optimal and phased implementation of flexible manufacturing systems», *Applied Mathematics and Computation*, No. 184 (2), pp. 729–736.
15. Shivanaud, H., Benal, M. and Koti, V. (2006), *Flexible manufacturing system*, New Age International Publishers, Banglador.

Пуховський Євген Степанович – доктор технічних наук, професор кафедри технології машинобудування Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

<https://orcid.org/0000-0001-7843-0922>.

Наукові інтереси:

- гнучкі виробничі системи машинобудування;
- обробка металів різанням;
- динаміка верстатів;
- технологія машинобудування.

Pukhovskiy E.S.

Design of automated flexible production management system

The increase in the efficiency of multi-level production is associated with the creation of technological systems of machines capable of responding quickly to changes in the production situation with high productivity and the ability to quickly re-equipment. Therefore, the problem of creating flexible manufacturing systems (FMS) on the basis of existing machines with numerical control (CNC) for processing a specific group of parts with a given release program is extremely urgent. At the stage of creating the FMS structure, it is possible to predict the management strategy of multi-level production, which is characterized by a large number of states and situations determined depending on the production targets. For the production of parts and machines of wide range of importance is the creation of integrated systems of automated design of FMS (CAD- FMS), as well as specialized CAD for individual design stages [1, 2, 4–7, 10, 13, 15]. These problems can be solved on the basis of system design principles [1, 2, 4, 8, 13], as well as on the basis of mathematical and simulation modeling [3, 8, 9, 11, 12, 14]. The scientific novelty of the work consists in solving the problem of integration of problems of synthesis of elements of FMS subsystems, taking into account the technological purpose of the system and its technical and economic efficiency. The procedure for creating an automated control system (CAD-FMS) was developed, which is designed to organize and synchronize the work of all elements of the FMS and performs the functions of calendar planning, control, accounting and analysis of the course of production.

Keywords: flexible manufacturing system; synthesis; management; mathematical models; system design.

Стаття надійшла до редакції 06.04.2022.