

*Ю.Л. ПРОНЧАКОВ*

## **ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРНИХ РІШЕНЬ ПРИ СТВОРЕННІ РОЗПОДІЛЕНОГО ВІРТУАЛЬНОГО ВИРОБНИЦТВА**

Поставлено та вирішено науково-прикладну задачу синтезу архітектури розподіленої віртуальної виробничої системи. Актуальність теми дослідження пов'язана зі створенням віртуальних виробництв, що відповідає концепції індустріального розвитку Industry 4.0. Метою дослідження є обґрунтування раціонального складу та топології віртуальної виробничої системи, яка орієнтована на інноваційний портфель замовлень. Дослідження складається з декількох етапів: формування архітектури віртуального виробництва; моделювання виробничого циклу; дослідження вузьких місць у розподіленому віртуальному виробництві. Для оцінки розташування технологічного обладнання використовуються показники у вигляді витрат, часу та ризиків. Проведено моделювання виробничого циклу виконання замовлень з урахуванням часових затримок на виконання операцій у технологічному обладнанні. Для моделювання вузьких місць досліджуються черги, які виникають при виконанні замовлень. Використано математичні методи: методи цілочисельного (булевого) програмування; імітаційне подійне моделювання; агентне моделювання.

### **1. Вступ**

Сучасна стратегія розвитку виробничих систем заснована на концепції індустріального розвитку виробництва Industry 4.0, в якій велику увагу приділено задачам віртуалізації, роботизації та інтелектуалізації управління сучасного виробництва [1]. Для підприємства, що розвивається, при формуванні нового портфелю замовлень інноваційного характеру необхідно проводити диверсифікацію своєї діяльності, впроваджувати нові технологічні об'єкти та процеси, сучасні форми організації у вигляді віртуального управління виробництвом [2]. Можлива розподіленість віртуальної виробничої системи (ВВС) призводить до необхідності пошуку раціональних архітектурних рішень при формуванні нових виробничих підсистем з урахування обмежених можливостей підприємства, що розвивається. Тому дослідження архітектурних рішень при створенні ВВС з урахуванням топології виробничої системи та складу нових технологічних об'єктів (ТО), які входять до ВВС, є актуальним.

### **2. Постановка задачі дослідження**

В теперішній час у світовій практиці створення нових виробництв існує множина типових топологій для архітектурних рішень розподіленої виробничої системи. Ці структури ефективно використовуються при створенні машинобудівних підприємств, транспортних систем, нафтогазових комплексів, при створенні автострад тощо. До типових топологій в архітектурних рішеннях складних систем можна віднести такі:

- послідовна структура, в якій окремі ТО пов'язані за допомогою комунікацій у послідовний логістичний ланцюг;
- матрична (гратчаста) структура, в якій комунікаційні зв'язки між ТО утворюють решітку;
- радіальна структура з центром у вигляді, наприклад, складального виробництва;
- древовидна (ієрархічна) структура, яка забезпечує виконання виробничих процесів, що відповідають багаторівневій архітектурі складного виробу машинобудування;
- кільцева структура, в якій комунікаційні зв'язки між ТО утворюють кільце.

Окрім того, на практиці часто використовують змішані (комбіновані) структури, в яких переважає той або інший тип топології, наприклад, радіально-кільцева структура.

Вибір архітектури розподіленого віртуального виробництва залежить від специфіки нового портфелю замовлень, логістичних взаємодій між виробничими підсистемами та ТО, від вимог щодо логістики виробничої системи, а також обмежених можливостей підприємства, що розвивається [3]. Тому при аналізі можливих архітектурних рішень експерти у галузі створення нових виробництв повинні обґрунтувати та вибрати топологію архітектури ВВС, виходячи з перелічених вимог.

Метою дослідження, яке розглядається у даній публікації, є вирішення задачі раціонального розташування ТО у вузлах розподіленої архітектури віртуального виробництва.

Для досягнення поставленої мети пропонується вирішити такі задачі дослідження:

а) розробка моделі розташування ТО в вузлах розподіленої архітектури ВВС.

б) дослідження технології моделювання виробничого циклу та вузьких місць у сформованій розподіленій архітектурі ВВС.

### 3. Розробка моделі розташування технологічних об'єктів в вузлах розподіленої архітектури віртуальної виробничої системи

Для пошуку раціональних рішень щодо розташування ТО у вузлах розподіленої архітектури ВВС будемо використовувати наступні показники [4, 5]:

- витрати на придбання або створення нових ТО у складі ВВС (технологічне обладнання, комунікаційні зв'язки тощо), -  $W$ ;

- час витрачений на формування нової ВВС (будівні роботи, монтаж обладнання, формування комунікаційних зав'язків тощо), -  $T$ ;

- ризики, пов'язані зі створенням нової ВВС (проектні, технологічні тощо), -  $R$ .

У подальшому архітектуру ВВС будемо представляти у вигляді топологічного графу  $G$  у вершинах (вузлах), якого будуть розташовані окремі ТО, а ребра будуть представляти комунікаційні зв'язки між ТО. Граф топології  $G$  формально можна представити у вигляді

матриці сумісності  $\|M_{ij}\|$  де  $i, j = \overline{1, L}$ ;  $L$  - кількість вершин графу  $G$ . Для використання вершин та ребер графу  $G$  у наступних розрахунках та з урахуванням його зміни на матрицю  $\|M_{ij}\|$  будемо брати до уваги тільки ті елементи матриці, які задовольняють вимогам  $i < j$ ,  $i \neq j$ . Для оптимізації показників  $W, T, R$  при виборі раціональних архітектурних рішень щодо створення ВВС, скористаємося цілочисельним лінійним програмуванням з булевими змінними:

$$x_{ik} = \begin{cases} 1, \text{ якщо } k\text{-й ТО розташований} \\ \text{у } i\text{-й вершині } G \text{ графу ВВС,} \\ 0, \text{ в протилежному випадку} \end{cases} \quad (1)$$

У подальшому будемо враховувати наступні обмеження:  $\sum_{k=1}^m x_{ik} = 1, i = \overline{1, L}$ , що значить обов'язкове розташування  $k$ -го ТО у графі  $G$ ,  $m \leq L$ .

Для рішення задачі оптимізації архітектурних рішень ВВС введемо допоміжні булеві змінні:

$$y_{je} = \begin{cases} 1, \text{ якщо } y_j\text{-у вершину } G \text{ графу} \\ \text{розташований } e\text{-й ТО,} \\ 0, \text{ в іншому випадку.} \end{cases} \quad (2)$$

$$z_{ik,je} = \begin{cases} 1, \text{ якщо } y_i\text{-у вершину } G \text{ графу} \\ \text{розташований } k\text{-й ТО,} \\ a \text{ у } y_j\text{-у вершину розташований } e\text{-й ТО,} \\ 0, \text{ в іншому випадку.} \end{cases} \quad (3)$$

При цьому необхідно виконати наступні обмеження:

$$x_{ik} - y_{je} = 0, i, j = \overline{1, L}, k = \overline{1, m}, i = j, k = e, \quad (4)$$

$$L - \sum_{j=1}^L \sum_{e=1}^m z_{ik,je} = 0, i = \overline{1, L}, e = \overline{1, m}, \quad (5)$$

$$L - \sum_{i=1}^L \sum_{k=1}^m z_{ik,je} = 0, j = \overline{1, L}, k = \overline{1, m} \quad (6)$$

Розглянемо мінімізацію показника витрат  $W$  для раціонального вибору архітектурних рішень при синтезі ВВС. Необхідно мінімізувати витрати  $W$ :

$$\min W, W = \sum_{i=1}^L \sum_{k=1}^m w_k x_{ik} + \sum_{j=1}^L \sum_{i=1}^L \sum_{k=1}^m \sum_{e=1}^m w_{ij} z_{ik,je} \quad (7)$$

де  $w_k$  - витрати, пов'язані з використанням  $k$ -го ТО в архітектурі ВВС;  $w_{ij}$  - витрати на комунікацію між  $i$ -им та  $j$ -им вузлами в архітектурі ВВС.

При цьому необхідно виконати наступні обмеження:

$$T \leq T', T = \sum_{i=1}^L \sum_{k=1}^m t_k x_{ik} + \sum_{j=1}^L \sum_{i=1}^L \sum_{k=1}^m \sum_{e=1}^m t_{ij} z_{ik,je} \quad (8)$$

де  $T'$  - максимально допустимі часові витрати на виконання робіт щодо створення ВВС;  $t_k$  - час, пов'язаний з монтажем  $k$ -го ТО у ВВС;  $t_{ij}$  - час витрачений на формування комунікацій між  $j$ -им та  $i$ -им вузлами обраної топології архітектури ВВС;

$$R \leq R', R = \sum_{i=1}^L \sum_{k=1}^m r_k x_{ik} + \sum_{j=1}^L \sum_{i=1}^L \sum_{k=1}^m \sum_{e=1}^m r_{ij} z_{ik,je} \quad (9)$$

де  $R'$  - допустимий ризик, пов'язаний зі створенням ВВС;  $r_k$  - ризик, пов'язаний з придбанням та монтажем  $k$ -го ТО у ВВС;  $r_{ij}$  - ризик, пов'язаний з організацією комунікацій між  $i$ -им та  $j$ -им вузлами у обраній топології архітектури ВВС.

Для пошуку компромісного рішення, з урахуванням усіх показників, скористаємося мінімізацією комплексного показника  $F$  у вигляді суми зважених локальних показників  $\overline{W}$ ,  $\overline{T}$ ,  $\overline{R}$ :

$$\min F, F = \alpha_W \cdot \overline{W} + \alpha_T \cdot \overline{T} + \alpha_R \cdot \overline{R} \quad (10)$$

де  $\alpha_W, \alpha_T, \alpha_R$  - "ваги" (значимість) показників  $\overline{W}$ ,  $\overline{T}$ ,  $\overline{R}$ ;  $\alpha_W + \alpha_T + \alpha_R = 1$ , тут  $\overline{W}$ ,  $\overline{T}$ ,  $\overline{R}$  - пронормовані (безрозмірні) представлення показників:

$$\overline{W} = \frac{W - W^*}{W' - W^*}, \quad \overline{T} = \frac{T - T^*}{T' - T^*}, \quad \overline{R} = \frac{R - R^*}{R' - R^*} \quad (11)$$

де  $W^*, T^*, R^*$  - мінімальні значення показників  $W, T, R$ , які було отримано у результаті їх незалежної оптимізації;  $W', T', R'$  - допустимі значення показників.

Можлива така постановка задачі формування архітектури ВВС, коли вузли пов'язані з певним типом ТО, які розміщують у ВВС.

В цьому випадку в розглянутій задачі оптимізації (1)-(11) необхідно ввести фільтр у вигляді матриці  $\|p_{ik}\|$ , яка вказує на дозвіл або заборону розташування  $k$ -го ТО у  $i$ -й вузол ВВС, де:

$$p_{ik} = \begin{cases} 1, & \text{якщо дозволено розмістити у } i\text{-й вузол ВВС } k\text{-й ТО,} \\ 0, & \text{в іншому випадку.} \end{cases}$$

З урахуванням запропонованого фільтру  $\|p_{ik}\|$  задача мінімізації витрат, пов'язаних з раціональним розміщенням ТО для використання у вузлах архітектури ВВС, буде мати наступний вигляд.

Необхідно знайти

$$\min W, W = \sum_{i=1}^L \sum_{k=1}^m w_k p_{ik} x_{ik} + \sum_{j=1}^L \sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^m \sum_{e=1}^m w_{ij} z_{ik,je} \quad (12)$$

з урахуванням обмежень

$$T \leq T', T = \sum_{i=1}^L \sum_{k=1}^m t_k p_{ik} x_{ik} + \sum_{j=1}^L \sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^m \sum_{e=1}^m t_{ij} z_{ik,je} \quad (13)$$

$$R \leq R', R = \sum_{i=1}^L \sum_{k=1}^m r_k p_{ik} x_{ik} + \sum_{j=1}^L \sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^m \sum_{e=1}^m r_{ij} z_{ik,je} \quad (14)$$

#### 4. Дослідження технології моделювання виробничого циклу та вузьких місць у сформованій розподіленій архітектурі віртуальної виробничої системи

Для дослідження часу виконання виробничого циклу у сформованій архітектурі віртуальної виробничої системи скористаємося імітаційним подійним моделюванням, яке реалізоване на агентній платформі JADE з використанням наступних агентів [6, 7]:

- 1 - агент «архітектура ВВС»;
- 2 - агент «часова затримка в вузлах» ВВС;
- 3 - агент «часова затримка між вузлами» ВВС;
- 4 - агент «технологічний маршрут»;
- 5 - агент «генератор замовлень»;
- 6 - агент «статистика»;
- 7 - агент «монітор».

Для ініціалізації замовлень «генератор замовлень» генерує заявки на обслуговування, які надходять до ВВС та рухаються у відповідності до вимог агента «технологічний маршрут». При цьому заявка проходить скрізь вузли та зв'язки між ними з урахуванням агентів «часова затримка в вузлах» та агента «часова затримка між вузлами». Планування руху заявок здійснює агент «монітор». Результати моделювання видає агент «статистика». До результатів моделювання включено: кількість замовлень, які було обслужено у ВВС, середній час виконання одного замовлення, завантаження окремих ТО, порушення планових строків виконання замовлень тощо. На рис. 1 представлено структурну схему агентної моделі.



Рис. 1. Структурна схема агентної моделі

Для дослідження вузьких місць у сформованій структурі ВВС в агентну модель добавлено агент «черга» (рис. 1). Виникнення черг при виконанні замовлень пов'язане з вузькими місцями у вигляді ТО з низькою пропускнуою здатністю, що призводить до збільшення часу

виконання замовлень. Наявність вузьких місць вимагає прийняття конструктивних рішень щодо їх усунення (включення до ВВС більш продуктивних ТО, формування раціонального план-графіка запуску замовлень тощо).

### **5. Висновки та перспективи подальших досліджень**

Проведено дослідження архітектурних рішень при формуванні віртуальної розподіленої виробничої системи за допомогою оптимізаційної моделі. Проведено пошук раціональних рішень щодо створення архітектури віртуального виробництва у вигляді множини технологічних об'єктів та комунікацій між ними в умовах обмежених можливостей підприємства, що розвивається. Для дослідження динамічних процесів, пов'язаних з виконанням інноваційних замовлень, використовується подійне імітаційне моделювання у вигляді агентної моделі. Досліджуються вузькі місця у віртуальному розподіленому виробництві у вигляді великих черг, які виникають при обслуговуванні заявок і викликають затримки виконання замовлень.

Наукова новизна проведеного дослідження пов'язана з розробкою методу синтезу архітектури розподіленої виробничої системи, заснованої на статичному (структурному) та динамічному представленні розподіленого віртуального виробництва з пошуком раціональної структури у вигляді вузлів з технологічним обладнанням і комунікацій між ними та моделювання процесу виконання інноваційного портфелю замовлень.

Запропонований підхід дозволяє на початкових етапах синтезу віртуальної розподіленої виробничої системи сформувати раціональну архітектуру з урахуванням топології, зв'язків між окремими віддаленими технологічними об'єктами та обґрунтувати комунікаційну інфраструктуру для задач управління виробництвом.

Подальші дослідження будуть спрямовані на вирішення задач розташування віртуального виробництва на земній поверхні, що призводить до витрат, пов'язаних з проведенням земельних та будівельних робіт, появою додаткових ризиків, у тому числі екологічних, необхідністю врахування кліматичних факторів, пов'язаних з різними природними зонами експлуатації віртуального розподіленого виробництва.

**Список літератури:** 1. *Lindgren, M., Bandhold, H.* Scenario Planning The link between future and strategy // Palgrave Macmillan UK, 2002. - 180 p. DOI: 10.1057/9780230511620. 2. *Uskenbayeva, R. K., Kurmangaliyeva, B. K., Yedilkhan, D.* Situational Management for Process Implementation of Working Operations of the Business Process // 54th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan (SICE). - Hangzhou, China, 2015. - P. 292-297. DOI: 10.1109/SICE.2015.7285573. 3. *Федорович, О.Є., Прончаков, Ю.Л.* Метод формування логістичних транспортних взаємодій для нового портфелю замовлень розподіленого віртуального виробництва // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*, 2020, № 2, С. 102-108. 4. *Pawluczuk, Ju.* К проблеме управления производственными ресурсами предприятия // *Zarz?dzanie : Teoria i praktyka*. - 2011. - № 1(3). - С. 17-26. 5. *Paulsen, S., Boens, J.* Summary of the Workshop on information and communication technologies supply chain risk management // *National Institute of Standards and Technology*, 2012. - 21 p. 6. *Кравець, Р. О.* Динамічна координатія стратегій мультиагентних систем // *Бюлетень Національного університету "Львівська політехніка"*. - 2011. - No. 699. - P. 134-144. 7. *Fedorovich, Oleg, Uruskiy, Oleg, Pronchakov, Yuri, Lukhanin, Mikhail.* Method and information technology to research the component architecture of products to justify investments of high-tech enterprise // *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*, 2021. - № 1 (2021).

*Надійшла до редколегії 17.06.2021*

**Прончаков Юрій Леонідович**, кандидат технічних наук, доцент, декан факультету програмної інженерії та бізнесу Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут». Наукові інтереси: логістика розподілених виробничих систем. Адреса: Україна, м. Харків, вул. Чкалова, 17, тел. +38 (095) 577 38 57, +38 (050) 637 87 68.