

УДК 62.5;519.1

Невлюдов І.Ш.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Хрустальов К.Л.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Функендорф А.О.

Харківський національний університет радіоелектроніки

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ СКЛАДАННЯ РОБОТІВ ІЗ КОНСТРУКЦІЄЮ МОДУЛЬНОГО ТИПУ

Розглянута проблема автоматизації керування технологічними процесами складання модульних конструкцій із погляду формалізації його елементів. Запропоновано структурно-функціональну та загальну математичну модель технологічного процесу складання роботів із конструкцією модульного типу, а також його елементів, згідно з їх функціональним призначенням, графі слідування виконання процесу. Приведено модель узгодженості елементів об'єкта складання у цілісній конструкції.

Ключові слова: модульна конструкція, технологічний процес складання, адаптивне керування, функціональні елементи, параметрична модель, математична модель, граф слідування.

Постановка проблеми. В умовах прагнення до типізації та уніфікації, спрощення процесів виробництва роботів різноманітного призначення все більшої актуальності набуває модульний підхід до реалізації їх конструкцій. Диспропорція в удосконаленні та автоматизації технологічних процесів складання роботів із конструкцією зазначеного типу є результатом найменшого заміщення ручної праці за рахунок їх найменшої автоматизації, внаслідок чого вони займають непропорційно велику питому вагу в загальній структурі трудомісткості виготовлення, що сягає 70% від загального об'єму виробництва.

Автоматизація технологічних процесів складання роботів із зазначеною конструкцією в умовах гнучких виробництв потребує урахування її можливості ще на етапах конструювання та проектування самого процесу [1]. Вона полягає в автоматизації окремих операцій та переходів, що входять до його складу та забезпечують узгодженість елементів конструкції у цілісній системі приладу, за рахунок отримання здебільшого міжмодульних роз'ємних з'єднань та операцій контролю. Це уможливорює використання великої процентної долі автоматизованого універсального обладнання щодо загального технічного забезпечення

виконання зазначених технологічних процесів та, як наслідок, досягнення гнучкості організації відповідної виробничої ділянки та можливості реалізації складальних процесів в умовах безлюдних виробництв.

Тенденція прагнення до інтелектуалізації виконавчого обладнання є основою застосування адаптивних алгоритмів, що в умовах уніфікації конструкцій об'єктів складання та їх елементів дозволяє оптимізувати ефективність процесів складання за параметрами швидкодії (в т. ч. і їх проектування, а також переналагодження виконавчого обладнання), витратами коштів на їх реалізацію за рахунок підвищення їх гнучкості. Однак застосування адаптивних алгоритмів потребує найбільш повної формалізації елементів виконавчого обладнання та об'єкта складання, яким у заданих умовах є модульна конструкція робота. Формалізація виконавчого обладнання здебільшого базується на його функціональних характеристиках. Найбільш поширений підхід до формалізації об'єктів складання полягає у застосуванні графічних двовимірних та тривимірних моделей у якості моделей формалізації, що є недостатнім для найбільш повного опису об'єктів та потребує складних алгоритмів [2] для обробки даних, а

також застосування дорогого програмного забезпечення для їх реалізації.

Постановка проблеми. В умовах прагнення до типізації та уніфікації, спрощення процесів виробництва роботів різноманітного призначення все більшої актуальності набуває модульний підхід до реалізації їх конструкцій. Диспропорція в удосконаленні та автоматизації технологічних процесів складання роботів із конструкцією зазначеного типу є результатом найменшого заміщення ручної праці за рахунок їх найменшої автоматизації, внаслідок чого вони займають непропорційно велику питому вагу в загальній структурі трудомісткості виготовлення, що сягає 70% від загального об'єму виробництва.

Автоматизація технологічних процесів складання роботів із зазначеною конструкцією в умовах гнучких виробництв потребує урахування її можливості ще на етапах конструювання та проектування самого процесу [1]. Вона полягає в автоматизації окремих операцій та переходів, що входять до його складу та забезпечують узгодженість елементів конструкції у цілісній системі приладу, за рахунок отримання здебільшого міжмодульних роз'ємних з'єднань та операцій контролю. Це уможливує використання великої процентної долі автоматизованого універсального обладнання щодо загального технічного забезпечення виконання зазначених технологічних процесів та, як наслідок, досягнення гнучкості організації відповідної виробничої ділянки та можливості реалізації складальних процесів в умовах безлюдних виробництв.

Тенденція прагнення до інтелектуалізації виконавчого обладнання є основою застосування адаптивних алгоритмів, що в умовах уніфікації конструкцій об'єктів складання та їх елементів дозволяє оптимізувати ефективність процесів складання за параметрами швидкодії (в т. ч. і їх проектування, а також перенастроювання виконавчого обладнання), витратами коштів на їх реалізацію за рахунок підвищення їх гнучкості. Однак застосування адаптивних алгоритмів потребує найбільш повної формалізації елементів виконавчого обладнання та об'єкта складання, яким у заданих умовах є модульна конструкція робота. Формалізація виконавчого обладнання здебільшого базується на його функціональних характеристиках. Найбільш поширений підхід до формалізації об'єктів складання полягає у застосуванні графічних двовимірних та тривимірних моделей у якості моделей формалізації, що є недостатнім для найбільш повного опису об'єктів та потре-

бує складних алгоритмів [2] для обробки даних, а також застосування дорогого програмного забезпечення для їх реалізації.

Постановка завдання. Метою роботи є розробка нових математичних моделей технологічного процесу складання роботів із конструкцією модульного типу, а також його елементів, згідно з їх функціональним призначенням, для подальшої автоматизації процесів їх складання із застосуванням адаптивних алгоритмів керування в рамках типізації та уніфікації конструкцій.

Виклад основного матеріалу дослідження.

1. Структурно-функціональна модель технологічного процесу складання

Технологічний процес складання приладів із модульною конструкцією є складною системою та з погляду функціонального призначення є сукупністю таких елементів:

- об'єкт складання;
- виконавче обладнання (основне та допоміжне);
- система керування, що містить засоби спостереження (у разі реалізації адаптивних алгоритмів керування) та її виконавчі елементи (засоби керування).

Функціональні зв'язки між зазначеними елементами процесів приведені на рис. 1.

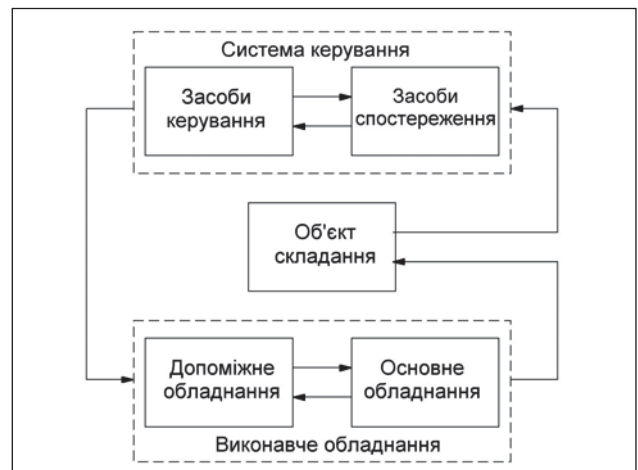


Рис. 1. Структурно-функціональна схема технологічного процесу складання

Під об'єктом складання розуміється конструкція робота, що складається, у її поточних станах, які змінюються з часом протягом виконання процесу під впливом виконавчого обладнання. Контроль за поточним станом конструкції реалізується за допомогою засобів спостереження (в умовах адаптивного керування процесом), дані з яких надходять на виконавчі засоби системи керування, згідно з чим генерується керуючий вплив

відповідно до алгоритмічного забезпечення системи, який надходить на елементи виконавчого обладнання та засоби спостереження (в окремих випадках).

Основне виконавче обладнання, яке застосовується для реалізації вказаних процесів в умовах їх повної автоматизації, – промислові роботи та спеціалізоване обладнання, що забезпечує реалізацію нероз’ємних внутрішньомодульних з’єднань (за необхідності їх реалізації у процесі загального складання конструкції). Відповідно до керуючих впливів, що надходять на виконавчі елементи обладнання, реалізується зміна стану конструкції об’єкта складання за умов узгодженості роботи допоміжного та основного обладнання виробничої ділянки.

Технологічний процес складання роботів із модульною конструкцією $M_{ТП}$ з погляду функціональних елементів, що входять до його складу, може мати таке математичне представлення, відображене параметричним описом кожного елемента у відповідний момент часу t_i :

$$M_{ТП,t_i} = \{ M_{OS,t_i}, M_{VO,t_i}, M_{ZS,t_i}, M_{SK,t_i} \}, \quad (1)$$

де M_{OS,t_i} – параметри об’єкта складання, що описують стан модульної конструкції робота у момент часу t_i ;

M_{VO,t_i} – параметри виконавчого обладнання, що описують його стан у момент часу t_i ;

M_{ZS,t_i} – параметри засобів спостереження, що описують їх стан у момент часу t_i ;

M_{SK,t_i} – параметри системи керування у відповідний проміжок часу t_i .

Таким чином, структурно-параметрична модель технологічного процесу складання, представлена в узагальненому вигляді виразом (1), є сукупністю параметричних описів її елементів у зазначений проміжок часу.

2. Формалізація елементів структурно-функціональної моделі

Формалізація елементів структурно-функціональної моделі технологічного процесу складання роботів із конструкцією модульного типу може бути виконано шляхом розробки відповідних математичних та параметричних моделей. Математична модель робота з конструкцією модульного типу як об’єкта складання є відображенням його параметричної моделі $M_{par OS}$, що є сукупністю параметричних описів його структурних елементів та зв’язків між ними:

$$M_{OS} = \{ M_{par OS}, R \}, \quad (2)$$

де R – показник взаємозв’язків модулів у цілісній конструкції робота.

Параметрична модель загальної структури модульного робота є сумісністю кортежів параметрів, що відповідають окремим параметричним моделям кожної зі складових частин функціональних модулів, до яких також входять параметри з’єднань, функціональні, експлуатаційні та конструктивні параметри, які відповідають характерним особливостям, згідно з наведеною класифікацією роботів за типом виконуваних робіт.

Математичне зображення параметричної моделі конструкції роботів, засноване на теорії множин, у розумінні їх як цілісної системи є множинами параметрів кожного з модулів, які входять до загальної множини параметрів, що описує загальну конструкцію робота [3]:

$$M_{par OS} \supset \{ P, S, M, K, IK, SP \} \quad (3)$$

де P – множина параметрів модуля переміщення;

S – множина параметрів сенсорного модуля;

M – множина параметрів маніпуляційного модуля;

K – множина параметрів корпусного модуля;

IK – множина параметрів інформаційно-керуючого модуля;

SP – множина параметрів модуля зв’язку з людиною.

Кожен зі структурних функціональних модулів конструкції сучасного робота може бути описаний множиною параметрів, які є характерними для відповідного модуля чи можуть бути притаманними кожному з модулів, незалежно від його функціонального призначення або особливостей загальної конструкції. Таким чином, у рамках цієї роботи було прийнято рішення розподілити всі параметри, притаманні структурним модулям конструкції роботів, на загальні, притаманні кожному з них, та специфічні, які характерні для відповідного модуля та описують його функціональні та структурні особливості:

$$M_{par i} \supset \{ P_{Zi}, P_{Si}, Z_i \}, \quad (4)$$

де $M_{par i}$ – параметрична модель i -го модуля конструкції;

P_{Zi} – множина загальних параметрів i -го модуля;

P_{Si} – множина специфічних параметрів i -го модуля;

Z_i – множина параметрів з’єднань i -го модуля.

Специфічні параметри модуля характеризуються його особливостями та функціональним призначенням [4].

Множина загальних параметрів може бути представлена сукупністю підмножин експлуата-

ційних параметрів, масогабаритних та економічних параметрів:

$$P_{Zi} \supset \left(\begin{array}{l} P_{\text{exp}i} \supset \{N_i, \text{Sec}_i, G_i, \text{Mech}_i, \text{Rad}_i, \text{Enc}S_i, \text{Op}S_i\}, \\ \{a_{i\text{max}}, l_{i\text{max}}, h_{i\text{max}}, V_i, p_i\} \in P_{MGi}, \\ \{Pr_i, D_{EXi}\} \in P_{EXi}. \end{array} \right), \quad (5)$$

де $P_{\text{exp}i}$ – множина експлуатаційних параметрів i -го модуля, що поділяються на параметри надійності N_i , параметри захищеності Sec_i , параметри живлення G_i , механічні Mech_i та радіаційні Rad_i експлуатаційні параметри, а також кліматичні, що відповідають експлуатації робота у закритих приміщеннях $\text{Enc}S_i$ чи на відкритому просторі $\text{Op}S_i$ відповідного модуля;

P_{MGi} – множина масогабаритних параметрів i -го модуля, які включають у себе максимальні значення параметрів ширини $a_{i\text{max}}$, довжини $l_{i\text{max}}$, висоти $h_{i\text{max}}$ та значення загального об'єму V_i і ваги p_i відповідного модуля;

P_{EXi} – множина економічних параметрів i -го модуля, що включає у себе значення закупівельної вартості Pr_i та додаткових витрат D_{EXi} на транспортування, пакування, оподаткування тощо відповідного модуля.

В окремих випадках належність деяких параметрів конкретній конструкції може характеризуватися обмеженнями, що накладаються на належність конструкції деяких інших параметрів. Такі обмеження можуть виникати як у рамках одного модуля, так і в декількох окремих, притаманних одній конструкції. Математичний опис обмеження, вираженого у притаманності параметра Par_k множині параметрів модуля M_i за умови належності параметра Par_j множині параметрів загальної конструкції робота, із застосуванням теорії множин може бути описано таким чином:

$$Par_j \in M_{\text{parOS}} \rightarrow Par_k \in M_i. \quad (6)$$

Відповідне обмеження, що накладає вилучення параметра Par_k із множини параметрів модуля M_i за умови належності параметра Par_j загальній конструкції робота має такий вигляд:

$$Par_j \in M_{\text{parOS}} \rightarrow Par_k \notin M_i. \quad (7)$$

Цей принцип обмежень є справедливим також і для окремих підмножин параметрів, у разі вилучення їх із загальної множини параметрів конструкції. Параметричні обмеження описаного характеру виникають здебільшого за умови належності загальній конструкції окремих специфічних параметрів модулів чи кліматичних параметрів, що входять до множини експлуатаційних параметрів.

Поєднання структурних функціональних модулів у цілісну конструкцію робота забезпечується

шляхом реалізації відповідних з'єднань між ними. У рамках даної роботи було прийняте рішення розділити можливі міжмодульні з'єднання на з'єднання механічного та електричного типів відповідно до їх функціонального призначення:

$$Z_i \supset \left(\begin{array}{l} MZ_i \supset \{MZR_i, MZP_i\}, \\ EIZ_i \supset \{EIZP_i, EIZUSB_i\}. \end{array} \right), \quad (8)$$

де MZ_i – множина механічних параметрів з'єднань i -того модуля, що характеризується параметрами різьбових з'єднань та з'єднань пазового типу MZP_i ;

EIZ_i – множина електричних параметрів з'єднань i -того модуля, що характеризується параметрами штирьових $EIZP_i$ з'єднань та з'єднань із роз'ємами типу USB $EIZUSB_i$.

Модульна конструкція робота може розглядатися як цілісна система, що потребує певної узгодженості між собою елементів, які входять до її складу. Основними взаємозв'язками між модулями, з погляду керування складальними процесами, є забезпечення узгодженості між ними шляхом забезпечення узгодженості між параметрами з'єднань відповідних модулів конструкції. Відповідно до цього, узгодженість між i -тим та j -тим модулями у цілісній конструкції шляхом забезпечення узгодженості між їх з'єднаннями відповідних типів в узагальненому вигляді може бути представлена таким виразом:

$$R_{i,j} = \begin{cases} MZ_{i,j} : MZ_{j,i}, \\ EIZ_{i,j} : EIZ_{j,i}. \end{cases} \quad (9)$$

де i та j – модуль що з'єднується та модуль, із яким реалізується з'єднання відповідно.

Значення показника узгодженості $R \rightarrow 1$, тобто в ідеальних умовах кількість механічних та електричних з'єднань, призначених для поєднання у цілісній конструкції відповідних модулів, збігаються, що передбачає також аналогічні відносини між їх параметрами згідно з виразами (8) та (9). У випадках, коли $R > 1$, можна зробити висновок, що конструкція є достатньо гнучкою та за рахунок незадіяних роз'ємів, притаманних окремим модулям, може бути модернізована шляхом заміни деяких модулів чи додаванням нових. Якщо $R < 1$, то структурні функціональні модулі є несумісними, на етапі конструювання робота була допущена помилка, відповідно, подальша реалізація технологічного процесу складання є недоцільною.

Розглядаючи виконавче обладнання, що може бути задіяне у реалізації процесів складання модульних роботів, його формалізація також може бути зведена до розробки відповідних математичних та параметричних моделей. Елементами

такого обладнання в умовах повної автоматизації процесу можуть виступати окремі одиниці промислових роботів, конвеєри (здебільшого стрічкового типу), автоматичні склади, роботизовані візки різноманітних типів та ємності, накопичувачі та інші елементи автоматичних транспортно-накопичувальних систем [5]. Кожна з окремих одиниць обладнання VO , що використовується для реалізації зазначеного процесу, може бути описана динамічною моделлю параметрів, значення яких може змінюватися упродовж часу його протікання:

$$M_{VO} = \{VO_1, VO_2, \dots, VO_n\}, \quad (10)$$

де n – кількість одиниць виконавчого обладнання, що задіяне у реалізації відповідного технологічного процесу складання.

Кожна з множин елементів сукупності виконавчого обладнання може бути описана відповідними множинами специфічних та загальних параметрів (аналогічно виразу (5)).

Засоби керування ZK та спостереження ZS , що входять до складу системи керування, при реалізації технологічних процесів складання роботів із модульною конструкцією можуть бути представлені різноманітними обчислювальними елементами (комп'ютери, програмовані логічні контролери) та системами технічного зору, датчиками різноманітних типів, що у комплексі з програмними засобами керування реалізують складну систему адаптивного керування процесом. Сукупність конструктивних, експлуатаційних, а також функціональних параметрів елементів системи керування M_{SK} , що спричинені умовами відповідної виробничої ділянки та виробництва взагалі, може бути описана як сукупність параметрів кожного з елементів системи керування, які також можуть бути розподілені на множини загальних та специфічних параметрів:

$$M_{SK} = (\{ZK_1, ZK_2, \dots, ZK_n\} \wedge \{ZS_1, ZS_2, \dots, ZS_m\}). \quad (11)$$

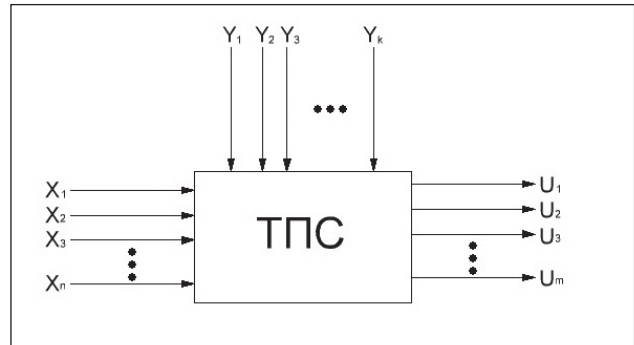
В умовах невизначеності конкретних параметрів елементів керування в узагальненому вигляді систему керування технологічним процесом складання можливо реалізувати за допомогою моделі типу «чорна скриня» (рис. 2). Моделі такого типу дозволяють розглядати систему взагалі, без урахування її елементів, та визначати її реакції на умови, що змінюються, з урахуванням її обмежень.

Математичний опис моделі складається з опису границь, які встановлюються можливостями системи, її програмного та технічного забезпечення. Моделі такого типу характеризуються вхідними сигналами X , що можуть бути задані програмно

та розглядатися як задані керуючі впливи, та сигналами з датчиків; випадковими зовнішніми збуреннями Y , що обумовлені здебільшого випадковими змінами умов навколишнього середовища (характерно для рухливих процесів складання), збоями та різноманітними погрішностями роботи обладнання та засобів спостереження, що характеризується відповідними значеннями їх динамічних параметрів; результуючими керуючими сигналами U , що надходять на виконавче обладнання та забезпечують режими технологічних параметрів процесу:

$$M_{ТПС} = \begin{cases} X = \{X_1, X_2, X_3, \dots, X_n\}; \\ U = \{U_1, U_2, U_3, \dots, U_m\}; \\ Y = \{Y_1, Y_2, Y_3, \dots, Y_k\}. \end{cases} \quad (12)$$

де n – кількість вхідних сигналів X ;
 m – кількість результуючих керуючих сигналів U ;
 k – кількість випадкових збурень Y .



ТПС – технологічний процес складання

Рис. 2. Модель системи керування технологічним процесом складання типу «чорна скриня»

3. Математична модель технологічного процесу складання

Математична модель технологічного процесу складання роботів із конструкцією модульного типу, згідно із розробленою структурно-функціональною моделлю та моделями формалізації її елементів, містить властивості самого об'єкта складання, виконавчого обладнання та засобів керування, що можуть бути представлені відповідними параметричними описами. В узагальненому вигляді вона відповідає поточній зміні стану об'єкта складання (конструкції робота) від залучення першого модуля до кінцевого завершення складання шляхом реалізації міжмодульних з'єднань:

$$T \xrightarrow{W_1} S_1 \xrightarrow{W_2} \dots \xrightarrow{W_{n-1}} S_{n-1} \xrightarrow{W_n} P, \quad (13)$$

де T – початковий стан виробничої ділянки, що відповідає готовності виконавчого обладнання до початку реалізації процесу;

$S_1 \dots S_{n-1}$ – поточні стани об’єкта складання, що забезпечуються виконанням відповідних технологічних операцій;

Π – кінцевий стан об’єкта складання, що відповідає технічному завданню на виріб ($S \rightarrow (S_n = \Theta)$).

$W_1 \dots W_n$ – шляхи досягнення відповідного стану об’єкта складання.

Початковий стан T автоматизованої виробничої ділянки характеризується станом виробничого обладнання та засобів керування, що відповідає необхідним вимогам для виконання складальних операцій зазначеної конструкції та може бути представлений відповідним параметричними описами, що містять у собі відображення значень динамічних параметрів P_{Di} , які входять до множини специфічних параметрів елементів виконавчого обладнання P_{sVO} , та системи керування P_{sSK} , за умови досягнення ними необхідних для початку реалізації процесу значень у момент часу t_i :

$$T = (P_{Di} \subset \{P_{sVO}, P_{sSK}, f\}). \quad (14)$$

Поточні стани об’єкта складання $S_1 \dots S_{n-1}$ характеризуються параметрами, належними відповідним складовим модулям, які є встановленими у загальній конструкції приладу та можуть бути записані у вигляді параметричної моделі, що відповідає зазначеному стану конструкції. Таким чином, стан конструкції робота, що відповідає кінцевому етапу складання, характеризується параметричними описами модулів, що входять до його складу на момент часу t_i :

$$\Theta = S_n = (M_{par OS_i} \supset \{P_i, S_i, M_i, K_i, IK_i, SP_i\}). \quad (15)$$

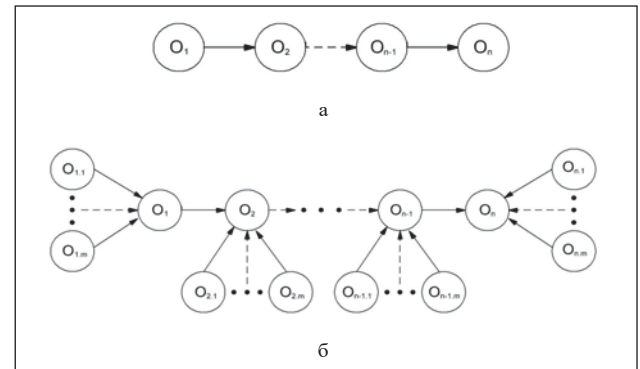
Вираз (14) є справедливим для включення до складу загальної конструкції робота модулів кожного з розглянутих типів.

Шляхи досягнення відповідного стану об’єкта складання $W_1 \dots W_n$ характеризуються динамічними параметрами стану обладнання та його переміщенням відповідно до керуючих впливів системи керування, адаптованих до отриманих показань із засобів спостереження та контролю, протягом часу t_i , що відповідають реалізації зазначеної технологічної операції та забезпеченню технологічних параметрів процесу:

$$W_i(U) = (P_{Di} \subset P_{sVO}). \quad (16)$$

Встановлення одного модуля до цілісної конструкції виробу може характеризуватися виконанням однієї загальної технологічної операції, що має ієрархічну структуру та включає у себе основні та загальні технологічні операції та переходи. Технологічний процес складання роботів із конструкцією модульного типу на операційному рівні, за наявності функціональних складових

модулів кожного з розглянутих типів та їх цілісності у загальній конструкції кінцевого виробу, характеризується послідовним складанням, що, згідно з виразом (12), може бути відображено за допомогою графа слідування лінійного типу (рис. 3, а). У разі представлення модуля одного типу декількома елементами процес складання характеризується послідовно-паралельним виконанням та може бути представлений графом слідування типу «дерево» (рис. 3, б).



а – граф слідування лінійного типу;
б – граф слідування типу «дерево»

Рис. 3. Графи слідування

Технологічні операції O (послідовність виконання яких наведена на графах, характеризується досягненням відповідного для цієї операції стану об’єкта складання S шляхом W) представлені вершинами графів, а дуги фіксують відносини між ними.

Висновки. Підвищення ефективності застосування адаптивних алгоритмів під час керування технологічними процесами складання роботів із конструкцією модульного типу може бути досягнуто шляхом розробки відповідного інформаційного забезпечення, що базується на математичному та параметричному описі елементів процесу. Наведені в роботі моделі формалізації таких елементів процесу, згідно з його розробленою структурно-функціональною моделлю, а саме модульної конструкції робота як об’єкта складання, елементів виконавчого обладнання, а також елементів керування, мають найбільш повний параметричний опис, що відповідає вимогам адекватності моделей такого типу та уможливають подальшу розробку моделі системи керування технологічними процесами складання з урахуванням їх оптимізації за показниками спрощення алгоритмів функціонування вказаних систем. На основі запропонованої моделі узгодженості структурних функціональних модулів у цілісній системі конструкції можлива реалізація додаткової опера-

ції вхідного контролю, що не потребує витрат на відповідне технічне забезпечення, що дозволить оптимізувати технологічний процес складання за показниками підвищення якості кінцевих виробів без значного підвищення витрат на його організацію. Приведені графи слідування, засновані на розроблених математичних моделях технологічного процесу та описі його елементів, відображають послідовність виконання процесу складання з урахуванням встановлення елементів з'єднань,

що поєднують структурні функціональні модулі конструкції у цілісну систему роботи. Запропоновані графи можуть бути адаптовані для різних відображень конструкцій зазначеного типу та відповідають схемам складання з базовою деталлю, що, у сукупності з картами з'єднань, є основними та достатніми технологічними документами, необхідними для реалізації технологічних процесів складання роботів із конструкцією модульного типу.

Список літератури:

1. Bikas Ch., Argyrou A., Pintzos G., Giannoulis Ch., Sipsas K., Papakostas N., Chryssolouris G. An Automated Assembly Process Planning System. 6th CIRP Conference on Assembly Technologies and Systems (CATS): Published by Elsevier B.V. (Gothenburg, Sweden, May 16–17th 2016). Gothenburg, 2016. P. 222–227.
2. Michniewicz J., Reinhart G., Boschert S. CAD-based automated assembly planning for variable products in modular production systems. 6th CIRP Conference on Assembly Technologies and Systems (CATS): Published by Elsevier B.V. (Gothenburg, Sweden, May 16–17th 2016). Gothenburg, 2016. P. 44–49.
3. Невлюдов І.Ш., Євсєєв В.В., Функендорф А.О., Разумов-Фризюк Є.А. Моделі формалізації вирішення задач автоматизації проектування конструкції роботів з модульною структурою. Збірник наукових праць Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка. «Системи управління, навігації та зв'язку». 2017. № 2 (42). С. 36–38.
4. Невлюдов І.Ш., Евсеев В.В., Функендорф А.О., Кушлак А.А. Разработка математической модели параметров принадлежности модулей робототехнических средств для автоматизации проектирования технологического процесса сборки. Технология приборостроения. 2015. № 2. С. 20–23.
5. Невлюдов, І.Ш. Виробничі процеси та обладнання об'єктів автоматизації: підручник. Кривий Ріг, 2017. 444 с.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА СБОРКИ РОБОТОВ С КОНСТРУКЦИЕЙ МОДУЛЬНОГО ТИПА

Рассмотрена проблема автоматизации управления технологическими процессами сборки конструкций с точки зрения формализации его элементов. Предложено структурно-функциональную и общую математическую модель технологического процесса сборки роботов с конструкцией модульного типа, а также его элементов, в соответствии с их функциональным назначением, графы следования выполнения процесса. Приведено модель согласованности элементов объекта сборки в целостной конструкции.

Ключевые слова: модульная конструкция, технологический процесс сборки, адаптивное управление, функциональные элементы, математическая модель, граф следования.

MATHEMATICAL MODEL OF ROBOTS WITH MODULAR TYPE CONSTRUCTION COMPOSITION TECHNOLOGICAL PROCESS

The problem of control by technological processes of assembly of modular constructions from the point of view of formalization of its elements is considered. Control of technological processes of modular constructions problem from the point of view formalization its elements is considered. The structural-functional and general mathematical model of the technological process of assembling robots with a modular type design, as well as its elements, according to their functional purpose, execution graphs, is proposed. The consistency model of the assembly elements object in the integral design is given.

Key words: modular constructions, assembly technological processes, adaptive control, functional elements, parametric model, mathematical model, execution graphs.