



## АНАЛІЗ ДИНАМІКИ ФУНКЦІОНУВАННЯ БАГАТОРІВНЕВИХ СИСТЕМ З ВИКОРИСТАННЯМ МОДЕЛЕЙ НА ПІДСТАІ ІЄРАРХІЧНИХ МЕРЕЖ ПЕТРІ

Проаналізовано сучасні підходи до організації ефективного управління сучасними підприємствами. Отримані результати аналізу дають змогу стверджувати, що розвиток енергетичної галузі України, як і інших галузей, неможливий без впровадження принципів технології "Industry 4.0" та розроблення систем управління підприємством має відбуватися з урахуванням міжнародних стандартів: ANSI/ISA-95 і IEC 62264-1. Побудова власної ієрархічної системи управління під конкретне підприємство має ґрунтуватися на використанні вже існуючих базових програмно-апаратних складових, що дасть змогу істотно зменшити її вартість. Відповідно, виникає задача узгодження роботи сумісного функціонування базових програмно-апаратних складових, а саме: дослідження динаміки функціонування ієрархічної системи. Для аналізу функціонування таких систем запропоновано моделі, які ґрунтуються на теорії ієрархічних та простих мереж Петрі, які дають змогу дослідити динаміку функціонування розроблювальної системи. Окрім цього, модель з використанням ієрархічних мереж Петрі надає можливість дослідити інформаційні потоки між ієрархічними рівнями та їх взаємний вплив. Наведено результати апробації побудованих моделей, а саме: приклад аналізу функціонування багаторівневої ієрархічної системи управління технологічними процесами підприємства. Отримані результати дають змогу стверджувати, що розроблена багаторівнева ієрархічна система управління технологічними процесами підприємства функціонує правильно, усі стани досяжні, а тупики відсутні.

**Ключові слова:** багаторівневі системи; ієрархічні мережі Петрі; модель; граф досяжності станів системи; принципи технології "Industry 4.0".

**Вступ.** Жорсткі умови конкурентної боротьби за ринки збуту промислової продукції, необхідність підвищення якості та зменшення термінів виробництва, потребують застосування сучасних інтелектуальних інформаційних технологій у промисловості. Проведений аналіз сучасних підходів до організації виробництва дає змогу стверджувати, що подальший розвиток енергетичного сектору України неможливий без впровадження технології "Industry 4.0" (Drath & Horch, 2014; Tsmots, et al., 2018).

Нині стратегія ефективного управління всією ієрархічною системою підприємства ґрунтується на інтеграції бізнес-логіки системи та виробництва в режимі реального часу. Система управління підприємством охоплює все, починаючи від давачів і закінчуючи операторами, які приймають рішення на підставі отриманої інформації від засобів збору відповідних інформаційних систем (Drath & Horch, 2014; Tsmots et al., 2018b).

На сьогодні є розроблені декілька стандартів для побудови, розгортання та аналізу систем управління на підприємствах. До них належать популярні стандарти ANSI/ISA-95 (Brandl, 1995) та IEC 62264-1 (International standard IEC62264-1, 2003). Стандарт IEC 62264 базується на стандарті ISA-95.

Стандарт ANSI ISA-95 розроблено в США організацією ISA Committee of volunteer experts. ANSI ISA-95 є міжнародним стандартом для розроблення автоматизо-

ваного інтерфейсу між підприємствами та системами управління. Його було розроблено для застосування у всіх галузях промисловості, а також у всіх різновидах процесів, таких як: періодичні процеси, безперервні та повторювані процеси (Davis et al., 2012; International standard IEC62264-1, 2003).

Стандарт ANSI ISA-95: "Інтеграції системи управління підприємством" активно розробляють, що містять такі частини: ANSI/ISA 95.01–2000 Частина 1: "Моделі та термінологія"; ANSI/ISA 95.02–2001 Частина 2: "Атрибути об'єктів"; ANSI/ISA 95.03–2005 Частина 3: "Моделі виробничих операцій"; ANSI/ISA 95.05–2007 "Частина 5: Бізнес-процеси виробництва".

В основі стандартів інтеграції системи управління підприємством є вирішення проблем із інтеграцією бізнес-логіки та виробничих процесів, організації процесів контролю та виробництва, інтеграцію модулів систем тощо (Peterson, 1984; Teslyuk et al., 2018b).

Загалом система управління підприємством є ієрархічною багаторівневою структурою. Процес розроблення таких систем потребує дослідження взаємодії інформаційних потоків між рівнями та складовими системами. З цих позицій, побудова моделей та засобів для дослідження динаміки функціонування багаторівневих систем є актуальною задачею сьогодення (Denysyuk et al., 2011; Teslyuk et al., 2010b).

**Побудову моделі на підставі теорії мереж Петрі для**

### Інформація про авторів:

**Теслюк Тарас Васильович**, аспірант. Email: [taras.teslyuk@gmail.com](mailto:taras.teslyuk@gmail.com); <https://orcid.org/0000-0001-6585-3715>

**Цитування за ДСТУ:** Теслюк Т. В. Аналіз динаміки функціонування багаторівневих систем з використанням моделей на підставі ієрархічних мереж Петрі. Науковий вісник НЛТУ України. 2018, т. 28, № 8. С. 149–154.

**Citation APA:** Teslyuk, T. V. (2018). The analysis of the dynamics of the functioning of multilevel systems using models based on hierarchical petri networks. *Scientific Bulletin of UNFU*, 28(8), 149–154. <https://doi.org/10.15421/40280830>

дослідження динаміки функціонування ієрархічних систем виконуємо в такий спосіб. У процесі побудови моделі для дослідження динаміки функціонування системи використовуємо базову структуру системи управління технологічними процесами (СУЕТПП), що складається з трьох рівнів: збору даних та управління виконавчими механізмами; контролю та управління технологічними процесами; операторського контролю та формування управлінських рішень.

Специфіка кожного рівня системи управління технологічними процесами визначається апаратно-програмними компонентами. На кожному ієрархічному рівні управління необхідно розв'язувати задачі відповідного рівня складності.

Для опису функціонування та дослідження динаміки роботи ієрархічної системи управління енергоефективністю регіону запропоновано використати моделі на підставі ієрархічних мереж Петрі (Peterson, 1984; Teslyuk et al., 2018). Загалом математичну модель ієрархічної системи описують таким виразом (Denysiuk et al., 2011):  $HMP = (MP1, P, T, F, M_0)$ , де:  $MP1$  – множина Петрі 1-го рівня ( $MP1 = (MP1_1, MP1_2, \dots, MP1_n)$ ,  $n$  – кількість мереж Петрі першого рівня);  $HMP$  – основна ієрархічна мережа (або ієрархічна мережа 0-го рівня),  $P$  – множина позицій,  $T$  – множина переходів,  $F$  – множина дуг, а  $M_0$  – початкова розмітка для ієрархічної мережі Петрі  $HMP$ . Кожну з мереж Петрі 1-го рівня описують аналогічним виразом з тією особливістю, що вона може включати мережі 2-го рівня:  $MP1_k = (MP2_k, P, T, F, M_0)$ , де  $MP2_k$  – множина мереж 2-го рівня для  $k$ -ї мережі 1-го рівня. Для мережі Петрі, з трьома рівнями, будемо мати ще мережі Петрі 3-го рівня:  $MP2_k = (MP3_m, P, T, F, M_0)$ , де:  $MP3_m$  – множина мереж 3-го рівня для мережі 2-го рівня  $MP2_k$ ;  $m$  – кількість мереж 3-го рівня для мережі  $MP2_k$ . Побудована модель дає змогу отримати граф досяжності станів, у яких перебуває досліджувана система (Teslyuk et al., 2010), аналіз якого дає змогу визначити параметри динаміки функціонування ієрархічної системи.

Отже, побудована модель дає змогу враховувати особливості ієрархічних систем та дослідити динаміку їх функціонування.

**Особливості реалізації програмної системи та результати дослідження.** Для моделювання роботи системи управління технологічним процесом управління енергоефективністю регіону використано моделі на підставі ієрархічних мереж Петрі, особливістю яких є можливість побудови складних багаторівневих мереж Петрі.

У процесі реалізації програмного засобу для моделювання та аналізу роботи ієрархічних систем загальну модель розбивають на підмережі, кількість яких визначається кількістю ієрархічних рівнів. На першому рівні знаходять підмережі для моделювання роботи кожного з рівнів системи. Кожна із МП рівня має вхідний та вихідний стек команд. Система працює у двох основних режимах. Перший режим передбачає виконання внутрішніх завдань та формування звітів. У другому режимі відбувається аналіз вхідних даних та виконання команд за потреби.

Отже, в процесі дослідження та аналізу роботи системи управління технологічним процесом управління енергоефективністю регіону використано модель, яка для дослідження роботи рівня збору даних та управління виконавчими механізмами охоплює частину підмережі, що відповідає за попередню ініціалізацію, основні цикли роботи рівня та роботу із вхідними-вихідними даними. Однією із особливостей роботи мікроконтролерів, які часто беруть за основні елементи цього рівня, є виконання інструкції у головному циклі. Відповідно неможливо організувати одночасне виконання внутрішнього циклу роботи та опрацювання вхідних команд від елементів вищого рівня. Якщо в буфері знаходиться хоча б одна команда, то мікроконтролер запускає цикл опрацювання команд. У випадку, якщо буфер є пустий, то мікроконтролер самостійно виконує внутрішню логіку, перевірку та надсилання звітів назовні.

На основі побудованої моделі рівня роботи збору даних та управління виконавчими механізмами підмережі Петрі (рис. 1) згенеровано граф досяжності станів моделі, схемну форму якого зображено на рис. 2. Цей граф має два основні цикли роботи, перший з яких відповідає за виконання внутрішньої логіки, другий – за опрацювання та виконання зовнішніх команд. Усі стани і переходи підмережі є досяжними, тупикові стани відсутні. Модель роботи рівня збору даних та управління виконавчими механізмами працює коректно.

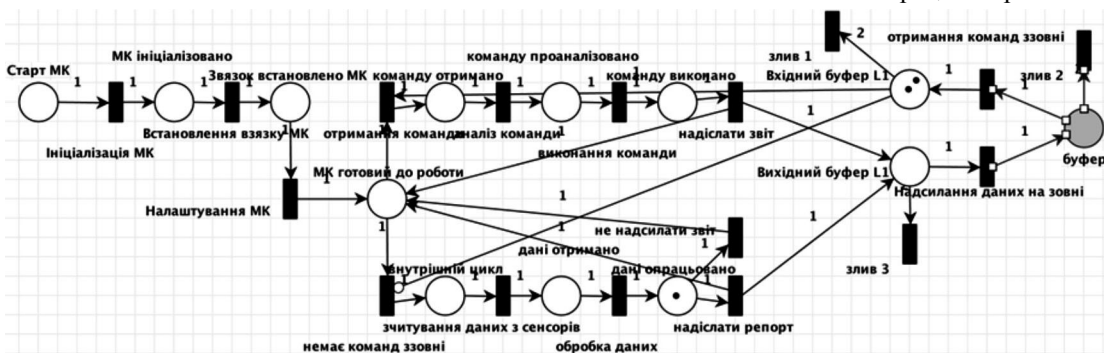


Рис. 1. Підмережа Петрі рівня збору даних та управління виконавчими механізмами

Підмережа Петрі, для дослідження роботи рівня контролю та управління технологічним процесом (рис. 3), охоплює у себе частину підмережі, яка відповідає за попередню ініціалізацію системи управління технологічним процесом, внутрішні цикли роботи та опрацювання вхідних-вихідних даних. Однією із особливостей роботи

технологічного процесу є можливість виконання декількох інструкцій у головному циклі. Одночасно можна отримувати команди від вищого рівня, звіти/дані – від нижнього рівня або виконувати внутрішній цикл. Якщо в буфері знаходиться хоча б одна команда, то стартує цикл опрацювання команд. Якщо в буфері знаходиться хоча б





Усі стани і переходи підмережі є досяжними, тупикові стани відсутні. Тому модель роботи рівня збору даних та управління виконавчими механізмами працює коректно.

Після побудови підмереж Петрі для кожного з рівнів можна реалізувати загальну модель мереж Петрі, яка враховує комунікацію між рівнями. Є наступні особливості роботи мережі, як кожен із рівнів здатний комунікувати із своїми сусідами та передавати команди або дані. Для коректної роботи системи виділено область пам'яті для збереження та накопичення команд та даних. Область пам'яті розбита на буфери, які одночасно є доступні декільком рівням. Саме тому мережу Петрі розбита на 3 підмережі, кожна з яких відповідає за отримання команд та формування даних заданого рівня (рис. 7).

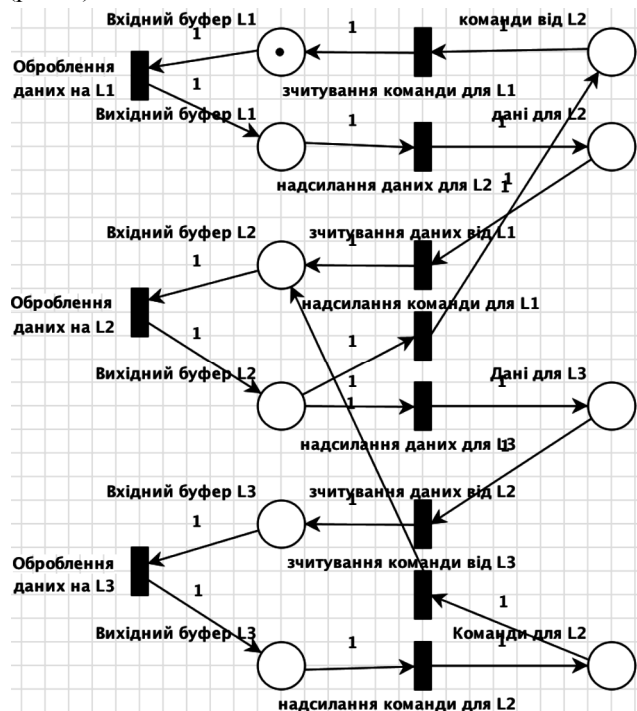


Рис. 7. Мережа Петрі комунікації та взаємодії рівнів

На основі побудованої моделі комунікації та взаємодії рівнів було згенеровано граф досяжності станів моделі, що зображено на рис. 8. Цей граф має 3 основні цикли роботи, перший з яких відповідає за комунікацію між першим та другим рівнями, другий цикл відповідає за комунікацію другого та третього рівнів.

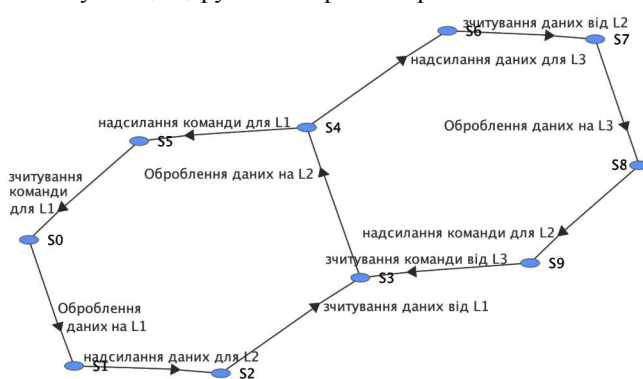


Рис. 8. Граф досяжності станів підмереж Петрі комунікації та взаємодії рівнів

Усі стани і переходи підмережі є досяжними, тупикові стани відсутні. Модель роботи рівня збору даних та управління виконавчими механізмами працює коректно.

### Висновки:

1. Розроблено модель на підставі ієрархічних мереж Петрі, яка дає змогу дослідити динаміку багаторівневих систем управління підприємствами. Особливістю практичної реалізації ієрархічної моделі на підставі мереж Петрі є використання простих мереж Петрі для кожного з ієрархічних рівнів, які інформаційно та функціонально поєднані через вхідний та вихідний стек команд.
2. Розроблено програмний засіб для побудови та дослідження моделей на підставі ієрархічних мереж Петрі. Побудована програма функціонує у двох основних режимах: перший режим передбачає виконання внутрішніх завдань та формування звітів, а в другому режимі відбувається аналіз вхідних даних та виконання команд за потреби.
3. Наведено результати застосування розробленої моделі та програмного засобу до аналізу динаміки багаторівневої ієрархічної системи управління технологічними процесами підприємства. Аналіз отриманих результатів дає змогу стверджувати, що розроблена багаторівнева ієрархічна система управління технологічними процесами підприємства функціонує правильно, усі стани досяжні, а тупики відсутні.

### Перелік використаних джерел

- Brandl, Dennis. (1995). *Practical Applications of the ISA 95 standard*. Retrieved from: [https://web-material3.yokogawa.com/2/11821/tabs/document\\_11744.pdf](https://web-material3.yokogawa.com/2/11821/tabs/document_11744.pdf). Title from the screen.
- Davis, J., Edgar, T., Porter, J., Bernaden, J., & Sarli, M. (2012). Smart manufacturing, manufacturing intelligence and demand-dynamic performance. *FOCAPO*, 47, 145–156.
- Denysyuk, P. Yu., Teslyuk, V. M., Pereyma, M. Ye., & Teslyuk, T. V. (2011). Using Petri hierarchical networks for MEMS simulation. *Scientific Bulletin of UNFU*, 21(17), 340–343.
- Drath, R., & Horch, A. (2014). Industrie 4.0: Hit or Hype? [Industry Forum]. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 8(2), 56–58.
- International standard IEC 62264–1. (2003). *Enterprise-control system integration. Part 1: Models and Terminology*. Retrieved from: [https://webstore.iec.ch/p-preview/info\\_iec62264-1%7Bed1.0%7Den.pdf](https://webstore.iec.ch/p-preview/info_iec62264-1%7Bed1.0%7Den.pdf). Title from the screen.
- Peterson, J. (1984). *Teoriya setey Petri i modelirovanie system* [The theory of Petri nets and system modeling]. Moscow: Mir, 264 p. [In Russian].
- Teslyuk, T., Tsmots, I., Teslyuk, V., Medykovskyy, M., & Opytyak, Y. (2018). Architecture and Models for System-Level Computer-Aided Design of the Management System of Energy Efficiency of Technological Processes at the Enterprise. In: *Shakhovska N., Ste-pashko V. (Eds.) Advances in Intelligent Systems and Computing II. CSIT 2017. Advances in Intelligent Systems and Computing*, (Vol. 689), (pp. 538–557). Springer, Cham.
- Teslyuk, V., Denysyuk, P., Al Shawabkeh, H. A. Y., & Kerymskyy, A. (2010). Developing the information model of the reachability graph. In: *Proc. of the 15-th International Seminar/Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory*, (pp. 210–214), DIPED2010, Sept. 27–30. Tbilisi.
- Tsmots, I. H., Batiuk, A. Ye., Yavorskyi, A. V., & Tesliuk, T. V. (2018). Systema monitorynhu tekhnolohichnykh protsesiv "rozumnoho pidpriemstva". *Visnyk Natsionalnoho universytetu "Lvivska politekhnika"*. Seriya: *Informatsiini systemy ta merezhi*, 887, 10–17. [In Ukrainian].

## АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ МНОГОУРОВНЕВЫХ СИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ИЕРАРХИЧЕСКИХ СЕТЕЙ ПЕТРИ

Проведен анализ современных подходов к организации эффективного управления современными предприятиями. Полученные результаты анализа дают возможность утверждать, что развитие энергетической отрасли Украины, как и других отраслей, невозможно без внедрения принципов технологии "Industry 4.0" и разработка систем управления предприятием должна происходить с учетом международных стандартов: ANSI / ISA-95 и IEC 62264-1. Построение собственной иерархической системы управления под конкретное предприятие должно основываться на использовании уже существующих базовых программно-аппаратных составляющих, что даст возможность существенно уменьшить ее стоимость. Соответственно, возникает задача согласования работы совместного функционирования базовых программно-аппаратных составляющих, а именно: исследование динамики функционирования иерархической системы. Для анализа функционирования таких систем предложены модели, основанные на теории иерархических и простых сетей Петри, которые дают возможность исследовать динамику функционирования разрабатываемой системы. Кроме того, модель с использованием иерархических сетей Петри дает возможность исследовать информационные потоки между иерархическими уровнями и их взаимное влияние. Приведены результаты апробации построенных моделей, а именно: пример анализа функционирования многоуровневой иерархической системы управления технологическими процессами предприятия. Полученные результаты дают возможность утверждать, что разработанная многоуровневая иерархическая система управления технологическими процессами предприятия функционирует правильно, все состояния достижимы, а тупики отсутствуют.

**Ключевые слова:** многоуровневые системы; иерархические сети Петри; модель; граф достижимости состояний системы; принципы технологии "Industry 4.0".

Т. V. Teslyuk

Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

## THE ANALYSIS OF THE DYNAMICS OF THE FUNCTIONING OF MULTILEVEL SYSTEMS USING MODELS BASED ON HIERARCHICAL PETRI NETWORKS

The author has described the analysis of existing approaches to the organization of efficient management of modern enterprises. The obtained results of the analysis allow stating that the development of the energy industry of Ukraine as well as other industries is impossible without the introduction of the principles of "Industry 4.0" technology. When developing enterprise management systems we should take into account the following international standards: ANSI / ISA-95 and IEC 62264-1. Furthermore, the construction of hierarchical management system for a particular enterprise should be based on the use of already existing basic software and hardware components. This approach will allow significant reducing its cost. System construction can be based on the next principles: system integration, variable equipment, modularity of construction, and openness and compatibility of software and hardware. Accordingly, there is the task to coordinate the work of basic software and hardware components. One of the ways to achieve that goal is studying the dynamics of the functioning of the hierarchical system. Models based on the theory of hierarchical and simple Petri networks are proposed for analysis of the functioning of such systems. Models allow investigating the dynamics of the functioning of the development system. In addition, the hierarchical Petri model provides the opportunity to explore information flows between hierarchical levels and their mutual influence. Software implementation of a petri-based hierarchical model is based on the use of simple Petri networks for each of the hierarchical levels. All these levels are informally and functionally linked through the input and output stack of commands. The software system operates in two main modes: the first mode involves executing internal tasks and reporting, while the second mode analyses the input data and executes the commands as needed. The results of the testing of the constructed models were presented, namely, an example of the analysis of the functioning of the multilevel hierarchical control system of technological processes of the enterprise, which consists of the following three levels: data collection and management of executive mechanisms; control and management of technological processes; operator control and decision making. The obtained results allow stating that the developed multilevel hierarchical control system of technological processes of the enterprise functions correctly, all states are achievable, and there are no dead ends.

**Keywords:** multilevel systems; hierarchical Petri networks; model; reachability graph; the principles of technology "Industry 4.0".