УДК 65.011.56.012:004.94

П.М. Павленко, канд. техн. наук

АВТОМАТИЗОВАНЕ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ЗАВАНТАЖЕННЯ ОБЛАДНАННЯ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ

НАУ, Інженерний центр, e-mail: petrpav@nau.edu.ua

Наведено результати математичного моделювання процесів завантаження металообробного обладнання методами теорії масового обслуговування, які використані для побудови відповідного програмного модуля автоматизованої системи технологічної підготовки виробництва.

Вступ

Глобальні зміни в світовій економіці останніх років потребують від сучасних підприємств кардинального переосмислення їх стратегічної політики та переходу від функціональних структур керування до процесно-орієнтованих структур, діяльність яких направлена на постійне удосконалення якості кінцевого продукту та задоволення вимог клієнтів.

Такий підхід до керування заснований на поняттях діяльності та процесу (бізнес-процесу), який, у свою чергу, складається з набору операцій та дій, порядок виконання яких чітко визначається технологією виготовлення того чи іншого виробу.

Перехід до процесно-орієнтованих структур потребує проведення детального аналізу існуючих бізнес-процесів та відповідно до розробленої стратегії розвитку підприємства побудови нових бізнес-процесів, які будуть задовольняти вимоги нової стратегії.

Аналіз існуючих бізнес-процесів передбачає побудову функціональних, організаційних та інформаційних моделей виробництва з відповідним рівнем деталізації.

Аналіз досліджень і публікацій

Для створення типових функціональних моделей запропонована чотирирівнева класифікація функцій, які моделюються блоками методології IDEF (Integrated Computer Aided Manufacturing – ICAM Definition), заснованої на графічному зображенні системи (підприємства).

Класифікація ділить всі функції таких систем (підприємств) на чотири основні типи [1]:
– діяльність;
– процес;
– операція;
– дія.

Діяльність (синоніми: справа, бізнес) – сукупність процесів**,** які виконуються (протікають) послідовно або/і паралельно та перетворюють множину матеріальних або/і інформаційних потоків у множину матеріальних або/і інформаційних потоків з іншими властивостями.

Процес (синонім: бізнес-процес) — сукупність операцій, які виконуються послідовно або/і паралельно та перетворюють матеріальний або/і інформаційний потік у відповідні потоки з іншими властивостями. Процес протікає відповідно до директив керування**,** які формуються на основі цілей діяльності. Під час процесу використовуються фінансові, енергетичні, трудові та матеріальні ресурси, враховуються обмеження з боку інших процесів та зовнішнього середовища.

Як приклад одного з рівнів декомпозиції функціональної моделі абстрактного підприємства до рівня процесів на рисунку зображено функціональну модель технологічного процесу механічної обробки деталей.

Процес складається з п’яти технологічних операцій. Після першої операції матеріальний потік розділяється на паралельні потоки. У результаті потік заготовок на вході перетворюється на потік готових деталей на виході.

Отже, наступним рівнем декомпозиції є операція.

Операція **–** сукупність дій, які виконуються послідовно або/і паралельно та перетворюють об’єкти, що належать до складу матеріального або/і інформаційного потоку, у відповідні об’єкти з іншими властивостями.

Дія – перетворення будь-якої властивості матеріального або інформаційного об’єкта в іншу властивість. Дія виконується відповідно до команди, яка є частиною директиви на виконання операції із споживанням необхідних ресурсів та з дотриманням обмежень, які накладаються на здійснення операції**.**

Постановка задачі

Створені функціональні моделі підприємства є декларативними та концептуально описують бізнес-процеси. Вони принципово не можуть відповісти на питання про те, як протікають процеси в часі і просторі, які їх характеристики. Усі ці питання виникають після того, як у процесі розробки функціональної моделі досягнуто нижній рівень декомпозиції. Після цього необхідно здійснити перехід до математичних моделей, які описують процеси у функціональних блоках.

Подальша математична формалізація функціонування підприємства на рівні операцій та дій, яка дає змогу отримати якісні характеристики виробництва та оцінити його ефективність, є найбільш складною задачею аналізу функціонування підприємства і потребує використання спеціальних математичних методів дослідження. Тому саме питанню математичного моделювання процесів завантаження обладнання, тобто роботи підприємства на рівні операцій та дій, і присвячена ця стаття.

Результати досліджень

Бізнес-процеси на підприємствах машинобудівної галузі можна досліджувати методами теорії масового обслуговування.

Предметом теорії масового обслуговування є розробка ймовірнісно-статистичних методів вирішення задач з обслуговування великої кількості однорідних об'єктів, наприклад, надходження заготовок до ліній обробки, робота ліній обробки, проектування технологічних процесів та ін.

Моделі масового обслуговування дозволяють оцінити продуктивність блоків (функцій, прецендентів), які виконують перетворення матеріальних та інформаційних потоків, визначити реальну пропускну здатність каналів (ліній обробки), за якими ці потоки передаються, виявити вузькі місця та резерви, оцінити залежність продуктивності від надійності елементів та витрати ресурсів.

Уведемо деякі поняття, необхідні для подальшого викладення матеріалу.

Потік одиниць, що обслуговується незалежно від його конкретної природи, називають потоком заявок.

Потік однорідних подій – це певна послідовність подій, однорідних за фактом здійснення або нездійснення події в той чи інший момент часу.

Моменти здійснення цієї події можуть бути чітко визначеними, тоді як інтервали між моментами здійснення подій є випадковими величинами. Значно частіше трапляються випадки, коли інтервали між моментами здійснення подій і самі моменти не визначені та є випадковими величинами. У цьому разі потік буде визначеним, коли відомий закон розподілу моментів здійснення цієї події, тобто для будь-яких значень $t_1, t_2, ..., t_k$ і будь-якого k відома функція

$$F(t_1, t_2, ..., t_k) = P\{t^{(1)} < t_1, t^{(2)} < t_2 ... t^{(k)} < t_k\},$$

де $t^{(k)}$ – k-й момент здійснення події, що визначає потік.

Потік заявок у теорії масового обслуговування є деяким потоком однорідних подій.

Система масового обслуговування (СМО) – сукупність обладнання, фахівців та організації самого процесу обслуговування [2].

У процесі обслуговування заявка займає на деякий час певний канал. Цей час називають часом зайнятості каналу.

За кількістю каналів СМО може бути одноканальною чи багатоканальною. Залежно від організації обслуговування СМО класифікується за трьома типами [3]:

– система з відмовами – заявка, яка надходить до системи в той час, коли всі канали зайняті, покидає систему без обслуговування;

– система з очікуванням – заявка, яка надійшла в систему, де всі канали зайняті, не покидає систему, а очікує, коли звільниться будь-який канал і тоді обслуговується;

– система з обмеженим очікуванням – механізм обслуговування такий, як і у випадку системи з очікуванням, але на час чекання накладено обмеження, після якого заявка отримує відмову в обслуговуванні.

Розглянемо математичну модель багатоканальної СМО з обмеженим очікуванням як найбільш складний випадок. Будемо вважати, що всі n каналів системи однаково досяжні для всіх заявок.

Основним показником роботи системи з обмеженим очікуванням є вірогідність відмови $ð_{â³ä}(t)$ та асимптотична поведінка цієї величини при $t \to \infty$. Для багатоканальної системи доведено, що існує

$$\lim_{t \to \infty} p_{â³ä}(t) = p_{â³ä}.$$

При функціонуванні системи можливі такі стани:

0 – всі канали вільні;

1 – один канал зайнятий, а n–1 каналів вільні;

..., ..., ..., ..., ..., ..., ..., ..., ..., …,

k – каналів зайняті, а n-k каналів вільні;

..., ..., ..., ..., ..., ..., ..., ..., ..., …,

n – всі n каналів зайняті, але черги немає;

n+1 – всі n каналів зайняті й одна заявка в черзі;

..., ..., ..., ..., ..., ..., ..., ..., ..., …,

n+s – всі n каналів зайняті і s заявок у черзі.

Визначимо через $p_k(t)$ вірогідність того, що система в момент часу t знаходиться в стані k, тобто

$$\lim_{t \to \infty} p_k(t) = p_k.$$

Величину p_k можна пояснити як вірогідність знаходження системи в стані k (стаціонарний режим).

Розглянемо декілька випадків, коли можливе аналітичне вирішення задачі [2].

Для всіх випадків вхідний потік заявок вважається найпростішим з параметром λ – інтенсивність потоку на вході системи – і з кількістю каналів n.

Вважаємо, що час зайнятості каналу $t_з$ і час чекання $\tau_{\text{î÷}}$ розподілені за показниковими законами з параметрами

$$\grave{I}\ (t_{\text{ç}}) = \frac{1}{\mu},\ \ \grave{I}\ (\tau_{\text{î÷}}) = \frac{1}{\nu},$$

де μ – інтенсивність обробки в каналі; ν – інтенсивність покидання каналу.

При показниковому законі розподілення часу чекання пропускна здатність не залежить від того, як обслуговується заявка, за чергою чи випадково.

Ураховуючи наведені припущення та аналітичне дослідження [4], для p_k були отримані такі залежності:

$$p_k = \frac{\dfrac{\alpha^k}{k!}}{\sum\limits_{k=0}^{n}\dfrac{\alpha^k}{k!} + \dfrac{\alpha^n}{n!}\sum\limits_{s=1}^{\infty}\dfrac{\alpha^s}{\prod\limits_{m=1}^{s}(n+m\beta)}}, \text{ якщо } (0 \le k \le n), \quad (1)$$

$$p_{n+s} = \frac{\dfrac{\alpha^n}{n!}\dfrac{\alpha^s}{\prod\limits_{m=1}^{s}(n+m\beta)}}{\sum\limits_{k=0}^{n}\dfrac{\alpha^k}{k!} + \dfrac{\alpha^n}{n!}\sum\limits_{s=1}^{\infty}\dfrac{\alpha^s}{\prod\limits_{m=1}^{s}(n+m\beta)}}, \text{ якщо } (s \ge 1), \quad (2)$$

$$\text{де } \alpha = \frac{\lambda}{\mu}; \quad \beta = \frac{\nu}{\mu}. \quad (3)$$

Вірогідність відмови визначається як відношення середньої кількості заявок, які вибувають з черги за одиницю часу, до середньої кількості заявок, які надходять за одиницю часу. Якщо $M(s)$ – математичне сподівання кількості заявок, що знаходяться в черзі, тоді, ураховуючи вираз (3):

$$p_{\text{â³ä}} = \frac{\nu M(s)}{\lambda} = \frac{\beta}{\alpha}M(s). \quad (4)$$

Математичне сподівання кількості заявок $M(s)$ визначають за формулою:

$$M(s) = \sum_{s=1}^{\infty} s p_{n+s} = \frac{\dfrac{\alpha^n}{n!}\sum\limits_{s=1}^{\infty}\dfrac{s\alpha^s}{\prod\limits_{m=1}^{s}(n+m\beta)}}{\sum\limits_{k=0}^{n}\dfrac{\alpha^k}{k!} + \dfrac{\alpha^n}{n!}\sum\limits_{s=1}^{\infty}\dfrac{\alpha^s}{\prod\limits_{m=1}^{s}(n+m\beta)}}. \quad (5)$$

Ураховуючи вирази (4), (5), отримуємо формулу вірогідності відмови:

$$p_{\text{â³ä}} = \frac{\beta}{\alpha}\frac{\dfrac{\alpha^n}{n!}\sum\limits_{s=1}^{\infty}\dfrac{s\alpha^s}{\prod\limits_{m=1}^{s}(n+m\beta)}}{\sum\limits_{k=0}^{n}\dfrac{\alpha^k}{k!} + \dfrac{\alpha^n}{n!}\sum\limits_{s=1}^{\infty}\dfrac{\alpha^s}{\prod\limits_{m=1}^{s}(n+m\beta)}}. \quad (6)$$

Припускаючи, що у формулах (1), (2), (6) $\frac{1}{\nu} \to 0$, отримуємо рівняння для вірогідності станів та вірогідності відмови в СМО з відмовами:

$$p_k = \frac{\dfrac{\alpha^k}{k!}}{\sum\limits_{k=0}^{n}\dfrac{\alpha^k}{k!}}, \text{ якщо } (0 \le k \le n), \quad (7)$$

$$p_{\text{â³ä}} = \frac{\dfrac{\alpha^n}{n!}}{\sum\limits_{k=0}^{n}\dfrac{\alpha^k}{k!}}. \quad (8)$$

Формули (7), (8) мають назву формул Ерланга і справедливі при будь-якому законі розподілу часу обслуговування [3]. Обмеження накладаються тільки на вхідний потік заявок, який повинен бути найпростішим.

Припустимо, що час зайнятості системи $t_з$ є випадковою величиною, розподіленою за показниковим законом із параметром μ, а час чекання – детермінованою величиною

$$\tau_{\div} = \tau = \frac{1}{\nu}.$$

Обслуговування здійснюється в порядку черговості надходження заявок у систему. За цих умов для вірогідності p_k отримаємо такі формули:

$$p_k = \frac{\alpha^k}{k!}p_0, \text{ якщо } 1 \le k \le n,$$

$$p_k = \frac{\alpha^k}{n!n^{k-n}}p_0 e^{-\frac{n}{\beta}}\sum_{j=k-n}^{\infty}\frac{\left(\dfrac{n}{\beta}\right)^j}{j!}, \text{ якщо } k > n.$$

Значення p_0 знаходимо з рівняння

$$\sum_{k=0}^{\infty} p_k = 1; \quad (9)$$

$$p_0 = \left[1 + \sum_{k=1}^{n}\frac{\alpha^k}{k!} + \frac{\alpha^{n+1}}{n!(n-\alpha)}\left(1 - e^{-\frac{n-\alpha}{\beta}}\right)\right]^{-1}, \quad (10)$$

якщо $\alpha \ne n$,

$$p_0 = \left[1 + \sum_{k=1}^{n}\frac{\alpha^k}{k!} + \frac{\alpha^{n+1}}{n!\beta}\right]^{-1}, \text{ якщо } \alpha = \beta.$$

Якщо $\tau = 0$ $(\beta \to 0)$, то всі вірогідності p_k, якщо $k > n$, перетворюються в нуль, отримаємо розв'язок Ерланга.

Для визначення вірогідності відмови $p_{\text{відм}}$ введемо величину c_s, яка є щільністю відмови за умови, що кількість заявок, які очікуються, дорівнює *s*. Маємо

$$c_s = \frac{n\mu\left(\frac{n}{\beta}\right)^{s-1} e^{-\frac{n}{\beta}}}{\int\limits_0^{n/\beta} z^{s-1}e^{-z}dz}.$$

Середню щільність відмови у цьому разі визначають як

$$\tilde{n} = \sum_{s=1}^{\infty} c_s p_{n+s} = \frac{\mu\alpha^{n+1}}{n!} e^{-\frac{n-\alpha}{\beta}} p_0. \quad (11)$$

Вірогідність відмови визначається співвідношенням

$$p_{\text{відм}} = \frac{c}{\lambda}. \quad (12)$$

Ураховуючи рівняння (11), (12), маємо

$$p_{\text{відм}} = \frac{\alpha^n}{n!} e^{-\frac{n-\alpha}{\beta}} p_0.$$

Коли $t_з$ та $\tau_{оч}$ описуються, як в попередньому випадку, а обслуговування здійснюється за умови випадкового вибору заявок із черги, будь-яка заявка може обслуговуватися з вірогідністю $1/s$:

$$p_k = \frac{\alpha^k}{k!},$$

якщо $1 \le k \le n$,

$$p_k = \frac{\alpha^k}{n!n^{k-n}} \prod_{j=1}^{k-n}\left(1 - e^{-\frac{n}{\beta j}}\right) p_0,$$

якщо $k > 1$.

Значення p_0, як і в попередньому випадку знаходимо з рівняння (9):

$$p_0 = \left[1 + \sum_{k=1}^{n} \frac{\alpha^k}{k!} + \frac{\alpha^n}{n!} \sum_{s=1}^{\infty} \left(\frac{\alpha}{n}\right)^s \prod_{j=1}^{s} \left(1 - e^{-\frac{n}{\beta j}}\right)\right]^{-1}.$$

Для визначення вірогідності відмови вводиться величина c_s для зроблених припущень, тобто:

$$c_s = \frac{n\mu e^{-\frac{n}{\beta s}}}{1 - e^{-\frac{n}{\beta s}}}.$$

Визначивши необхідні змінні, знаходимо середню щільність і вірогідність відмови:

$$c = \sum_{s=1}^{\infty} c_s p_{n+s} = \frac{\lambda\alpha^n}{n!} p_0 \sum_{s=1}^{\infty} \left(\frac{\alpha}{n}\right)^{s-1} e^{-\frac{n}{\beta s}} \prod_{j=1}^{s} \left(1 - e^{-\frac{n}{\beta j}}\right), \quad (13)$$

$$p_{\text{відм}} = \frac{\alpha^n}{n!} p_0 \left[e^{-\frac{n}{\beta}} + \sum_{s=1}^{\infty} e^{-\frac{n}{(s+1)\beta}} \left(\frac{\alpha}{n}\right)^s \prod_{j=1}^{s} \left(1 - e^{-\frac{n}{\beta j}}\right)\right]. \quad (14)$$

Якщо $\tau = 0$ $(\beta \to 0)$, як і в попередніх випадках, отримаємо розв'язок Ерланга.

Обслуговування заявки (дисципліна черги) впливає на показники системи, але можна розглянути варіанти вибору вільного каналу:

– усі канали мають свої номери, і заявка після надходження до системи обирає канал з найменшим номером;

– канали, які звільнюються, організовують чергу в порядку звільнення моментів від обслуговування, тобто заявка буде обслуговуватися каналом, першим у черзі (з максимальним часом простою);

– заявка займає будь-який з вільних каналів за випадковим законом розподілення.

Критерій вибору одного або деякої комбінації наведених варіантів залежить від конкретної ситуації. Так, якщо всі канали рівноцінні за вартістю або надійністю, то краще вибрати перший варіант. Другий варіант краще вибирати, коли всі канали рівноцінні, але бажано, щоб ступінь старіння був приблизно однаковим у момент часу t.

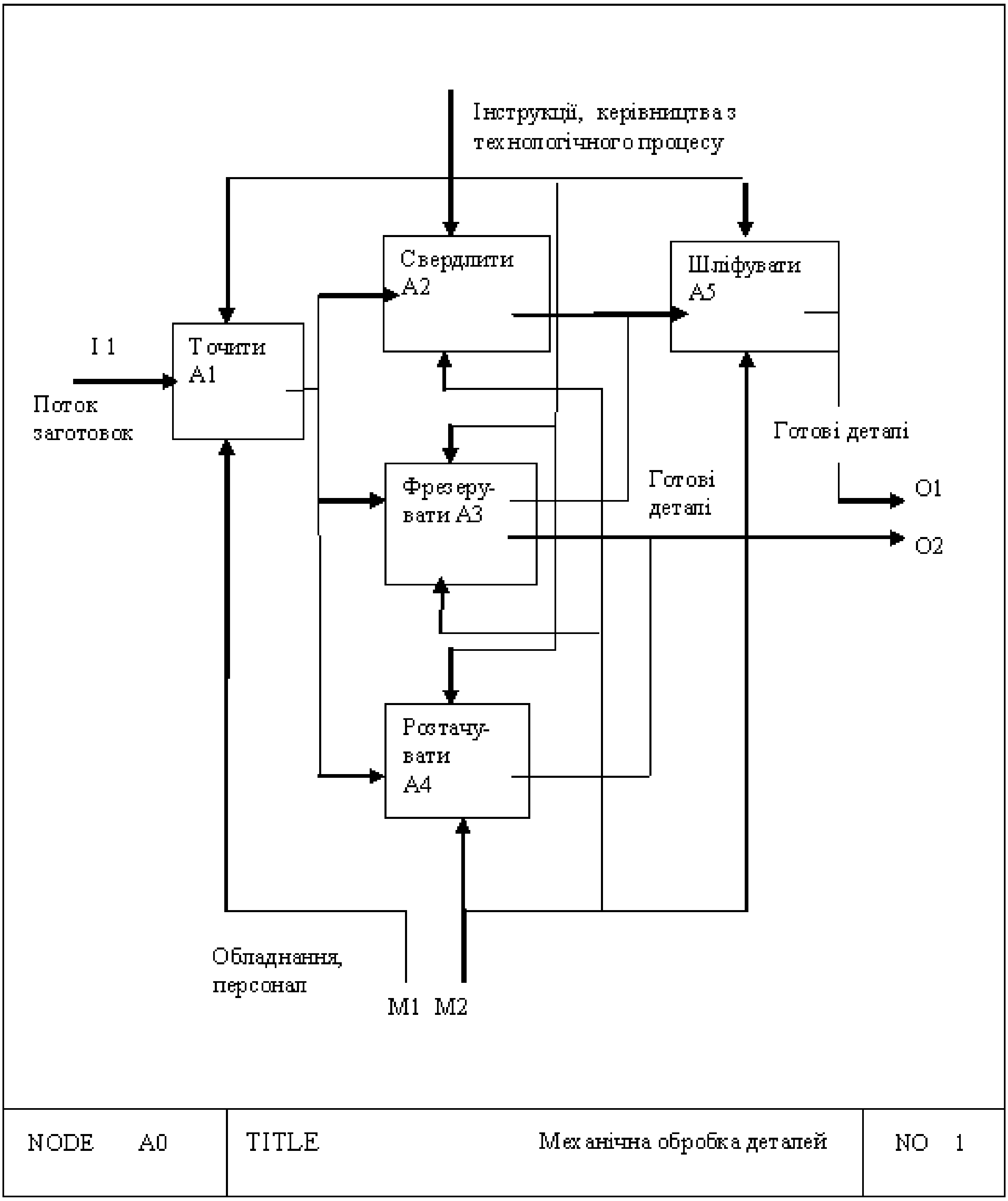
Описана СМО є однофазною для певного спрощення. Сучасні виробництва машинобудівної галузі є багатофазними, складаються із декількох однофазних систем, і заявки від однієї системи переходять в іншу. У цьому разі здійснюється декомпозиція системи із заданою деталізацією та будуються математичні моделі для кожної фази.

Як функціональну модель технологічного процесу, зображену на рисунку, проаналізуємо практичну реалізацію розглянутого математичного апарату. Для цього зробимо деякі припущення.

1. Вхідний потік заготовок, який приходить на обробку, – найпростіший пуасонівський потік з інтенсивністю λ. Середній час між надходженням наступної деталі (заявки) $T_д = 10$ с, тобто

$$\lambda = \frac{1}{T_д} = \frac{1}{10} = 0{,}1.$$

2. Кожний блок на IDEF0-діаграмі (див. рисунок) розглядається як металообробний верстат, який має n однакових і паралельно працюючих каналів. Заготовка, яка надійшла на верстат, обробляється на тому каналі, який першим звільнився від обробки заготовки, яка надійшла раніше, тобто розглядається другий варіант вибору вільного верстата, коли всі канали рівноцінні, але бажано, щоб ступінь старіння був приблизно однаковим у момент часу t.



IDEFO-діаграма технологічного процесу обробки деталей

Середній час механічної обробки (час зайнятості) на всіх каналах однаковий, є постійною величиною і дорівнює $t_{Ç}$, що відповідає інтенсивності процесу обробки

$$\mu = \frac{1}{t_{Ç}}.$$

3. Верстати А2, А3, А4 мають більше одного каналу ($n = 3$), матеріальні потоки на виході верстатів А2, А3 об'єднуються в один потік (для верстата А5). Отже, структуру системи, яка розглядається, можна віднести до складної.

Невиконання умови нормального функціонування системи $\frac{\lambda}{\mu n} < 1$ призводить до того, що черга заготовок, які чекають на обробку, буде нескінченно зростати.

Як дані для розрахунків використовуємо імперичні величини, які характеризують ефективність технологічного обладнання (табл. 1).

Таблиця 1

Вихідні дані для розрахунку параметрів технологічного процесу

Блок (верстат)	Технологічний процес	Середній час обробки	Відсоток виробничого браку, %	Кількість каналів
А0	Виготовлення	125	–	11
А1	Точіння	5	0,03	1
А2	Свердління	50	0,05	3
А3	Фрезерування	20	0,02	3
А4	Розточування	45	0,04	3
А5	Шліфування	5	0,02	1

Значення μ задається для кожного верстата індивідуально, виходячи з технічних характеристик та позначається як $\mu_з$($з = 1...ò$, $ò$ – загальна кількість верстатів у технологічній лінії, в нашому випадку п'ять верстатів).

Відсоток виробничого браку визначається відповідно до статистичних даних, які збираються протягом експлуатації даного обладнання. Кількість каналів визначають, виходячи з реальної організаційної структури.

Оскільки система має розподілену структуру, то для кожної гілки вихідного потоку (наприклад, після блоку А1) приписується частина заявок d_j, яка надходить у цю гілку.

Числові значення цих частин повинні задовольняти вимозі:

$$\sum_j d_j = 1,\ j = 1,2... \qquad (15)$$

Для формалізації зв'язку між відповідними верстатами використовуємо матрицю зв'язків (табл. 2), в елементи якої заносяться величини $d_{зj}$ за такими правилами: i – номер рядка (верстат, який передає), j – номер стовпця (верстат, який приймає).

Таблиця 2

Матриця зв'язків

Блок (верстат)	А0	А1	А2	А3	А4	А5
А0	0	0	0	0	0	0
А1	0	0	0,2	0,5	0,3	0
А2	0	0	0	0	0	1
А3	0	0	0	0	0	1
А4	0	0	0	0	0	0
А5	0	0	0	0	0	0

У праці [5] детально розглянутий математичний апарат для розрахунку якісних характеристик функціональної моделі (див. рисунок) з урахуванням обмежень та припущень, зроблених для цієї системи.

Формули (1)–(8), (10), (11) дещо спрощуються у зв'язку з припущенням, що час зайнятості та час чекання є постійними величинами.

Аналіз графу станів верстатів дозволяє отримати середню кількість заготовок, які очікують черги на обробку:

$$L_{î÷} = \frac{\grave{a}^{n+1} p_0}{n \cdot n! \left(1 - \frac{\grave{a}}{n}\right)^2}.$$

Вірогідність p_0 того, що верстат вільний, розраховується за формулою (10), але дещо спрощується з урахуванням зроблених припущень:

$$ð_0 = \frac{1}{1 + \sum_{k=1}^{n} \frac{a^k}{k!} + \frac{a^{n+1}}{n!(n-a)}}.$$

Середню кількість заготовок, які одночасно знаходяться в системі, тобто які обробляються та очікують черги, визначають за формулою

$$L_{ñèñ} = L_{î÷} + a.$$

Середній час перебування заготовки у черзі та в системі відповідно дорівнюють:

$$\tau_{î÷} = \frac{L_{î÷}}{\lambda};$$

$$\grave{O}_{ñèñ} = \frac{L_{ñèñ}}{\lambda}.$$

Середній час простою верстата в очікуванні чергової заготовки дорівнює:

$$T_{пр} = \frac{p_0}{\lambda}. \quad (16)$$

Процес розрахунку було автоматизовано та зведено у табл. 3.

Змінюючи вхідні параметри, можна визначити максимально ефективну функціональну структуру технологічного процесу та розробити рекомендації щодо впровадження технологічного процесу у виробництво.

Таблиця 3

Розрахунок параметрів технологічного процесу

Блок (верстат)	Інтенсивність		$a=\lambda/\mu$	Вірогідність, p_0	Середня кількість заготовок		Середній час		
	μ	$\lambda_i(i=1...m)$			у черзі на обробку $L_{оч}$	у системі (одночасно) $L_{сист}$	$\tau_{оч}$	$T_{сист}$	$T_{пр}$
A1	0,2000	0,0970	0,4850	0,5150	0,4567	0,9417	4,7087	9,7087	5,3093
A2	0,0200	0,0184	0,9215	0,3946	0,0329	0,9544	1,7868	51,7868	21,408
A3	0,0500	0,0475	0,9506	0,3828	0,0372	0,9878	0,7830	20,7830	8,0549
A4	0,0222	0,0279	1,2571	0,2765	0,1136	1,3708	4,0682	49,0682	9,8960
A5	0,2000	0,0646	0,3232	0,6768	0,1543	0,4776	2,3878	7,3878	10,471

Що стосується значення
$\lambda_i(i=1...m)$,
то воно визначається таким чином.
Якщо під час обробки не виникає браку, то інтенсивність потоку, який надходить на наступний верстат, визначають за формулою:
$\lambda_i = \lambda_{i-1}(1-p_{i-1})$,
де p_{i-1} – вірогідність відбракування заготовки, або середній відсоток відбракованих заготовок.
Інтенсивність вхідного потоку відповідного верстату з урахуванням рівнянь (15), (16) визначають за формулою
$\lambda_j = d_j\lambda_i$.

Висновок

Автоматизований процес розрахунку дозволяє досить швидко знайти «вузькі» місця в системі, тобто верстати, в яких відбувається накопичення заготовок у черзі на обробку або простій обладнання.

Література

1. *Р50.1.028-2001.* Информационные технологии поддержки жизненного цикла изделия. Методология функционального моделирования. – М.: Изд-во стандартов, 2001. – 150 с.
2. *Буслаенко Н.П.* Математическое моделирование производственных процесов. – М.: Наука, 1964. – 362 с.
3. *Вентцель Е.С.* Теория вероятностей. – М.: Физматгиз. – 1962. – 320 с.
4. *Хинчин Ф.Я.* Работы по математической теории массового обслуживания. – М.: Физматгиз, 962. – 250 с.
5. *Левин А.И., Окулесский В.А., Юденков А.Г.* Количественная оценка характеристик бизнес-процессов в функциональных моделях сложной структуры. – М.: НИЦ CALS технологий, 2001. – 25 с.

Стаття надійшла до редакції 27.01.06.

Приведены результаты математического моделирования процессов загрузки металлообрабатывающего оборудования методами теории массового обслуживания, использованные для построения соответствующего программного модуля автоматизированной системы технологической подготовки производства.

The results of mathematical modeling the process of loading of the metalcutting equipment by theory methods of mass service are submitted. The results are used for construction of the appropriate program module of the automated system technological preparation of manufacture.