

І. А. Головатенко, А. В. Писаренко

МЕТОДИ МОДЕЛЮВАННЯ КІБЕР-ФІЗИЧНИХ СИСТЕМ

Анотація: У статті досліджуються найбільш перспективні методи побудови моделей кібер-фізичних систем. Виконано огляд найбільш ефективних підходів і методів побудови кібер-фізичних систем, розроблено модель кібер-фізичної системи для автономного рухомого об'єкту який виконує перевезення вантажу з одного складу на інший. В процесі переміщення вантажу виникають перешкоди на шляху рухомого об'єкту на які кібер-фізична система має проактивно реагувати, змінюючи оптимальний маршрут.

Ключові слова: Кібер-фізична система, логістика, оптимальне керування, планування маршруту.

Сучасні методи побудови кібер-фізичних систем

Одним із підходів до моделювання кібер-фізичних систем є їх представлення у вигляді шаблонів на основі FCA (Formal Concept Analysis) для оптимізації функціональної сумісності кібер-фізичних систем в Індустрії 4.0 [1]. Функціональна сумісність може бути визначена як здатність двох або більше систем до обміну, розуміння і споживання інформації.

Кібер-фізична система представляється у вигляді метамоделі взаємодії n -ої кількості кібер-фізичних систем. Компонентами кібер-фізичної системи є набори як фізичних, так і кібер компонентів. Кібер-фізична система являє собою структурний агломерат цих елементів, який також може включати інші кібер-фізичні підсистеми, формуючи нову кібер-фізичну систему.

Визначення системи в даному випадку буде наступним. Нехай є система

$$\{P, C, CPS, R^P, R^C\}, \quad (1)$$

де P – множина фізичних компонентів, які пов'язані відношенням R^P ;

C – множина кібер компонентів, які пов'язані відношенням R^C ;

CPS – кібер-фізична система, включена у вигляді дочірньої, що має ті ж властивості, що і батьківська.

В якості наступного підходу до опису кібер-фізичних систем розглянемо Business Process Modeling Notation (BPMN 2.0), що використовується з урахування специфіки кібер-фізичних систем. Для класифікації нових метакласом потрібне глибоке розуміння метакласів BPMN [2].

Для цього вводяться нові абстрактні класи кібер-фізичних систем як набір підкласів BPMN. Дана концепція дозволить розробнику кібер-фізичної системи описувати логіку внутрішніх процесів, різні типи дій всередині і реальні об'єкти.

На рис. 1 наведено приклад, який ілюструє виконання замкнутого циклу кібер-фізичною завдання в розрізі трьох пулів: фізичного, пулу контролера і пулу кіберпроцесу.

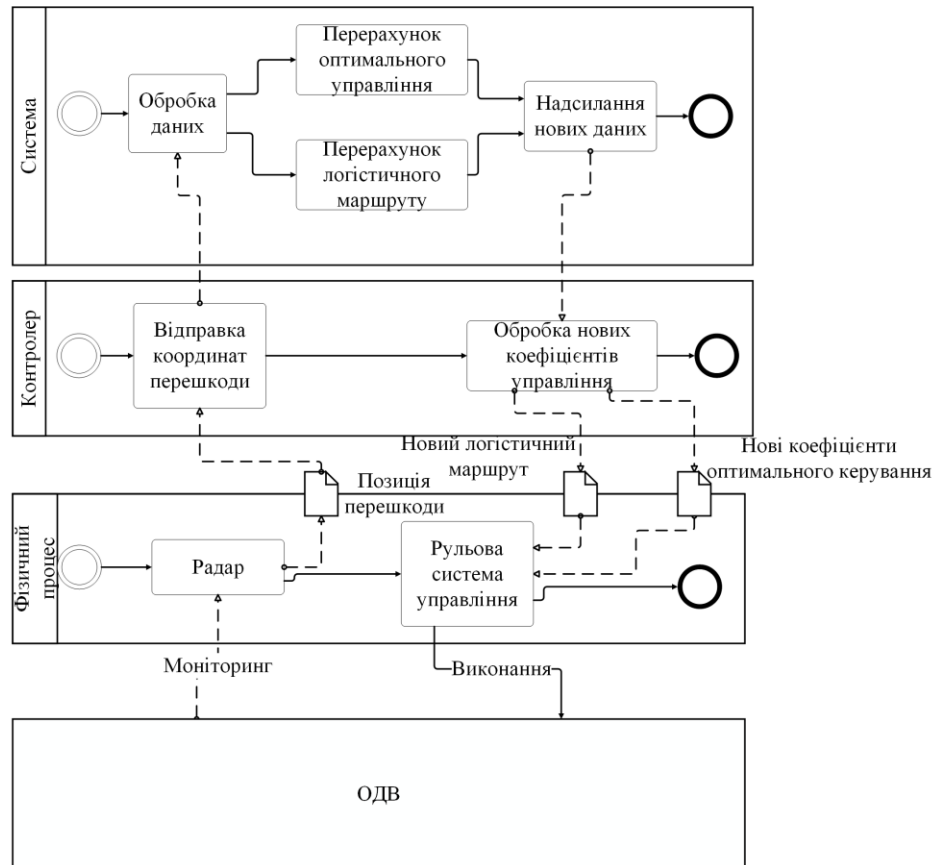


Рисунок 1. Замкнений цикл абстрактної кібер-фізичної задачі

Третім підходом до моделювання кібер-фізичних систем є метод проектування, заснованого на моделі, для побудови динамічних систем [3].

Проектування складної кібер-фізичної системи, особливо з різнорідними підсистемами, розподіленими по мережах, є нетривіальним завданням. Зазвичай використовуються методи проектування складні і включають математичне моделювання фізичних систем, формальні моделі обчислень, моделювання гетерогенних систем, синтез програмного забезпечення, верифікацію, валідацію і тестування.

Пропонується алгоритм, що складається з 10 кроків:

1. постановка задачі;
2. опис фізичних процесів рівняннями;
3. опис області визначення, мінімальних / максимальних параметрів, накладення обмежень;

4. синтез управління;
5. підбір обчислювального забезпечення;
6. вибір апаратного забезпечення;
7. моделювання процесу;
8. конструювання;
9. програмне забезпечення;
10. перевірка працездатності і тестування.

Постановка проблеми

Розглянемо наступну кібер-фізичну систему:

1. Об'єкт, який доставляє вантаж (ОДВ) отримав логістичний маршрут доставки вантажу з місця доставки вантажу (МДВ₁) в МДВ₂ і алгоритм оптимального, за витратами енергії, управління від централізованого хмарного сервера;
2. ОДВ починає рух, паралельно відстежуючи зовнішні впливи на шляху прямування (наприклад, за допомогою радара);
3. У разі виникнення ситуації, при якій рух запланованим маршрутом неможливий – ОДВ відсилає відповідну інформацію в централізовану «хмару»;
4. «Хмара», в свою чергу, перераховує логістичний маршрут і алгоритм оптимального, за витратами енергії, управління;
5. Отримавши оновлені дані, ОДВ продовжує рух до МДВ₂.

Така динамічна реакція на зміну зовнішнього середовища дозволить мінімізувати проблему несвоєчасності доставки вантажу.

Побудова моделей логістичної кібер-фізичної системи

Використовуємо метод метамоделі кібер-фізичної системи. На рис. 2 представлено між компонентну взаємодію кібер-фізичної системи, запропоновану в постановці проблеми.

Екземпляр класу кібер-фізичної системи позначається як еліпс, де суцільна половина позначає фізичний компонент, а пунктирна половина позначає кібер-компонент.

На рис. 3 представлена реалізація моделі логістичної кібер-фізичної системи в термінології BPMN4CPS.

Тут розширена BPMN нотація розділяє логіку процесу на три частини: кібер-частина, контролер і фізична частина.

Ці частини взаємодіють один з одним за допомогою обміну повідомленнями.

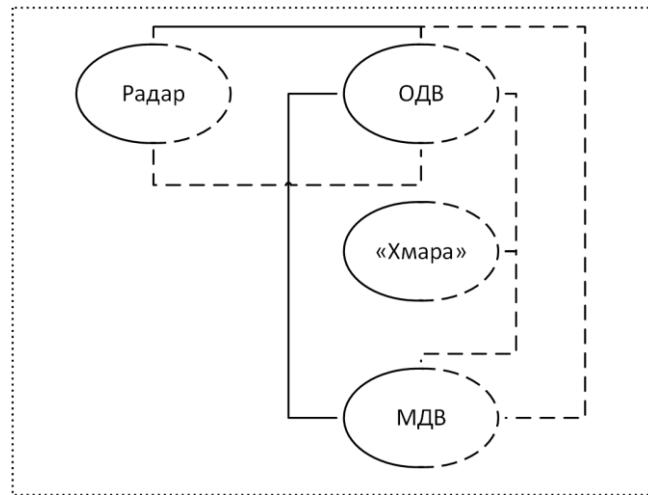


Рисунок 2. Метамодель кібер-фізичної системи

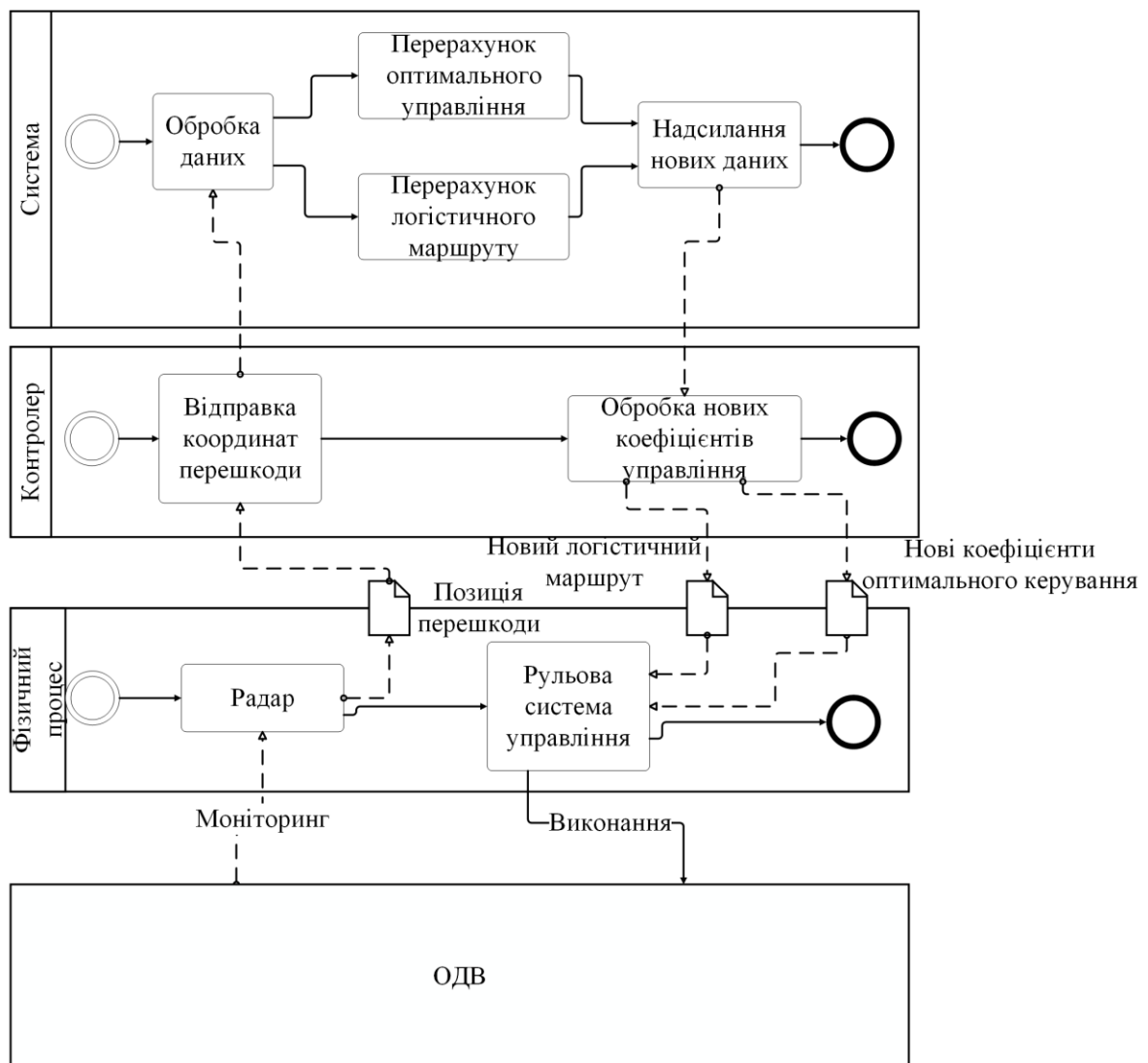


Рисунок 3. BPMN4CPS нотация кібер-фізичної системи

Результати моделювання

Рис. 4 показує початковий логістичний маршрут із МДВ₁ в МДВ₂, отриманий ОДВ від централізованої «хмари».

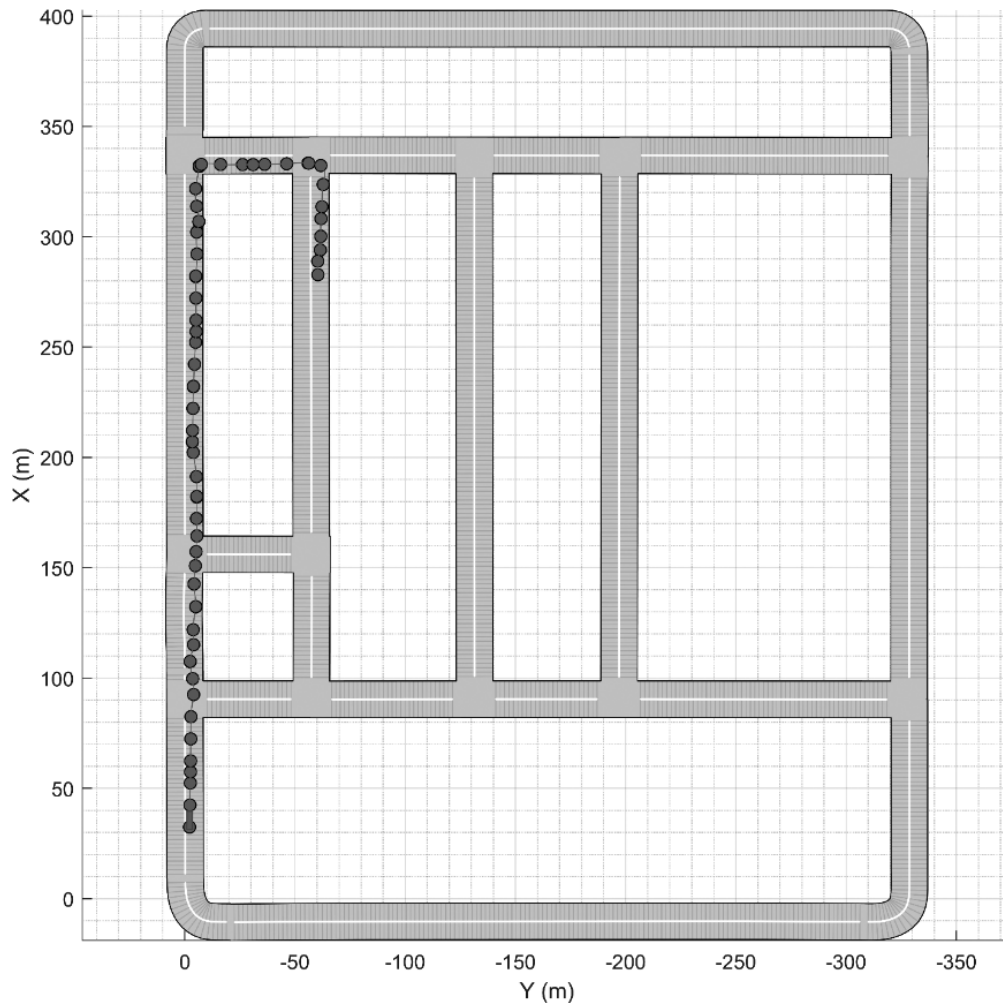
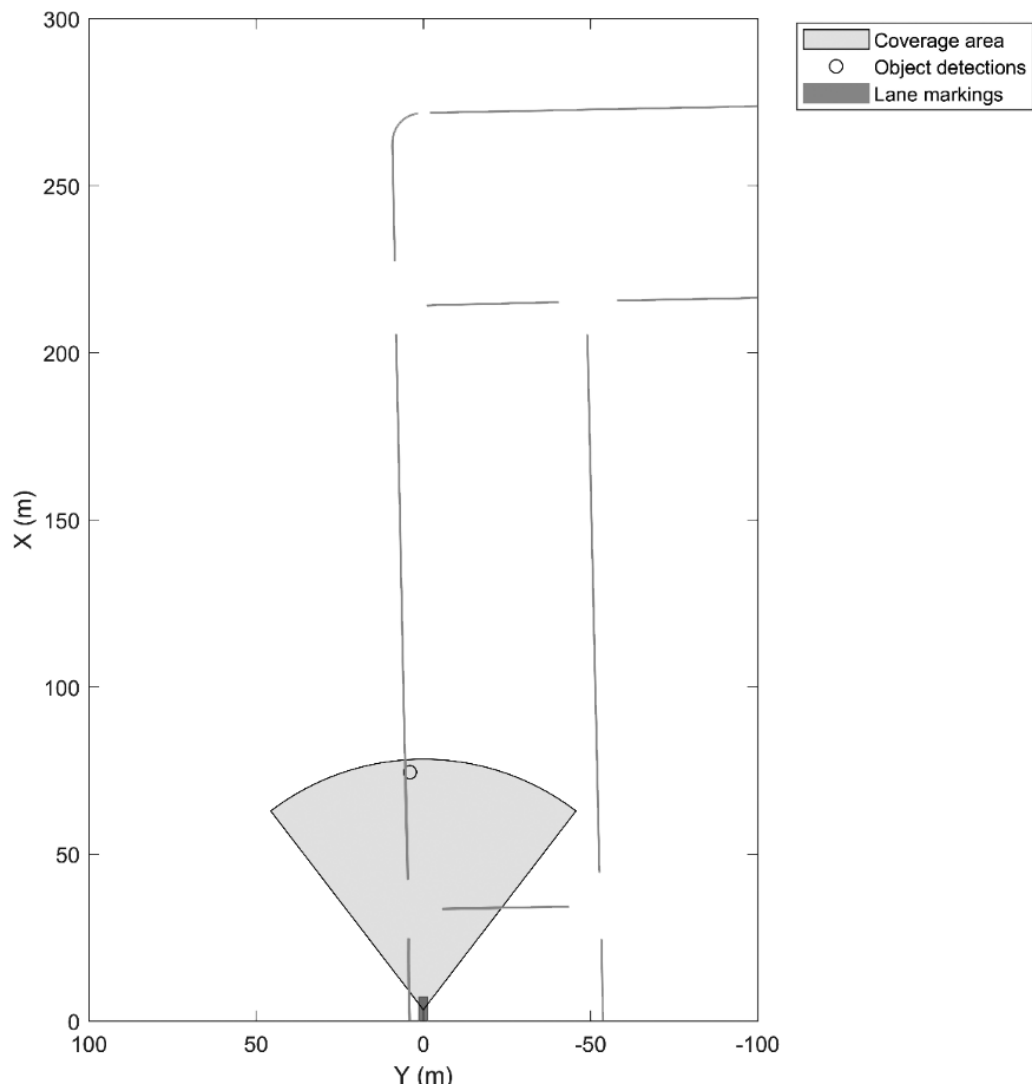


Рисунок 4. Первинна траєкторія, отримана ОДВ в початковий момент часу

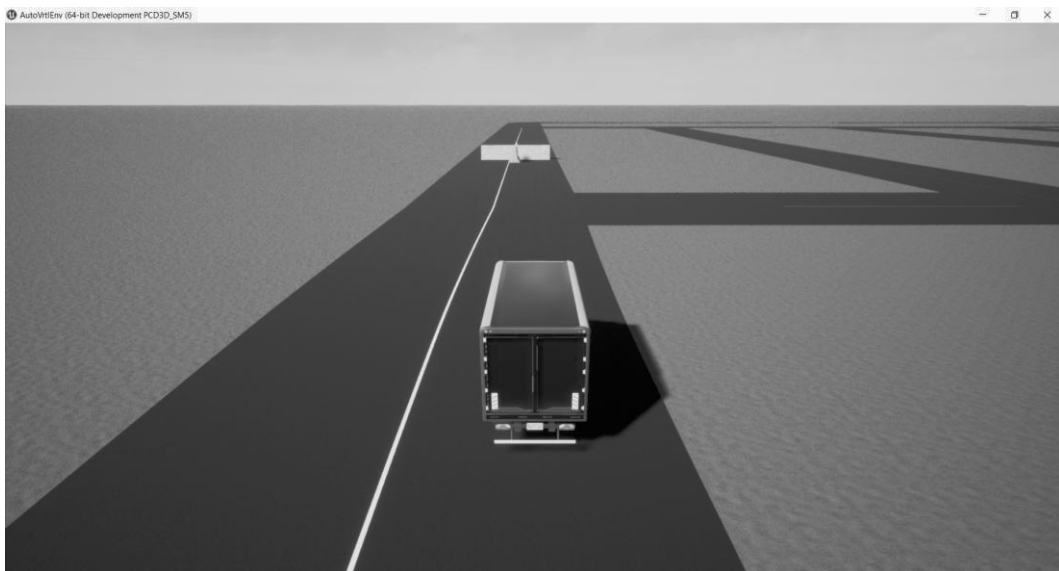
Далі ОДВ почав рух по логістичному маршруту. Під час руху безперервно відбувається відстеження зовнішніх впливів на дорогах, таких як пробки або перешкоди. На рис. 5 показано стан кібер-фізичної системи в момент віднайдення перешкоди на шляху руху ОДВ.

Як тільки радар фіксує перешкоду, дані контролером відправляються у «хмару». Дані, отримання від радару, являють собою масив GPS точок – координати перешкоди. Обчислювальний сервер обраховує нову траєкторію, з урахуванням перешкоди і надсилає новий маршрут, і коефіцієнти оптимального управління у контролер ОДВ. Рис. 6 показує новий логістичний маршрут, після активної реакції на перешкоду на шляху.

На рис. 7 показано стан кібер-фізичної системи після отримання нового логістичного маршруту і коефіцієнтів оптимального управління. ОДВ рухається далі до МДВ₂.



а



б

Рисунок 5. Стан кібер-фізичної системи в момент виявлення радаром перешкоди (а – стан радар, б – стан ОДВ)

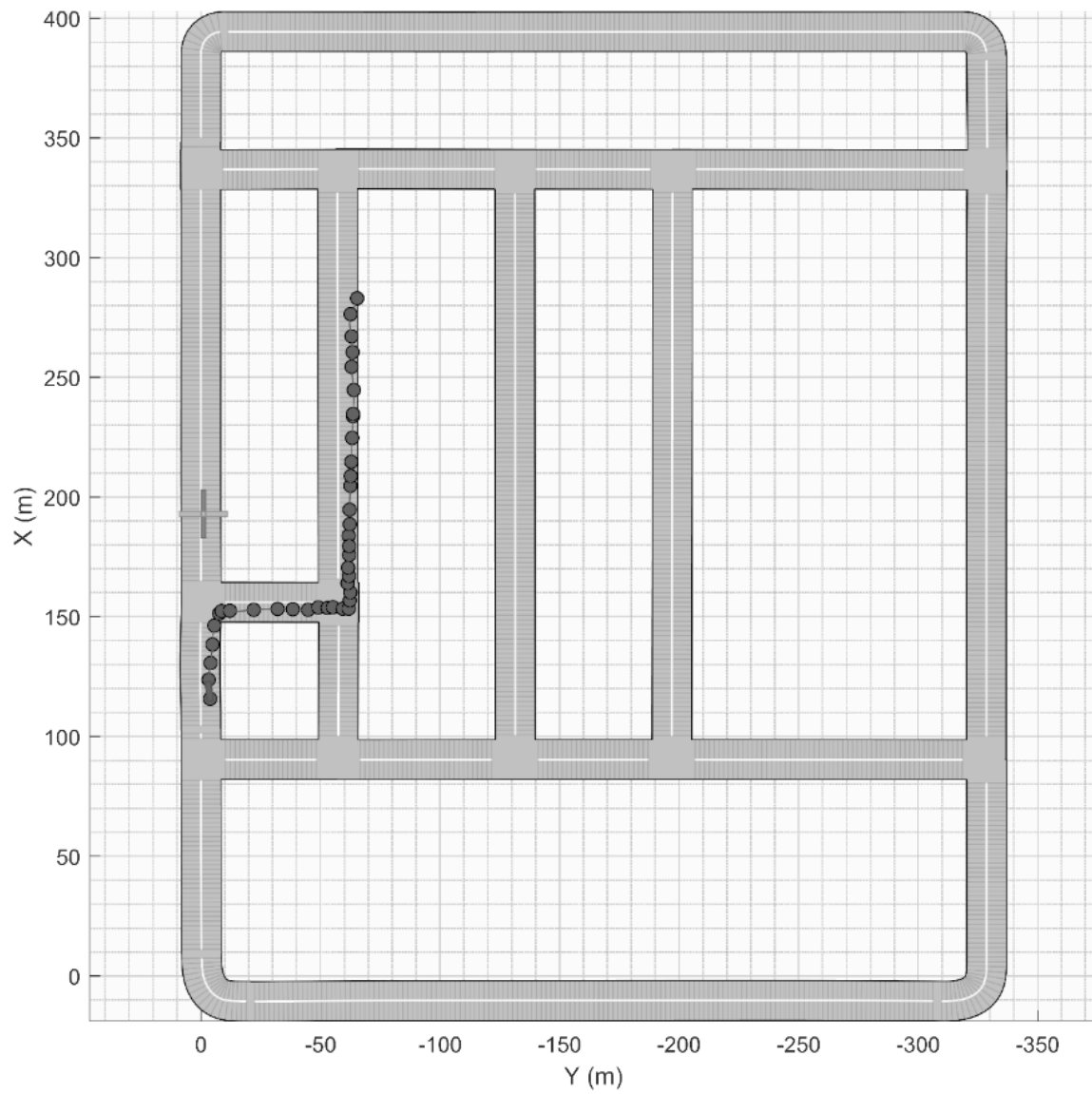
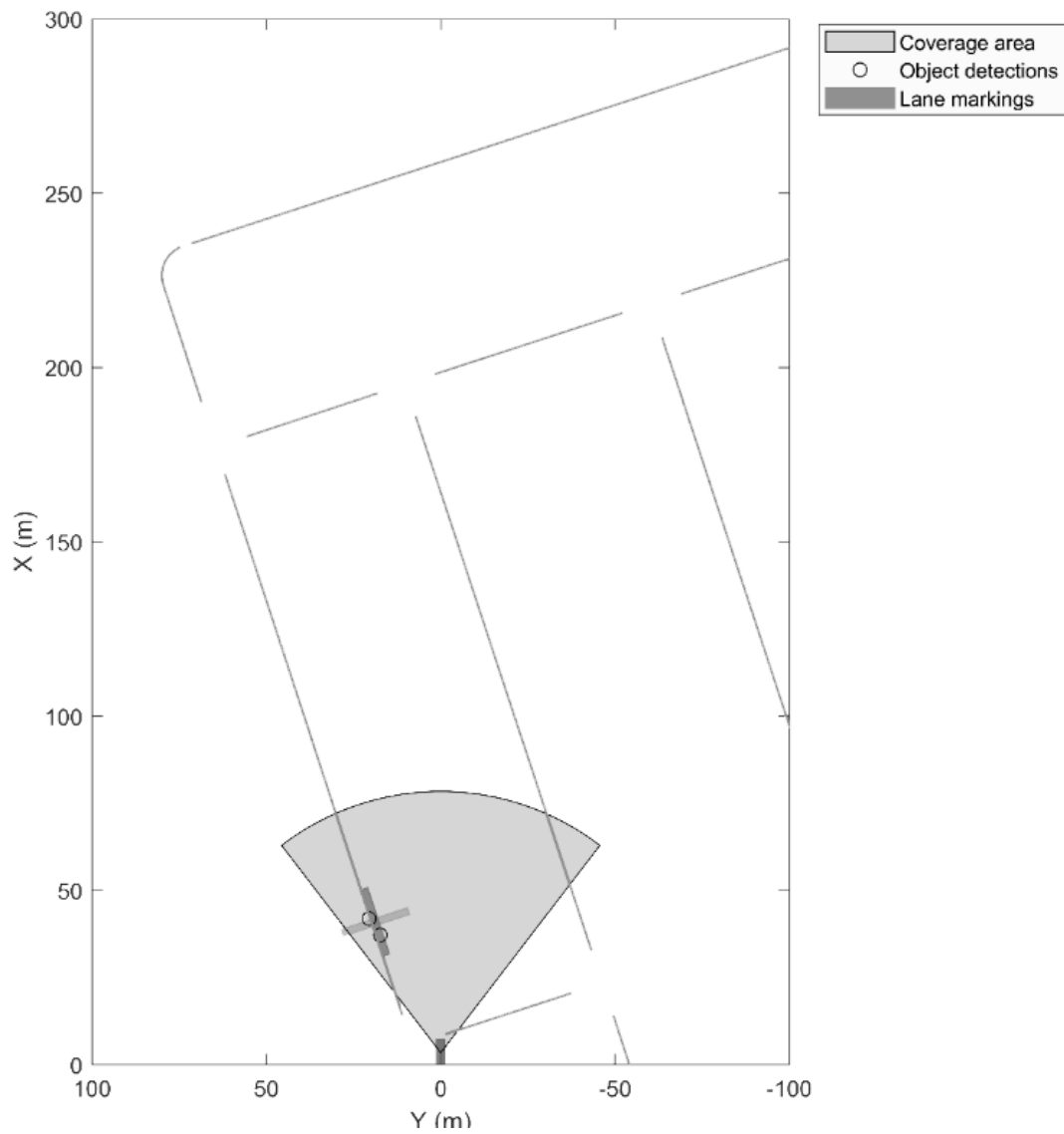


Рисунок 6. Новий логістичний маршрут, перерахований через перешкоди на шляху ОДВ



а



б

Рисунок 7. Стан кібер-фізичної системи після отримання нового логістичного маршруту (а – стан радар, б – стан ОДВ)

Висновки

У статті розглянуті найбільш перспективні, з точки зору повноти опису, підходи до моделювання кібер-фізичних систем. Виконано не тільки аналіз підходів до моделювання кібер-фізичних систем, а й представлені результати побудови моделі для обраного об'єкту.

Підхід на основі метамоделі FCA відмінно підходить для побудови високорівневого подання кібер-фізичних систем. Результат дає чітке розуміння того, з яких систем / функціональних блоків складається кібер-фізична система і як ці вузли з'єднані між собою (за допомогою кібер або фізичних зв'язків).

Підхід на основі BPMN відмінно підходить для опису внутрішніх взаємодій між системами / функціональними блоками. Якщо попередній підхід показував, які в системі компоненти фізичні, а які кібер, то цей підхід детально ілюструє, як саме ці компоненти взаємодіють між собою.

Останній, так званий model-based підхід, може бути продовженням попереднього. Однак найбільш ефективно його слід виконувати в сукупності з ним. Основним недоліком даного підходу – є відсутність будь-яких графічних репрезентацій проміжних результатів в процесі побудови кібер-фізичної системи. У свою чергу, великою його перевагою є – алгоритмічність.

Кожен із підходів має свої переваги і недоліки. Автори бачать сенс в деякому симбіозі даних підходів. Перший підхід ідеально підходить для стадії первинного прототипування. Слідуючи першим крокам третього підходу «опис фізичних процесів рівняннями» і «опис області визначення, мінімальних / максимальних параметрів, накладення обмежень» можна зібрати необхідний набір значень / даних для опису внутрішніх взаємодій між компонентами кібер-фізичної системи. Далі, слід продовжувати розробку кібер-фізичної системи згідно з model-based підходу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Morozov D. Multi-paradigm modelling of Cyber-Physical Systems // IFAC-PapersOnLine. 2018. № 51 (11). С.1385-1390.
2. Graja, I. BPMN4CPS: A BPMN Extension for Modeling Cyber-Physical Systems. // 2016 IEEE 25th International Conference on Enabling Technologies: Infrastructure for Collaborative Enterprises (WETICE). Paris, 2016. С.152-157.
3. Jensen J. C. A model-based design methodology for cyber-physical systems // 2011 7th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference. Istanbul, 2011. С.1666-1671.
4. Holovatenco I. A., Pysarenko A. V. Energy-Efficient Path-Following Control System of Automated Guided Vehicles // Journal of Control, Automation and Electrical Systems 2021. № 32. С.390-403.

5. Chikrii A. A. Control of Moving Objects in Condition of Conflict. In: Kuntsevich, V.M. Control Systems: Theory and Applications. Series in Automation, Control and Robotics // River Publishers, Gistrup, Delft. 2018. С.17-43.

6. Gubarev V. F. Model Predictive Control for Discrete MIMO Linear Systems. In: Kondratenko, Y.P., Chikrii, A.A., Gubarev, V.F., Kacprzyk, J. (Eds) Advanced Control Techniques in Complex Engineering Systems: Theory and Applications. Dedicated to Prof. V.M. Kuntsevich. Studies in Systems, Decision and Control, Vol. 203. Cham: Springer Nature Switzerland AG, 2019, pp. 63-81.

7. MathWorks. Automated Driving Toolbox // MathWorks. Дата оновлення: 22.10.2021. URL: <https://www.mathworks.com/products/automated-driving.html> (дата звернення 20.10.2021).

8. Microsoft Azure. Linux Virtual Machines Pricing // Microsoft. Дата оновлення: 20.07.2019. URL: <https://azure.microsoft.com/en-us/pricing/details/virtual-machines/linux> (дата звернення 20.10.2021).

9. MathWorks. Instrument Control Toolbox // MathWorks. Дата оновлення: 16.05.2018. URL: <https://www.mathworks.com/products/instrument.html> (дата звернення 20.10.2021).