

УДК 004.4`2; 004.94

**Панченко Артем
Сергійович***Аспірант факультету Математики і інформатики
Харківській національний університет імені В.Н.Каразіна, майдан
Свободи 4, Харків, Україна, 61022
e-mail: artem.panchenko@karazin.ua
<https://orcid.org/0000-0001-5865-6158>***Жолткевич Григорій
Миколайович***д.т.н., професор; декан факультету Математики і інформатики
Харківській національний університет імені В.Н.Каразіна, майдан
Свободи 4, Харків, Україна, 61022
e-mail: g.zholtkevych@karazin.ua
<https://orcid.org/0000-0002-7515-2143>*

Техніка моделювання Кіберфізичних систем за допомогою Коалгебри

Актуальність. На сьогодні ми можемо спостерігати стрімкий темп розвитку інформаційних технологій, впровадження результатів якого є широкий процент автоматизації виробничих процесів. У більшості випадків цю мету можна досягти за допомогою впровадження Кіберфізичних систем у виробничі процеси. Основною особливістю таких інформаційних систем є інтеграція різноманітних сенсорів та маніпуляторів (фізичної складової системи) у обчислювальну систему, що виконує операційно-контролюючу функцію (кібернетична складова системи). Такі системи потребують високого рівня надійності роботи, що у свою чергу вимагає від їх проєктувальників уважно ставитися до аналізу специфікації поведінки подібних систем за метою виявлення критичних станів її роботи.

Мета. У роботі досліджується можливість використання формальних моделей опису роботи системи за допомогою Коалгебри. Такий підхід дасть можливість більш ефективно уникати помилок аналізу поведінки Кіберфізичної системи на стадії її проєктування. У цьому дослідженні буде показано методику моделювання розповсюджених типів динамічних систем за допомогою Коалгебри.

Методи дослідження. Основні типи динамічних систем у ході цього дослідження будуть абстраговані до моделі на основі Коалгебри.

Результати. Було розроблено підходи до моделювання найпоширеніших типів динамічних систем, а саме, Детермінованої системи, Системи з переходами та Рандомної системи. Моделі будувались з використанням теорії категорій та Коалгебри, що забезпечує необхідний високий рівень абстракції. Такий підхід забезпечує можливість працювати не з однією конкретною системою, що була ціллю до аналізу а з цілим класом подібних систем.

Висновки. Результати дослідження показали основні методи до створення моделей основних моделей динамічних систем з використанням Коалгебри. Результати цього дослідження можуть бути корисними для розв'язання задачі моделювання динамічних систем, як основа для подальших досліджень.

Ключові слова: Кіберфізичні системи, Коалгебра, Моделювання динамічних систем, Теорія категорій, Фінальна коалгебра.

Як цитувати: Панченко А.С., Жолткевич Г.М. Техніка моделювання Кіберфізичних систем за допомогою Коалгебри. *Вісник Харківського національного університету імені В.Н.Каразіна, сер. «Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління»*. 2023. вип. 58. С.47-53.

<https://doi.org/10.26565/2304-6201-2023-58-05>

How to quote: Panchenko A., Zholtkevych H., “The technique of modeling Cyberphysical systems using Coalgebra”, *Bulletin of V. N. Karazin Kharkiv National University, series “Mathematical modelling. Information technology. Automated control systems*, vol. 58, pp.47-53, 2023.

<https://doi.org/10.26565/2304-6201-2023-58-05>

1 Вступ

В сучасному світі зростає розуміння необхідності інтеграції інформаційних технологій та фізичних процесів у так званих Кіберфізичних системах. Кіберфізичні системи є новим напрямком розвитку, що виникає в результаті стрімкої еволюції інформаційних технологій та автоматизації виробничих процесів. Під Кіберфізичними системами ми розуміємо такі системи, що поєднують у собі компоненти реального світу, таких як різноманітні датчики та маніпулятори (фізична складова системи), та елементи контролю та керування на основі комп'ютерів (кібернетична складова системи). Однією з основних областей застосування кіберфізичних систем є промисловість, медичні технології, транспорт та логістика [1].

Слід зазначити, що можна розглядати Кібер фізичну систему як вид розподіленої системи. Подібні системи мають велику кількість переваг, у першу чергу паралельність виконання задач, але потребують більш детального підходу до проектування подібних систем.

Серед основних проблем, що виникають під час проектування Кіберфізичних [2] систем можна виділити наступні

1. Системна складність: Кіберфізичні системи включають в себе різноманітні компоненти, що взаємодіють між собою на різних рівнях. Підтримка та управління такими складними системами може бути викликана труднощами у розумінні взаємодії між компонентами та управлінням їх функціонуванням.
2. Безпека та конфіденційність даних: У кіберфізичних системах, які залучають обробку великих обсягів даних, виникають серйозні проблеми забезпечення безпеки та конфіденційності цих даних. Вразливості в програмному забезпеченні та мережеві атаки можуть призвести до проникнення зловмисників та порушення конфіденційності даних.
3. Гетерогенність інтегрованих систем: Кіберфізичні системи часто поєднують у собі різні технології та пристрої, які можуть мати різну архітектуру та стандарти взаємодії. Це може викликати проблеми сумісності та інтеграції між компонентами системи.
4. Недостатня надійність та стійкість до відмов: Кіберфізичні системи повинні бути стійкими до відмов та недоліків в роботі окремих компонентів. Однак навіть невеликі відмови можуть призвести до серйозних наслідків у функціонуванні системи.
5. Відсутність єдиної методології розробки та тестування: На сьогоднішній день не існує єдиної методології розробки та тестування кіберфізичних систем. Це може призвести до різних підходів до розробки, що ускладнює співпрацю між командами розробників та може призвести до недоліків у якості та надійності системи.

Враховуючи ці проблеми, необхідно використовувати такі підходи до аналізу специфікації поведінки Кіберфізичної системи [3] та її проектування, що характеризуються високим рівнем

1. Формальності мови специфікації, що дозволить уникати помилок при реалізації конкретних специфікацій
2. Виразності мови, що дозволить описати усі аспекти поведінки системи
3. Надійності опису, що дозволить уникати протиріч під час специфікації поведінки системи

У ході цього дослідження ми покажемо і доведемо, що найбільш адекватним інструментом до розв'язання цієї задачі є підхід з використанням Коалгебри. Коалгебра - це математична структура, що вивчається в теорії категорій, яка виникає як дуальна до алгебри структура. Вона дозволяє моделювати властивості об'єктів зі складною структурою, які можуть бути описані через взаємодію та композицію.

Використання Коалгебри дозволяє абстрагуватися від конкретних реалізацій системи та розглядати її як композицію окремих компонентів, які взаємодіють між собою. Це дозволяє здійснювати формальний аналіз властивостей системи та забезпечує більшу модульність та гнучкість у проектуванні.

Таким чином, стає очевидно, що Коалгебра виявляється корисним математичним інструментом, який дозволяє моделювати та аналізувати взаємодію між різними компонентами Кіберфізичних систем. Основна методика застосування Коалгебри під час проектування та специфікації поведінки розподілених систем включає в себе наступні застосування:

1. Моделювання взаємодії компонентів: Коалгебра дозволяє створювати абстрактні моделі, які відображають взаємодію між різними компонентами кіберфізичної системи. Це допомагає розуміти структуру та функціонування системи на високому рівні абстракції та забезпечує базу для подальшого аналізу та оптимізації.
2. Аналіз властивостей системи: За допомогою коалгебри можна вивчати різні властивості кіберфізичних систем, такі як стійкість до відмов, продуктивність, безпека тощо. Вона дозволяє формалізувати ці властивості та визначати їх умови та обмеження.
3. Розробка алгоритмів управління: Коалгебра надає математичний апарат для розробки та аналізу алгоритмів управління кіберфізичними системами. Вона дозволяє моделювати та формалізувати різні аспекти управління, такі як взаємодія з сенсорами та актуаторами, прийняття рішень на основі отриманих даних тощо.

4. Валідація та верифікація систем: Коалгебра дозволяє проводити формальну валідацію та верифікацію кіберфізичних систем, перевіряючи їхні властивості та специфікації за допомогою математичних методів та алгоритмів.

В рамках цього дослідження ми зосередимося на підходах до валідації та верифікації систем за допомогою знаходження фінальної Коалгебри для системи.

2 Аналіз сучасних підходів до специфікації поведінки Кіберфізичних систем

Під час дослідження нами було проаналізовано декілька актуальних наукових публікацій на тему, серед них можна виділити наступні:

Автори [4] окремо наголошують на підвищених вимогах до безвідказності та безперервності роботи Кіберфізичних, через те, що вони можуть використовуватися у системах автопілотування і ціна помилки такої системи буде вартувати людських життів. Також окремо наголошується, що не існує єдиного підходу до специфікації поведінки подібних систем. Авторами було запропоновано саме підхід з використання Коалгебри, що забезпечує перевірку працездатності системи у цілому. Авторами було показано, що за допомогою використання Коалгебри можна забезпечити уніфікований математичний інструмент для обмеження поведінки надскладних систем та мінімізувати небезпечну поведінку подібних систем.

Автори [5] наголошують, що композиція є важливою властивістю мови специфікації, оскільки вона дозволяє проектувати складну систему як композицію її підсистем, що дозволяє редукувати складність проектування. Декомпозиція однаково важлива для міркування про структурні властивості системи. Зазвичай, однак, систему можна декомпонувати кількома способами, кожен з яких оптимізується за окремим набором критеріїв. У своєму дослідженні автори вивчили можливість використання цього математичного апарату у Коалгебраїчних моделях, націлених на розв'язання задачі проектування Кіберфізичних систем та успішно використали цей фреймворк для проектування реальної системи з керування роботизованою Кіберфізичною системою.

Автори <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8673032> у своїй роботі представили підхід до трансформації моделі роботи Кіберфізичних систем, заснований на абстрактній інтерпретації, техніці статичного програмного аналізу. Таким чином, автори підкреслюють необхідність відходу від концепції неформального опису роботи систем до формального та високорівневого. Таким чином ми зможемо використовувати такий інструмент специфікації, що є максимально прозорим для доведення некоректної поведінки систем у разі наявності такої поведінки..

2.1 Висновки щодо аналізу сучасних підходів до розв'язання поставленої задачі

Аналіз сучасних методів аналізу та специфікації поведінки розподілених систем показав наступне

1. Подібна задача на сьогодні не має єдиного підходу для її розв'язання
2. Однак існує чітке розуміння необхідності використання формальних підходів до опису роботи Кіберфізичних систем, що дає ряд переваг над неформальними, а саме чіткий опис моделі та надійний інструмент доведення
3. Використання Коалгебри для аналізу та специфікації поведінки Кіберфізичних систем є розповсюдженим, у першу чергу через властивості цього математичного апарату, а саме формальна математична основа та високий рівень абстракції.

3 Основні концепти Коалгебри

У розділі буде описано визначення коалгебри та пов'язаних основних Концепцій. Основним джерелом визначень для нас буде онлайн-енциклопедія nLab. Даний розділ необхідний для розуміння подальших моделей систем, створених за допомогою Коалгебр а також буде містити у собі неформальну інтерпретацію формальних визначень

Крім того, деякі конкретні концепції обговорюються для випадку, коли базова категорія - це категорія **Set**.

Визначення 1. Функтор $F: \mathcal{C} \rightarrow \mathcal{C}$ від категорії до себе самої називається ендифунктором.

Далі у ході дослідження ми будемо вважати за замовченням, що ми працюємо з заданою та фіксованою категорією \mathcal{C} та її ендифунктором F .

Визначення 2. Морфізм a категорії \mathcal{C} називається F -коалгеброю, якщо виконується рівність $\text{cod } a = F(\text{dom } a)$. У цьому випадку $\text{dom } a$ називається носієм a та позначається як \underline{a} .

Визначення 3. Нехай a та $b \in F$ -коалгебрами. Тоді морфізм $f: \underline{a} \rightarrow \underline{b}$ називається F -морфізмом з a в b , якщо діаграма, зображена на Рисунку 1 є комутативною

$$\begin{array}{ccc} \underline{a} & \xrightarrow{f} & \underline{b} \\ \downarrow a & & \downarrow b \\ F \underline{a} & \xrightarrow{Ff} & F \underline{b} \end{array}$$

Рис.1 Діаграма комутативності

Твердження 1. Клас F -коалгебр, обладнаних F -морфізмами, є Категорією, яку зазвичай позначають як $Coalg_F(\mathbb{C})$ або просто $Coalg_F$, якщо базова категорія \mathbb{C} зрозуміла з контексту.

Визначення 4. Термінальний об'єкт $Coalg_F$, якщо він існує, називається кінцевою F -коалгеброю, яку позначають символом νF .

Визначення 5. Для будь-якої F -коалгебри a , єдиний F -морфізм з a в νF називається аноморфізмом і позначається $[[a]]$.

Таким чином, ми бачимо, що використання Коалгебри є не тільки доцільним з точки зору вибору формального інструменту, а й цілком природним до предметної області моделювання динамічних систем. Це пов'язано за декількома факторами, а саме

1. Визначення 2 можна неформально інтерпритувати наступним чином. Під Коалгеброю ми розуміємо процес зміну стану систем після кожної ітерації її роботи
2. Використовуючи підхід з використання Теорії категорій ми розв'язуємо задачу моделювання до цілого класу систем, що мають однакові властивості
3. Визначення 4 неформально можна інтрепитувати наступним чином. Якщо у класі систем існує такий об'єкт, що має у собі основні властивості систем класу, то ми завжди зможемо створити механізм абстракції кожної системи до його рівня (за допомогою аноморфізма) і аналізувати тільки його поведінку. Таким чином ми зможемо розповсюджувати результати досліджень на усі систему обраного класу.

4 Підходи до моделювання основних типів динамічних систем за допомогою Коалгебри

У цьому розділі ми опишемо підходи до моделювання основних типів динамічних систем за допомогою Коалгебр. Нами будуть формалізовані процеси їх роботи та дано визначення самої Коалгебри для таких категорій систем.

4.1 Дискретна детермінована система

Дискретна детермінована система - це математична модель систем, що складається з множини станів та перехідних функцій, які визначають перехід між цими станами. Формально, така система може бути представлена як впорядкована пара (X, δ) , де X - множина станів, а δ - функція переходу, яка відображає поточний стан в наступний стан згідно з певними правилами.

Однією з ключових особливостей дискретних детермінованих систем є їхня детермінованість, що означає, що результат переходу між станами є повністю визначеним правилами системи і не залежить від випадкових факторів.

Формально таку категорію систем можна визначити за допомогою ідентифікаційного ендоморфізму Id категорії Set . Це означає, що Id -система є парою $(X, \delta: X \rightarrow X)$, а Id -морфізм з A в B є функцією $f: \underline{A} \rightarrow \underline{B}$ такою, що діаграма, зображена на Рисунку 2 є комутативною.

$$\begin{array}{ccc} \underline{A} & \xrightarrow{f} & \underline{B} \\ \delta_A \downarrow & & \downarrow \delta_B \\ \underline{A} & \xrightarrow{f} & \underline{B} \end{array}$$

Рис.2 Діаграма комутативності Коалгебри для Дискретної системи

Таким чином, ми бачимо, що такий клас систем доволі легко замоделювати за допомогою Коалгебри. Подібні системи відіграють ключову роль у широкому спектрі областей, включаючи теорію керування, комп'ютерні науки, інформатику, теорію автоматів, теорію ігор та інші. Вони є об'єктом інтенсивного дослідження через їхню важливу роль у моделюванні різноманітних процесів та систем.

4.2 Системи з переходами

Систему з переходами можна описати як математичну структуру, що складається з набору станів і набору переходів між цими станами. Кожен стан представляє собою конкретну конфігурацію системи, а переходи відображають, як система переходить з одного стану в інший відповідно до певних правил або умов.

Такі системи широко використовуються для моделювання різноманітних процесів і систем, таких як програми, мережеві протоколи, керування процесами, та багато інших. Вони дозволяють аналізувати поведінку системи, виявляти помилки та неочікувані стани, та розробляти стратегії керування та відновлення.

Формально категорію Систем з переходами можна визначити за допомогою ендofунктора P_* , який переводить будь-яку множину X у множину її кінцевих підмножин і будь-якої функції $f : X \rightarrow Y$, він надсилає у функцію, яка приймає скінченну підмножину A з X і повертає скінченну підмножину $\{f x \mid x \in A\}$ з Y . Перевірка того, що описані перетворення визначають ендofунктор, є тривіальною.

Отже, Система з переходами – це пара $(X, \delta : X \rightarrow P_* X)$, функція переходу δ якої пов'язує скінченну множину можливих станів-наступників з будь-яким поточним станом $x \in X$.

Наступне поняття є корисним для опису P_* -морфізмів.

Нехай A - P_* -система, тоді можна визначити таке бінарне відношення \xrightarrow{A}

$$x \xrightarrow{A} x' \text{ тільки за умови, якщо } x' \in \delta Ax$$

Таким чином, P_* -морфізм $f : A \rightarrow B$ це функція $f : \underline{A} \rightarrow \underline{B}$ така, що

$$fx \xrightarrow{B} y \text{ тільки за умови, якщо } x \xrightarrow{A} x' \text{ для деяких } x', \text{ таких, що } fx' = y$$

Системи з переходами є потужним інструментом для моделювання та аналізу дискретних процесів та систем. Їх широкий спектр застосувань робить їх важливим елементом у розв'язанні різних завдань у сферах інформатики, інженерії програмного забезпечення, теорії автоматів та багатьох інших областях. У цьому підрозділі нами було показано як замоделювати їх роботу за допомогою Коалгебри, що значно спрощить їх аналіз та зроблять його більш надійним.

4.3 Рандомні системи

Як було зазначено вище, у Детермінованій системі кожен можливий стан або перехід між станами є чітко визначеним і передбачуваним. Перехід між станами відбувається згідно з чіткими правилами або алгоритмами, і результат переходу завжди однозначно визначений. Такий підхід до моделювання не завжди є оптимальним у першу чергу через те, що зазвичай у нас немає можливості повного збору інформації щодо поточного стану системи. Саме тому виникає можливість використовувати модель Рандомної системи.

Основною її відмінністю від Детермінованої системи є те, що у Рандомній системі переходи між станами визначаються випадковим чином. Результати переходів або подій не можуть бути передбаченими з абсолютною впевненістю, оскільки вони залежать від випадкових факторів або ймовірностей. Таким чином, нам необхідно використовувати монади розподілення ймовірностей для визначення наступного стану системи.

Формально Рандомну систему можна визначити наступним чином. Нехай X, Y — довільні множини, а $f : X \rightarrow Y$ - функція, тоді

$$D_+X = \{p : X \rightarrow [0,1] \mid p(x) \neq 0 \text{ для кінцевої множини } x \text{ та } \sum_{x \in X} p(x) = 1\}$$

$$D_+f = \lambda p. \lambda y \sum_{x \in X} [f x = y] \cdot p(x) : D_+X \rightarrow D_+Y$$

Таким чином, D_+ можна називати Рандомною системою.

Для D_+ -системи A ми інтерпретуємо $(\delta Ax)(x')$ як ймовірність переходу $x \xrightarrow{A} x'$ для $x, x' \in \underline{A}$,

тобто

$$Pr\left(f x \xrightarrow{B} y\right) = \sum_{x' \in X} [f x' = y] \cdot Pr\left(x \xrightarrow{A} x'\right)$$

Для будь-яких $x \in A$ та $y \in B$.

Отже, у цьому підрозділі було показано, як за допомогою використання функтору Джирі на Коалгебри можна змоделювати роботу Рандомної системи.

5 Висновки

Робота над аналізом та специфікацією поведінки Кібрфізичної системи пов'язана з низкою проблем у першу чергу викликаних високими вимогами до безпеки (з точки зору безвідмовності) системи, що проектується. Через це, стандартні для розробки програмного забезпечення методи аналізу поведінки системи не завжди можуть бути оптимальними.

Через подібні обмеження бажано використовувати формальні методи моделювання системи з високим рівнем абстракції. Такий підхід забезпечить

1. Відсутність протиріч у вимогах, що зумовлено використання математичних моделей
2. Можливість розповсюдження отриманих знань про систему на увесь клас подібних систем

Класичним підходом до розв'язання задачі аналізу та специфікації поведінки системи є використання Коалгебри та Теорії категорій. Основною причиною цього вибору є високий рівень виразності та абстрактності, а також аналіз усього класу систем за допомогою Фінальної Коалгебри.

В статті були представлені підходи до моделювання основних моделей динамічних систем, а саме Детермінованої системи, Системи з переходами та Рандомної системи. Для кожної з них було представлено відповідну Коалгебру. Результати цього дослідження можуть бути корисними для розв'язання задачі моделювання динамічних систем, як основа для подальших досліджень.

ЛІТЕРАТУРА

1. Y. Liu, Y. Peng, B. Wang, S. Yao and Z. Liu, "Review on cyber-physical systems," in IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, vol. 4, no. 1, pp. 27-40, Jan. 2017, doi: 10.1109/JAS.2017.7510349. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7815549>
2. Rasim Alguliyev, Yadigar Imamverdiyev, Lyudmila Sukhostat, Cyber-physical systems and their security issues, Computers in Industry, Volume 100, Pages 212-223, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.compind.2018.04.017>. <https://sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0166361517304244>
3. Hasuo, I. Metamathematics for Systems Design. New Gener. Comput. 35, 271–305 (2017). <https://doi.org/10.1007/s00354-017-0023-1>. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00354-017-0023-1>
4. Georgios Bakirtzis, Cody H. Fleming, and Christina Vasilakopoulou. 2021. Categorical Semantics of Cyber-Physical Systems Theory. ACM Trans. Cyber-Phys. Syst. 5, 3, Article 32 (July 2021), 32 pages. <https://doi.org/10.1145/3461669>. <https://dl.acm.org/doi/abs/10.1145/3461669>
5. Benjamin Lion, Farhad Arbab, Carolyn Talcott, A formal framework for distributed cyber-physical systems, Journal of Logical and Algebraic Methods in Programming, Volume 128, 2022, 100795, <https://doi.org/10.1016/j.jlamp.2022.100795>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352220822000487>

REFERENCES

1. Y. Liu, Y. Peng, B. Wang, S. Yao and Z. Liu, "Review on cyber-physical systems," in IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, vol. 4, no. 1, pp. 27-40, Jan. 2017, doi: 10.1109/JAS.2017.7510349. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7815549>
2. Rasim Alguliyev, Yadigar Imamverdiyev, Lyudmila Sukhostat, Cyber-physical systems and their security issues, Computers in Industry, Volume 100, Pages 212-223, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.compind.2018.04.017>. <https://sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0166361517304244>

3. Hasuo, I. *Metamathematics for Systems Design*. *New Gener. Comput.* 35, 271–305 (2017).
<https://doi.org/10.1007/s00354-017-0023-1>.
<https://link.springer.com/article/10.1007/s00354-017-0023-1>
4. Georgios Bakirtzis, Cody H. Fleming, and Christina Vasilakopoulou. 2021. *Categorical Semantics of Cyber-Physical Systems Theory*. *ACM Trans. Cyber-Phys. Syst.* 5, 3, Article 32 (July 2021), 32 pages. <https://doi.org/10.1145/3461669>. <https://dl.acm.org/doi/abs/10.1145/3461669>
5. Benjamin Lion, Farhad Arbab, Carolyn Talcott, *A formal framework for distributed cyber-physical systems*, *Journal of Logical and Algebraic Methods in Programming*, Volume 128, 2022, 100795, <https://doi.org/10.1016/j.jlamp.2022.100795>.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352220822000487>

Panchenko Artem*PhD student**V. N. Karazin Kharkiv National University, 4 Svobody Sq., Kharkiv, 61022, Ukraine**e-mail: artem.panchenko@karazin.ua*<https://orcid.org/0000-0001-5865-6158>**Zholtkevych Hryhorii***Doctor of Engineering, Professor;**Head of School of Mathematics and Computer Sciences**V. N. Karazin Kharkiv National University, 4 Svobody Sq., Kharkiv, 61022, Ukraine**e-mail: g.zholtkevych@karazin.ua*<https://orcid.org/0000-0002-7515-2143>

The technique of modeling Cyberphysical systems using Coalgebra

Relevance. Presently, we observe a rapid pace of development in information technologies, the implementation of which results in a broad percentage of automation in manufacturing processes. In most cases, this goal can be achieved by integrating Cyber-Physical Systems (CPS) into production processes. The primary feature of such information systems is the integration of various sensors and actuators (the physical component of the system) into a computational system performing operational and control functions (the cybernetic component of the system). These systems require a high level of operational reliability, demanding careful analysis of the behavior specification of such systems to identify critical operational states from their designers.

Goal. This work explores the possibility of utilizing formal models to describe system behavior using Coalgebra. Such an approach provides the opportunity to more effectively avoid errors in analyzing the behavior of Cyber-Physical Systems during the design stage. This investigation demonstrates the methodology of modeling distributed types of dynamic systems using Coalgebra.

Research methods. The main types of dynamic systems in this study are abstracted into models based on Coalgebra.

The results. Approaches to modeling the most common types of dynamic systems, namely, Deterministic Systems, Transition Systems, and Stochastic Systems, have been developed. Models are constructed using category theory and Coalgebra, ensuring the necessary high level of abstraction. Such an approach enables working not with individual systems but with entire classes of similar systems.

Conclusions. The research results have demonstrated fundamental methods for creating models of basic dynamic systems using Coalgebra. The findings of this study can be beneficial for addressing the challenge of modeling dynamic systems as a basis for further research.

Keywords: *Cyber-Physical Systems, Coalgebra, Dynamic Systems Modeling, Category Theory, Final Coalgebra*