

УДК 658.52.011:658.512.4

**УМОВИ ПАРАМЕТРИЧНОЇ РЕАЛІЗОВАНОСТІ ПРИ
АВТОМАТИЗОВАНОМУ СИНТЕЗІ РОБОТИЗОВАНИХ
МЕХАНОСКЛАДАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

В. А. Кирилович, доктор технічних наук

Житомирський державний технологічний університет

e-mail: kiril_va@yahoo.com

Анотація. *В рамках системного підходу реалізації стратегії автоматизованого синтезу роботизованих механоскладальних технологій запропоновано формалізацію однієї із складових умов вирішуваності (УВ) – умов параметричної реалізованості (УПР). Розкрито зміст задач УПР, визначено та формалізовано умови існування УПР. Множина задач УПР декомпозована на такі, що визначають наступні параметри: технологічного обслуговування стаціонарним промисловим роботом кожної робочої позиції гнучкої виробничої комірки, міжагрегатні переміщення схвата промислового робота між робочими позиціями, а також сукупності робочих позицій та їх узгодження.*

Ключові слова: *промисловий робот, параметрична реалізованість, роботизована механоскладальна технологія.*

Відома стратегія вирішуваності [3, 4] при автоматизованому синтезі (АС) роботизованих механоскладальних технологій (РМСТ) передбачає розв'язування низки задач, що є змістом умов вирішуваності (УВ). Визначення УВ виконується шляхом генерування множини РМСТ та визначення параметрів РМСТ, що є оптимальними в заданому сенсі, та таких, які повинні відповідати умовам функціональної, параметричної та критеріальної реалізованості (відповідно УФР, УПР та УКР), що реалізуються саме в такій послідовності.

Очевидна необхідність задовольняти згенерованою множиною частини РМСТ, що відповідають умовам функціональної реалізованості, певним

параметрам, наприклад, щодо швидкодії параметрів законів управління переміщення ланок маніпуляційної системи та схвата (Сх) промислового робота (ПР), характеристик відпрацювання траєкторій тощо дозволяє виділити та відсіяти варіанти РМСТ, які є непридатними для подальшого розгляду. Умови, що описують подібні вимоги, називаються *умовами параметричної реалізованості* (УПР).

Прийнята в [4] функція автоматизованого синтезу (ФАС) РМСТ φ^{dg} на певному рівні абстрагування в загальному випадку може бути інтерпретована як зміна (відображення) інформаційних, матеріальних та енергетичних потоків, що визначені використанням ПР, на множині (множину) визначення УФР, УПР та УКР:

$$\varphi^{dg} : (\varphi_{I(\tau)}^{IR} \times \varphi_{M(\tau)}^{IR} \times \varphi_{E(\tau)}^{IR}) \rightarrow \left(\left(\varphi_{i_{\varphi_f}}^{dg} \mid i_{\varphi_f} = \overline{1, n_{\varphi_f}^{dg}} \right) \times \left(\varphi_{i_{\varphi_p}}^{dg} \mid i_{\varphi_p} = \overline{1, n_{\varphi_p}^{dg}} \right) \times \left(\varphi_{i_{\varphi_c}}^{dg} \mid i_{\varphi_c} = \overline{1, n_{\varphi_c}^{dg}} \right) \right) (1)$$

де $\varphi_{I(\tau)}^{IR}$, $\varphi_{M(\tau)}^{IR}$, $\varphi_{E(\tau)}^{IR}$ – функції, що визначають технологічну зміну відповідно інформаційних, матеріальних та енергетичних потоків, що відбуваються в часі τ за участі ПР; $\varphi_{i_{\varphi_f}}^{dg}$, $\varphi_{i_{\varphi_p}}^{dg}$, $\varphi_{i_{\varphi_c}}^{dg}$ – i_{φ_f} -та, i_{φ_p} -та, i_{φ_c} -та ФАС, що визначають відповідно умови функціональної (f), параметричної (p) та критеріальної (c) реалізованості при АС РМСТ в ГВК, що реалізуються на одноіменних рівнях f , p , c .

Очевидно, що множина ФАС $\varphi_{i_{\varphi_p}}^{dg}$ визначається на множині $\varphi_{i_{\varphi_p}}^{dg}$, а $\varphi_{i_{\varphi_c}}^{dg}$ – на множині $\varphi_{i_{\varphi_p}}^{dg}$ з врахуванням відповідних параметрів, що розглядаються на відповідних рівнях.

Мета досліджень – встановлення на формалізованому рівні змісту та сутності задач умов параметричної реалізованості, що є складовими системного підходу до автоматизованого синтезу роботизованих механоскладальних технологій в гнучких виробничих комірках.

Матеріали та методика досліджень. Нині відсутній системний підхід та відповідно відсутній комплексний розгляд всієї множини факторів, умов та параметрів при проектуванні ГВК як складових гнучких виробничих систем машино- та приладобудування [1, 5-7,11-13] та АС РМСТ в них[2-4, 8-10]. При цьому задачі загального синтезу технологій в такій постановці не розглядаються і тому прямих аналогів на сьогодні не мають. Розрізненість та неупорядкованість, фрагментарність та неоднозначність (альтернативність) безперечно вагомих здобутків щодо розв'язування окремих задач технологічного змісту при використанні ПР в певних предметних областях лише підкреслюють необхідність системно досліджувати та розробляти нові підходи до АС РМСТ. Один із необхідних етапів при цьому і є множина задач, що формалізовано визначають УПР.

Результати досліджень. Із викладеного вище випливає, що параметри АС РМСТ f -рівня – УФР згідно стратегії вирішуваності на наступному p -рівні параметризуються та формалізуються з використанням відповідних ФАС, що формують кінцеву множину УПР – ${}_p\varphi_{cm}^{dg}$, де p – індекс параметричного рівня при описі технологічного роботизованого комплекту (ТРК) [3, 4], для якого характерним є доцільність генерування не траєкторії переміщення робота, а траєкторний простір переміщення ТРК; $cm=t$ – повнота розгляду задач: $cm=t$ – щодо кожної t -ої РП (WP_t -повнота); $cm=c$ – щодо ГВК (FMC -повнота) при виготовленні в ГВК g -их виробів їх d -ої групи.

Таким чином, кожен елемент кінцевої множини ФАС ${}_p\varphi_{cm}^{dg}$ визначає параметри технологічного обслуговування ПР кожної t -ої РП (WP_t), їх технологічно упорядковану сукупність та взаємну узгодженість (за необхідності):

$${}_p\varphi_{cm}^{dg} = {}_p\varphi_t^{dg} \times {}_p\varphi_{c.u}^{dg} \times {}_p\varphi_{c.c}^{dg}, \quad (2)$$

де ${}_p\varphi_t^{dg}$ функція WP_t - параметричної реалізованості; ${}_p\varphi_{c.u}^{dg}$ - функція FMC - параметричної узгодженості; ${}_p\varphi_{c.c}^{dg}$ - функція циклової FMC - параметричної узгодженості.

В основу визначення всіх ФАС за (2) p -рівня за аналогією з ФАС f -рівня [4] покладено твердження: функція WP_t - параметричної реалізованості існує (${}_p\varphi_t^{dg} \neq 0$), якщо на підставі існування функцій ${}_f\varphi_{t,tr}^{dg}$ (умови WP_t -траєкторної реалізованості) та ${}_f\varphi_{c,tr}^{dg}$ (умови FMC -траєкторної реалізованості) ПР може забезпечити відповідні переміщення ТРК ${}_p^{kn}S_t^{dg}$ з відповідними технологічними параметрами, енергетичними складовими та законами управління траєкторіями переміщення ТРК ${}_p^{kn}S_t^{dg}$ при технологічному обслуговуванні ПР кожної РП ГВК.

Існування ${}_p\varphi_t^{dg}$ забезпечується трьома умовами ${}_pY$, а саме:

– умова ${}_pY1$: ${}_p^{ts}TrSp_t^{dg}$ різнонаправленого переміщення ТРК певного складу при технологічному обслуговуванні ПР між (A_t^{IR}) , (\dots^{IR}) та $(C_t^{IR}) \forall WP_t$ виконується з врахуванням існування ${}_f\varphi_{t,tr}^{dg}$ та визначається мінімальною енергоємністю при заданій або граничній швидкодії та відповідних законах управління переміщень $P_{Gr} \subset {}_p^{kn}S_t^{dg}$:

$$({}_p\varphi_t^{dg} \neq 0 \forall {}_f\varphi_{t,tr}^{dg} \neq 0) : \left[\exists ({}_p^{ts}TrSp_t^{dg})_{(A_t^{IR}) \leftrightarrow (\dots^{IR}) \leftrightarrow (C_t^{dg})} \rightarrow (q_{i_1(A_t^{IR}) \leftrightarrow (\dots^{IR}) \leftrightarrow (C_t^{dg})}) \right] \rightarrow \quad (3)$$

$$\rightarrow {}_p^{ts} E_{(A_t^{IR}) \leftrightarrow (\dots^{IR}) \leftrightarrow (C_t^{dg})}^{dg} \min | t = \overline{1, T^{dg}}; \tau_c \leq [\tau_c]; U_{Gr_1}(\tau) | i_1 = \overline{n_1} \geq n;$$

Тут та далі: $(C_t) = \overline{1, T^{dg}}$ - множина точок положення полюса СхПР при завантаженні / розвантаженні кожної t -ої WP_t ; $(D_t) = \overline{1, T^{dg}}$ - множина проміжних точок позиціонування полюса СхПР; $(A_t) = \overline{1, T^{dg}}$ - множина точок положення полюса СхПР при міжагрегатному транспортуванні ОМ;

– умова ${}_p Y2: {}_p {}^{is} TrSp_t^{dg}$ міжагрегатного переміщення ТРК певного складу при переміщенні ПР між $(A_t^{dg} | \forall t = \overline{1, T^{dg}})$ повинен виконуватись з врахуванням існування ${}_f \varphi_{t.tr}^{dg}$ та визначатись мінімальною енергоємністю при заданій або граничній швидкодії та відповідних законах управління $U_{Gr_{i_1}}(\tau)$ переміщень Сх як складової ТРК $P_{Gr} \subset {}_p {}^{aa} S_t^{dg}$:

$$({}_p \varphi_{c.n}^{dg} \neq 0 \forall {}_f \varphi_{c.tr}^{dg} \neq 0) : \left[\exists ({}_p {}^{aa} TrSp_t^{dg})_{(A_i^{dg}) \leftrightarrow (A_j^{dg})} \rightarrow (q_{i_1((A_i^{dg}) \leftrightarrow (A_j^{dg})))} \right] \rightarrow (4)$$

$$\rightarrow {}_p {}^{aa} E_{((A_i^{dg}) \leftrightarrow (A_j^{dg}))}^{dg} \min | (i \neq j) = t = \overline{1, T^{dg}}; \tau_c \leq [\tau_c]; U_{Gr_{i_1}}(\tau) | i_1 = \overline{1, n_1} \geq n;$$

– умова ${}_p Y3: {}_p {}^{is} TrSp_t^{dg}$ ТРК певного складу при цикловому переміщенні ПР між $\langle (A_t^{IR}), (\dots, \dots, A_t^{IR}), (C_t^{IR}), (A_i^{IR} - A_j^{IR}) | i \neq j \neq t = \overline{1, T^{dg}} \rangle$. згідно M^{dg} повинен виконуватись з врахуванням ${}_p Y1$ та ${}_p Y2$ та визначатись мінімальною енергоємністю за умови забезпечення заданої продуктивності та відповідних законів управління $U_{Gr_{i_1}}(\tau)$ переміщення полюса Сх $P_{Gr} \subset {}_p {}^{aa} S_t^{dg}$:

$$({}_p \varphi_{c.c}^{dg} \neq 0 (\forall {}_f \varphi_{t.tr}^{dg} \neq 0; \forall {}_f \varphi_{c.tr}^{dg} \neq 0)) : \left[\exists ({}_p {}^{kn} TrSp_t^{dg})_{(A_i^{dg}) \leftrightarrow (\dots, \dots, A_t^{dg}) \leftrightarrow (C_t^{dg}) \leftrightarrow (A_i^{dg}) \leftrightarrow (A_j^{dg})} \rightarrow (q_{i_1((A_i^{dg}) \leftrightarrow (\dots, \dots, A_t^{dg}) \leftrightarrow (C_t^{dg}) \leftrightarrow (A_i^{dg}) \leftrightarrow (A_j^{dg})))} \right] \rightarrow (5)$$

$$\rightarrow {}_p {}^{kn} E_{(A_i^{dg}) \leftrightarrow (\dots, \dots, A_t^{dg}) \leftrightarrow (C_t^{dg}) \leftrightarrow (A_i^{dg}) \leftrightarrow (A_j^{dg})}^{dg} \min | (i \neq j) = t = \overline{1, T^{dg}}; \tau_c \leq [\tau_c]; U_{Gr_{i_1}}(\tau) | i_1 = \overline{1, n_1} \geq n;$$

В свою чергу ФАС ${}_p \varphi_t^{dg}$ може бути представлена декартовим добутком складових:

$${}_p \varphi_t^{dg} = {}_p \varphi_{t.e}^{dg} \times {}_p \varphi_{t.u}^{dg}, \quad (6)$$

де ${}_p \varphi_{t.e}^{dg}$ - функція WP_t - енергетичних параметрів; ${}_p \varphi_{t.u}^{dg}$ - функція WP_t^{dg} - законів управління.

Це означає, що параметри технологічного обслуговування кожної WP_t можуть бути реалізовані за умови наявності певних законів управління ланками (УК) при розв'язуванні прямих та зворотних задач кінематики та динаміки.

В свою чергу функція WP_t - енергетичних параметрів ${}_p\varphi_{t.e}^{dg}$ означає, що при технологічному обслуговуванні ПР будь-якої WP_t ГВК завжди існує такий траєкторний простір ${}_p^{ts}TrSp_t^{dg}$, який серед множини згенерованих ${}_p^{ts}TrSp_t^{dg}$ має найменшу енергоємність ${}_pE_t^{dg} \min$:

$$\begin{aligned} &{}_p\varphi_{t.e}^{dg} : ({}_p^{ts}TrSp_t^{dg} \subset ({}_p^{ts}TrSp_{c,i_{p}^{ts}TrSp_t}^{dg} \mid i_{p}^{ts}TrSp_t = \overline{1, n_{p}^{ts}TrSp_t}})) \rightarrow \\ &\rightarrow ({}_pE_t^{dg} \min \subset ({}_pE_{t,i_{p}^{ts}E_t}^{dg} \mid i_{p}^{ts}E_t = \overline{1, n_{p}^{ts}E_t}}; n_{p}^{ts}E_t = n_{p}^{ts}TrSp_c))) \end{aligned} \quad (7)$$

Зміст функцій ${}_p\varphi_{t.e}^{dg}$ - законів управління такий:

- при технологічному обслуговуванні ПР будь-якої РП ГВК для ${}_p^{ts}TrSp_t^{dg}$ існує закон управління переміщенням Сх або УК ПР, що забезпечує ${}_pE_t^{dg} \min$:

$${}_p\varphi_{t.u}^{dg} : ({}_p^{ts}TrSp_t^{dg} \rightarrow {}_pE_c^{dg}) \rightarrow \left\{ {}_p^{ts}U_{Gr_{i_1}}(\tau); {}_p^{ts}U_{q_{i_1}}(\tau) \mid i_1 = \overline{1, n_1} \geq n \right\}. \quad (8)$$

де n_1 - загальна кількість ланок МС ПР; n – кількість активованих ланок;

- *FMC*- параметричної узгодженості ${}_p\varphi_{t.u}^{dg}$ визначає реалізацію міжагрегатних переміщень ТРК ${}_p^{aa}S_c^{dg}$ за траєкторним простором ${}_p^{aa}TrSp_c^{dg}$, що характеризується найменшою ${}_p^{aa}E_c^{dg} \min$ та наявністю відповідних законів управління схвата ${}_p^{ts}U_{Gr_{i_1}}(\tau)$ або ланок ${}_p^{aa}U_{q_{i_1}}(\tau)$:

$${}_p\varphi_{c.u}^{dg} = {}_p\varphi_{c.e}^{dg} \times {}_p\varphi_{c.u.c}^{dg},$$

де ${}_p\varphi_{c.e}^{dg}$ - функція *FMC*- енергетичних параметрів; ${}_p\varphi_{c.u.c}^{dg}$ - функція *FMC*- законів управління.

Тому

$$\begin{aligned} &{}_p\varphi_{c.e}^{dg} : \left({}_p^{aa}TrSp_c^{dg} \subset \left({}_p^{aa}TrSp_{c,i_{p}^{aa}TrSp_c}^{dg} \mid i_{p}^{aa}TrSp_c = \overline{1, n_{p}^{aa}TrSp_c}} \right) \right) \rightarrow \\ &\rightarrow \left({}_p^{aa}E_c^{dg} \min \subset \left({}_p^{aa}E_{c,i_{p}^{aa}E_c}^{dg} \mid i_{p}^{aa}E_c = \overline{1, n_{p}^{aa}E_c}}; n_{p}^{aa}E_c = n_{p}^{aa}TrSp_c^{dg} \right) \right); {}_p\varphi_{c.u.c}^{dg} : \left({}_p^{aa}TrSp_c^{dg} \rightarrow {}_p^{aa}E_c^{dg} \min \right) \rightarrow {}_p^{aa}U_{Gr_{i_1}}(\tau) \mid i_1 = \overline{1, n_1} \geq n; \end{aligned} \quad (9)$$

- функція циклової *ФМС*-параметричної узгодженості ${}_p\varphi_{c.c}^{dg}$ визначає реалізацію циклових переміщень ${}_pS_{cm}^{dg}$ за ${}_p{}^{kn}TrSp_{cm}^{dg}$ з найменшою ${}_pE_{cm}^{dg}$ та наявністю відповідних законів управління схватом ${}_pU_{Gr_i}^{kn}(\tau)$:

$${}_p\varphi_{c.c}^{dg} : \left(\begin{matrix} {}^{kn} * \\ {}_pTrSp_c^{dg} \rightarrow {}_pE_c^{dg} \min \end{matrix} \right) \rightarrow {}_pU_{Gr_i}^{kn}(\tau) \Big|_{i_1 = \overline{1, n_1} \geq n; \tau_c \leq [\tau_c]; {}_p\varphi_i^{dg} \neq 0; {}_p\varphi_{c.u}^{dg} \neq 0.} \quad (10)$$

Узагальнення викладеного вище дає змогу представити УПР на теоретико-множинному рівні такими ФАС:

$${}_p\varphi_{c.m}^{dg} = {}_p\varphi_{t.e}^{dg} \times {}_p\varphi_{t.u}^{dg} \times {}_p\varphi_{c.e}^{dg} \times {}_p\varphi_{c.u.c}^{dg} \times {}_p\varphi_{c.c}^{dg} \quad (11)$$

Вказаний вираз вказує на наоднозначність відношень між висвітленими складовими УКР та підкреслює необхідність проведення подальших досліджень для розкриття сутності декартових добутоків в (11).

Висновки

Проведені формалізовані дослідження кінцевої множини задач, що складають УПР, висвітлюють зміст кожної з них, системно фіксують їх ієрархічну підпорядкованість та передбачають використання при АС РМСТ. Формалізація складових УПР дає можливість розглядати останні як підсистему системного підходу при реалізації стратегії АС РМСТ.

Подальші дослідження направлені перш за все на дослідження взаємних ітераційно-рекурентних відношень між складовими рівнів та всередині їх, а також на алгоритмічну та програмну реалізацію розв'язування задач УПР та їх подальшу інтеграцію в загальну систему АС РМСТ.

Список літератури

1. Гнучкі комп'ютерно-інтегровані системи: планування, моделювання, верифікація, керування / Л.С. Ямпольський, П.П. Мельничук, К.Б. Остапченко, О.І. Лісовиченко. – Житомир: ЖДТУ, 2010. – 786 с.

2. Кирилович В.А. Геометричний аспект траєкторних задач роботизованих механоскладальних технологій / В. А. Кирилович, І. В. Сачук // Збірник наукових праць Кіровоградського державного технологічного

університету // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. – Вип.12. – Кіровоград: КДТУ, 2003. – С. 210–214.

3. Кирилович В.А. Системний підхід до роботизованих механоскладальних технологій як об'єкта синтезу / В.А. Кирилович // Сборник трудов XIX международной научно-технической конференции "Машиностроение и техносфера XXI века". – 2012. – Донецк. – Т.2. – С. 38 – 39.

4. Кирилович В.А. Умови функціональної реалізованості роботизованих механообробних технологій в гнучких виробничих комірках / В.А. Кирилович // Технологічні комплекси. – Луцьк. – 2010. – № 1. – С. 136 – 145.

5. Корендясев А.И. Теоретические основы робототехники / Корендясев А.И., Саламандра Б.Л., Тывес С.М.; отв.ред. Каплунов С.М.; Ин-т машиноведения им. А.А. Благонравова РАН. – М.: Наука, 2006. – 376 с. (В 2-х кн.).

6. Лищинский Л.Ю. Структурный и параметрический синтез гибких производственных систем / Лищинский Л.Ю. – М.: Машиностроение, 1990. – 312 с.

7. Пуховский Е.С. Проектирование станочных систем многономенклатурного производства / Пуховский Е.С., Кукарин А.Б. – К.: Техника, 1997. – 221 с.

8. Automated research of trajectory problems in Industrial Robotics by the criterion of power consumption / [Valerii Kyrylovych, Petro Melnychuk, LubomirDimitrov, Roman Morgunov, Aleksandr Pidtychenko] // Recent. Industrial Engineering Journal. – Transilvania University of Brasov, Romania. – Vol.15 (2014). – №3 (43). – November, 2014. – P.184–190

9. Caihua Xiong. Fundamentals of Robotic Grasping and Fixturing / Caihua Xiong, Ham Ding, Youlung Xiong. – Word Scientific Publishing Co. Ptc. Ltd., 2007. – 218 p.

10. Fahimi F. Autonomous Robots: Modeling, Path Planning, and Control / Fahimi F. – New York: Springer, 2009. – 348 p/

11. Gibilisco S. Concise Encyclopedia of Robotics / Stan Gibilisco – McGraw-Hill, 2003. – 383 p.
12. Siciliano B. Handbook of robotics. / B. Siciliano, O. Khatib. – Berlin: Springer-Verlag, 2008. – 1628 p.
13. Siciliano B. Robotics: Modelling, Planning and Control / B. Siciliano, L. Sciavicco, L. Villani, G. Oriolo. – London: Springer, 2009. – 632 p.

УСЛОВИЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗУЕМОСТИ ПРИ АВТОМАТИЗИРОВАННОМ СИНТЕЗЕ РОБОТИЗИРОВАННЫХ МЕХАНОСБОРОЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

В.А. Кирилович

***Аннотация.** В рамках системного подхода реализации стратегии автоматизированного синтеза роботизированных механосборочных технологий предложено формализацию одной из составляющих условий решаемости (УВ) – условий параметрической реализуемости (УПР). Раскрыто содержание задач УПР, определены и формализованы условия существования УПР. Множество задач УПР декомпозировано на определяющие следующие параметры: технологического обслуживания стационарным промышленным роботом каждой рабочей позиции гибкой производственной ячейки, междуагрегатного перемещения схвата промышленного робота между рабочими позициями, а также совокупности рабочих позиций и их согласования.*

***Ключевые слова:** промышленный робот, параметрическая реализуемость, роботизированная механосборочная технология*

CONDITIONS OF PARAMETRIC FEASIBILITY FOR AUTOMATED SYNTHESIS OF MECHANICAL ASSEMBLY ROBOTIC TECHNOLOGIES

V. Kyrylovych

***Abstract.** As the part of a systematic approach of the strategy implementation automated synthesis is of robotic mechanical assembly technologies the formalization*

of the components of solvability conditions (SC) was proposed. There are parametric feasibility conditions (PFC). Maintenance of PFC tasks are defined and formalized the conditions of existence of the PFC. The set of PFC tasks is decomposed. As a result the parts define the following parameters: technological service of industrial robot of each working position of flexible manufacturing cell, among aggregate motions of gripper of stationary industrial robot between working positions and their coordination.

Keywords: *industrial robot, parametric feasibility, mechanical assembly robotic technology*