

ІНФОРМАТИКА, ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ

УДК 658.512

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2020.5/10>**Євсєєв В.В.**

Харківський національний університет радіоелектроніки

Максимова С.С.

Харківський національний університет радіоелектроніки

ТЕХНОЛОГІЯ ПРОЦЕСУ КЕРУВАННЯ РОЗРОБКОЮ КІБЕРФІЗИЧНИХ ВИРОБНИЧИХ СИСТЕМ

У статті, що пропонується, вказується, що в сучасному світі, в сучасній промисловості все більшого застосування знаходить технологія Industry 4.0. Слід зазначити, що кіберфізичні промислові системи (CPPS) – це концепція, що виникає та втілює принципи дизайну й поведінки надзвичайно складних технічних систем. У представленій роботі розглядається технологія процесу керування розробкою CPPS. Запропонована нова методологія проєктування CPPS. Указана методологія використовує принцип подання CPPS як метасистеми, в якій використовується вертикальне розбиття (декомпозиція) рівнів проєктних рішень. У такому випадку використовується так зване проєктування «згори-вниз». В основі запропонованої технології проєктування CPPS рекомендується використовувати принцип «зверху-вниз» і «зліва-направо». Такий вибір зумовлений складною ієрархічною структурою будь-якої сучасної промислової CPPS. У роботі детально подане дерево проєктування з урахуванням п'ятирівневої декомпозиції та етапів проєктування. Розроблені формалізовані методи декомпозиції рівнів проєктних рішень за такими етапами: цільовий, функціональний, організаційно-технічний, інфологічний, інформаційний та алгоритмічний. У поточній науковій роботі наводяться та пояснюються такі структури: дерево проєктних рішень на етапі декомпозиції, дерево проєктних рішень декомпозиції на функціональному етапі, дерево проєктних рішень декомпозиції на організаційно-технічному етапі, дерево проєктних рішень декомпозиції на інфологічному етапі, дерево проєктних рішень декомпозиції на інформаційному етапі, дерево проєктних рішень декомпозиції на алгоритмічному етапі. У статті описуються розроблені формалізовані методики побудови системних моделей за кожним із вищеназваних етапів проєктування. Це дозволяє оцінити правильність прийнятих проєктних рішень і зв'язків, оцінити часові, якісні й функціональні параметри на ранньому етапі проєктування CPPS.

Ключові слова: Industry 4.0, кіберфізичні промислові системи, технологія, автоматизація процесів керування.

Постановка проблеми. Стаття є однією з циклу статей, присвячених проблемі керування розробкою кіберфізичних промислових систем (CPPS). Вона представляє собою продовження розв'язання складної науково-дослідницької задачі розробки нової технології автоматизації процесів керування на базі запропонованої архітектурно-логічної моделі автоматизації процесу керування розробкою складних CPPS [1].

Головною загальною характеристикою є дуже тісна взаємодія між обчислювальними (кібер) та фізичними процесами (складовими). Тож можна зробити висновок, CPPS – це комплексна

система з кібер і фізичних елементів, що безперервно отримує інформацію ззовні (з навколишнього середовища) та використовує її для подальшої оптимізації процесів керування. Така система може ефективно працювати в умовах, які постійно змінюються. Це стає особливо актуальним у сучасному світі, коли ситуація на ринку змінюється постійно, часто непередбачувано.

Таким чином стає нагальною проблема створення систем CPPS. А отже, дослідження технології процесу керування розробкою кіберфізичних виробничих систем є актуальним завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сучасному світі все більших обертів набирає розвиток та застосування технології Industry 4.0. Дослідники приділяють величезну увагу проблемам створення нового світу – світу, у якому поєднуються кібер і фізична складова. У [2] автори зазначають, що Індустрія 4.0 прагне пом'якшити обмеження, що існують у сучасній практиці. Ця технологія пропагує бачення повністю взаємопов'язаної екосистеми систем, машин, продуктів і багатьох різних зацікавлених сторін. У цьому середовищі динамічно взаємопов'язані автономні системи підтримують людей у багатогранному прийнятті рішень. Промисловий Інтернет речей та кіберфізичні системи (CPS) – це лише дві концепції, що виникають, що втілюють принципи дизайну та поведінки таких надзвичайно складних технічних систем. Дослідники у [3] наголошують, що кіберфізична система є основною концепцією Індустрії 4.0 для побудови розумних фабрик. Зазвичай архітектури більше наголошують на вертикальній інтеграції і менше на горизонтальній інтеграції. Lee J., Vagheri B., Kao H.-A. [4] приділяють увагу тому, що досягнення в певних галузях промисловості відкрили шлях до систематичного розгортання кіберфізичних систем (CPS), в рамках яких інформація з усіх суміжних точок зору ретельно відстежується та синхронізується між фізичним підлогою заводу та кіберобчислювальним простором. У статті [5] розглядаються 118 академічних та галузевих робіт, опублікованих у період з 2010 по 2019 рік. Тут зазначається, що як у бізнес-звітах, так і в технічних документах приділяється підвищена увага пропозиціям щодо моделей, інфраструктур та систем IoT. Ці звіти та публікації часто представляють зіставлення інших суміжних систем та технологій (наприклад, Індустріальний Інтернет речей, Кіберфізичні системи, Індустрія 4.0 тощо). Натепер у літературі відсутній процес проектування для інтеграції цих систем та технологій, що постійно розвиваються, у чітку та зрозумілу поетапну модель.

Постановка завдання. В результаті проведеного аналізу публікацій, пов'язаних із темою дослідження дав можливість зробити висновок, що рішення, які вже існують, носять описовий характер. В них відсутнє чітке визначення послідовності процесу керування розробкою CPPS.

Метою дослідження є розробка технології процесу керування розробкою кіберфізичних виробничих систем.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

а) провести декомпозицію процесу розробки CPPS;

б) розробити дерево проєктних рішень декомпозиції на функціональному етапі;

в) розробити дерево проєктних рішень декомпозиції на організаційно-технічному етапі;

г) розробити дерево проєктних рішень декомпозиції на інфологічному етапі;

г) розробити дерево проєктних рішень декомпозиції на інформаційному етапі;

д) розробити дерево проєктних рішень декомпозиції на алгоритмічному етапі.

Виклад основного матеріалу дослідження. Запропоновано архітектурно-логічну модель автоматизації процесу управління розробкою складних CPPS та методи декомпозиції основних етапів процесів керування, які дозволяють прийняти рішення на кожному етапі розробки [1]. Але вони не дають загального уявлення про технологію розробки CPPS. Наступним кроком є розробка технології процесу керування CPPS. Під поняттям через технологію процесу керування розробкою CPPS будемо розуміти таке поняття – це логічно пов'язана послідовність прийняття рішень розробником на основі методів декомпозиції у відповідності до дерева й етапів розробки (рис. 1).

В основі запропонованої технології розробки CPPS, пропонується використовувати принцип «зверху-вниз» і «зліва-направо». Такий вибір обумовлений складною ієрархічною структурою будь-якої сучасної промислової CPPS. Отже, на початковому етапі необхідно вирішити завдання системного проєктування. Грунтуючись на такому припущенні розробнику необхідно визначити п'ятий рівень ієрархії розробки CPPS грунтуючись на критерії головної мети і вимог зазначених в технічному завданні. В ході проведення системного аналізу, вибору критеріїв декомпозиції, визначення п'ятого рівня декомпозиції відбувається на базі запропонованого метода [1]. Розробник виділяє необхідний рівень ієрархії розробки. Проводиться декомпозиція метасистеми на мультисистеми і фіксується цей рівень.

Що дає можливість приймати рішення на такому рівні в суворій послідовності використовуючи принцип «зліва-направо» в відповідності із запропонованими етапами розробки з урахуванням послідовності рішень від m до $m+n$. [1] Отже структуру технології розробки CPPS можна візуалізувати у вигляді систематизованого дерева прийняття рішень на етапі декомпозиції, який представлений на рис. 2.

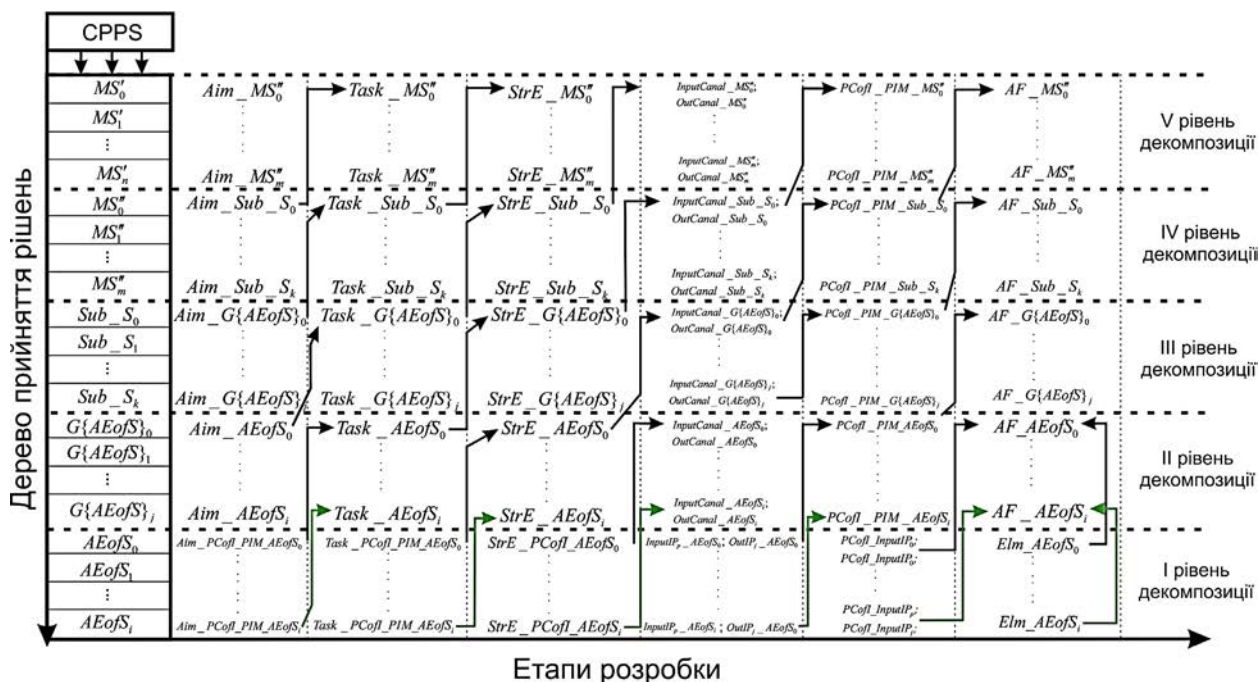


Рис. 1. Технологія процесу керування розробкою CPPS

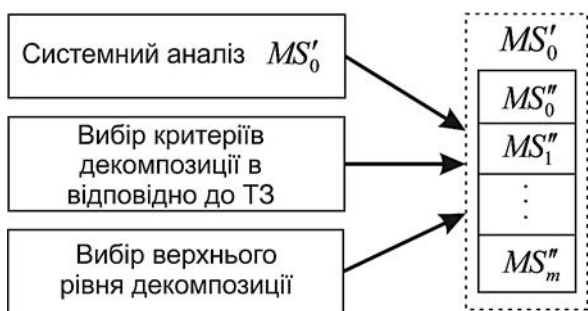


Рис. 2. Дерево прийняття рішень на етапі декомпозиції MS'_0

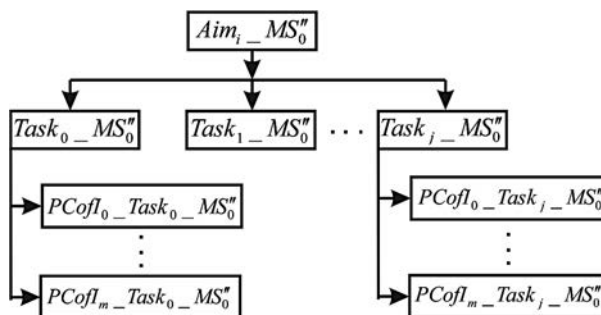


Рис. 3. Дерево прийняття рішень декомпозиції на функціональному етапі

Після виділення рівня декомпозиції, розробник виконує декомпозицію MS'_0 на $Aim_i - MS''_0$ на базі головної мети технічного завдання. Наступним кроком розробника є виявлення і обґрунтування всіх $PCofl - MS''_0$, на базі яких здійснюється побудова цільової моделі, проводиться перевірка правильності й оцінка ефективності прийняття рішень. Це виконується за допомогою статистичне або динамічного моделювання, яке повинно показати досягнення головної мети розробки MS'_0 . У відповідності до запропонованої технології проектування CPPS (рис.1.1) розробник може перейти до наступного етапу – розробка функціональної моделі. На цьому етапі відбувається пошук відповідності для кожної підцилі

($Aim_i - MS''_0$) свого завдання ($Task_j - MS''_0$) або групи завдань. Для кожного завдання $Task_j - MS''_0$ розробляється $PCofl - Task_j - MS''_0$, на базі яких будується функціональна модель досягнення $Aim_i - MS''_0$. Дерево прийняття рішень декомпозиції на функціональному етапі представлено на рис. 3.

Методом системного моделювання на $Task_j - MS''_0$ розробник виконує статистичне моделювання $PCofl - Task_j - MS''_0$ декомпованих функціональних елементів MS''_0 . Якщо результати моделювання відповідають головній меті MS'_0 , то можна вважати, що прийнятих рішення на функціональному етапі декомпозиції задач і так-

тико-технічних характеристик розроблені адекватно. Тоді розробник може переходити до етапу організаційно-технічного. На цьому етапі розробник розробляє структурні елементи системного рівня $StrE_MS_0''$, проводиться дослідження і вибір їх $PCofl_StrEM S_0''$ в залежності від вимог $PCofl_Task_j_MS_0''$. Будується системна структурна модель CPPS рівня MS_0'' та виконується статистичне моделювання $PCofl_StrEM S_0''$ для досягнення $Aim_i_MS_0''$.

Дерево прийняття рішень декомпозиції на організаційно-технічному етапі наведено на рис. 4.

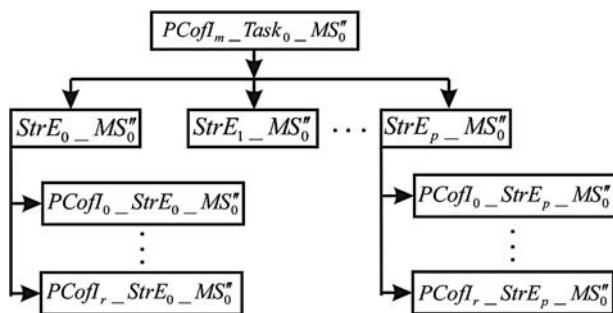


Рис. 4. Дерево прийняття рішень декомпозиції на організаційно-технічному етапі

Якщо результати моделювання задовольняють $PCofl_StrEM S_0''$ і $Aim_i_MS_0''$ можна вважати, що прийняти рішення на такому рівні відповідають головній меті розробки CPPS та вимогам технічного завдання. Це означає, що розробник може переходити до проектування інфологічного етапу. Розробник проводить аналіз $StrE_MS_0''$ та визначає $InputIP_i$ та $OutIP_j$ для кожного структурного елемента. Це вимагає дослідження інфологічних перетворювачів параметрів IC_MS_0'' і системних каналів зв'язків між ними $InputCanal_MS_0''$ та $OutCanal_MS_0''$, а також $PCofl_IC_MS_0''$ і $PCofl_InputCanal_MS_0''$, $PCofl_OutCanal_MS_0''$. На базі проведеного аналізу будується інфологічна модель CPPS системного рівня MS_0'' проводиться статистичне моделювання на відповідність $PCofl_IC_MS_0''$, $PCofl_InputCanal_MS_0''$, $PCofl_OutCanal_MS_0''$ і Aim_MS_0'' . При відповідності $PCofl_IC_MS_0''$, $PCofl_InputCanal_MS_0''$ та $PCofl_OutCanal_MS_0''$ головній меті рівня MS_0'' розробник може вважати, що прийняти рішення на такому етапі такими, що задовольняють технічному завданню на CPPS. Дерево прийняття рішень декомпозиції на інфологічному етапі наведено на рис. 5.

На основі результатів попереднього етапу розробник може переходити до розробки інформаційної структури обраного рівня. Для цього на базі результатів статистичного моделювання $PCofl_InputIP_i_MS_0''$ та $PCofl_OutIP_j_MS_0''$, $InputCanal_MS_0''$, $OutCanal_MS_0''$ проводиться розробка тактико-технічних характеристик фізико-інформаційної моделі такого рівня декомпозиції ($PCofl_PIM_MS_0''$). На їх основі синтезується послідовність інформаційних потоків, параметрів і зв'язків. Проводиться імітаційне моделювання під навантаженням для перевірки досягнення головної меті рівня MS_0'' та вимогам технічного завдання. Дерево прийнятих рішень декомпозиції на інформаційному етапі наведено на рис. 6.

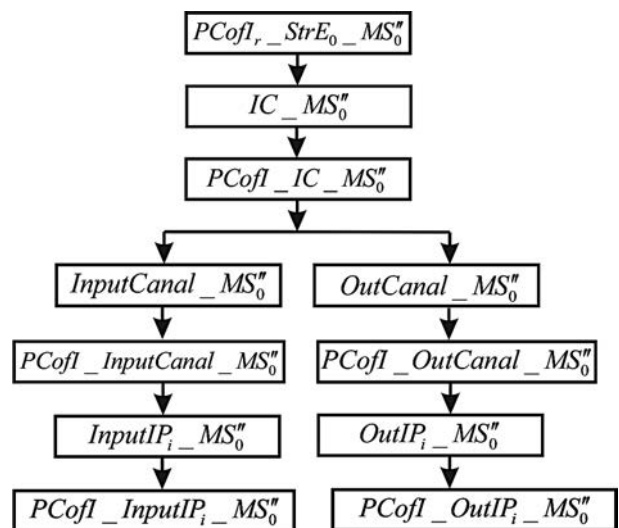


Рис. 5. Дерево прийняття рішень декомпозиції на інфологічному етапі

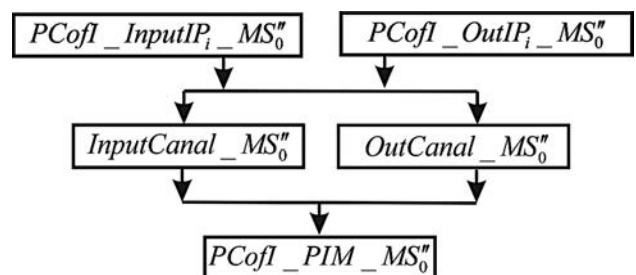


Рис. 6. Дерево прийняття рішень декомпозиції на інформаційному етапі

Базуючись на отриманих результатах розробник може переходити до розробки алгоритмічного етапу такого рівня декомпозиції. Завданням етапу є розробка алгоритму функціонування, на основі

якого в подальшому проводиться розробка кібер-складової CPPS.

На основі запропонованої метода розробник проводить аналіз $PCofI_PIM_MS_0^n$ та виконує розробку алгоритму рівня $AF_MS_0^n$. Для цього розроблюються оператори Op_h алгоритму функціонування CPPS на такому рівні декомпозиції, проводиться розрахунок тактико-технічних й інформаційних характеристик $PCofI_PIM_Op_h_MS_0^n$ системного рівня $AF_MS_0^n$ для кожного $Op_h_MS_0^n$. Використовуючи отримані результати розробник будує алгоритм $AF_MS_0^n$ і виконує спочатку статистичне, а потім імітаційне моделювання під навантаженням для перевірки правильності прийнятих рішень. Дерево прийняття рішень декомпозиції на алгоритмічному етапі наведено на рис. 1.7.

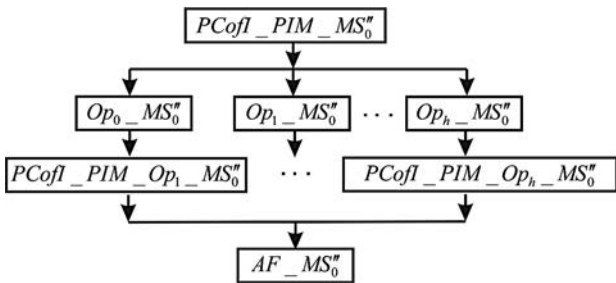


Рис. 7. Дерево прийняття рішень декомпозиції на алгоритмічному етапі

Якщо отриманий результат повністю задовольняє вимогам $Task_j_MS_0^n$, $Aim_i_MS_0^n$ і головній меті CPPS, то можна вважати, що прийняті рішення декомпозиції на інформаційному етапі правильні, отже, всі рішення на попередніх етапах розробки CPPS такого рівня декомпозиції «життєздатні».

Для більшої зручності розуміння всі запропоновані рішення декомпозиції рівня MS_0^n за такими етапами: мети, функціональному, організаційно-технічному, інфологічному, інформаційному й алгоритмічному можна подати у вигляді узагальненого дерева прийняття рішень декомпозиції рівня MS_0^n , який подано на рис. 8.

Базуючись на наведеному дереві декомпозиції рівня MS_0^n , можна припустити, що використовуючи запропоновані методи можна провести декомпозицію всіх рівнів від Sub_S_k до $AEofS_i$

і забезпечити досягнення головної мети розробки CPPS. Слід зазначити, що запропоновані методи декомпозиції дозволяють розробнику не лише розробити структуру CPPS, а й забезпечити вибір необхідних атомарних елементів $AEofS_i$ (фізичної складової) на основі їх можливості розв'язання елементарних задач і отримати математичний опис кожної задачі або групи для розробки їх алгоритму роботи (кібер складової). Отримані рішення з процесу керування розробки CPPS надають можливість провести статистичне й імітаційне моделювання під навантаженням. Також стає можливим оцінити часові, якісні та функціональні параметри CPPS, що розробляється.

Висновки. У статті проведено дослідження сучасних кіберфізичних систем (CPPS), які є невід'ємною частиною технології Industry 4.0. Обґрунтовано, що розробка кіберфізичних систем є складним науково-дослідницьким завданням, яка має складний багаторівневий характер, що поєднує кібер і фізичну складові та синтез зв'язків між ними. У зв'язку з цим запропонована нова методологія процесу керування розробкою CPPS на базі розроблених і систематизованих методів декомпозиції. Технологія базується на принципі подання CPPS як метасистеми з вертикальною декомпозицією рівнів прийняття рішень, які дозволяють реалізувати дерево рішень за принципом «згори-вниз». Запропоновані етапи процесу керування розробкою CPPS, які описують кібер і фізичну складову шляхом декомпозиції за принципом «зліва-направо». Запропонований комплекс логічно пов'язаних рішень, які є системою методів і моделей, на основі якої запропонована послідовність рішень на кожному етапі та рівні декомпозиції CPPS. Для цього розроблені формалізовані методи декомпозиції рівнів прийняття рішень за такими етапами: цільовий, функціональний, організаційно-технічний, інфологічний, інформаційний і алгоритмічний. Розроблені формалізовані методи побудови системних моделей за кожним етапом розробки. Це дозволяє оцінити правильність прийнятих рішень і зв'язків, оцінити часові, якісні та функціональні параметри на ранньому етапі розробки CPPS з використанням сучасних засобів статистичне й імітаційного моделювання.

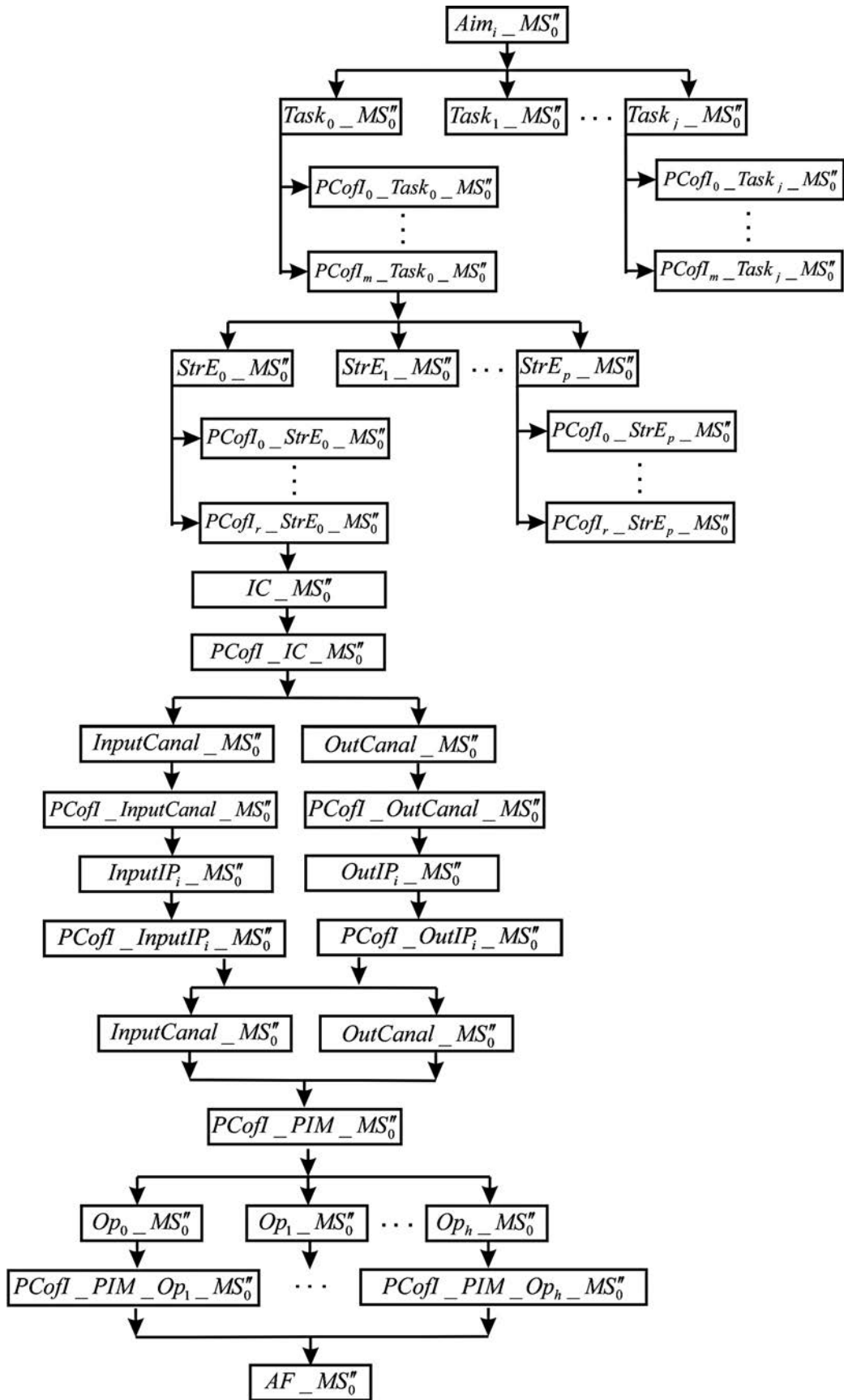


Рис. 8. Дерево прийняття рішень декомпозиції рівня MS_0^n

Список літератури:

1. Nevliudov I., Yevsieiev V., Maksymova S., Filippenko I. Development of an architectural-logical model to automate the management of the process of creating complex cyber-physical industrial systems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Vol 4. No 3 (106). 2020. P. 44–52. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.210761.
2. Ribeiro L., Hochwallner M. On the design complexity of cyber-physical production systems. *Complexity*. 2018. P. 1–13. URL: <https://doi.org/10.1155/2018/4632195>.
3. Jiang J.-R. An improved cyber-physical systems architecture for Industry 4.0 smart factories. *Advances in Mechanical Engineering*. 2018. Vol. 10 (6). P. 1–15. URL: <https://doi.org/10.1177/1687814018784192>.
4. Lee J., Bagheri B., Kao H.-A. A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*. 2015. No. 3. P. 18–23. URL: <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2014.12.001>.
5. Radanliev P., Roure D. de, Nicolescu R., Huth M. A reference architecture for integrating the Industrial Internet of Things in the Industry 4.0. *Computers and Society (cs.CY)*. 2019. DOI: 10.13140/RG.2.2.26854.47686.

Yevsieiev V.V., Maksymova S.S. CYBER-PHYSICAL PRODUCTION SYSTEMS DEVELOPMENT CONTROL PROCESS TECHNOLOGY

*The proposed article states that in today's world, in modern industry, Industry 4.0 technology is increasingly used. It should be noted that cyber-physical *зкувзсеиуиуи* systems (CPPS) is a concept that arises and embodies the principles of design and behavior of such extremely complex technical systems. In the presented work the technology of CPPS development control process is considered. A new CPPS design methodology is proposed. This methodology uses the principle of CPPS representation as a metasystem that uses vertical partitioning (decomposition) of design decision levels. In this case, the so-called “top-down” design is used. Based on the proposed CPPS design technology, it is proposed to use the “top-down” and “left-right” principle. This choice is due to the complex hierarchical structure of any modern industrial CPPS. The paper presents in detail the design tree, taking into account the five-level decomposition and design stages. Formalized methods of design decisions levels decomposition on the following stages are developed: target, functional, organizational and technical, infological, informational and algorithmic. The current scientific work provides and explains the following structures: design decisions tree at the stage of decomposition, design decisions tree of decomposition at functional stage, design decisions tree of decomposition at the organizational and technical stage, design decisions tree of decomposition at the infological stage, design decisions tree of decomposition at the information stage, design decisions tree of decomposition at the algorithmic stage. The article describes the developed formalized methods of building system models for each of the above stages of design. This allows to assess the correctness of design decisions and relationships, to assess the time, quality and functional parameters at an early stage of CPPS design.*

Key words: Industry 4.0, cyber-physical production systems, technology, control processes automation.