

ОПТИМІЗАЦІЯ РОЗМІЩЕННЯ ОБЛАДНАННЯ ГНУЧКИХ ВИРОБНИЧИХ СИСТЕМ

Пуховський Євген Степанович

доктор технічних наук, професор

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Сікорського», м. Київ, Україна

ORCID: 0000-0001-7843-0922

puhovskije50@gmail.com

Компонування гнучких виробничих систем (ГВС) багато в чому визначає технічні та економічні показники роботи обладнання ділянки, цеху та підприємства в цілому. Розстановка основного технологічного обладнання (ОТО) в ГВС визначається виробничими можливостями, обсягами продукції, яка випускається, та характером оброблюваних деталей. Загальні компонувальні схеми розміщення обладнання визначаються організаційно-технічними вимогами: технологічними зв'язками між ділянками та цехами, структурою системи інструментального забезпечення ділянок та окремих модулів обробки, технічними умовами експлуатації будівель, споруд і комунікацій (Pukhovskiy E.S., Malafeev U.M., Dobrianskiy S.S. (2015)) Структурно-компонувальні рішення гнучкої автоматизованої ділянки (ГАД) залежать від організаційно-технологічних рішень у цеху, напрямку матеріальних потоків, типів застосовуваних автоматизованих транспортних засобів (АТЗ) і пристроїв їх стикування, характеру систем інструментального забезпечення та видалення відходів виробництва (*Increasing of the efficiency of flexible manufacturing system. (2016)*).

За ознакою напрямку матеріальних потоків предметів і засобів праці відносно зон зберігання та зон обробки можна виділити такі основні компонування ГВС: радіальні, лінійні, Т-подібні, замкнені, вертикальні, комбіновані (Azab A., El Maraghy H.A. (2007); Pukhovskiy E.S. *Problemi proektuvannia GVS. (2009)*).

За радіальним компонуванням транспортні потоки розходяться в радіальному напрямі: від центрального накопичувача до обладнання, розташованого навколо зони зберігання. Таке компонування зручне для оброблюючого модуля, який складається з кількох агрегатів, зосереджених навколо стелажа з промисловим роботом (ПР). При радіальному компонуванні транспортні потоки розходяться в радіальному напрямі: від центрального накопичувача до обладнання, розташованого навколо зони зберігання. Таке компонування зручне для оброблюючого модуля, який складається з кількох агрегатів, зосереджених навколо стелажа з ПР (Megrabi M.G., Ulsol A.G., Koren Y., Heytler R. (2022)).

Лінійне компонування застосовується, наприклад, при транспортуванні вантажів штабелером складу безпосередньо до верстатів, витягнутих у лінію. Штабелер виконує роль транспортного пристрою, який обслуговує склад та обладнання для обробки. Такий вид компонування досить поширений, оскільки верстати можуть розташовуватись по один або по обидва боки від траси обслуговування при паралельній або перпендикулярній схемі встановлення відносно траси (Matta A., Samerato Q. (2006)).

При паралельному розташуванні верстатів уздовж траси зручно використовувати будь-які автоматизовані транспортні засоби (АТЗ) – підлогові та підвісні, проте деяка розтягненість траси та збільшена у зв'язку з цим потреба в площах, підвищене навантаження на транспортні засоби, потреба в їх додатковій кількості для транспортування до верстата інструменту та оснащення створюють деякі ускладнення і є головними недоліками паралельного розташування обладнання (*Design of Flexible Production Systems. (2009)*).

У разі перпендикулярного розташування обладнання до траси досягаються більша компактність планування і, отже, менша потреба у виробничих площах, можливість забезпечити робочі місця за допомогою одного транспортного засобу заготовками, інструментами та оснащенням, використання для транспортних цілей як підлогових, так і підвісних роботів. Недоліками даного компонування є підвищене навантаження на АТЗ, наявність додаткових вимог до виробничих площ і складність організації роботи на робочих місцях (*Increasing of the efficiency of flexible manufacturing system. (2016)*).

У разі Т-подібного компонування траси обслуговування верстатів перпендикулярні до трас зберігання. Такий вид компонування збільшує гнучкість системи і сприяє нарощуванню обсягів зберігання деталей при збільшенні масштабів випуску продукції.

У кільцевих компонуваннях траса АТЗ довільної траєкторії замкнена. Зона зберігання розміщена уздовж ділянки траси. Таке компонування дуже зручне при роботі на трасі кількох транспортних засобів, оскільки дає змогу розширити зону оптимізації обслуговування виключенням повернень і зменшенням шляхів доставки заготовок і оснащення (*Design of Flexible Production Systems. (2009)*).

Вертикальне компонування передбачає розміщення зони зберігання та обслуговування на різних рівнях. Передача заготовок і оснащення відбувається у вертикальній площині.

Комбіновані компонування, що об'єднують кілька ділянок, забезпечують максимальну гнучкість і мінімальні транспортні переміщення у разі різного розміщення технологічного обладнання.

Розробляючи компонування ГВС, треба враховувати всі параметри, що впливають на побудову системи: тип оброблюваних деталей, маршрутно – технологічні процеси виготовлення деталей, кількість і види обладнання і робочих місць, будівельні рішення виробничих приміщень і будівель, норми технологічного проектування (Guash A., Piera M., Figueras J. (2011); *Manufacturing Systems. – Theory and Practice. (2005)*).

Мета роботи: Підвищення ефективності гнучких виробничих систем за рахунок мінімізації площі розміщення ГВС, зменшення затрат на транспортне обслуговування обладнання та оптимізації організаційно-технічних та технологічних зв'язків.

Ключові слова: компоновання, траса, промисловий робот, верстат, дільниця, транспортер, штабелер, склад.

DOI <https://doi.org/10.32782/msnau.2023.1.12>

Викладення основного матеріалу. Завершальним етапом синтезу структури ВС є розміщення основного і допоміжного обладнання, тобто створення планування ВС. Автоматизація процесу синтезу планувань – актуальне завдання, так як до сих пір при проектуванні цехів і дільниць механообробного виробництва використовуються традиційні методи отримання планувань за допомогою шаблонів (тамплетів), вирізаних з плоского матеріалу. Система автоматизації проектування планувань (САПР-П) передбачає автоматизацію процесу отримання графічного зображення планування ГВС із застосуванням оптимізаційних процедур, що забезпечують раціональне розміщення обладнання і підвищення ефективності багатомономенклатурного виробництва за рахунок економії виробничих площ. Аналіз методів автоматизації синтезу планувань підрозділів механічної обробки показує відсутність єдиного підходу до вирішення проблеми. В основному використовуються наступні критерії оцінки якості планувального рішення ГВС: мінімізація виробничої площі; мінімізація вантажопотоків або транспортних переміщень в ВС, на ділянці, в цеху; мінімізація вартості транспортної системи; мінімізація втрат, пов'язаних з простоями транспортних засобів. Розстановка устаткування в проектованій ВС залежить від її технологічного призначення. На ділянках технологічної спеціалізації обсяг вантажопотоків незначний, тому завдання планування обладнання зводиться до моделі розміщення невзаємопов'язаних об'єктів (Migel A.S., Vagner G.M. (2019)).

Ділянки предметної спеціалізації відрізняються необхідністю мінімізації вантажопотоку з метою підвищення, продуктивності за рахунок скорочення транспортних переміщень деталей в процесі обробки. На ділянках багатомономенклатурного виробництва в залежності від номенклатури оброблюваних деталей, обсягів їх випуску та розміру партії запуску зустрічаються такі організаційно-технологічні ситуації: основне технологічне устаткування розташовується відповідно до прийнятої організаційної форми технологічних процесів; обладнання розташовується з урахуванням типу обраної транспортної системи (конвеєр, траса руху ПР і т. п.); обладнання, розміщується довільно з використанням ТЗ, що переміщуються по довільним траєкторіям. При проектуванні ГВС багатомономенклатурного виробництва завдання розміщення обладнання вирішуються відповідно з так званим схемним варіантом, при якому компоновання трас обслуговування обладнання транспортними засобами визначено заздалегідь. На початковому етапі синтезу планувань ГВС вирішується питання про розподіл детале-операцій по конкретним верстатам, тобто формується матриця закріплення детале-операцій за окремими одиницями обладнання ГВС (табл. 1). В якості цільової

функції приймається мінімум сумарної довжини транспортних переміщень, які проходять всі деталі в процесі їх обробки. Вибір варіанту компоновальною структури ГВС здійснюється особою, яка приймає рішення, на підставі даних про застосування типових компоновок, поміщених в спеціалізовану базу даних, з урахуванням даних про пріоритети застосування різних транспортних засобів у ГВС (табл. 2). У разі, якщо необхідно вибрати компоновочну схему для заданої виробничої площі, обрану компоновку проектують на задану площу.

Для формалізації завдання вводиться поняття графа компоновання, який найбільш адекватно відображає розташування обладнання на виробничій площі ГПС і дозволяє врахувати розміри транспортних проїздів між рядами обладнання і наявність точок розвороту ТЗ, необхідних для обслуговування приверстатних накопичувачів, а також при передачі деталей між окремими одиницями обладнання розглядати тільки зони контакту обладнання (приверстатні накопичувачі, осередки складу для прийому і видачі зі складу і т. п.) з ТЗ. Структура графа визначається відображенням обраної компоновальною схеми гнучкого виробничої дільниці (рис. 1). Відстанню l_{ij} , $i = 1, 2, \dots, K, j = 1, 2, \dots, N$, N – число одиниць основного технологічного обладнання (ОТО) в складі проектованої ГВС між вершинами a_i і a_j графа компоновання називається довжина найкоротшого ланцюга, що з'єднує ці вершини (під довжиною ланцюга розуміється сума довжин ребер, що входять до неї). Маючи в своєму розпорядженні тамплети з необхідними розмірами, тобто плани моделей обладнання, що входять до складу ГВС, можна для кожного варіанту розміщення верстатів в межах розглянутого компоновання скласти матрицю відстаней $L = \|l_{ij}\|$ розмірності $N \times N$ (табл. 3). Елементами матриці є відстані між контактними зонами обладнання, а також відстані між обладнанням та складом. На підставі прийнятих схем обробки детале-операцій групи, програми випуску деталей і даних матриці закріплення детале-операцій може бути складена матриця інтенсивності передачі деталей між різними одиницями устаткування ГВС $A = \|\alpha_{ij}\|$, елементами якої є інтенсивності передачі деталей від i -ї одиниці обладнання до j -ї:

$$\alpha_{ji} = \alpha_{ij} = \sum_{W=1}^D \{1 / t_o [m_{ji}(W) + m_{ji}(W)]\}$$

де $m_{ji}(W)$ і $m_{ij}(W)$ – число деталей W -го найменування, переданих відповідно від i -ї позиції до j -ї і навпаки за розглянутий плановий період t_o ; D – безліч найменувань деталей, що утворюють номенклатуру, закріплену за ГВС.

У такій постановці завдання розміщення являє собою квадратичну задачу про призначення, яка за складністю відноситься до класу NP оптимізаційних задач. Загальна кількість варіантів перебору в задачі дорівнює $N!$.

Матриця закріплення деталей-операцій групи за окремими одиницями обладнання

№ одиниці ОТО ГПС	№ деталеоперації групи												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	...	d	...	D
1	1	0	0	1	0	0	1	0	0	...	1	...	0
2	0	1	0	0	0	1	1	0	1	...	0	...	1
3	1	0	1	0	0	1	1	0	0	...	1	...	1
4	0	1	0	1	0	1	0	0	1	...	1	...	0
5	1	1	1	0	1	0	0	1	0	...	0	...	0
6	0	1	1	0	0	1	1	0	0	...	1	...	1
7	0	0	0	1	1	0	0	1	1	...	1	...	0
.													
.													
.													
.	1	0	1	0	0	1	1	1	1	...	0	...	0
.													
.													
.													
.	1	0	1	0	0	1	0	1	1	...	0	...	1

Таблиця 2

Значення пріоритетів для транспортних засобів ГПС

Техніко-економічна характеристика	Роль-ганг	Рельсовий візок	Індуктивно-керований візок	Штабелер	Цепний конвеєр	Монорельс	Кран
Оперативність обслуговування	2	4	5	4	3	5	4
Вантажо-підйомність	5	2	4	2	5	4	4
Можливість вбудовування в систему додаткового обладнання	4	4	5	4	1	3	3
Можливість розвитку транспортної системи	3	4	5	4	2	3	4
Перебудова транспортного шляху	3	4	5	2	1	4	2
Можливість використання в якості внутрішньо-заводського транспорту	1	1	5	1	4	5	5
Можливість використання в якості накопичув.	5	1	2	5	4	3	3
Потреба у виробничій площі	1	2	3	2	3	5	5
Витрати на монтаж	3	1	5	1	4	1	4
Капіталовкладення	1	3	4	3	2	5	5

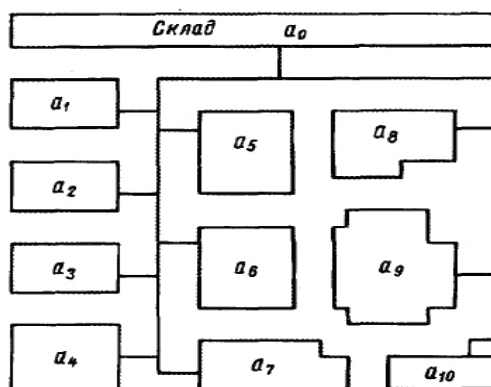


Рис. 1. Приклад графа компоновки для ГВС з числом одиниць основного технологічного устаткування N = 10

Нижче розглядаються відомі методи рішення квадратичної задачі про призначення (Design of Flexible Production Systems.(2009); Guash A., Piera M., Figueras J. (2011); Modeling, Simulation and Control of Flexible Manufacturing Systems. (1999); Manufacturing Systems. – Theory and Practice. (2005)).

Таблиця 3

Матриця відстаней $L = \|L_{ij}\|$ між одиницями ОТО ГПС (з числом одиниць $N=10$)

$\begin{matrix} j \\ i \end{matrix}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	a_0a_1	a_0a_2	a_0a_3	a_0a_4	a_0a_5	a_0a_6	a_0a_7	a_0a_8	a_0a_9	a_0a_{10}
	a_1a_1	a_1a_2	a_1a_3	a_1a_4	a_1a_5	a_1a_6	a_1a_7	a_1a_8	a_1a_9	a_1a_{10}
		a_2a_2	a_2a_3	a_2a_4	a_2a_5	a_2a_6	a_2a_7	a_2a_8	a_2a_9	a_2a_{10}
			a_3a_3	a_3a_4	a_3a_5	a_3a_6	a_3a_7	a_3a_8	a_3a_9	a_3a_{10}
				a_4a_4	a_4a_5	a_4a_6	a_4a_7	a_4a_8	a_4a_9	a_4a_{10}
					a_5a_5	a_5a_6	a_5a_7	a_5a_8	a_5a_9	a_5a_{10}
						a_6a_6	a_6a_7	a_6a_8	a_6a_9	a_6a_{10}
							a_7a_7	a_7a_8	a_7a_9	a_7a_{10}
								a_8a_8	a_8a_9	a_8a_{10}
									a_9a_9	a_9a_{10}
										$a_{10}a_{10}$

Метод релаксації. Метод релаксації передбачає розгляд траєкторій транспортних засобів, які обслуговують одиниці технологічного устаткування ГВС, у вигляді пружних ліній (пружин). Тоді, в силу введеної аналогії, можна визначити силу тяжіння між одиницями обладнання згідно закону Гука $f=kx$, де k – коефіцієнт пружності, який визначається матрицею інтенсивностей передачі деталей між верстатами; x – протяжність транспортних переміщень між окремими одиницями обладнання ГВС. Рішення завдання розміщення при такому підході відповідає такому розміщенню верстатів, коли вся ГВС характеризується мінімальною кінетичною енергією.

Попарні перестановки. Метод попарних перестановок є одним з найпростіших методів пошуку оптимальних рішень задачі розміщення. При його використанні для конкретного розміщення технологічного обладнання оцінюється значення цільової функції і потім міняються місцями дві одиниці ОТО, після чого обчислюється нове значення цільової функції. У разі, якщо відбулося поліпшення значення цільової функції, останній варіант розміщення приймається для подальшого дослідження. В іншому випадку виконується парна перестановка іншої пари ОТО. У загальному випадку процес триває до тих пір, поки відбувається поліпшення значення цільової функції.

Стохастичні методи. Пошук локального рішення задачі розміщення, заснований на застосуванні методу Монте-Карло, виходить з того, що область прийнятних варіантів розміщень значна в області всіх можливих варіантів, тобто ймовірність випадкового вибору прийняттого варіанту розміщення досить висока.

Метод гілок і меж. Заснований на тому, що в процесі послідовного розгалуження безлічі допустимих рішень, виключаються ті з одержуваних підмножин, про які стало відомо, що вони не містять допустимих рішень, кращих деякого раніше отриманого.

Аналіз переваг і недоліків різних методів вирішення квадратичної задачі про призначення, дозволив зупинитися на застосуванні для синтезу розміщення ОТО ГВС методу попарних перестановок.

Завдання вибору оптимального розміщення одиниць основного технологічного обладнання гнучкого виробничого ділянки може бути сформульована як задача пошуку на орієнтованому графі G_N взаємних перестановок. Граф G_N будують таким чином. Кожному конкретному варіанту розміщення N одиниць технологічного обладнання по виділених N позиціях на даній ділянці поставимо у відповідність одну вершину графа G_N . Таким чином шуканий граф характеризується $N!$ вершинами. Деяку вершину графа G_N називають сусідньою по відношенню до деякої іншої вершини цього ж графа, якщо розміщення обладнання, відповідне другий вершині, виходить з розміщення обладнання, відповідного першій вершині, тільки однією перестановкою двох одиниць обладнання. Якщо тепер кожну вершину графа G_N з'єднати дугами з усіма сусідніми до неї вершинами, то однозначно задається граф G_N для розміщення N одиниць обладнання. У всіх вершин графа G_N однаково число сусідніх вершин, тобто кожна вершина графа з'єднана ребрами рівно з $N(N-1)/2$ іншими вершинами. Назвемо таким чином отриманий граф графом розміщення.

На рис. 2 наведено приклад графа розміщення для $N=4$. У цього графа $4! = 24$ вершини і у кожній вершині $4(4-1)/2 = 6$ сусідніх вершин.

Очевидно, що на графі G_N можуть бути локальні мінімуми, причому, потрапивши в локальний мінімум, неможливо визначити, глобальний чи локальний це мінімум, поки не визначено безліч всіх локальних мінімумів. Розроблено алгоритм локальної оптимізації, який дозволяє раціонально проводити пошук безлічі локальних мінімумів на графі G_N в основу якого покладено метод попарних перестановок. Переміщення з вершини графа G_N в одну із сусідніх по відношенню до неї вершин відповідає одній попарній перестановці. Методом попарних перестановок з довільної початкової вершини графа G_N знаходять вершину, що характеризується локальним максимумом. Це відповідає підйому в вершину з локально-максимальним значенням цільової функції. Із знайденої вершини методом попарних перестановок проводимо пошук безлічі вершин, відповідних локальним мінімумам по всім, що виходять з даної вершини ребрам.

Це відповідає спуску з вершини з локальним максимумом цільової функції вершини з локальними мінімумами. Підйом в вершину з локальним максимумом вигідний тим, що з такої вершини пошук вершин з локальними мінімумами на графі G_N буде більш ефективним. Безліч локальних мінімумів, знайдених з локального максимуму, більш широкий, ніж той же безліч, знайдений з довільної вершини, так як при підйомі в вершину, відповідну локальному максимуму, безліч досяжних вершин розширюється. В результаті пошуку локальних мінімумів з усіх відповідних ребер отримуємо деякий безліч вершин, відповідний різним локальним мінімумам. Вибравши з цієї множини вершин вершину, відповідну локального мінімуму, що характеризується наймен-

шим значенням цільової функції, отримують локально-оптимальне рішення задачі розміщення технологічного обладнання ГВС.

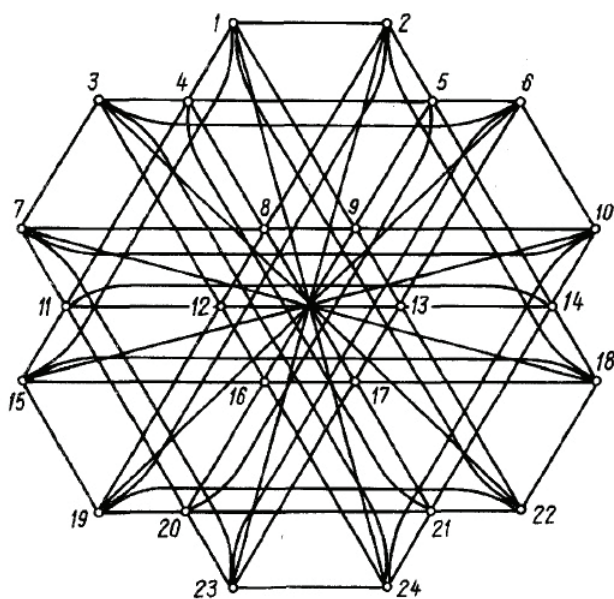


Рис. 2. Приклад графіка розміщення основного технологічного устаткування ГПС з числом одиниць $N = 4$

При необхідності можна продовжити пошук вершини графа, що відповідає більш оптимальному рішенні задачі розміщення, в такий спосіб: знаходять на графі вершину, відповідну локального максимуму, але відмінну від вершини з якої вже було здійснено пошук вершин, відповідних локальних мінімумам. Перебуваючи в новому локальному максимумі, здійснюємо пошук безлічі локальних мінімумів, які доповнять раніше сформований безліч локальних мінімумів. Якщо серед додаткових варіантів розміщень є краще, ніж раніше сформовані, розміщення, то вибирають його в якості локально – оптимального рішення задачі розміщення обладнання.

Блок-схема розробленого алгоритму пошуку локально оптимального варіанту розміщення одиниць основного технологічного устаткування ГВС представлена на рис. 3.

Блок 12 призначений для здійснення додаткової установки окремих одиниць ОТО, в межах обраної компоноваль-

ної схеми, в тих випадках, коли відповідні тамплети візуально потрапляють в заборонені для розміщення зони. До числа таких зон відносяться колони, електрошафи, проїзди і т. п.

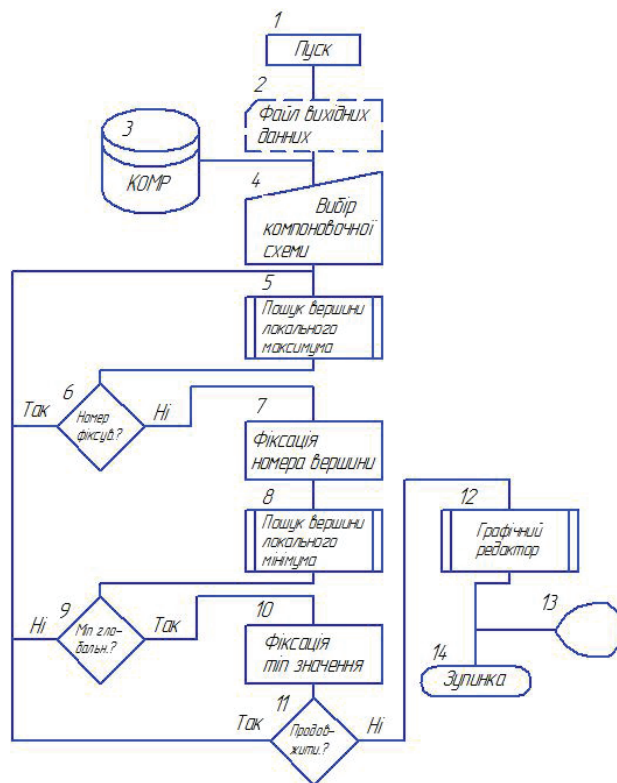


Рис. 3. Збільшена блок-схема алгоритму синтезу оптимального розміщення основного технологічного устаткування ГВС

Приведений алгоритм може слугувати як базовий при повній процедурі розміщення ОТО на завершальному етапі проектування ГВС.

Висновки. Розроблена методика розміщення основного технологічного обладнання ГВС, яка дозволяє автоматизувати складні проектні роботи та оптимізувати процедуру розміщення ОТО. Оптимізація планувань ГВС дозволяє значно підвищити їх ефективність за рахунок зменшення виробничих площ, мінімізації транспортних потоків та зниження капітальних вкладень при впровадженні сучасних гнучких автоматизованих виробництв.

Бібліографічні посилання:

1. Azab A., El Maraghy H.A., (2007) Mathematical Modelling for reconfigurable process planning. CIRP Ann 56 (1) : 467-472.
2. Design of Flexible Production Systems. (2009), Metodologies and Tools. By T. Tolio. Berlin: Springer, ISBN 978-3-540-85413-5.
3. N. Manesku, A. Nedelcu, (2015), Flexibility and efficiency analysis of a flexible manufacturing system. Romania. Review of the Air Force Academy, N1, (28).
4. Flexible versus efficiency? (1999). A case study of modern changeover in the Toyota Production System. P. Adler, B. Goldoftas, D. Levine, Unuverscity of Southern California, Los Angeles. Organisation Science/ vol. 10, N1, june.
5. Guash A., Piera M., Figueras J. (2011) Automatic warehouse modelling and simulation. International Journal of Simulation. Process modelling, 6(4), 228-296.
6. Yakimovitch B., Korshunov A., Sviatski V. (2016), Increasing of the efficiency of flexible manufacturing system. International conference of manufacturing engineering. 6-10 june, Novy Smocolec, Slovacia. <https://doi.org/10/j.proeng.2016.06.709>

7. Manufacturing Systems. – Theory and Practice. (2005), By G. Chryssolouris. New York, NY: Springer Verlag. 2nd edition, 233 p.
8. Matta A., Samerato Q. (2006), 200 Design of advanced manufacturing systems. Springer, The Netherlands.
9. Megrabi M.G., Ulsol A.G., Koren Y., Heytler R. (2022), Trend and Perspectives in Flexible and Reconfigurable Manufacturing Systems. April, 20 Journal of Intelligent Manufacturing Systems, 13(2) / DOI: 10.1023/A:101453633051
10. Migel A.S., Vagner G.M. (2019), Implementation of a Flexible Manufacturing Systems in a production of the automotive industry. decision and choice. University of Vale do Rio. – Brasil, DOI: 10.1590/0103-6513.20180092.
11. Modeling, Simulation and Control of Flexible Manufacturing Systems. (1999). By (autors): Meng Chu Zhou (New Jersey Institute of Technology, USA) and Kurapati Vencates (New Jersey Institute of Technology, USA)., 428 p.,
12. Pukhovskiy E.S. (2009), Problemi proektuvannia GVS. [Problems of FMS dtsign], Visnik NTUU(KPI), Mashinosnoenie, N56, S. 127-134. [in Ukrainian].
13. Pukhovskiy E.S., Malafeev U.M. (2017), Proektuvannia gnuchkikh virobnychikh system mashinobuduvannia. [Design of flexible manufacturing systems of mechanical engineering], chast 1, NTUU(KPI), – 286 s. (in Ukrainian).
14. Pukhovskiy E.S., Malafeev U.M., Dobrianskiy S.S. (2015), Proektuvannia gnuchkikh virobnychikh system mashinobuduvannia. [Design of flexible manufacturing systems of mechanical engineering], chast 2, NTUU(KPI), – 204 s. (in Ukrainian).
15. Veselovskaia N.P. (2015) Analis verstatnikh kompleksiv mekhanichnoi obrobki v mashinobuduvanni. [Analysis of machine tool complexes of mechanical processing in mechanical engineering]. Vinnitza, VDU, 8 s. (in Ukrainian).

Pukhovskiy Ye. S., Doctor of Technical Sciences, Professor, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine

Optimization of placement of equipment for flexible manufacturing systems

The layout of flexible manufacturing systems (FMS) largely determines the technical and economic performance of the equipment of the site, workshop and enterprise as a whole (Pukhovskiy E.S., Malafeev U.M., Dobrianskiy S.S. (2015)). The arrangement of the main technological equipment (MTE) in the FMS is determined by the production capabilities, the volume of products and the nature of the parts being processed. General layout schemes for the placement of equipment are determined by organizational and technical requirements: technological links between sites and workshops, the structure of the system of tooling of sites and individual processing modules, technical conditions for the operation of buildings, structures and communications (Increasing of the efficiency of flexible manufacturing system. (2016)). Structural and layout solutions of a flexible automated site depend on organizational and technological solutions in the workshop, the direction of material flows, the types of automated vehicles used and their docking devices, the nature of tool support systems and production waste disposal (Increasing of the efficiency of flexible manufacturing system. (2016)). After sign of the direction of material flows of objects and means of labor relative to storage areas and processing areas can be distinguished the following main layouts of FMS: radial, linear, T-shaped, closed, vertical, combined (Azab A., El Maraghy H.A. (2007); Pukhovskiy E.S. Problemi proektuvannia GVS. (2009)).

According to the radial layout, traffic flows diverge in the radial direction: from the central drive to the equipment located around the storage area. This layout is convenient for the processing module, which consists of several units centered around the rack with an industrial robot (IR). With a radial layout, traffic flows diverge in the radial direction: from the central drive to the equipment located around the storage area. This layout is convenient for the processing module, which consists of several units centered around the rack with IR (Increasing of the efficiency of flexible manufacturing system. (2016)). Linear layout is used, for example, when transporting goods by a warehouse stacker directly to machines stretched out into a line. The stacker acts as a transport device that serves the warehouse and processing equipment. This type of layout is quite common, since the machines can be located on one or both sides of the service route with a parallel or perpendicular installation scheme relative to the route (Matta A., Samerato Q. (2006)).

With the parallel arrangement of machines along the route, it is convenient to use any automated vehicles – floor and suspension, but some stretching of the route and increased in this regard, the need for areas, increased load on vehicles, the need for their additional quantity for transportation to the machine tool and equipment create some complications and are the main disadvantages of the parallel arrangement of equipment (Design of Flexible Production Systems. (2009)).

In the case of perpendicular arrangement of equipment to the highway, greater compactness of planning and, therefore, less need for production areas are achieved, the ability to provide workplaces with the help of one vehicle with blanks, tools and equipment, the use of both floor and suspended robots for transport purposes. The disadvantages of this layout are the increased load on the vehicle, the presence of additional requirements for production areas and the complexity of organizing work in the workplace (Increasing of the efficiency of flexible manufacturing system. (2016)).

In the case of a T-shaped layout, the machine maintenance routes are perpendicular to the storage routes. This type of layout increases the flexibility of the system and contributes to an increase in the storage of parts while increasing the scale of production. In ring layouts, the transport route of an arbitrary trajectory is closed. The storage area is located along the section of the route. This layout is very convenient when working on the highway of several vehicles, as it makes it possible to expand the service optimization area by eliminating returns and reducing the delivery routes of workpieces and equipment (Design of Flexible Production Systems. (2009)). The vertical layout involves placing the storage and maintenance area at different levels. The transfer of blanks and equipment takes place in a vertical plane. Combined layouts, combining several sections, provide maximum flexibility and minimal transport movements in the case of different placement of technological equipment. When developing the layout of the FMS, it is necessary to take into account all the parameters affecting the construction of the system: the type of parts being processed, the route

and technological processes for manufacturing parts, the number and types of equipment and workplaces, construction solutions for industrial premises and buildings, technological design standards (Guash A., Piera M., Figueras J. (2011); Manufacturing Systems. – Theory and Practice. (2005)).

The purpose of the work: Improving the efficiency of flexible manufacturing systems by minimizing the area of FMS placement, reducing the cost of transport maintenance of equipment and optimizing organizational, technical and technological connections.

Key words: layout, route, industrial robot, machine tool, site, conveyor, stacker, warehouse.