

Міністерство освіти і науки України

Харківський національний університет радіоелектроніки

ЄВСЄЄВ ВЛАДИСЛАВ В'ЯЧЕСЛАВОВИЧ

УДК 62.932:007.52

**МЕТОДИ ТА МОДЕЛІ КІБЕР-ФІЗИЧНОГО КЕРУВАННЯ
ПРОЦЕСАМИ В ОРГАНІЗАЦІЙНО-ТЕХНІЧНИХ
ВИРОБНИЧИХ ОБ'ЄКТАХ**

05.13.07 – автоматизація процесів керування

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня

доктора технічних наук

Харків 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Харківському національному університеті радіоелектроніки, Міністерство освіти і науки України.

- Науковий керівник: доктор технічних наук, професор,
заслужений діяч науки і техніки України
Невлюдов Ігор Шакирович,
Харківський національний університет радіоелектроніки,
завідувач кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій,
автоматизації та мехатроніки.
- Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор,
Поркуян Ольга Вікторівна,
Східноукраїнський національний університет
ім. Володимира Даля, ректор;
- доктор технічних наук, професор,
Осадчий Сергій Іванович,
Центральноукраїнський національний технічний
університет, завідувач кафедри автоматизації виробничих
процесів;
- доктор технічних наук, професор,
Кошовий Микола Дмитрович,
Харківський національний аерокосмічний університет
імені М. Є. Жуковського «ХАІ», професор кафедри
інтелектуальних вимірювальних систем та інженерії
якості

Захист відбудеться «29» квітня 2021 р. о 12.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.052.08 Харківського національного університету радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, просп. Науки, 14.

З дисертацією можна ознайомитися в науковій бібліотеці Харківського національного університету радіоелектроніки, за адресою: 61166, м. Харків, пр. Науки, 14 і на сайті спеціалізованої вченої ради Д 64.052.08 за посиланням: <https://nure.ua/branch/d-64-052-08>.

Автореферат розіслано «26» березня 2021 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

І.П. Плісс

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Нині, в умовах широкого застосування цифрових, мережових і інтелектуальних технологій, постійного розвитку інтегрованих виробничих інновацій, відбуваються основні та глибокі зміни в філософії розвитку сучасної промисловості, на базі концепції Industry 4.0. Такі зміни ставлять перед виробниками завдання автоматизації процесів керування виробничими процесами в режимі реального часу, що передбачає створення єдиного інформаційного простору підприємства, який зв'язує воєдино технологічний і бізнес рівні управління підприємством, вирішуючи при цьому безліч найважливіших для промислового підприємства завдань.

Кількість інформації, яку необхідно прийняти і оперативно обробити для формування ефективних керуючих впливів, у сучасних системах керування складними виробничими об'єктами настільки виросла, що набагато перевищує можливості існуючих автоматизованих систем управління, які нині переважно мають класичну 5-шарову архітектуру. Але у зв'язку з розвитком мережових технологій, архітектура управління видозмінюється, рівні управління об'єднуються, може відбуватися безпосередня передача інформації датчиків у хмарні сервіси, а служби планування виробництва опрацьовують необхідні дані в режимі реального часу.

У міру розгортання досліджень в галузі нових технологій організації виробництва стає очевидним, що мова йде не про якусь єдину, що претендує на загальнонаукове значення концепцію, а про новий напрямок дослідницької діяльності, формування нового підходу до об'єкту дослідження, якими і є кіберфізичні-виробничі системи (CPPS). Науково-технічні розробки в цій галузі ведуться в: США, Німеччині, Японії, Франції, Австралії, Китаї та ін., в рамках державних програм розвитку цифрового виробництва.

Істотний внесок у розвиток теоретичних і методологічних основ розробки кібер-фізичних виробничих систем внесли: Lee J., Bagheri B., Као Н., J. Jehn-Ruey, Rasman M., Pipan M., Šimic M., Roure D. De, Nicolescu R., Huth M.; Zhang H., Wagner T., Herrmann C., Thiede S.; Elhoone H., Zhang T., Anwar M., Edward R. та вітчизняні вчені: Жолткевич Г.М., Осадчий С.І., Хаустова В. Є., Лисенко В.П., Хаханов В. І., Крамарев Г. В., Варшавський О. Є., Васечко Д. Ю., Глазьев С. Ю., Жученко А.А., Сухарев О. С., Якубовський М. М, Ладанюк А. П., Невлюдов І. Ш. та інші.

Розробка і впровадження CPPS є індивідуальними завданнями для кожного підприємства, і, як результат, не існує єдиного підходу до процесів керування організаційно-технічними виробничими об'єктами. Проте, для керування процесами складних організаційно-технічних об'єктів необхідно забезпечити: єдиний інформаційний простір керування, реалізацію технології «Digital Twins», самоадаптацію, самодіагностику і самообслуговування. Таким чином, наявним є протиріччя між індивідуальним характером виробництва та необхідністю єдиного підходу до процесів керування організаційно-технічними виробничими об'єктами, що може бути розв'язане за рахунок розробки комплексу методів, моделей і технологій організації процесів керування організаційно-технічними виробничими об'єктами на

базі кібер-фізичних виробничих систем.

Для розв'язання указанного протиріччя, актуальним є вирішення наукової проблема розробки ефективної стратегії автоматизації процесів керування складними організаційно-технічними виробничими об'єктами, шляхом реалізації комплексу моделей, методів процесів керування і технології на базі кібер-фізичних систем.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки Харківського національного університету радіоелектроніки в рамках науково-дослідних робіт: «Теоретичні основи створення перспективних компонентів мікроелектромеханічних систем та технологій їх виробництва» (№ ДР 0108U002216); «Теоретичні основи мікроелектромеханічних систем, проектування та технології їх виробництва для гнучких інтегрованих систем» (№ ДР 0110U002594); «Створення експериментальних зразків компонентів мікросистемної техніки для виробництв з інтелектуальними властивостями і їх впровадження» (№ ДР 0113U0003582); «Створення мікрооптоелектромеханічних засобів для інтелектуальних технологічних систем промислового обладнання та робототехніки» (№ ДР 0115U002433), «Безскладальні гнучко-жорсткі конструкції зі змінною конфігурацією для компонентів мікросистемної техніки та міні-та мікророботів» (№ ДР 0117U002529), які виконувалися у відповідності з наказами Міністерства освіти і науки України за результатами конкурсного відбору проектів наукових досліджень. В рамках зазначених тем здобувачем, як виконавцем, було розроблено моделі, методи, технології і програмне забезпечення, які дозволяють підвищити ефективність виробничого процесу шляхом покращення продуктивності і ритмічності виробництва.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є підвищення ефективності виробничого процесу шляхом розробки методів, моделей і нової технології, алгоритмічного і програмного забезпечення для реалізації управління організаційно-технічними об'єктами на базі кібер-фізичних виробничих систем.

Для досягнення мети роботи необхідно вирішити такі завдання:

- провести аналіз сучасного стану існуючих проблем, концепцій, архітектури, методологій, моделей і методів процесів керування організаційно-технічними об'єктами на базі кібер-фізичних виробничих систем;
- розробити архітектурно-логічну модель представлення процесів керування складними організаційно-технічними виробничих об'єктах на базі CPPS, з урахуванням вимог висунутих технологіями «Digital Twins»;
- розробити методи прийняття рішень на кожному етапі архітектури і технології процесів управління розробкою CPPS;
- запропонувати технологію розробки кібер-фізичних виробничих систем;
- розробити метод синтезу алгоритмів функціонування CPPS і формалізації структурних системних моделей;
- розробити модель формалізації кібернетичної складової на базі параметрів і подій GUI (графічних інтерфейсів розробника), які реалізують НМІ (людино-машинний інтерфейс) системи керування організаційно-технічними об'єктами;
- розробити синтаксичну та семантичну моделі мови визначення і опису

параметрів, необхідних і достатніх для автоматизації процесів розробки CPPS;

– розробити програмне забезпечення для реалізації розроблених моделей і методів та провести експериментальні дослідження ефективності отриманих теоретичних результатів.

Об'єкт дослідження – процес кібер-фізичного керування складними організаційно-технічними виробничими об'єктами.

Предмет дослідження – закономірності, методи, моделі та технології кібер-фізичного керування організаційно-технічними виробничими об'єктами.

Методи дослідження. Під час проведення дисертаційних досліджень використовувалися: теорія мультисистем і моносистем та методи формалізованого представлення систем – для розробки архітектурно-логічної моделі декомпозиції та взаємопов'язаних методів кібер-фізичного керування процесами в складних організаційно-технічних об'єктах; методи теоретико-множинного представлення, методи структуризації та теорії графів – для визначення технології розробки кібер-фізичних виробничих систем; теорія апарату регулярних схем і алгоритмічних алгебр, інфологічна логіка предикатів та методи синтезу – для розробки метода представлення структурних системних моделей кібер-фізичного керування та методу синтезу блоків функціонування на кожному рівні архітектурно-логічної моделі; теорія системного аналізу, теорія множин, методологія візуального об'єктно-орієнтованого програмування (абстрагування, поліморфізм, інкапсуляція), методологія графічного представлення Константайна та методи організації і побудови графічного інтерфейсу користувача – для розробки моделі життєвого циклу керування організаційно-технічним об'єктом, моделі формалізації та структурного представлення кібернетичної складової організаційно-технічного об'єкта; синтаксична і семантична моделі мов моделювання – для розробки декларативної мови визначення і маніпулювання даними предметної області, близької до деякої підмножини природної мови; теорія розширеної форми Бекуса-Наура, теорії баз знань – для реалізації експериментальних досліджень.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Вперше запропоновано архітектурно-логічну модель декомпозиції кібер-фізичного керування процесами в складних організаційно-технічних об'єктах, яка на відміну від існуючих еталонних архітектурних моделей дає можливість представити керування процесом у вигляді єдиного інформаційного простору, який об'єднує в собі фізичні, кібернетичні і стратегічні складові;

2. Вперше запропоновано взаємопов'язані методи керування процесами у організаційно-технічних об'єктах, як логічно узгоджені послідовності прийняття рішень, які формуються на фізичному рівні за допомогою апаратних засобів, що дозволило реалізувати технологію «Digital Twins»;

3. Вперше запропоновано технологію розробки кібер-фізичних виробничих систем, яка дозволяє представити їх структуру як логічно пов'язану послідовність алгоритмів функціонування кожного рівня, що дає можливість реалізувати гнучкість процесу керування організаційно-технічним об'єктом;

4. Удосконалено метод представлення структурних системних моделей кібер-фізичного керування, що дозволило формалізувати алгоритми функціонування в системні моделі, який, на відмінну від існуючих, дає можливість побудови

структурних і подієвих моделей функціонування організаційно-технічного об'єкта;

5. Удосконалено метод синтезу алгоритмів функціонування кібер-фізичного керування, що дозволяє об'єднати алгоритмів функціонування кожного рівня керування організаційно-технічним об'єктом в єдину систему функціонування, який, на відміну від існуючих методів, дозволяє мінімізувати кількість операторів і спростити структуру системи функціонування організаційно-технічного об'єкта;

6. Удосконалено модель життєвого циклу керування організаційно-технічним об'єктом, що дає можливість автоматизувати процес керування кібернетичною складовою організаційно-технічного об'єкта, яка, на відмінну від існуючих, дозволила визначити послідовність виконання і взаємозв'язки процесів, дій і завдань, з урахуванням структури синтезованої системи функціонування організаційно-технічним об'єктом;

7. Вперше розроблено модель формалізації кібернетичної складової організаційно-технічного об'єкта, яка дозволяє представити людино-машинний інтерфейс НМІ у вигляді взаємопов'язаних багаторівневих графічних елементів, з урахуванням параметрів і подій, що дозволило автоматизувати реалізацію заданих функцій, відповідно до вимог, які висуваються до організаційно-технічного виробничого об'єкта;

8. Вперше запропоновано структурне представлення кібернетичної складової організаційно-технічного об'єкта у вигляді математичного опису зв'язків між основними елементами НМІ, що дозволило реалізувати представлення адитивного кібер-дизайну, за рахунок автоматизації процесу реалізації подій GUI елементів у вигляді фрагментів програмного коду;

9. Отримала подальший розвиток методологія сигнально-кодової конструкції, на базі якої запропонований метод графічного представлення конструкції кібернетичної складової організаційно-технічного об'єкта, який, на відміну від існуючих (методології Джексона, Гейн-Сарсон), дозволяє відображати взаємодію основних елементів НМІ для редукції розробки структури;

10. Вперше розроблено синтаксичну і семантичну моделі декларативної мови визначення і маніпулювання даними предметної області, близької до підмножини природної мови. Запропонована мова, яка на відміну від існуючих, не вимагає від розробника знання об'єктно-орієнтованих мов високого рівня програмування, на базі якої розробляється кібернетична складова, що істотно спрощує процес керування організаційно-технічним виробничим об'єктом.

Практична значення отриманих результатів. Практичне значення отриманих теоретичних результатів підтверджено актами впровадження та доводять коректність теоретичних положень дисертаційної роботи, високу якість розроблених моделей та методів. Результати дисертаційної роботи реалізовані у вигляді програмного забезпечення «Система розробки кібернетичної складової для автоматизації процесів керування організаційно-технічним виробничим об'єктом» та впроваджено: у виробничий процес АТ «Мотор Січ» (акт від 15.05.2019р.); ТОВ «Науково виробниче підприємство «УКРІНТЕХ»» (акт від 23.10.2019р.); в освітній процес Кременчуцького національного університету імені М. Остроградського (акт від 04.11.2020р.), Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна (акт від 29.10.2020р.); Національного університету «Запорізька політехніка» (акт від

23.01.2020р.).

Впровадження розроблених в дисертаційній роботі методів і моделей в модернізацію існуючих і розробку перспективних систем керування процесами в організаційно-технічних виробничих об'єктах дозволяє скоротити час запуску виробництва та підвищити його продуктивність та ритмічність.

Особистий внесок здобувача. Основні наукові результати, наведені у дисертаційній роботі, сформульовані і отримані здобувачем особисто. Наукові праці [1]–[5], [30] опубліковані без співавторів. Окремі етапи дослідження були виконані у співпраці. У публікаціях, написаних у співавторстві, внесок здобувача полягає у такому: [6] – розроблено модель та метод синтезу візуальних компонентів НМІ кібернетичної складової CPPS; [7] – запропоновано теоретичні основи побудови параметричної моделі декомпозиції мов високого рівня програмування для розробки адитивного кібер-дизайну; [8] – розроблено модель життєвого циклу «Jump»; [9] – проведена формалізація об'єктно-орієнтованих мов програмування на базі теорій формальних мов; [10, 24] – проведено дослідження моделей розрахунку вартості розробки ПП для корпоративних інформаційних систем технологічної підготовки виробництва; [11] – проведена оцінка доцільності застосування стандартів ISO/IES для вирішення завдань розробки НМІ для CPPS; [12] – проведено дослідження сумісності стандартів Industry 4.0 для розробки кібер-фізичних виробничих систем; [13] – розроблено метод низхідного синтаксичного аналізу з прогнозованим вибором альтернатив для контекстно-залежних граматик при розробці граматичних і автоматних моделей мовних процесорів; [14] – розроблена архітектурно-логічна модель процесу керування розробкою CPPS та методи декомпозиції; [15] – розроблено технологію процесу керування розробкою CPPS та дерева прийняття рішень на кожному етапі; [16] – розроблено системні моделі та метод синтезу елементів CPPS; [17] – розроблено синтаксичну діаграму мови моделювання адитивного кібер-дизайну; [18] – проведено оцінку адекватності моделі та методу розробки адитивного кібер-дизайну; [19] – удосконалена модель візуальної інформаційної структури НМІ; [20] – запропоновано інформаційну модель організаційно-технічних об'єктів; [21] – досліджено моделі: Waterfall, V-shaped, Prototype, Rapid, Incremental та Spiral з точки зору використання при розробці кібернетичної складової CPPS; [22] – розроблена інформаційна модель для автоматизації створення адитивного кібердизайну кібер-фізичних виробничих систем; [23] – запропоновано моделі автоматизації управління ТП на виробництві; [25] – запропоновано етапи керування складними організаційно-технічними виробничими об'єктами на виробництві; [26] – визначено показники допусків для автоматизованих систем неруйнівного контролю; [27] – удосконалено модель візуальної інформаційної структури проектування ТП; [28] – розраховано цільову функцію вибору модулів; [29] – запропоновано використання методів технологічних схем; [31] – розроблено метод керування.

Апробація результатів дисертації. Результати дисертаційної роботи апробовані на 23 міжнародних, наукових, науково-технічних, науково-практичних конференціях: 2-й, 4-й міжнародних конференціях «Manufacturing & Mechatronic Systems (M&MS)» (м. Харків, 2018, 2020р.) [32]–[33]; 23-й, 24-й, 25-й міжнародних

конференціях «CAD in Machinery Design. Implementation and Educational Issues (CADMD)» (м. Львів, 2015р., Vochnia, 2016р., Bielsko Biala, 2017р.) [32]–[36]; 11-й, 12-й, 14-й міжнародних науково-технічних конференціях «Фізичні процеси та поля технічних і біологічних об'єктів» (м. Кременчук, 2011р., 2012р., 2015р.) [37]–[39]; 4-й Міжнародній науково-технічній конференції «Информационные системы и технологии (ИСТ)» (м. Харків, 2015р.) [40]; Міжнародній науково-практичній конференції «Математическое моделирование процессов в экономике и управлении инновационными проектами (ММП)» (м. Харків, 2013р.) [41]; 23-й міжнародній конференції «Новые технологии в машиностроении» (м. Рибаче, 2013) [42]; 9-й міжнародній молодіжній науково-технічній конференції «Сучасні проблеми радіотехніки та телекомунікацій (РТ)» (м. Севастополь, 2013р.) [43]; 15-й, 16-й, 17-й, 24-й Міжнародному молодіжному форумі «Радіоелектроніка та молодь у ХХІ столітті» (м. Харків, 2011, 2012, 2013, 2020) [44]–[47]; 1-й Всеукраїнській науково-практичній конференції «Актуальні проблеми створення електронних засобів промислових автоматизованих систем» (м. Северодонецьк, 2011р.) [48]; IIth International scientific and practical conference «Development of scientific and practical approaches in the era of globalization» (Boston, USA, 2020р.) [49]; IVth International scientific and practical conference «Actual Trends of Modern Scientific Research» (Munich, Germany, 2020р.) [50]; III International scientific-practical conference «Theory, science and practice» (Tokyo, Japan, 2020р.) [51]; IVth International scientific and practical conference «Integration of scientific bases into practice» (Stockholm, Sweden, 2020р.) [52]; 7-й Міжнародній науково-технічній Internet-конференції «Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем керування організаційно-технічними та технологічними комплексами» (м. Київ, 2020р.) [53]; Xth International scientific and practical conference «Trends in the development of modern scientific thought» (Vancouver, Canada, 2020р.) [54].

Публікації. Результати дисертації опубліковані в 54 наукових роботах, серед них 22 наукові статті, що індексуються міжнародними наукометричними базами даних (Scopus, Cross Ref, EBSCO, Index Copernicus та іншими), з них: 18 у виданнях з технічних наук, включених до «Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукового ступеня доктора і кандидата наук», 1 – в журналі категорії А (Scopus та віднесена до третього квартиля (Q3) відповідно до класифікації Journal Citation Reports), 1 – у зарубіжному науковому періодичному виданні що індексуються у наукометричній базі даних Scopus, 2 – у наукових періодичних виданнях інших держав (з них 1 стаття у періодичному науковому виданні, що входять до Європейського Союзу), 5 – написані без співавторів; 9 свідоцтв про реєстрацію авторського права України на твір (з них 1 без співавторів); 23 тези доповідей у матеріалах міжнародних, наукових, науково-технічних та науково-практичних конференціях.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел і чотирьох додатків. Повний обсяг роботи складає 405 сторінок, що містять 13 таблиць, 105 рисунків (з них 4 таблиці та 7 рисунків на 13 окремих сторінках), 238 найменувань списку використаних джерел на 34 сторінках і 4 додатків на 26 сторінках.

ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету роботи, завдання досліджень, які вирішуються у дисертаційній роботі, а також викладено наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів. Наведено відомості про впровадження результатів роботи, апробацію та особистий внесок здобувача у публікаціях, структуру роботи.

У першому розділі дисертації визначені основні проблеми існуючих систем керування процесами у складних організаційно-технічних виробничих об'єктах, які пов'язані з недосконалістю моделей та методів керування кібер-фізичними виробничими системами, при використанні їх в умовах сучасного виробництва, в рамках концепції Industry 4.0. Проведено аналіз відомих архітектур моделей кібер-фізичних систем, які використовуються для автоматизації керування процесами у організаційно-технічних об'єктах, виявлено їх відмінності та недоліки, визначені невирішені питання для обґрунтування вибору напрямку дослідження. Сформульовано наукову проблему, мету та завдання дослідження.

У другому розділі наведено розроблену архітектурно-логічну модель представлення системи керування процесами у складних організаційно-технічних виробничих об'єктах, на базі CPPS, яка є складним n -рівневим об'єктом. Для цього проведено дослідження щодо визначення рівнів ієрархії, побудоване на базі методів декомпозиції і розбиття на складові компоненти за класифікаційними властивостями.

Грунтуючись на базі теорії великих систем, введемо такі поняття:

- атомарний елемент системи ($AEofS_i$) – неподільна елементарна частина системи, яка не складається з будь-яких частин, де $i=0\dots n$. Тобто атомарні елементи системи, які за своїми властивостями характеризують їх фізичну або інформаційну природу можуть бути як однаковими так і різними. Звідси можна записати умову, яка на самому нижньому елементарному рівні складатиметься з безлічі $AEofS_i$.

Цей нижній рівень визначимо як «рівень декомпозиції першого рівня» CPPS;

- група елементів ($G\{AEofS\}$) та $AEofS_i$ об'єднаних за принципом володіння однаковими властивостями на атомарному рівні. ($G\{AEofS\}$) дозволить представити CPPS через ($G\{AEofS\}$), а отже описати її у вигляді $CPPS \subset G\{AEofS\}_j$, де $j=1..m$, що відповідає другому рівню складності уявлення CPPS і визначається як «декомпозиція другого рівня»;

- підсистема (Sub_S) – це уявлення CPPS на базі об'єднаних ($G\{AEofS\}$) в групу за природними властивостями. Тоді уявлення CPPS, на базі (Sub_S), дасть можливість визначити «третій рівень декомпозиції»;

- мультисистема (MS'') – об'єднання (Sub_S) складних об'єктів, що мають свої властивості, яка дає можливість представити об'єкт як «четвертий рівень декомпозиції CPPS»;

- метасистема (MS') – об'єднання MS'' за властивостями, відповідно до вище описаної логіки.

При цьому необхідно врахувати, що процес керування процесами в сучасних організаційно-технічних виробничих об'єктах, на базі CPPS, може протікати як в

синхронному так і в асинхронному часовому режимі, що вимагає встановлювати жорстку послідовність виконання рішень, оскільки їх невиконання призведе до зміни ТП виробництва, зменшення ритмічності. Виходячи з цього визначено наступну послідовність етапів прийняття рішень: цільова; функціональна; організаційно-технічна; інфологічна; інформаційна; алгоритм функціонування.

У відповідності до розробленої архітектурно-логічної моделі керування процесами у складних організаційно-технічних виробничих об'єктах, наведеної на рис. 1., можна визначити, що на 5 рівні необхідно провести декомпозицію головної мети метосистеми MS'_0 на підцілі, які формують мету для кожної мультисистеми MS''_0 , за умови $MS'_0 \subset MS''_0$, що повністю відповідають головній меті розробки. Методика декомпозиції MS'_0 наступна:

- проводиться аналіз властивостей MS''_0 ;
- вивчаються і аналізуються зв'язки між рівнями системи MS''_0 ;
- досліджується можливість досягнення головної мети MS''_0 ;
- визначаються закономірності відносин між MS'_0 і MS''_0 ;
- аналітичним методом розраховуються якісні і кількісні показники вимог для кожної підцілі ($QandQIR_MS''_0$), при цьому вони можуть бути як поодинокі так і об'єднані в групи;
- розглядається можливість існування співвідношень в групах MS''_0 , які володіють своїми цілями. Дані співвідношення аналізуються і розраховується $QandQIR_MS''_0$;
- будується графова модель за принципом: вузли – це значення $QandQIR_MS''_0$ графа мети MS'_0 , а співвідношення – ребра графа;
- проводиться перевірка правильності побудови $QandQIR_MS''_0$ для MS''_0 і $QandQIR_MS'_0$ для MS'_0 , за допомогою розв'язання оберненої задачі суперпозиції параметрів;
- якщо в ході перевірки система параметрів підцілей MS''_0 складе кількісне значення параметрів головної мети MS'_0 , то можна вважати, що проектне рішення з декомпозиції головної мети MS'_0 розробки CPPS на цілі MS''_0 , є правильним.

У відповідності до розробленої архітектурно-логічної моделі керування процесами у складних організаційно-технічних виробничих об'єктах (рис. 1) запропоновано на першому етапі описати процес розробки фізичної складової CPPS.

Для цього розробляється комплекс завдань, за допомогою яких досягається головна мета CPPS, із використанням розробленого методу прийняття рішень на функціональному рівні:

- фіксується перший рівень декомпозиції на атомарному рівні ($AEofS$);
- проводяться дослідження галузі знань (засоби досягнення мети функціонування фізичної складової CPPS) на цьому рівні;
- визначаються завдання або група завдань для досягнення поставленої мети.

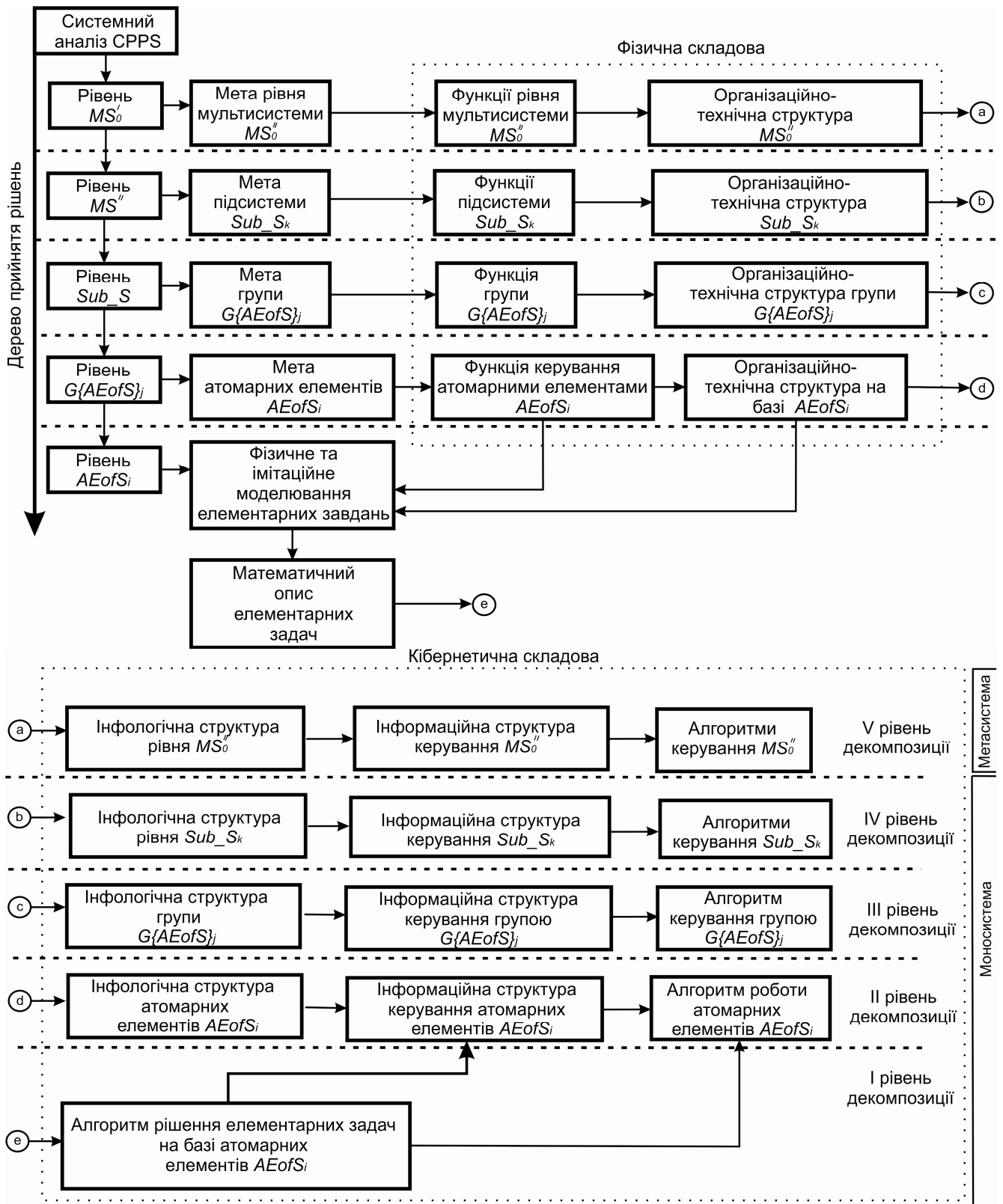


Рисунок 1 – Архітектурно-логічна модель керування процесами у складних організаційно-технічних виробничих об'єктах

Введемо Aim_i , як мету одного з рівнів декомпозиції CPPS. Тобто для кожної мети (Aim_i), для досягнення мети, розробляються завдання ($Task_j$), з урахуванням їх ефективності та запобігання надлишковості даних. Це можна представити у вигляді бінарних відношень $AT \subset \{Aim_i\} \times \{Task_j\}$:

$$Aim_i \cong Task_j \Leftrightarrow (Aim_i, Task_j) \in AT \quad (1)$$

У випадку існування декількох $Task_j$, для досягнення Aim_i , таку множину завдань (TA_i) можна представити:

$$TA_i = \{t \mid (Aim_i, t) \in AT\} \quad (2)$$

Для кожного кількісного параметра мети ($QandQIR$) обираються атомарні елементи ($AEofS$)_{*i*}, для яких розраховується технічні характеристики завдання ($PCofT$), які повинні повністю відповідати заданим Aim_i ;

– проводиться побудова системної графової функціональної моделі CPPS за наступними принципами: вузли графа розташовуються у відповідності послідовності розроблених завдань ($Task_j$), а зв'язком між $Task_j$ виступають Aim_i у вигляді ребер графа. У результаті цього отримується орієнтований функціональний граф ($FCofTask_j$) досягнення мети у вигляді завдань. Це дозволяє контролювати правильність ухвалення рішень на функціональному етапі заданого рівня декомпозиції;

– проводиться перевірка на функціональну повноту $Task_j$ для вирішення всіх поставлених Aim_i . Для цього порівнюються графи заданого рівня розробки і завдань цього рівня. Отже можна стверджувати, що граф мети для MS''_0 ($Aim_MS''_0$) є «батьківським» для графа завдань MS''_0 ($Task_MS''_0$), що доводить гомоморфізм графів $Aim_MS''_0$ і $Task_MS''_0$;

– параметрами $PCofI_MS''_0$ розмічається системний функціональний граф, що дозволить зробити системне моделювання декомпозиції $PCofI_MS''_0$ на відповідність технічним вимогам мети ($QandQIR_MS''_0$) за критеріями ефективності та специфічних параметрів даної MS''_0 . Якщо результати моделювання $PCofI_MS''_0$ повністю задовольняють заданим $QandQIR_MS''_0$ і головній меті MS''_0 , тоді можна вважати рішення на функціональному етапі системного рівня вірними.

На організаційно-технічному етапі розробки фізичної складової визначаються апаратні засоби, на базі яких вирішуються завдання, або комплекс завдань для досягнення головної мети. Позначимо на певному рівні декомпозиції ($Pattern_MS''_0$), для рівня MS''_0 . Уявімо структурний елемент $Pattern$ у вигляді абстрактного процесу, який призначений для функціонального рішення $Task$, або групи $Task_j$ функціонування CPPS на даному рівні декомпозиції. Це дозволяє створити комплекс технічних засобів (мехатронних пристроїв), на рівні фізичної складової, функціонально здатних вирішувати необхідні завдання (Aim_i). Для досягнення рішень на організаційно-технічному етапі розроблений наступний метод:

– проводиться дослідження $Task_j_MS''_0$ системного рівня розробки на предмет можливості бути реалізованим і досягти $Aim_i_MS''_0$, а також аналізуються зв'язки у $FCofTask_MS''_0$ на предмет «сильних» і «слабких» зв'язків;

– $Task_j_MS''_0$ групуються, на базі ознак «реалізованості» і «слабкості» зв'язків, з метою реалізації на своєму структурному елементі ($StrE_MS''_0$) даного рівня розробки об'єкта. Це дозволить знайти відповідності між $Task_j_MS''_0$ і $StrE_MS''_0$, на яких вона може бути реалізована. Далі, для досягнення необхідного рівня за специфічними особливостями (технічних даних) властивих $AEofS_i$ або $G\{AEofS\}_j$, проводиться структурно-функціональний синтез об'єкту. За результатами будеється

співвідношення:

$$Task_j_MS''_0 \cong Pattern_MS''_0 \quad (3)$$

– проводиться з'єднання $Pattern_MS''_0$ в систему, за допомогою ототожнення зв'язків між $Task_j_MS''_0$, як всередині $AEofS_i$ так і між ними. Існуючі зв'язки між $Task_j_MS''_0$ різних структурних елементів ($AEofS_i$) визначають зв'язки $Pattern_MS''_0$, у результаті чого отримується системна модель організаційно-технічної структури, яка відповідає заданому рівню процесу керування;

– аналізуються $PCofI_MS''_0$ (технічні характеристики), на рівні MS''_0 , які закріплені за кожним $StrE_MS''_0$. Результатами даного аналізу дозволяють розрахувати параметри технічних характеристик $Pattern_MS''_0$ структурних елементів, що реалізують Aim . Модель розрахунків параметрів для $PCofI_MS''_0$ і для будь-якого рівня визначаються закономірностям предметної області знань, аналогічно розраховуються параметри продуктивності, надійності, точності для кожного $Pattern$;

– проводиться моделювання $PCofI_MS''_0$ на відповідність $TrandTR_Aim_MS''_0$ та критеріям ефективності декомпозиції структурних елементів. Отриманий результат моделювання повинен показати відповідність продуктивності, точності, надійності елементів, що піддані декомпозиції: $StrE_MS''_0$ і $TrandTR_Aim_MS''_0$ і, як наслідок, можна зробити висновок, що прийняті рішення структурно-функціонального синтезу даного рівня декомпозиції відповідають технічному завданню (ТЗ) на CPPS.

Наступним кроком є розробка методів прийняття рішень на кібернетичній складовій. Зробимо припущення, що ці завдання мають вихідні ($InputIP_i$) і вихідні ($OutIP_j$) інформаційні параметри.

Розглядаючи завдання верхніх ієрархічних рівнів можна стверджувати, що це будуть тільки інформаційні потоки, а на нижніх рівнях – параметри матеріальних потоків атомарних елементів ($AEofS_i$) або групи атомарних елементів ($G\{AEofS\}_j$). Виходячи з особливостей розробки і функціонування CPPS для складних організаційно-технічних виробничих об'єктах розроблені наступні методи прийняття рішення:

– проводиться аналіз і дослідження $InputIP_i$ і $OutIP_j$ для кожної $Task_MS''_0$ системного рівня. Залежно від рівня MS''_0 параметри будуть носити «укрупнений» характер. Визначаються об'ємні і часові характеристики $InputIP_i$ і $OutIP_j$, а також об'ємні і часові характеристики $Pattern_MS''_0$. Відстежуються перетворення параметра $InputIP_i$ в $OutIP_j$, на базі рішення кожної $Task_j_MS''_0$. Обираються математичні моделі і методи перетворення інформаційних параметрів, властивих предметній області $Task_j$, які адекватно описують даний процес;

– кожен $AEofS_i$ представляється у вигляді інформаційного перетворювача (IC). Обирається і розраховується швидкодія, обсяги оброблюваної інформації, функціональна точність і необхідність перетворення інформації;

– проводиться об'єднання $InputIP_i$ всіх завдань, що вирішуються на одному $AEofS_i$, у вигляді вхідного інформаційного каналу ($InputCanal$), а $OutIP_j$ у вигляді вихідного інформаційного каналу ($OutCanal$) з $AEofS_i$;

– об'єднуючи $InputCanal$ і $OutCanal$ різних $AEofS_i$ за ознаками системного зв'язку отримуємо, що вихідні параметри $OutCanal_Task_j$ будуть служити

$InputCanal_{i+1}Task_j$, що дозволяє сформувати системну інфологічну модель CPPS;

– для перевірки правильності побудови системної інфологічної моделі проводиться аналіз параметричної сумісності всіх вихідних і вихідних параметрів $Task_j_G\{AEofS_i\}$, розв'язуваних на IC ;

– проводиться моделювання інфологічної моделі системного рівня за наступними мінімальним критеріям: продуктивність, точність, надійність, а також обов'язково на відповідність $TrandTR_Aim_i_G\{AEofS_i\}$. Якщо отримані результати повністю задовольняють головну мету і ТЗ, то всі прийняті рішення на інфологічному етапі є правильними. Це дозволяє перейти до реалізації інформаційних потоків на кожному рівні. На данному етапі запропоновано зробити декомпозицію методом «знизу-вгору», що обумовлено наступними завданнями:

– необхідно мати тактико-технічні характеристики кожного атомарного елемента системи ($PCofI_AEofS_i$), з точки зору його інформаційної складової, а також кількості $OutIP_j$, $InputIP_i$, $PCofI_OutIP_j$, $PCofI_InputIP_i$;

– алгоритми вирішення елементарних завдань базуються на всіх $AEofS_i$, які досягають $Aim_i_AEofS_i$ кожного атомарного елемента;

– інформація вхідних $InputCanal_AEofS_i$ і вихідних $OutCanal_AEofS_i$ каналів забезпечує зв'язки всередині групової $G\{AEofS_i\}$, що дозволяє досягти $Aim_i_G\{AEofS_i\}$ і т.д.

Виходячи з вищеперерахованих завдань, розроблено наступний метод прийняття рішень:

– проводиться аналіз $OutIP_j$, $InputIP_i$, $PCofI_OutIP_j$, $PCofI_InputIP_i$, для кожного $AEofS_i$;

– перевіряється і моделюється інформація вхідних $InputCanal_AEofS_i$ і вихідних $OutCanal_AEofS_i$ каналів $AEofS_i$;

– $AEofS_i$ об'єднуються у необхідну групу $G\{AEofS_i\}$ атомарних елементів $AEofS_i$, які відповідають $Task_j_G\{AEofS_i\}$ і дозволяють досягти $Aim_i_G\{AEofS_i\}$, а також перевіряється інформаційна сумісність $PCofI_G\{AEofS_i\}$ всередині кожної $G\{AEofS_i\}$;

– проводиться моделювання досягнення вирішення задач, або завдань для кожної $Aim_i_G\{AEofS_i\}$ і перевіряється досягнення правильності рішення, точності і швидкодії необхідних (Sub_S_k) на вході наступного рівня;

– за отриманими результатами моделювання приймається рішення про правильність побудови інформаційної структури рівня Sub_S_k ;

– використовуючи отримані результати синтезується послідовність інформаційних зв'язків елементів рівня Sub_S_k для досягнення вимог до вхідної інформації на рівень MS''_0 , яка є необхідною для досягнення $Aim_i_MS''_0$, $Task_j_MS''_0$ на даному рівні розробки;

– розробляються всі інформаційні зв'язки між елементами MS''_0 , які враховують всі канали зв'язків і їх технічні характеристики, що в сумі дає змогу досягти головної мети CPPS.

Позначимо під алгоритмом функціонування CPPS наступну послідовність виконання: $Task_j_MS''_0$ на $StrE_MS''_0$, з урахуванням $InputCanal_MS''_0$ і $OutCanal_MS''_0$, для виконання $Aim_i_MS''_0$ функціонування CPPS на даному рівні розробки. Представимо алгоритм функціонування у вигляді наступного виразу:

$$AF_MS''_0 = f(Task_j_MS''_0, StrE_MS''_0, InputCanal_MS''_0, OutCanal_MS''_0, t) \quad (4)$$

де $AF_MS''_0$ – алгоритм функціонування CPPS на рівні MS''_0 ; $Task_j_MS''_0$ – завдання на рівні MS''_0 ; $StrE_MS''_0$ – структурні елементи на рівні MS''_0 ; $InputCanal_MS''_0$ і $OutCanal_MS''_0$ – вхідні і вихідні системні канали рівня MS''_0 ; t – час.

На початковому етапі розробки $AF_MS''_0$ проводиться декомпозиція CPPS по:

- $Aim_i_MS''_0$ (цілі на рівні MS''_0);
- $PCofI_Aim_i_MS''_0$ (технічні характеристики цілі на рівні MS''_0);
- $Task_j_MS''_0$ (завдання на рівні MS''_0);
- $PCofI_Task_j_MS''_0$ (технічні характеристики завдань на рівні MS''_0);
- $StrE_MS''_0$ (структурні елементи рівня MS''_0);
- $PCofI_StrE_MS''_0$ (технічні характеристики елементів рівня MS''_0);
- $InputCanal_MS''_0$ і $OutCanal_MS''_0$ (вхідні та вихідні системні канали рівня MS''_0 і зв'язки між ними);
- $PCofI_InputCanal_MS''_0$ і $PCofI_OutCanal_MS''_0$ (технічні характеристики вихідних і вихідних каналів рівня MS''_0).

Розроблена наступна послідовність рішень:

- аналізується початковий стан MS''_0 , $StrE_MS''_0$, $InputCanal_MS''_0$, $OutCanal_MS''_0$, $PCofI_StrE_MS''_0$, $PCofI_InputCanal_MS''_0$, $OutCanal_MS''_0$ і визначається готовність до функціонування;
- для досягнення генеральної мети розробки CPPS аналізується $Aim_i_MS''_0$, $PCofI_Aim_i_MS''_0$ та їх взаємодія. На базі аналізу будується граф цільової моделі;
- для досягнення $Aim_i_MS''_0$ проводиться аналіз $Task_j_MS''_0$ і визначається послідовність;
- перевіряється сумісність $PCofI_Aim_i_MS''_0$ і $PCofI_StrE_MS''_0$ при послідовному їх проходженні по структурних елементах;
- аналізується і перевіряється сумісність $PCofI_InputCanal_MS''_0$ і $PCofI_OutCanal_MS''_0$ з $PCofI_StrE_MS''_0$;
- розробляється послідовність виконання $Task_j_MS''_0$ на базі $StrE_MS''_0$, з урахуванням $InputCanal_MS''_0$ і $OutCanal_MS''_0$ та просторових характеристик $PCofI_Task_j_MS''_0$, $PCofI_StrE_MS''_0$, $PCofI_InputCanal_MS''_0$ і $PCofI_OutCanal_MS''_0$;
- будується граф алгоритму функціонування рівня MS''_0 , де вузлами виступають $Task_j_MS''_0$. Зв'язком між $Task_j_MS''_0$ виступають $InputCanal_MS''_0$ та $OutCanal_MS''_0$, які будуть ребрами даного графа. Таким чином розробник отримує графову модель алгоритму функціонування CPPS рівня;
- за допомогою статичного моделювання, за критеріями ефективності CPPS рівня MS''_0 , проводиться аналіз графу алгоритму функціонування і перевіряється досягнення $Aim_i_MS''_0$.

Розроблений метод дає можливість комплексувати рішення за цільовою, функціональною, інформаційною, алгоритмічною сумісністю з метасистемою, яка представляє собою керування процесами у складних організаційно-технічних виробничих об'єктах на базі CPPS.

Розглядаючи CPPS, як складну багаторівневу метасистему, пропонується

використовувати вищепредставлені вербально-формульні описи для розробки рішень на алгоритмічному етапі для всіх рівнів декомпозиції і розглядати їх як певну кількість підсистем (Sub_S_k), за умови, що $MS''_0 \subset Sub_S_k$. Отже можна визначити, що прийняті рішення здійснюються за цільовою, функціональною, організаційно-технічною структурами на інфологічному і алгоритмічному етапах. Грунтуючись на (4) можна провести декомпозицію $Aim_i_MS''_0$ на підцілі $Aim_i_Sub_S_k$, з побудовою графа $Aim_i_MS''_0$ на алгоритмічному етапі. Для цього представимо $Aim_i_MS''_0$ як:

$$AF_Aim_i_MS''_0 = f(Aim_i_Sub_S_k, t) \quad (5)$$

де $AF_Aim_i_MS''_0$ – алгоритм функціонування досягнення мети на рівні MS''_0 ; $Aim_i_Sub_S_k$ – цілі на рівні підсистем Sub_S_k ; t – час.

Далі необхідно знати всі $PCofI_Aim_i_Sub_S_k$, розрахунок критеріїв ефективності кожної складової, надійність і результати системного моделювання всіх прийнятих рішень на кожному рівні. Так само можна уявити опис на функціональному етапі кожної підсистеми:

$$AF_Aim_i_Sub_S_k = f(Task_j_Sub_S_k, t) \quad (6)$$

де $AF_Aim_i_Sub_S_k$ – алгоритм функціонування досягнення мети підсистеми Sub_S_k ; $Task_j_Sub_S_k$ – завдання підсистеми Sub_S_k ; t – час.

Далі проводиться розрахунок основних критеріїв ефективності $PCofI_Aim_i_Sub_S_k$ за розробленим алгоритмічним описом і на функціональному етапі, за допомогою моделювання, доводиться правильність прийнятих рішень, які відповідають головній меті CPPS. На організаційно-технічному етапі визначаються структурні елементи підсистеми ($Pattern_Sub_S_k$), аналізуються і розраховуються $PCofI_Pattern_Sub_S_k$, та на їх базі будується структурна модель системи підсистем:

$$AF_Patten_Sub_S_k = f(Patten_Sub_S_k, t) \quad (7)$$

де $AF_Pattern_Sub_S_k$ – алгоритм функціонування моделі підсистеми рівня Sub_S_k ; $Pattern_Sub_S_k$ – організаційно-технічна структура рівня Sub_S_k ; t – час.

На базі (7) проводиться системне моделювання правильності прийнятих рішень, які показують досягнення необхідних цілей MS''_0 , за допомогою сукупності Sub_S_k , на базі їх $PCofI_Pattern_Sub_S_k$, з урахуванням $PCofI_InputCanal_Sub_S_k$, $PCofI_OutCanal_Sub_S_k$.

Для забезпечення кібернетичної складової CPPS, пропонується наступний метод прийняття рішень на інфологічному етапі:

– аналізуються і визначаються підсистемні канали $InputCanal_Sub_S_k$ та $OutCanal_Sub_S_k$;

– виділяються і аналізуються необхідні $PCofI_InputCanal_Sub_S_k$, $PCofI_OutCanal_Sub_S_k$;

– перевіряються $PCofI_InputCanal_G\{AEofS\}_j$ і $PCofI_OutCanal_G\{AEofS\}_j$ кожної групи;

– будується інфологічна модель системи на базі:

$$AF_InputCanal_Sub_S_k = f(InputCanal_G\{AEofS\}_j, PCofI_InputCanal_G\{AEofS\}_j, t) \quad (8)$$

$$AF_OutCanal_Sub_S_k = f(OutCanal_G\{AEofS\}_j, PCofI_OutCanal_G\{AEofS\}_j, t) \quad (9)$$

де $AF_InputCanal_Sub_S_k$ – алгоритм функціонування $InputCanal$ підсистеми рівня Sub_S_k ; $InputCanal_G\{AEofS\}_j$ – вхідний канал $G\{AEofS\}_j$ з притаманними йому каналами рівня атомарних елементів $G\{AEofS\}_j$; $PCofI_InputCanal_G\{AEofS\}_j$ – технічні характеристики вхідного каналу групи атомарних елементів $G\{AEofS\}_j$; $AF_OutCanal_Sub_S_k$ – алгоритм функціонування $OutCanal$ підсистеми рівня Sub_S_k ; $OutCanal_G\{AEofS\}_j$ – вихідний канал $G\{AEofS\}_j$ з притаманними йому каналами рівня атомарних елементів $G\{AEofS\}_j$; $PCofI_OutCanal_G\{AEofS\}_j$ – технічні характеристики вихідного каналу групи атомарних елементів $G\{AEofS\}_j$; t – час.

Після побудови інфологічної моделі розраховується критерій ефективності підсистеми каналів і проводиться моделювання правильності побудови інфологічної структури рівня Sub_S_k . Будується алгоритм функціонування на підсистемному рівні MS''_0 :

$$AF_MS''_0 = f(Aim_i_Sub_S_k, StrE_Sub_S_k, OutCanal_Sub_S_k, InputCanal_Sub_S_k, t) \quad (10)$$

де $AF_MS''_0$ – алгоритм функціонування підсистеми рівня MS''_0 ; $Aim_i_Sub_S_k$ – досягнення мети підсистеми рівня Sub_S_k ; $StrE_Sub_S_k$ – вхідні канали рівня Sub_S_k ; $OutCanal_Sub_S_k$ – вихідні канали рівня Sub_S_k ; $InputCanal_Sub_S_k$ – вхідні канали рівня Sub_S_k ; t – час.

Після побудови $AF_MS''_0$ проводиться дослідження з виявлення досягнення $Aim_i_MS''_0$, шляхом моделювання за просторово-тимчасовими характеристиками і критеріями ефективності при навантаженні.

На підсистемному рівні декомпозиції, за запропонованими рішеннями (1–10), проводиться комплексування в єдину систему по всім рівням, з урахуванням технічних характеристик їх підсистемних рівнів, які повинні відповідати технічним умовам мети та завданню даного рівня.

Визначимо технологію розробки CPPS для керування процесами у складних організаційно-технічних виробничих об'єктах, як логічно пов'язану послідовність прийняття рішень, на основі методів декомпозиції, відповідну дереву і етапам розробки (рис. 2).

В основі запропонованої технології лежить принцип «зверху-вниз» і «зліва-направо». Грунтуючись на даному припущенні визначено п'ятирівневу ієрархію CPPS, яка ґрунтується на критеріях головної мети і вимогах ТЗ. Виділяючи необхідний рівень ієрархії процесу управління розробкою проводиться декомпозиція метасистеми MS'_0 на мультисистеми MS''_0 і фіксується цей рівень. Після виділення рівня декомпозиції розробки MS'_0 , проводиться декомпозиція MS'_0 на $Aim_i_MS''_0$, на базі головної мети ТЗ. Наступним кроком є виявлення і обґрунтування всіх $PCofI_MS''_0$, на базі яких здійснюється побудова цільової моделі

MS'_0 . Далі, за допомогою статичного або динамічного моделювання, проводиться перевірка правильності й оцінка ефективності прийняття рішень, яке повинно показати досягнення головної мети розробки MS'_0 .

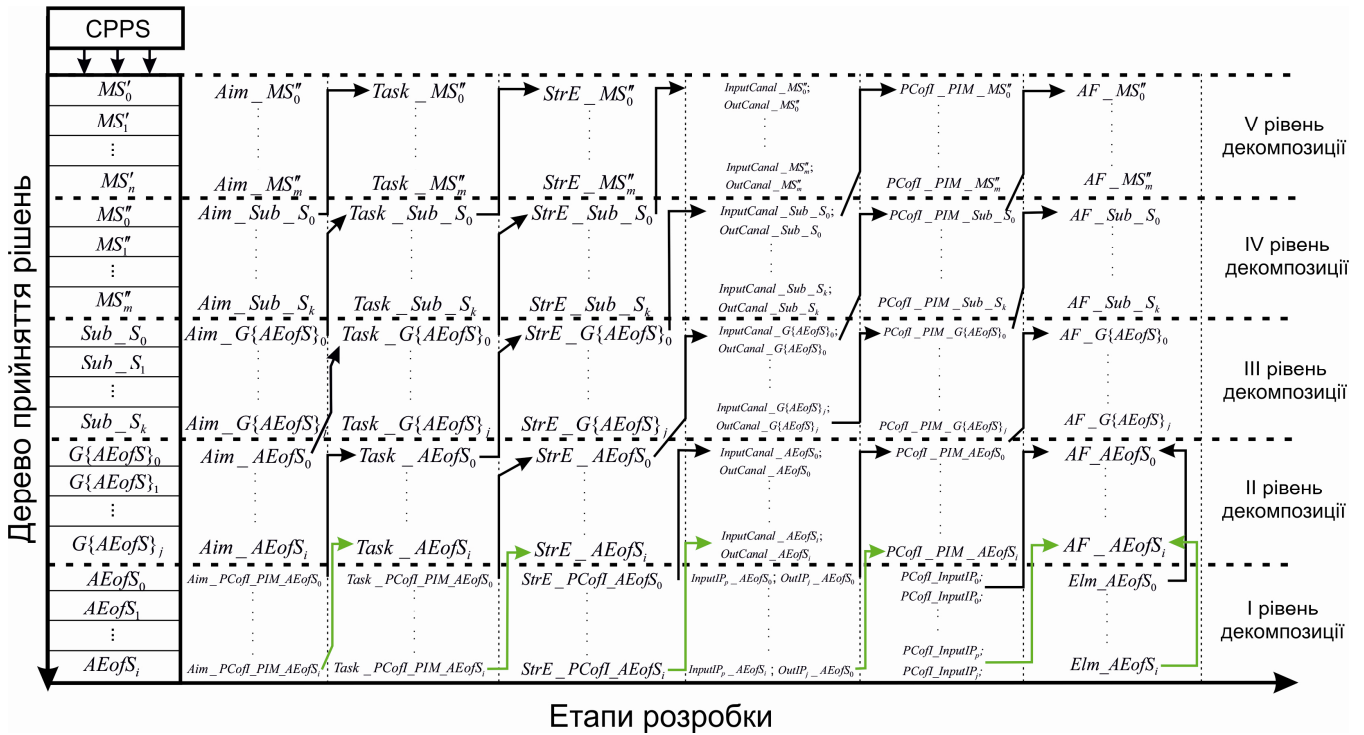


Рисунок 2 – Технологія процесу керування розробкою CPPS

На цьому етапі знаходиться відповідність для кожної підцілі ($Aim_i MS''_0$) свого завдання ($Task_j MS''_0$), або групи завдань. Для кожного завдання $Task_j MS''_0$ розробляються $PCofl_Task_j MS''_0$, на базі яких будується функціональна модель досягнення $Aim_i MS''_0$. Методом системного моделювання на $Task_j MS''_0$ проводиться моделювання $PCofl_Task_j MS''_0$ функціональних елементів MS''_0 , які піддавались декомпозиції. Якщо результати моделювання відповідають головній меті MS'_0 , то можна вважати, що рішення, на функціональному етапі декомпозиції завдань і технічних характеристик, розроблені вірно.

На організаційно-технічному етапі розробляються структурні елементи системного рівня $StrE_MS''_0$, проводяться дослідження і вибір їх $PCofl_StrE_MS''_0$, в залежності від вимог $PCofl_Task_j MS''_0$. Будується системна структурна модель CPPS рівня MS''_0 і для досягнення $Aim_i MS''_0$ проводиться статичне моделювання $PCofl_StrE_MS''_0$. Якщо результати моделювання задовольняють $PCofl_StrE_MS''_0$ і $Aim_i MS''_0$ – можна вважати, що рішення на даному рівні відповідають головній меті розробки CPPS і вимогам ТЗ. Далі проводиться аналіз $StrE_MS''_0$ і визначаються $InputIP_i$ і $OutIP_j$ для кожного структурного елемента, що вимагає дослідження інфологічних перетворювачів параметрів $IC_MS''_0$ та системних каналів зв'язку між $InputCanal_MS''_0$ і $OutCanal_MS''_0$, в тому числі $PCofl_IC_MS''_0$, $PCofl_InputCanal_MS''_0$, $PCofl_OutCanal_MS''_0$. На базі проведеного аналізу будується інфологічна модель CPPS системного рівня MS''_0 і проводиться статичне моделювання на відповідність $PCofl_IC_MS''_0$, $PCofl_InputCanal_MS''_0$, $PCofl_OutCanal_MS''_0$ і $Aim_i MS''_0$. При відповідності $PCofl_IC_MS''_0$, $PCofl_InputCanal_MS''_0$ та $PCofl_OutCanal_MS''_0$ головній меті розробки MS'_0 , можна вважати, що прийняті рішення на даному етапі задовольняють ТЗ на CPPS.

Ґрунтуючись на отриманих результатах можна приступити до розробки інформаційної структури обраного рівня. Для цього на базі результатів статичного моделювання $PCofI_InputIP_i_MS''_0$, $PCofI_OutIP_i_MS''_0$, $InputCanal_MS''_0$, $OutCanal_MS''_0$, проводиться розробка технічних характеристик фізико-інформаційної моделі даного рівня декомпозиції ($PCofI_PIM_MS''_0$). На її базі синтезуються послідовності інформаційних потоків, параметрів і зв'язків. Для перевірки досягнення головної мети розробки MS'_0 і вимог ТЗ проводиться імітаційне моделювання під навантаженням.

З аналізу $PCofI_PIM_MS''_0$ і ґрунтуючись на (4) проводиться розробка алгоритму функціонування рівня $AF_MS''_0$. Для цього розробляються оператори (Op_h) алгоритму функціонування CPPS на даному рівні декомпозиції, проводиться розрахунок їх тактико-технічних і інформаційних характеристик $PCofI_PIM_Op_h_MS''_0$ системного рівня $AF_MS''_0$ кожного $Op_h_MS''_0$. За отриманими результатами будується алгоритм функціонування рівня $AF_MS''_0$. Це відбувається аналогічно на всіх рівнях розробленої технології процесу керування розробкою CPPS.

У третьому розділі розроблено метод представлення алгоритмів функціонування CPPS у системній моделі. Логічно, що для кожного CPPS і його складових частин, зв'язки і властивості між ними різні і верифікуються закономірностями тієї предметної області, до яких відносяться процеси, що відбуваються всередині. Отже, часткові методи визначення складових частин CPPS (вид, зв'язки, властивості, і т.д.) будуть визначені предметною областю знань, але при цьому метод декомпозиції для всіх буде один.

Визначимо системну модель, як графічне представлення, в якому вузли – об'єкти, відповідні етапам і рівням розробки CPPS, а ребра – канали зв'язків між ними. Логічно, що для досягнення головної мети розробки CPPS необхідно досягти всі підцілі на всіх рівнях декомпозиції, тому для спрощення запису визначимо через предикат Ω – умову досягнення всіх цілей нижнього рівня $Aim_j_MS''_0$, необхідних і достатніх для досягнення цілей рівня $Aim_i_MS'_0$:

$$Aim_i_MS'_0 \Rightarrow \Omega(Aim_j_MS''_0), \quad (11)$$

де $Aim_i_MS'_0$ – головна мета розробки CPPS у відповідності з ТЗ; $Aim_j_MS''_0$ – цілі на рівні декомпозиції MS''_0 .

Ґрунтуючись на (11) можна провести декомпозицію мети $Aim_j_MS''_0$ на підцілі рівня $Sub_S_k_MS''_0$ у вигляді (12).

$$Aim_j_MS''_0 \Rightarrow \Omega_m(Aim_m_Sub_S_k_MS''_0) \quad (12)$$

де $Aim_m_Sub_S_k_MS''_0$ – цілі на рівні декомпозиції $Sub_S_k_MS''_0$.

Проведемо декомпозиції мети розробки по всьому дереву:

$$Aim_m_Sub_S_k_MS''_0 \Rightarrow \Omega(Aim_l_G\{AEofS\}_p_MS''_0) \quad (13)$$

де $Aim_l_G\{AEofS\}_p_MS''_0$ – мета для групи атомарних елементів $G\{AEofS\}_p_MS''_0$.

$$Aim_l_G\{AEofS\}_p_MS''_0 \Rightarrow \Omega_s(Aim_s_AEofS_t_MS''_0) \quad (14)$$

де $Aim_s_AEofS_t_MS''_0$ – мета атомарного елемента $AEofS_t$.

Аналізуючи (11)–(14) виявлено, що головна мета розробки CPPS, є наслідком досягнення цілей на кожному рівні декомпозиції кожного етапу, а отже можна стверджувати існування «спадковості» (\rightarrow) цілей за принципом декомпозиції «зверху-вниз» (15):

$$\begin{aligned} Aim_i_MS'_0 &\rightarrow Aim_j_MS''_0 \rightarrow Aim_j_Sub_S_k_MS''_0 \rightarrow \\ &\rightarrow Aim_i_G\{AEOF\}_p_MS'' \rightarrow Aim_s_AEOF\}_i_MS''_0 \end{aligned} \quad (15)$$

Ґрунтуючись на (15), можна уявити граф досягнення головної мети розробки CPPS, з урахуванням його багаторівневості, що дозволяє враховувати вплив досягнення цілей одна на одну всередині одного рівня декомпозиції.

Аналогічно можна побудувати граф функціонального рівня. Для цього розробляється комплекс завдань ($Task_j$) для рівня MS'_0

$$Aim_i_MS'_0 \Rightarrow \Omega(Task_j_MS''_0) \quad (16)$$

де $Aim_i_MS'_0$ – головна мета розробки CPPS; $Task_j_MS''_0$ – завдання рівня MS''_0 для досягнення $Aim_i_MS'_0$.

Якщо вузлами графа на кожному рівні декомпозиції буде $Task$, а ребрами графа зв'язок (\rightarrow) між завданнями для досягнення головної $Task_j$ на цьому рівні, тоді необхідно провести фіксацію зв'язків між завданнями за допомогою лічильника задач:

$$\begin{aligned} Task_j &\rightarrow Task_{j+1}; Task_j \rightarrow Task_{j+2}; \\ Task_{j+1} &\rightarrow Task_{j+3}; Task_{j+n-1} \rightarrow Task_{j+n} \end{aligned} \quad (17)$$

Запропонована «спадковість» дозволяє отримати підграфову модель уявлення $Task_j$. Базуючись на підграфовій моделі представлення $Task_j$ можна провести декомпозицію наступного підрівня $Sub_S_k_MS''_0$. Логічно, що для даного підрівня тотожний запис:

$$Task_j_MS''_0 \Rightarrow \Omega(Task_m_Sub_S_k_MS''_0) \quad (18)$$

де $Task_m_Sub_S_k_MS''_0$ – завдання на функціональному етапі рівня Sub_S_k .

Підставивши підграф (12) в математичне уявлення (18) можна отримати граф декомпозиції головного завдання рівня MS'_0 до рівня Sub_S_k .

Аналогічно (16) та (18) можна вивести вирази для всіх рівнів декомпозиції на функціональному етапі:

– для $Task_m_Sub_S_k_MS''_0$:

$$Task_m_Sub_S_k_MS''_0 \Rightarrow \Omega_i(Task_i_G\{AEOF\}_p_MS''_0) \quad (19)$$

– для $Task_i_G\{AEOF\}_p_MS''_0$:

$$Task_i_G\{AEOF\}_p_MS''_0 \Rightarrow \Omega_s(Task_s_AEOF\}_i_MS''_0) \quad (20)$$

Аналогічно розробляються системні функціональні моделі на всіх рівнях декомпозиції, а ребра – зв'язки між ними.

Метод побудови системної організаційно-технічної моделі буде аналогічним функціональній моделі і будується у вигляді графа, в якому вузлом виступатиме

$StrE_q$, а ребрами – «спадковість» зв'язків у вигляді:

$$\begin{aligned} StrE_q &\rightarrow StrE_{q+1}; StrE_q \rightarrow StrE_{q+2}; \\ StrE_{q+1} &\rightarrow StrE_{q+3}; StrE_{q+n-1} \rightarrow StrE_{q+n} \end{aligned} \quad (21)$$

Для опису системної інфологічної моделі приймемо вузли графа у вигляді IC_v , а в якості ребер графа виступатимуть $InputCanal$ і $OutCanal$ зв'язків. Грунтуючись на розробленому методі побудови системної моделі Aim_i , опишемо системну інфологічну модель рівня MS''_0 :

$$\begin{aligned} I^{MS} _ MS'_0 &\Rightarrow \Omega(IC_v _ MS''_0, \\ &InputCanal _ IC_v _ MS''_0, OutCanal _ IC_v _ MS''_0) \end{aligned} \quad (22)$$

де $I^{MS} _ MS'_0$ – інфологічна модель системи рівня MS''_0 ; $IC_v _ MS''_0$ – інформаційний перетворювач на рівні MS''_0 ; $InputCanal _ IC_v _ MS''_0$ – вхідні канали на рівні MS''_0 ; $OutCanal _ IC_v _ MS''_0$ – вихідні канали на рівні MS''_0 .

Аналогічно (22) можна уявити системну модель інфологічного етапу за наступними підсистемними рівнями:

– системна модель на рівні $I^{MS} _ MS''_0$:

$$\begin{aligned} I^{MS} _ MS''_0 &\Rightarrow \Omega(IC_v _ Sub _ S_k, \\ &InputCanal _ IC_v _ Sub _ S_k, OutCanal _ IC_v _ Sub _ S_k) \end{aligned} \quad (23)$$

– системна модель на рівні $I^{MS} _ Sub _ S_k$:

$$\begin{aligned} I^{MS} _ Sub _ S_k &\Rightarrow \Omega(IC_v _ G\{AEofS\}_p, \\ &InputCanal _ IC_v _ G\{AEofS\}_p, OutCanal _ IC_v _ G\{AEofS\}_p) \end{aligned} \quad (24)$$

– системна модель на рівні $I^{MS} _ G\{AEofS\}_p$:

$$\begin{aligned} I^{MS} _ G\{AEofS\}_p &\Rightarrow \Omega(IC_v _ AEofS_t, \\ &InputCanal _ IC_v _ AEofS_t, OutCanal _ IC_v _ AEofS_t) \end{aligned} \quad (25)$$

– системна модель на рівні $I^{MS} _ AEofS_t$:

$$I^{MS} _ AEofS_t \Rightarrow \Omega(AEofS_t (InputIP_{p,q} _ AEofS_t, OutIP_{q,p} _ AEofS_t)). \quad (26)$$

Таким чином, для аналізу правильності вибору інформаційного перетворювача, в залежності від каналів зв'язків, за (22)–(26) можна отримати набір інфологічних системних моделей на будь-якому рівні представлення «верхнього» рівня через «нижній».

Результати, отримані на інфологічному етапі, дозволяють приступити до реалізації системних моделей інформаційного етапу за наступними підсистемними рівнями:

– системна модель рівня $PCofI _ PIM _ MS''_0$:

$$PCofI_PIM_MS''_0 \Rightarrow \Omega(I^{MS}_Sub_S_k_MS''_0, PCofI_PIM_Sub_S_k) \quad (27)$$

– системна модель рівня $PCofI_PIM_Sub_S_k$:

$$\begin{aligned} PCofI_PIM_Sub_S_k &\Rightarrow \Omega(I^{MS}_G\{AEofE\}_p_MS''_0, \\ PCofI_PIM_G\{AEofE\}_p) & \end{aligned} \quad (28)$$

– системна модель рівня $PCofI_PIM_G\{AEofE\}_p$:

$$\begin{aligned} PCofI_PIM_G\{AEofE\}_p &\Rightarrow \\ \Rightarrow \Omega(I^{MS}_AEofS_t_MS''_0, PCofI_PIM_AEofS_t) & \end{aligned} \quad (29)$$

– системна модель рівня $PCofI_PIM_AEofS_t$:

$$\begin{aligned} PCofI_PIM_AEofS_t &\Rightarrow \\ \Rightarrow \Omega(PCofI_InputIP_p_AEofS_t, PCofI_OutIP_q_AEofS_t) & \end{aligned} \quad (30)$$

Для опису системної інформаційної моделі прийmemo $PCofI_PIM$ у вигляді вузла даного рівня, а ребрами виступатимуть технічні характеристики інформаційних зв'язків ($PCofI_InputIP_p$, $PCofI_OutIP_q$). При цьому потрібно дотримуватися умови існування бінарних співвідношень:

$$PCofI_PIM_AEofS_0 \cong PCofI_PIM_AEofS_t \quad (31)$$

Останнім етапом, відповідно до запропонованої архітектурно-логічної моделі автоматизації процесу управління розробкою складних CPPS (рис. 1), є розробка алгоритму функціонування (AF) на кожному рівні декомпозиції CPPS. Для його побудови пропонується використовувати принцип граф-схем із-за зручності їх подання. Етапи розробки алгоритму:

– проводиться аналіз Aim_i , $Task_j$, $InputCanal$, $OutCanal$ системного рівня розробки;

– відповідно для кожної $Task_j$ обираємо Op_h (оператор) граф-схеми алгоритму, на базі запропонованих методів в другому розділі. Позначимо, що першим завданням рівня $Task_0_MS''_0$ буде Op_0 , отже для наступного рівня декомпозиції $Task_0_MS''_0$ буде $Task_1_MS''_0$ а йому буде відповідати Op_1 . Аналогічно для $Task_j_MS''_0$ оператором буде Op_h ;

– проводиться аналіз послідовності виконання $Task_j_MS''_0$ для даного рівня, де досягається $Aim_i_MS''_0$, або є необхідним для досягнення головної мети розробки CPPS;

– проводиться розстановка Op_h за логічною послідовністю виконання $Task_j_MS''_0$. Введемо поняття умовного і безумовного переходу від $Task_j_MS''_0$ до $Task_{j+1}_MS''_0$ якщо перехід без умови, то Op_h з'єднується \rightarrow , якщо Op_h має зв'язок з іншими операторами Op_{h+1} , то необхідно вести поняття умовного оператора логічних умов (CO_l), який працює за аналогією з блоком «умови» базової теорії побудови алгоритмів. На базі даного припущення AF може враховувати не тільки «лінійний вид», а й реалізовувати «диз'юнктивний перехід», «цикли» і «умови

переходу» для досягнення $Task_j$.

– AF розробляється на кожному рівні системного уявлення і об'єднується в $AF_MS'_0$, який досягає головну мету розробки CPPS. На базі розробленого $AF_MS'_0$, за допомогою імітаційного моделювання під навантаженням, проводиться перевірка для підтвердження правильності прийнятих рішень.

Для формалізації системних моделей було запропоновано використовувати математичний апарат регулярних схем алгоритму і алгоритмічних алгебр. Грунтуючись на теорії апарату регулярних схем і алгоритмічних алгебр, введемо такі позначення:

$$OA_q = (Op_h, CO_l, H, \emptyset, true, false, x) \quad (32)$$

OA_q – алгебра операторів, елементами алгебри операторів є Op_h , а також для зручності подання ведемо додаткові операції, що не є операторами перетворення інформації: H – тотожний оператор, \emptyset – порожній оператор;

OP_r – алгебра умов включає в себе всі логічні умови CO_l , які можуть набувати наступних значень $true, false$ або CO_l^x $x = [true, false, b, c, y, \dots, r]$.

Для зручності маніпулювання OA_q (в рамках алгоритмічних алгебр) необхідно визначити основні типи операцій:

Визначення 1. Множення операторів – строго послідовне виконання операторів в порядку їх черги.

$$OA = OA_i \cdot_{CO_l} (OA_k \vee OA_n) \cdot OA_m \quad (33)$$

де $OA_i = Op_i, \dots, Op_j$; $OA_k = Op_k (Op_l \vee Op_m)$; $OA_n = Op_n \{Op_p\} Op_i$;

$OA_m = Op_m, \dots, Op_s$; CO_l – логічні умови;

Визначення 2. Додавання операторів – це умовне розгалуження простих, або вкладених одна в одну операцій (\tilde{Op}_h).

$$OA_q = \tilde{Op}_1 \cdot \tilde{Op}_2 \cdot \dots \cdot \tilde{Op}_h \quad (34)$$

$$OA_{q-1} = (\tilde{Op}_1 \vee_{CO_1} (\tilde{Op}_2 \vee_{CO_2} (\tilde{Op}_3 \vee_{CO_3} \dots \vee_{CO_l} (\tilde{Op}_h \vee e)))) \quad (35)$$

Визначення 3. Процес складання в системні моделі – це дотримання умовного розгалуження і з'єднання шляхів алгоритму, залежно від CO_l .

$$OA_q = (Op_{h-1} \vee_{CO_l} Op_h) \quad (36)$$

Визначення 4. Ітераційний процес складання – це правила запису і читання послідовних і концентрично вкладених циклів. Грунтуючись на даному визначенні представимо існуючі типи циклів:

– проста послідовність циклів:

$$CY = CY_1 \cdot CY_2 \cdot \dots \cdot CY_n \quad (37)$$

де $CY_n = \{Op_h\}_{CO_i}$;

– концентричне вкладених циклів:

$$CY_n = \{ \{ \{ \dots \{Op_1\}_{CO_1} Op_2 \}_{CO_2} Op_3 \}_{CO_3} \dots Op_h \}_{CO_i} \quad (38)$$

– окремий випадок циклу CY_n з поверненням до оператора Op_h при виконанні умови CO_i :

$$CY_n = \{Op_{h-2} \dots Op_{h-1}\}_{CO_i} Op_h \quad (39)$$

Грунтуючись на (1)–(4) можна подати такі описи ітеративних шляхів:

– виконання інтерактивного шляху: за умови $CO_{l-1} = false$, до закриття фігурної дужки і повторення, потім повернення до перевірки $CO_l = true$, тоді дія алгоритму переносяться за дужку, що закривається до наступного за ним оператора.

$$CY_{n-3} = \{Op_1 \dots Op_{h-1}\}_{CO_{l-1}} Op_h \quad (40)$$

– виконання інтерактивного шляху за умови $CO_{l-1} = false$, повернення до скобки, що відкривається і повторення. За умови $CO_l = true$ дія переноситься за дужку, що закривається.

$$CY_{n-m} = \{Op_1 \dots Op_{h-1}\}_{CO_{l-1}} Op_h \quad (41)$$

Умова CO_l , яка представлена знизу дужок, визначає перевірку за параметром (*false*, *true*) і в залежності від заданого параметра відбувається умовний перехід. Умова CO_{l-1} , представлена зверху дужок, показує те місце куди треба повернутися при *false* і продовжити дію алгоритму. Запропонований опис алгоритмів дозволяє представити клас послідовних алгоритмів будь-якої складності перетинання циклів.

Визначення 5. Кон'юнкція алгоритму – це безумовне розгалуження з виконання декількох паралельних шляхів алгоритму.

$$OA_q = [Op_{h-2} \wedge Op_{h-1} \wedge Op_h] \quad (42)$$

Введемо припущення, що дії операторів алгоритму, що знаходяться в квадратних дужках, починаються паралельно – переносяться за дужки. Після виконання алгоритму, за допомогою одного з шляхів, здійснюється перехід до виконання оператора, що стоїть за дужками. Для коректності цього запису необхідно дотримуватись рівності всіх шляхів, тому визначимо через P – довжину шляху (кількість операторів) на даній гілці алгоритму функціонування.

$$POp_{h-2} = POp_{h-1} = POp_h \quad (43)$$

Для визначення розгалуження алгоритму запропоновано наступний метод запису: CO_l^x вказується внизу відкритої квадратної дужки, що означає перевірку умови і початок паралельної роботи алгоритму при x , а зверху над дужкою, що закриває, вказується умова виходу CO_{l-1}^x з алгоритму.

При виконанні паралельних алгоритмів необхідно врахувати параметр x при CO_l , який повинен визначатися розмірністю умов і завжди повинен бути визначений

для кожної конкретної умови $x = [true, false, b, c, y, \dots, r]$, виконання умов b, c, r , що задовольняють вимогам умов виходу CO_{l-1} , тоді можна вважати що паралельний алгоритм виконав свою функцію.

$$OA_q = [\underset{CO_l^x}{Op_{h-4}} \wedge \dots \wedge Op_{h-1} \wedge Op_h \wedge Op_{l-1}^{CO_l^x}] \quad (44)$$

Аналогічно можливе існування CO_l^x при $x = [true, false, b, c, y, \dots, r]$ для операції ітераційного процесу складання алгоритмів. Для зручності запису системної моделі пропонуються наступні правила синтаксису:

- умова перевірки CO_l записується знизу закритої фігурної дужки;
- визначимо наступний запис у вигляді визначення верхніх індексів для фігурних дужок $CO_l^{true, false, b, c, y, \dots, r}$ і розставимо в тих місцях, куди повертається дія алгоритму, залежно від умови значень $x = [true, false, b, c, y, \dots, r]$.

$$OA_q = \{ \underset{CO_l^b}{Op_{h-4}} \{ \underset{CO_{l-2}^{true}}{Op_{h-3}} \{ \underset{CO_{l-3}^y}{Op_{h-2}} \cdot Op_{h-1} \} \} \}_{CO_l} \quad (45)$$

На базі розробленої мови формалізації системних моделей, проводиться алгебраїчний опис всіх операторів і умов їх взаємодії у вигляді алгоритма функціонування (AF) на всіх етапах і рівнях декомпозиції CPPS.

Визначення 6. Об'єднання алгоритмів функціонування – якщо набір Op_h і CO_l для виконання частних алгоритмів є загальними, отже їх можна об'єднати за CO_l .

$$AF = (\underset{OC_l}{AF_r \vee AF_m}) \quad (46)$$

за умови, що $CO_l = (true, false)$

$$AF_r + AF_m = (\underset{OC_l}{AF_r \vee AF_m}) = \begin{cases} AF_r & \text{при } CO_l = true \\ AF_m & \text{при } CO_l = false \end{cases} \quad (47)$$

Визначення 7. Декомпозиція алгоритмів функціонування – це розділення алгоритму на прості алгоритми без втрати тотожності умов його роботи. Приклад декомпозиції алгоритму функціонування (48) представлений у (49) :

$$AF_i = (\underset{OC_{l-2}}{AF_j \vee (\underset{OC_{l-1}}{AF_m \vee AF_n}) }) \cdot (\underset{OC_l}{AF_p \vee AF_g}) \quad (48)$$

$$AF_i = \begin{cases} AF_1 = \underset{OC_l}{AF_j} (\underset{OC_l}{AF_p \vee AF_g}) \text{ при } OC_{l-2} = true \\ AF_2 = (\underset{OC_{l-1}}{AF_m \vee AF_n}) (\underset{OC_l}{AF_p \vee AF_g}) \text{ при } OC_{l-2} = false \end{cases} \quad (49)$$

Для вирішення питань об'єднання (склеювання) різних алгоритмів, пропонується модифікувати апарат регулярних схем системних моделей. Для цього введемо такі поняття:

- шлях – це фрагмент AF_i , який містить певну послідовність Op_h , тоді шляхом алгоритму буде $Op_{h-1} \rightarrow Op_h$. Звідси, шлях алгоритму є простим, якщо не має разгалужень і складним, коли має місце ітераційний процес (визначення 4) та

кон'юнкцію (визначення 5) і т.д.

– довжина шляху – часова характеристика алгоритму, яка служить для доказу тотожності алгоритму при структурній мінімізації за однаковими шляхами. Позначимо частковий алгоритм або шлях алгоритму як $\vec{A}F_i$.

$$\vec{A}F_i = \vec{A}F_1 \cdot \vec{A}F_2 \cdot \vec{A}F_3 \cdot \dots \cdot \vec{A}F_{i-1} \quad (50)$$

Для об'єднання вихідних алгоритмів, необхідно провести його декомпозицію у відповідності до (визначення 7) і визначити прості шляхи. Проводиться аналіз Op_h і OC_i по кожному \rightarrow вихідних AF_i , з метою визначення однакових. Виходячи з цього опису приймемо такі припущення щодо еквівалентності алгоритмів: два будь-яких алгоритми $\vec{A}F_i$ і $\vec{A}F_{i-1}$ будуть тотожно еквівалентні, якщо вони складаються з однакових \rightarrow , довжин шляху, Op_h і CO_l в \rightarrow будуть рівнозначні, CO_l – ідентичні.

Четвертий розділ дисертаційної роботи присвячений розробці методів та моделей автоматизації створення кібернетичної складової для керування процесами у складних організаційно-технічних виробничих об'єктах на базі кібер-фізичних виробничих систем. В рамках даних досліджень формалізуємо процес розробки кібернетичної складової (\aleph), як наступний кортеж:

$$\aleph = \langle P(\aleph, \mathfrak{R}, H), K, L \rangle \quad (51)$$

де $P(\aleph, \mathfrak{R}, H)$ – сукупність правил і структурування даних про об'єкт моделювання; P – об'єкт моделювання (множина НМІ форм); \aleph – множина базових понять (концепцій уявлення) об'єкта моделювання; \mathfrak{R} – множина відносин між базовими поняттями моделі; H – множина функцій описів і трактування базових понять і відносин; K – множина вимог обмеження цілісності; L – мова представлення моделювання даними.

Для опису сукупності правил і структурування даних P , розроблений словник опису і трактування базових понять H , який складений для множини базових понять \aleph . Уявімо множини \aleph як набір базових понять в такому вигляді:

$$\begin{aligned} \aleph = \{ & Form, ParameterForm, ValueForm, EventForm, \\ & LinguisticVariable, ElementForm, ParameterElement, \\ & ValueElement, EventElement, ContainerSolutions \} \end{aligned} \quad (52)$$

Наведемо опис основних базових понять:

Form (Windows Form) – деяка виділена і унікально ідентифікована частина предметної області. Її призначення – опис і подання візуальної структури кібернетичної складової у вигляді основних блоків;

ParameterForm – сукупність типів і способів опису властивостей предметної області, виділених і згрупованих за деякими ознаками, а також ідентифікованих за ім'ям. Призначення – опис параметрів, необхідних і достатніх для відображення і моделювання візуального представлення *Form*;

ValueForm – значення, яке присвоюють типу і способу опису властивостей предметної області. Призначення – присвоєння конкретного значення (цілочисельного, лінгвістичного, булевого) типу або способу опису параметрів,

залежно від функціональних ознак і допустимих рішень;

EventForm – подія або група подій (дія), які можуть відбуватися (вже відбулися або відбудуться) з предметною областю в певний момент або інтервал часу. Ідентифікується часом (необхідністю) і об'єктом, до якого належить подія. З одним об'єктом в один момент часу може відбуватися тільки одна подія, яка попередньо ініціалізується користувачем. Необхідні для опису призначення допустимого набору подій (умов CO_i), що задані в алгоритмі функціонування кожного етапу і рівня, залежно від вимог до кібернетичної складової;

LinguisticVariable («Лінгвістична змінна») – іменованій (природною мовою системи) логічний опис дій при виникненні подій. Такі описи можуть бути згруповані за рядом ознак. Призначення – присвоєння класу події або одиничній події лінгвістичної інтуїтивно-зрозумілої користувачеві моделі змінної для опису реакцій при виникненні тієї чи іншої події;

ElementForm – елемент або група елементів GUI (підклас об'єкта) для візуального представлення взаємодії користувача і модельованого функціоналу кібернетичної складової. Призначення – графічне відображення елементів або групи елементів, які можуть мати деревоподібну структуру візуального представлення і використовуватись для взаємодії з користувачем кібернетичної складової;

ParameterElement – типи і способи опису властивості елементів, поодинокі або згруповані за деякими ознаками і ідентифіковані ім'ям. Призначення – опис параметрів, необхідних і достатніх для подання та моделювання візуального представлення елемента в рамках єдиного інформаційного об'єкта;

ValueElement – значення, що присвоюється типу і способу опису властивостей GUI елемента. Призначення – присвоюється конкретного значення (цілочисельного, лінгвістичного, булевого) типу або способу опису параметрів, в залежності від функціональних ознак і реалізації візуального інтерфейсу. Для деяких *ParameterForm* і *ParameterElement* при їх функціональному призначенні і поіменній ідентифікації, значення можуть бути однаковими, що залежить від вимог до кібернетичної складової;

EventElement – подія, група подій або умова (CO_i), які можуть відбуватися (вже відбулися або відбудуться) з елементом GUI, який виконує певну функцію в певний момент або інтервал часу. Ідентифікується часом (необхідністю) та елементом до якого належить подія. З одним об'єктом в один момент часу може відбуватися тільки одна подія, що ініціалізується користувачем. Призначення – одна з основних властивостей елемента, яке обмежено: функціональними можливостями цього GUI елемента, областю застосування, необхідністю і роллю в загальній концепції застосування;

ContainerSolutions («Контейнер рішень») – іменованій опис реакцій при виникненні події або групи подій в певний момент часу на елемент (групу елементів) або предметну область. Є жорстко структурованим, залежно від мови високого рівня програмування і середовища розробки, і є необхідний для досягнення мети розробки. Застосування – часткове або повне рішення виконання необхідних дій з даними, які необхідні для досягнення мети розробки CPPS.

\mathcal{R} – множина відносин між базовими поняттями моделі, що формально

представляють класифікацію відносин визначення типу взаємодії між об'єктами предметної області та їх елементами. Визначимо в даній системі такі види відносин: «об'єкт–об'єкт», «елемент–об'єкт», «елемент–елемент», «об'єкт–елемент», за допомогою яких можна зробити класифікацію елементів предметної області. При цьому утворюються класи подій, встановлюються правила відносин між усіма учасниками процесу взаємодії з кібернетичною складовою та використанням *LinguisticVariable* і *ContainerSolutions*, як невід'ємної частини множини \mathfrak{R} і існуючих в будь-якому вигляді відносин визначених вище.

Припустимо, що будь-який P (кібернетична складова) володіє одним (обов'язковим) або набором *Form*. Для зручності побудови моделі розділимо цю множину на дві підмножини: «*master*» і «*slave*». «*Master*» будемо називати $Form_n^{master}$, а «підлеглий» $Form_n^{slave}$ (відповідно $Form_{n+1}^{slave}$, де $n = \overline{1, i}$). Виходячи з цього, за умови, що $n \neq 0$, можна представити у вигляді такого записи:

$$Form_1^{master} = \{Form_1^{slave}, \dots, Form_{n-1}^{slave}, Form_n^{slave}\} \quad (53)$$

Введемо наступні ознаки відносин типу взаємодії (\mathfrak{R}) між базовими поняттями такими як: "включає", "є елемент", "є параметр", "є подія", "є значення", "є ім'я", "є рішення":

– "включає":

$$[(Form_1^{slave}, Form_2^{slave}, \dots, Form_n^{slave}) \in Form_1^{master}] \in P \quad (54)$$

– "є елемент":

$$\exists (ElementForm_1^1, ElementForm_2^1, \dots, ElementForm_i^1) \in Form_1^{master} \quad (55)$$

– "є параметр" для $Form_1^{master}$ і $Form_n^{slave}$:

$$\begin{aligned} ((parameter_1, \dots, parameter_p) \in ParameterForm_z^1) \in Form_1^{master} &\equiv \\ \equiv ((parameter_1, \dots, parameter_p) \in ParameterForm_z^1) \in Form_2^{slave} &\end{aligned} \quad (56)$$

– "є подія" для $Form_n^{master}$ і $Form_n^{slave}$:

$$\begin{aligned} ((event_1, \dots, event_e) \in EventForm_c^1) \in Form_1^{master} &\equiv \\ \equiv ((event_1, \dots, event_e) \in EventForm_c^2) \in Form_2^{slave} &\end{aligned} \quad (57)$$

– "є значення":

$$\exists (ValueForm_1, ValueForm_2, \dots, ValueForm_u) \in parameter_p \quad (58)$$

– "є ім'я":

$$\exists! LinguisticVariable_w \in LinguisticVariable \forall event_e \in EventForm_c \quad (59)$$

– "є рішення":

$$\begin{aligned} \exists! ContainerSolutions_d \in ContainerSloution = \\ LinguisticVariable_w \in LinguisticVariable &\end{aligned} \quad (60)$$

\mathfrak{H} – множина функцій описів і трактування базових понять і відносин \mathfrak{R} , що визначає правила подання і опису структури даних предметної області моделювання кібернетичної складової. В рамках даних досліджень визначимо:

– "є значення":

$$\begin{aligned} f : Form_n^{master} \times ParameterForm_z &\rightarrow ValueForm_u \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow Form_n^{master} \times ParameterForm_z &\xrightarrow{f} ValueForm_u \end{aligned} \quad (61)$$

де для будь-якої впорядкованої пари $(Form_n^{master}, parameter_p)$ із $Form_n^{master} \times ParameterForm_z$ існує не більше одного елемента $value_v$ з $ValueForm_u$, який є $(Form_n^{master}, parameter_p, value_v) \in f$.

- "є подія" ґрунтується на структурі запису (61):

$$name_m = f(Form_n^{master}, event_e) \quad (62)$$

де $Form_n^{master} \in Form$; $event_e \in EventForm_t$; $name_m \in ValueElement_y$;

- "має рішення" для $EventForm_c$:

$$cod_l = f(event_e, name_m) \quad (63)$$

де $event_e \in EventForm_c$; $name_m \in LinguisticVariable_w$; $cod_l \in ContainerSolutions_d$.

K – множина вимог щодо обмеження цілісності. Це деяка логічна умова, що обмежує семантику обраного об'єкта або елемента, для уникнення втрати відносин всередині кібернетичної складової. В рамках даного дослідження запропоновано два типи обмежень цілісності: явні (накладаються семантикою) і неявні (накладаються для підтримки і досягнення головної мети розробки CPPS)

L – мова представлення даних, що дозволяє непідготовленому фахівцю правильно і повно описати всі необхідні дані, для адекватного представлення моделі і вхідної інформації для неї.

Представим кібернетичну складову (P) як:

$$[(Form_1^{slave}, Form_2^{slave}, \dots, Form_n^{slave}) \in Form_1^{master}] \in P; \quad (64)$$

де $Form_1^{master}, Form_n^{slave}$ – *Windows Form*.

$$(Form_1PE, CF_1) \in Form_1^{master}; \quad (65)$$

де $Form_1PE$ – множина характеристик представлення та подій $Form_1^{master}$; CF_1 – множина GUI елементів що знаходяться на $Form_1^{master}$.

$$\begin{aligned} Form_1PE \subseteq & ((mp_1^1, \dots, mp_x^1) \in MP_1 \cap (pp_1^1, \dots, pp_a^1) \in PP_1) \wedge; \\ & \wedge ((me_1^1, \dots, me_h^1) \in ME_1 \cap (ea_1^1, \dots, ea_z^1) \in EA_1) \end{aligned} \quad (66)$$

де $(mp_1^n, \dots, mp_x^n) \in MP_n$ – множина параметрів *ParameterForm*; $(pp_1^n, \dots, pp_a^n) \in PP_n$ – множина значень *ValueForm* та *ValueElement*; $(me_1^n, \dots, me_h^n) \in ME_n$ – множина подій *EventForm*; $(ea_1^n, \dots, ea_z^n) \in EA_n$ – множина *LinguisticVariable*.

$$\begin{aligned} CF_1 \subseteq & [((pc_1^1, \dots, pc_m^1) \in PC_1^1 \cap (pp_1^1, \dots, pp_a^1) \in PP_1^1) \wedge; \\ & \wedge ((ce_1^1, \dots, ce_w^1) \in CE_1^1) \cap (ea_1^1, \dots, ea_z^1) \in EA_1^1] \end{aligned} \quad (67)$$

$(pc_1^x, pc_2^x, \dots, pc_m^x) \in PC_y^x$ – множина параметрів *ParameterElement*;

$(ce_1^z, ce_2^z, \dots, ce_w^z) \in CE_z^x$ – множина параметрів *EventElement*;

Для визначення зв'язків введемо Ξ – як умову взаємодії між множинами $Form_n$. Надалі будемо розглядати такий запис $Form_1^{master} \xrightarrow{\Xi} Form_n^{slave}$, як взаємодію (передача даних, виклик і т.д.) $Form_1^{master}$ через подію me_h^n , або ce_w^n , що належать будь-якому GUI елементу приналежного $Form_1^{master}$ на $Form_n^{slave}$.

Структурне подання кібернетичної складової (P) та зв'язків між $Form$ представлено на рисунку 3.

Спираючись на запропоновані рішення, в рамках даних досліджень, визначимо наступну форму запису для множин $(Form_n PE, CF_n) \in Form_n$ і призначення кожної з її підмножин:

- математичний опис множини $Form_n PE$:

$$\begin{aligned}
 Form_n PE \in & \underbrace{((mp_1^n, mp_2^n, \dots, mp_x^n) \in MP_n)}_{\text{Множина параметрів}} \xrightarrow{\zeta_p} \underbrace{((pp_1^n, pp_2^n, \dots, pp_a^n) \in PP_n)}_{\text{Множина значень}} \wedge \\
 & \underbrace{((me_1^n, me_2^n, \dots, me_h^n) \in ME_n)}_{\text{Множина подій}} \xrightarrow{\zeta_p} \underbrace{((ea_1^n, ea_2^n, \dots, ea_z^n) \in EA_n)}_{\text{Множина "лінгвістичних імен"}} \xrightarrow{\varphi_e} \\
 & \xrightarrow{\varphi_e} \underbrace{((z_1^o, z_2^o, \dots, z_q^o) \in Z_o)}_{\text{Множина "контейнерів рішень"}}.
 \end{aligned} \tag{68}$$

- математичний опис множини CF_n :

$$\begin{aligned}
 CF_n \in & \underbrace{(CD_x^n)}_{\text{елемент}} \in \underbrace{[(pc_1^x, pc_2^x, \dots, pc_m^x) \in PC_y^x]}_{\text{Множина параметрів елемента}} \xrightarrow{\varepsilon_v} \underbrace{((pp_1^x, pp_2^x, \dots, pp_a^x) \in PP_t^x)}_{\text{Множина значень}} \wedge \\
 & \underbrace{((ce_1^z, ce_2^z, \dots, ce_w^z) \in CE_z^x)}_{\text{Множина подій}} \xrightarrow{\varepsilon_v} \underbrace{((ea_1^p, ea_2^p, \dots, ea_z^p) \in EA_p^x)}_{\text{Множина "лінгвістичних імен"}} \xrightarrow{\varphi_e} \\
 & \xrightarrow{\varphi_e} \underbrace{((z_1^o, z_2^o, \dots, z_q^o) \in Z_o)}_{\text{Множина "контейнерів рішень"}}.
 \end{aligned} \tag{69}$$

Визначимо ζ_p як відповідність між множинами MP_n , а PP_n як довільну підмножину добутків $MP_n \times PP_n$, тобто $\zeta_p \subseteq MP_n \times PP_n$. Зауважимо, що ця відповідність складається з упорядкованих пар.

Кожна пара $(mp_x^n, pp_a^n) \in \zeta_p$ показує, що параметру $mp_x^n \in MP_n$ відповідає значенню $pp_a^n \in PP_n$, теж саме дійсне для опису ε_v .

Використання даного рішення дозволяє реалізувати зв'язок між елементами:

$$\begin{aligned}
 \varepsilon = & \{(pc_1^n, pp_1^n), (pc_1^n, pp_2^n), (pc_2^n, pp_a^n), (pc_m^n, pp_2^n), \\
 & (ce_1^n, ea_1^n), (ce_1^n, ea_2^n), (ce_2^n, ea_z^n), (ce_w^n, ea_z^n)\}
 \end{aligned} \tag{70}$$

за умови, що всі властивості ζ , які приведені вище зберігаються для ε . В наслідок цієї взаємодії безлічі $(ce_1^n, \dots, ce_w^n) \in CE_n$ за допомогою лінгвістичного «імені» $(ea_1^n, \dots, ea_z^n) \in EA_n$ і безлічі $(z_1^o, z_2^o, \dots, z_q^o) \in Z_o$ «Container Solution».

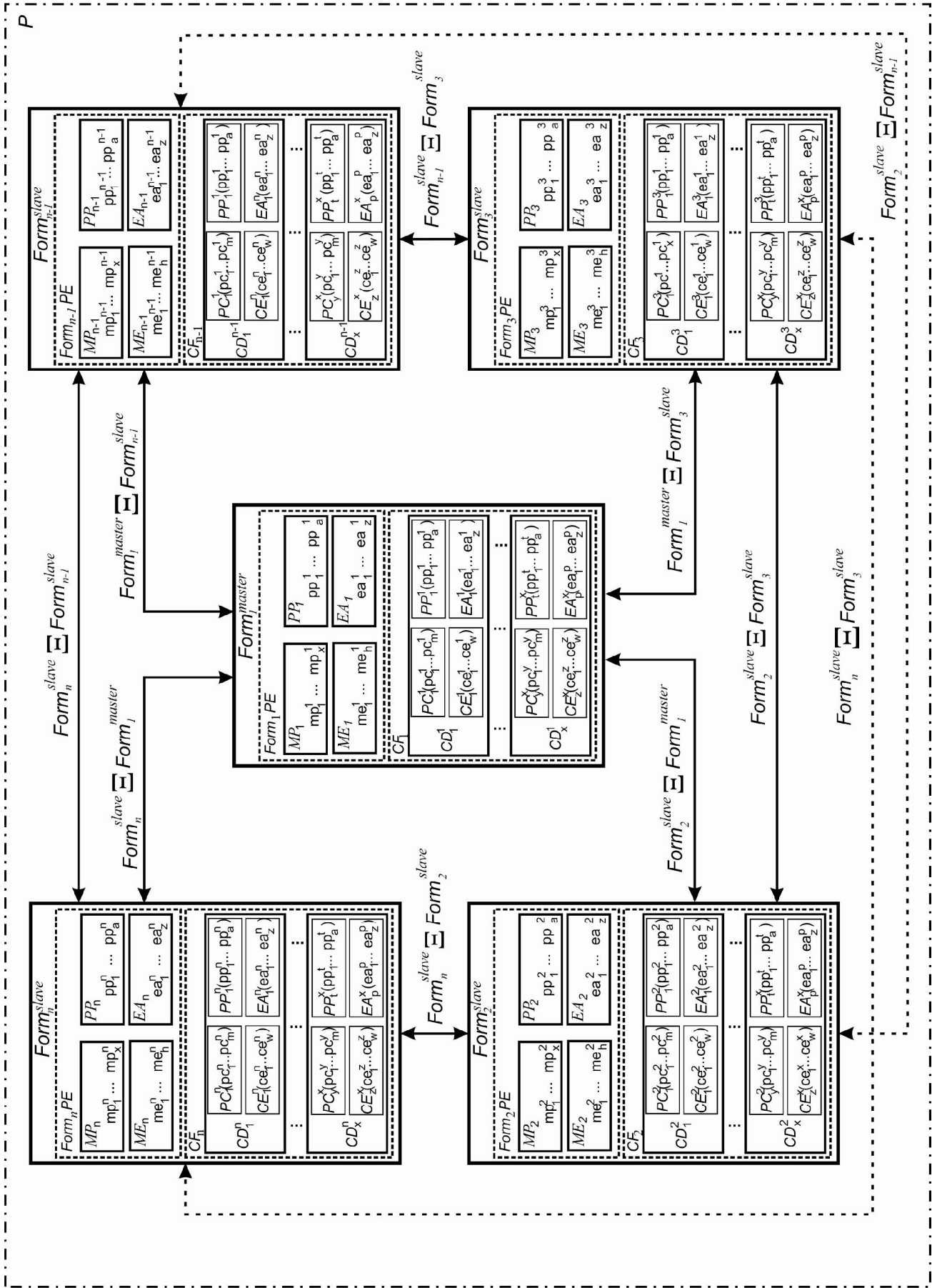


Рисунок 3 – Структурне подання кібернетичної складової (P) та зв'язків між Form

На базі запропонованого математичного опису (68), а також графічних елементів (69) у вигляді співвідношень $PC_y^x \xrightarrow{\varepsilon} PP_t^x$ і $CE_z^x \xrightarrow{\varepsilon} EA_p^x \xrightarrow{\varphi} Z_o$ (70), було проведено формальний опис значень та «лінгвістичних змінних», які відповідають опису властивостей і подій властивих формі і графічним елементам (GUI).

Дане рішення дозволяє реалізувати зв'язок між елементами як:

$$\varepsilon = \{(pc_1^n, pp_1^n), (pc_1^n, pp_2^n), (pc_2^n, pp_a^n), (pc_m^n, pp_2^n), (ce_1^n, ea_1^n), (ce_1^n, ea_2^n), (ce_2^n, ea_z^n), (ce_w^n, ea_z^n)\} \quad (71)$$

за умови, що всі властивості ζ , які доведені вище зберігаються для ε . Внаслідок цієї взаємодії множини $(ce_1^n, \dots, ce_w^n) \in CE_n$ за допомогою лінгвістичного «імені» $(ea_1^n, \dots, ea_z^n) \in EA_n$ і множини $(z_1^o, z_2^o, \dots, z_q^o) \in Z_o$ «Container Solution».

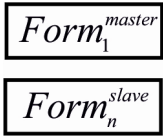
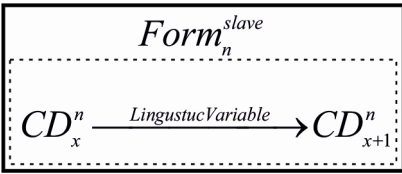

Це дозволяє нам описати для $Form_n PE$ всі необхідні параметри реалізації графічного відображення $Form_n$, які можна задати наступним чином:

$$Form_1^{master} \left[Form_1 PE(MP_k^1) \xrightarrow{mp_1^k = \text{textname}, mp_2^k = 640, mp_3^k = \text{beSizeable}, \dots, mp_x^k = \text{true}} PP_1 \right]. \quad (72)$$

Аналогічно (71) описуються *ParameterElement*, *EventForm*, *EventElement* на базі математичних описів (68) і (69) відповідно.

Для спрощення графічного представлення взаємодії між $Form_n$ на базі отриманих алгоритмів функціонування, був адаптована методологія Константайна, фрагмент якої приведений в таблиці 1.

Таблиця 1 – Адаптовані графічні моделі методології Константайна

Графічне представлення	Опис
	$Form_1^{master} \in [(Form_1 PE \in (MP_1 \in (mp_1^1, \dots, mp_x^1) \wedge PP_1 \in (pp_1^1, \dots, pp_a^1) \wedge ME_1 \in (me_1^1, \dots, me_n^1)) \wedge (CF_1 \in (CD_x^1 \in (PC_y^x(pc_1^y, \dots, pc_m^y) \wedge PP_t^x \in (pp_1^t, \dots, pp_a^t) \wedge CE_z^x(ce_1^z, \dots, ce_w^z), \dots))))]$
	$CF_n \in (CD_x^n \in (PC_y^x(pc_1^y, \dots, pc_m^y) \wedge PP_t^x \in (pp_1^t, \dots, pp_a^t) \wedge CE_z^x(ce_1^z, \dots, ce_w^z)) \xrightarrow{\varphi_n} (CD_{x+1}^n \in (PC_y^{x+1}(pc_1^y, \dots, pc_m^y) \wedge PP_t^{x+1} \in (pp_1^t, \dots, pp_a^t) \wedge CE_z^{x+1}(ce_1^z, \dots, ce_w^z))))$ при взаємодії $CD_x^n \rightarrow CD_{x+1}^n$, в рамках однієї з $Form_n^{master}$, за умов φ
	Зв'язок за даними (змінним) Ξ , типи даних представлені в параметричній моделі

П'ятий розділ дисертаційної роботи містить результати розробки синтаксичної і семантичної моделей мови визначення і опису моделювання кібернетичної складової для керування процесами в складних організаційно-технічних виробничих об'єктах на базі кібер-фізичних виробничих систем. Визначене поняття мовної моделі (ММ), як

декларативної (непроцедурної) мови, призначенням якої є визначення та опис термінологій, в основі яких покладено запропоновані моделі та методи і співвідношення між метаданими та даними предметної області та способів їх перетворення. Розроблена наступна специфікація мови моделей даних:

Дозволені алфавітно-цифрові символи, які підтримуються середовищами розробок для мов високого рівня програмування і відповідають таблиці ASCII-кодів: + - \ . , ! “ < > = () \$ % & ~ * _ & @ пробіл; { };

Ключові слова: базові поняття у вигляді слів зарезервованих в розроблюваній моделі в четвертому розділі, що служать для опису ключових ознак (*Form^{master}*, *Form^{slave}*, *ParameterForm*, *ElementForm*, *EventForm*, *ParameterElement*, *cod*, *EventElement*, *ValueElement*, *LinguisticVariable*, *ContainerSolutions*, *parameter*, *value*, *event*, *name*);

Ідентифікатори, використовувані для позначення таких ознак:

– приналежності параметрів та подій до доменного або недоменного типів: *domen*, *not_domen*. Домени відповідних характеристик (значень), що належать до перелічуваного (облікового) типу, який має можливість вибору із заздалегідь сформованого списку;

– тип даних значень (*value*), який визначає характеристику параметрів *ParameterForm* та *ParameterElement* (текстове, булеве, цілочисельне, цілочисельне негативне, текстове, словосполучення);

– лінгвістичний опис ознаки посилання *LinguisticVariable* (*name*) на *ContainerSolutions*, який містить необхідний *cod*;

– базові поняття, які дають можливість зв'язати події *ElementForm* і *EventElement*, містять набір певних *event*, що належать певному візуальному графічному елементу з *ContainerSolutions* (*cod*) через *LinguisticVariable* (*name*);

Літерали, певний набір значень, які не представлені ідентифікатором:

Рядкові літерали – представляються у вигляді послідовності дозволених символів з різним типом написання (великі та малі) літер.

Алгебраїчні літери – літери, що являють собою опис простих логічних операцій типу *True*, *False*, які дозволяють задати значення (*value*) того чи іншого параметра (*parameter*), який належить *ParameterElement*, *ParameterForm* та є необхідним і достатнім для опису властивостей візуальних елементів.

Зарезервовані літери – слово, словосполучення або скорочення, які дають можливість вибрати ту чи іншу властивість параметра, необхідні для досягнення умов заданих в алгоритмі функціонування.

Типи представлених значень, в яких містяться деякі параметри *ParameterForm* і *ParameterElement*, допустимі в області застосування.

Розділювачі – символні позначення виділення основних елементів синтаксичної конструкції розроблюваної ММ.

< *Form* > (кутові дужки *Form*) – використовуються для вказівки ключового слова, яке показує початок метаопису тієї чи іншої *Form* в конструкції ММ.

</ *Form* > (слеш кутові дужки *Form*) – використовується для вказання ключового слова, яке показує завершення метаопису тієї чи іншої *Form* в конструкції ММ.

Для запропонованої конструкції ключового слова, на початку і завершенні

метаопису *Form* накладені такі обмеження: назва *Form* може мати нумерацію як *Form1*, або буквене визначення, наприклад, *Form_master* або *Form_add_operat*. При цьому обов'язково ключове слово початку метаопису має збігатися з ключовим словом завершення метаопису тієї чи іншої *Form* в конструкції ММ. При невиконанні цієї вимоги до конструкції, інтерпретатор ММ не зможе сприйняти її як метаопис всіх необхідних параметрів і подій властивих даній *Form*.

{ (відкриваюча фігурна дужка) – обов'язковий символ початку рядка метаопису *Form* і *ElementForm*.

} (закриваюча фігурна дужка) – обов'язковий символ завершення рядка метаопису *Form* і *ElementForm*.

(решітка) – після цього символу конструкція інтерпретатора ММ сприймає початок опису графічних візуальних елементів інтерфейсу користувача (*ElementForm*).

/# (слеш решітка) – після даної комбінації символів інтерпретатор ММ вважає, що опис графічних візуальних елементів інтерфейсу користувача (*ElementForm*) завершено.

/ (слеш) – використовується для задання ієрархії метаопису візуальних графічних елементів (*ElementForm*), відповідно до дерева побудови CPPS, і застосовується всередині # /# метаопису *Form*. *ElementForm1/ElementForm2* – необхідно розуміти як *ElementForm2*, що знаходиться всередині *ElementForm1* і є її невід'ємною частиною.

[] квадратні дужки – використовується для завдання метаопису необхідних параметрів і подій *ParameterElement*, *EventForm*, *ParameterElement*, *EventElement*.

; (крапка з комою) – обов'язковий символ конструкції ММ, який показує, що для даного *parameter* або *event* присвоєння *value* та *name* відповідно, завершено, застосовується всередині.

, , (перерахування через кому) – використовується для перерахування назв *parameter* для *ParameterForm*, *ParameterElement*, а також *event* для *EventForm*, *EventElement* за умови, що для набору з декількох *parameter* або *event* значення *value* та *name* відповідно, однакове і застосовується всередині.

= (знак рівності) – присвоює *parameter* певне значення типу даних *value* і застосовується для вказівки події (*event*) певного *name* з *LinguisticVariable*, яке містить посилання на *cod* або його фрагмент в *ContainerSolutions*. Варто врахувати, що залежно від контексту (логіки й змісту виконуваних дій), даний знак можна трактувати як інструкцію присвоєння, згідно з якою для зазначеного базового параметра визначається значення, яке йому належить.

Коментарі – всі символи і рядки, записані всередині даної конструкції інтерпретатором ММ, ігноруються і сприймаються як коментарі.

?** (знак питання з двома зірочками) – показує, що після заданих символів слідує коментар, який ігнорується інтерпретатором ММ.

**? (дві зірочки і знак питання) – показують, що після заданих символів закінчується коментар і далі йде текст, що не ігнорується інтерпретатором ММ.

Для адаптації розробленого синтаксису опису ММ, була використана розширена форма Бекуса-Наура, що дозволило розробити інтуїтивно просту і адаптивну формальну мову подання та опису даних. Синтаксична діаграма розробленої мови представлена на рисунку 4.

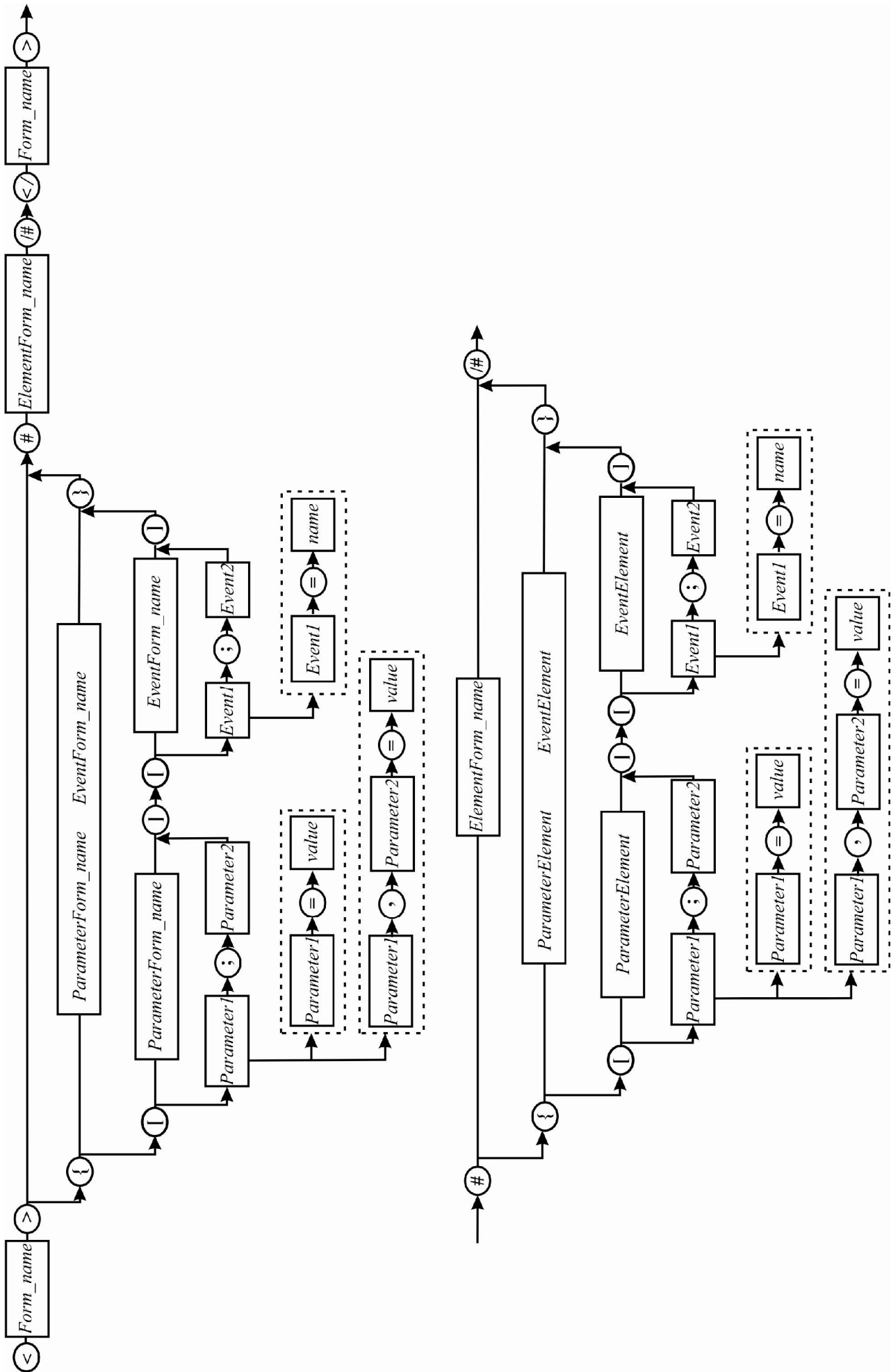


Рисунок 4 – Синтаксична діаграма ММ

Зручність читання та подання розробленої декларативної мови було досягнуто завдяки використанню трьох принципів подання: максимально лінійність; стислість; самодокументованість.

Запропоновано наступний тип стилю запису:

```
< Form _ master >
  { ??? відкриття блоку опису параметрів і значень, а також подій та імен
  LingusticVariable для Form _ master ???
    [ parameter1 = value; parameter2, parameter3 = value ]
    [ event1 = name; event2 = name ]
  } ??? закриття блоку опису параметрів і значень, а також подій та імен
  LingusticVariable для Form _ master ???
  # “ ім'я елемента в середовищі розробки ”
??? відкриття блоку опису візуальних графічних елементів Form _ master ???
  { ??? блок опису Element1 _ Form _ master ???
    [ parameter1 = value; parameter2, parameter3 = value ]
    [ event1 = name; event2 = name ]
  } ??? закриття блоку опису Element1 _ Form _ master ???
  { ??? блок опису Element2 _ Form _ master ???
    [ parameter1 = value; parameter2, parameter3 = value ]
    [ event1 = name; event2 = name ]
  } ??? закриття блоку опису Element2 _ Form _ master ???
  /# ??? закриття блоку опису візуальних графічних елементів Form _ master ???
  < / Form _ master >
```

При необхідності реалізації ієрархії (дерева побудови) приналежності візуальних графічних елементів *ElementForm1/ElementForm2* пропонується наступна структура метаопису:

```
# “ ім'я елемента в середовищі розробки ” ??? відкриття блоку опису візуальних
графічних елементів Form _ master ???
  { ??? блок опису Element1Form _ master ???
    [ parameter1 = value; parameter2, parameter3 = value ]
    [ event1 = name; event2 = name ]
  } ??? закриття блоку опису Element1Form _ master ???
  / “ ім'я елемента в середовищі розробки ”
  { ??? блок опису Element2Form _ master ???
    [ parameter1 = value; parameter2, parameter3 = value ]
    [ event1 = name; event2 = name ]
  } ??? закриття блоку опису Element2Form _ master ???
  /# ??? закриття блоку опису візуальних графічних елементів Form _ master ???
```

Використання “/” (слеш) дозволяє інтерпретатору ММ визначити ступінь вкладання (приналежності) візуального елемента в інший, тобто в середовищі розробки реалізувати дерево структури (Structure) кібернетичної складової.

Ґрунтуючись на розробленій синтаксичній діаграмі (рис.4), запропоновано

наступний метаопис подій (*event*) для *Form* та *ElementForm*:

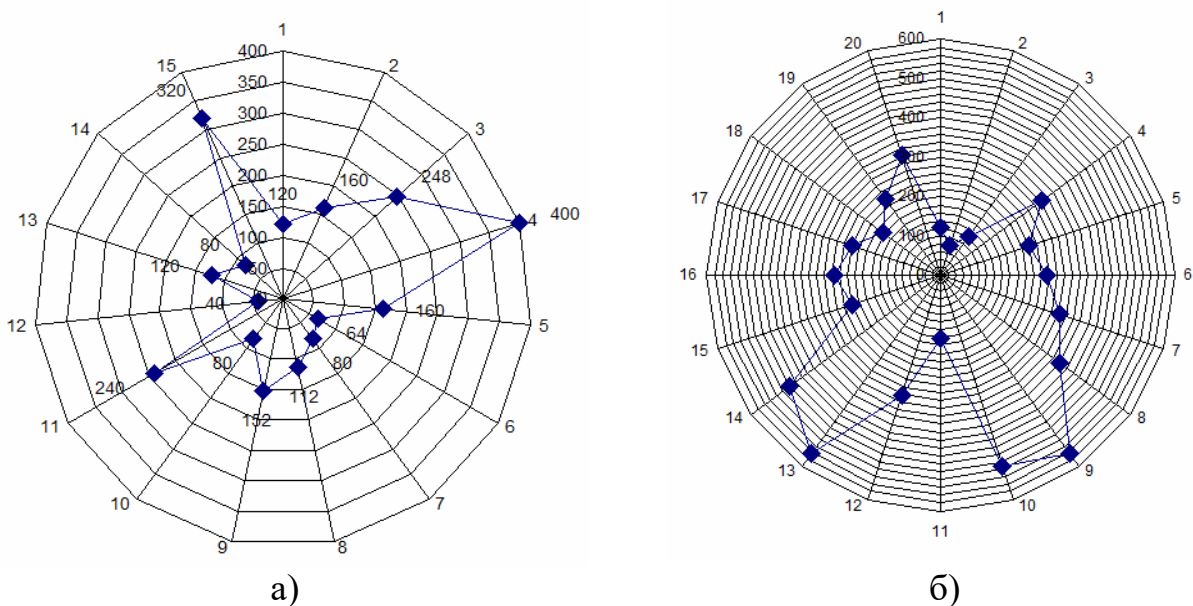
$$event \rightarrow LinguisticVariable \rightarrow ContainerSolution \rightarrow cod \quad (73)$$

де *LinguisticVariable*, *ContainerSolutions*, *cod* це елементи бази знань, при цьому в елементі *cod* знаходяться приклади реалізації подій у вигляді програмного коду. Розроблене представлення дозволяє адаптувати метаопис до будь-якої об'єктно-орієнтованої мови, а також дає можливість розробнику розширювати базу знань новими “*Container Solutions*”, що дозволить скоротити час на розробку та модифікацію кібернетичної складової для керування процесами в складних організаційно-технічних виробничих об'єктах на базі кібер-фізичних виробничих систем.

Шостий розділ дисертаційної роботи містить результати експериментальних досліджень у вигляді розробленого програмного забезпечення (ПЗ) для автоматизації процесів керування організаційно-технічним виробничим об'єктом.

Проведення даних досліджень були виконані в рамках договору № 14-04 з ТОВ «ЗЕО «Сокіл»» (Автоматика) «Розробка комплексної системи оперативно-диспетчерського керування виробничим підприємством ТОВ «ЗЕО «Сокіл» (OSCEM). Отримані результати були порівняні з існуючими стандартними підходами до розробок кібер-фізичних виробничих систем або їх фрагментами. Як можна бачити з рис. 9 розроблені моделі та методи, реалізовані у розробленому ПЗ, мають ряд переваг перед класичним методом управління:

- кількість етапів і підетапів в розробленому технологічному процесі управління розробкою CPPS менше ніж в класичному методі;
- розроблена «Система розробки кібернетичної складової для автоматизації процесів керування організаційно-технічним виробничим об'єктом» може досягти максимального обсягу часу, необхідного для вирішення завдань на підетапі «Математичний опис елементарних завдань» – 400 годин.



а) розроблений процес управління розробкою CPPS; б) класичний метод управління розробкою CPPS

Рисунок 9 – Обсяг годин витрачених на кожному підетапі процесу управління розробкою «OSCEM»

Другий експеримент проводився в рамках науково-дослідної роботи з ТОВ «НВП «Укрінтех», головною метою якого була модернізація преса гідравлічного ДА2238Б і розробка системи керування на базі кібер-фізичних систем. З графіку (рис. 10) можна помітити, що застосування розроблених методів і моделей управління дозволило скоротити витрати часу на етапі розробки фізичної складової, у порівнянні зі стандартним підходом, на 10,71% і на 17,78% на етапі розробки кібернетичної складової.

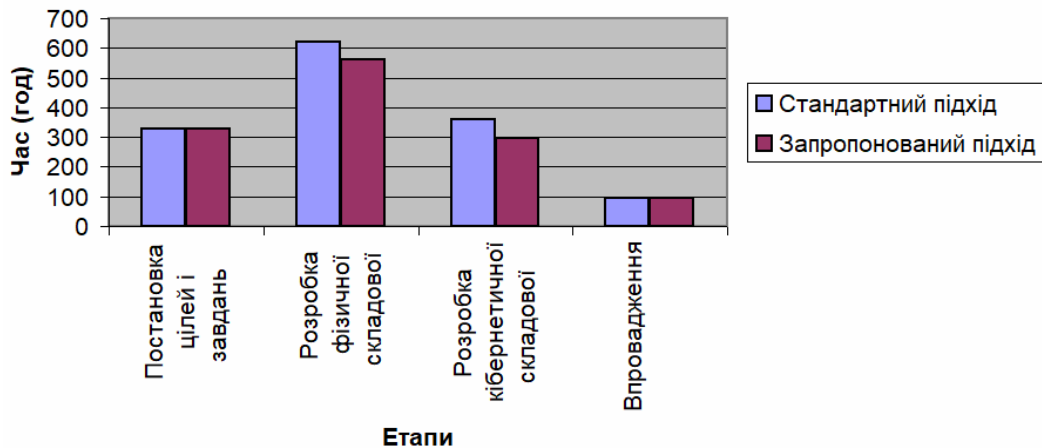


Рисунок 10 – Графік витрат часу на модернізацію гідравлічного преса ДА2238Б.

ОСНОВНІ ВИСНОВКИ ТА РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ

У дисертаційній роботі, на підставі отриманих результатів, вирішена актуальна науково-прикладна проблема забезпечення ефективної стратегії автоматизації керування складними організаційно-технічними виробничими об'єктами, шляхом реалізації комплексу моделей, методів процесів керування і технології на базі кібер-фізичних систем.

В результаті проведеного дослідження отримано такі наукові і практичні результати.

1. Проведено критичний аналіз існуючих архітектур, методів та моделей керування процесами в організаційно-технічних виробничих об'єктах та виявлено, що найбільш перспективним, в рамках концепції Industry 4.0, є використання кібер-фізичних систем. Встановлено основні протиріччя, що дозволили визначити наукову проблему.

2. Вперше розроблено архітектурно-логічну модель представлення керування процесами в складних організаційно-технічних виробничих об'єктах на базі кібер-фізичних систем, яка базується на науково-обґрунтованих теоріях мультисистем і моносистем та методах формалізованого представлення систем, що дозволило об'єднати стратегічні, фізичні та кібернетичні складові системи керування складними організаційно-технічними виробничими об'єктами у єдиний інформаційний простір.

3. Вперше розроблено логічно узгоджені послідовності взаємопов'язаних методів прийняття рішень на кожному етапі архітектурно-логічної моделі, що дозволило реалізувати технологію «Digital Twins» та самоадаптацію елементів кібер-фізичних виробничих систем керування;

4. Вперше запропоновано технологію розробки кібер-фізичних виробничих систем, яка реалізована на базі теоретико-множинного представлення інформаційних блоків кожного етапа та рівня архітектурно-логічної моделі та методах їх структуризації, що дозволило реалізувати гнучкість керування процесами в організаційно-технічних виробничих об'єктах;

5. Удосконалено метод уявлення структурних системних моделей кібер-фізичного керування процесами в організаційно-технічних виробничих об'єктах, що дозволило формалізувати алгоритм функціонування на базі теорії апарату регулярних схем і алгоритмічних алгебр та побудувати структурні і подієві моделі функціонування кібер-фізичних виробничих систем;

6. Удосконалено метод синтезу алгоритмів функціонування кібер-фізичних виробничих систем, що дозволило мінімізувати кількість операторів і спростити структуру системи функціонування організаційно-технічного об'єкту;

7. Удосконалено модель життєвого циклу керування організаційно-технічним об'єктом на базі кібер-фізичних виробничих систем, що дозволило автоматизувати процес розробки кібернетичної складової на базі синтезованих блоків функціонування;

8. Вперше розроблено модель формалізації кібернетичної складової організаційно-технічного об'єкта у вигляді взаємопов'язаних багаторівневих GUI елементів, що дозволило автоматизувати реалізацію функцій, відповідно до вимог НМІ кібер-фізичних виробничих систем;

9. Вперше розроблено математичний опис зв'язків між GUI, як основних елементів НМІ, що дозволило реалізувати структурне уявлення кібернетичної складової організаційно-технічного об'єкта за рахунок реалізації подій GUI елементів у вигляді фрагментів програмного коду;

10. Отримала подальший розвиток методологія Константайна, на базі якої запропонований метод графічного представлення конструкції кібернетичної складової організаційно-технічного об'єкта, що дозволило досягнути редукцію розробки структури;

11. Вперше розроблено синтаксичну і семантичну моделі декларативної мови визначення і опису моделювання кібернетичної складової для керування процесами в складних організаційно-технічних виробничих об'єктах, на базі кібер-фізичних виробничих систем, за розширеною формою Бекуса-Наура, що дозволило істотно спростити процес керування організаційно-технічним виробничим об'єктом;

12. Практичне значення отриманих теоретичних результатів дисертаційної роботи полягає у розробці методів та моделей керування процесами в складних організаційно-технічних виробничих об'єктах на базі кібер-фізичних систем. Результати дисертаційної роботи впроваджені та реалізовані: у виробничий процес Акціонерного товариства «Мотор Січ» (акт від 15.05.2019р.); Товариства з обмеженою відповідальністю «Науково виробниче підприємство «УКРІНТЕХ»» (акт від 23.10.2019р.); в освітній процес Кременчуцького національного університету імені М. Остроградського (акт від 04.11.2020р.), Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна (акт від 29.10.2020р.); Національного університету «Запорізька політехніка» (акт від 23.01.2020р.).

13. На користь обґрунтованості до достовірності отриманих результатів дисертаційної роботи свідчать такі факти:

– використання в роботі теоретично-обґрунтованих та апробованих на практиці методів дослідження;

– впровадження у виробництво запропонованих методів та моделей автоматизації керування процесами на базі кібер-фізичних виробничих систем у вигляді програмного засобу, які дозволили підвищити продуктивність на 5% та ритмічність 3% (ВАТ «Мотор Січ»), продуктивність на 1,2% та ритмічність 1,8% на місяць (ТОВ «НВП «УКРІНТЕХ»»), що підтверджено відповідними актами впровадження;

– залучення наукової громадськості до апробації наукових результатів на представницьких наукових форумах та їх публікації у фахових наукових виданнях.

14. Наукове значення роботи полягає у подальшому розвитку теорії керування складними організаційно-технічними об'єктами та комплексами на базі кібер-фізичних виробничих систем, в рамках концепцій Industry 4.0 та Smart Factory

15. Подальші дослідження рекомендовано продовжити у напрямку узагальнення розроблених методів та моделей кібер-фізичного керування процесами в складних організаційно-технічних об'єктах та комплексах, для вирішення завдання створення безлюдного виробництва, в рамках Industry 4.0 та Smart Factory, для досягнення мети «Lean Manufacturing».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. **Yevsieiev V.** Visual components formal description development for the automated design of software products and modules for computer-integrated production technological preparation systems. *Вчені записки таврійського національного університету імені В.І. Вернадського Серія: Технічні науки.* 2018. Том 29 (68) № 1 Частина 1. С.143–147. DOI: 10.31474/2075-4272-2018-1-31-24-31.

2. **Евсеев В. В.** Применение программных метрик кода на раннем этапе жизненного цикла программного обеспечения. *Восточно-европейский журнал передовых технологий.* 2011. Вып. № 1/2 (49). С.19–21.

3. **Yevsieiev V.** Conceptual scheme and basic concepts graphic representation of software and modules visual elements description in CIS TPP design automation problem solution. *Наукові нотатки. Міжвузівський збірник (за галузями знань «Технічні науки»).* 2018. Випуск 61. С. 40–47.

4. **Yevsieiev V.** Visual objects interaction mathematical presentation to solve the problem of software design automation for computer information systems of technological production preparation. *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: «Обчислювальна техніка та автоматизація»* 2018. № 1(31). С. 24–31.

5. **Yevsieiev V.** Program code automated system development at early stage of software life cycle. *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: «Обчислювальна техніка та автоматизація».* 2017. №1(30). С.69–77. DOI: 10.31474/2075-4272-2018-1-31-24-31.

6. Невлюдов І.Ш., **Євсєєв В.В.**, Демська А.І. Розробка моделі життєвого циклу

розробки програмних продукту та програмних модулів для КІС ТПВ. *Технологія приборостроєння*. 2017. №1. С.12–16.

7. Nevlyudov I., **Yevsieiev V.**, Miliutina S., Kolesnyk K. High – Level Programming Language Decomposition Parametric Model. *Machine Dynamics Research, Warsaw University of Technology*. 2015. Vol. 39. No 1. P.81–91.

8. Nevlyudov I., **Yevsieiev V.**, Miliutina S. Program Project Development Life Cycle Model. *Комп'ютерні системи проектування теорія і практика*. 2014. № 808. С. 26–30.

9. Невлюдов И.Ш., Андрусевич А.А., **Евсеев В.В.**, Милютин С.С., Замирец Я.О. Формализация объектно-ориентированных языков программирования. *Технологія приборостроєння*. 2014. №3. С.11–17.

10. Невлюдов И.Ш., **Евсеев В.В.**, Милютин С.С., Бортникова В.О. Анализ моделей расчета трудоемкости программного продукта при разработке КИС ТПП. *Восточно-европейский журнал передовых технологий*. 2012. Вып.6. №2(60). С.21–24.

11. Невлюдов И.Ш., Андрусевич А.А., **Евсеев В.В.** Анализ жизненного цикла разработки программного обеспечения для корпоративных информационных систем. *Восточно-европейский журнал передовых технологий*. 2010. Вып.6/8(48). С.25–27.

12. **Евсеев В.В.**, Андрусевич А.О., Власенков Д.П. Аналіз концепції Industry 4.0 в технології ІІОТ. *Технологія приборостроєння*. 2020, №1. С.64–68.

13. Плотникова З.В., **Евсеев В.В.** Метод нисходящего анализа с прогнозируемым выбором альтернатив для контекстно – зависимых грамматики. *Восточно-европейский журнал передовых технологий*. 2009. Вып. 4/11(40). С.11–13.

14. 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). С.44–52. DOI: 10.15587/1729- 4061.2020.210761.

15. **Евсеев В.В.**, Максимова С.С. Технологія процесу керування розробкою кібер-фізичних виробничих систем. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2020. Том 31(70). № 6, С.57–63.

16. Nevliudov I., **Yevsieiev V.**, Omarov M., Bronnikov A., Liashenko V.. Method of Algorithms for Cyber-Physical Production Systems Functioning Synthesis. *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research (IJETER)*, 2020. Volume 8. No.10. PP.7465–7473. DOI:10.30534/ijeter/2020/1278102020.

17. Nevliudov I., **Yevsieiev V.**, J. H. Baker, Ahmad M. A., Lyashenko V. Development of a cyber design modeling declarative language for cyber physical production systems. *Journal of Mathematical and Computational Science*. 2021. No.1. PP.520–542. DOI:10.28919/jmcs/5152.

18. Nevliudov, I., **Yevsieiev, V.**, Demska, N., Novoselov, S. Development of a software module for operational dispatch control of production based on cyber-physical control systems. *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*. 2020. No.4(14), P.155–168. DOI:10.30837/ITSSI.2020.14.155.

19. Невлюдов І.Ш., Євсєєв В.В., Бортникова В.О. Розробка програмного модуля для автоматизованого проектування технологічного процесу виготовлення мікроелектромеханічних акселерометрів. *Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових прац.* (2015). Випуск 3(35). С 107–112.

20. Невлюдов І.Ш., Євсєєв В.В., Милютіна С.С., Бортникова В.О. Разработка графа параметрической зависимости для КИС ТПП на базе языков высокого уровня программирования. *Вестник Нац. техн. ун-та "ХПИ": сб. науч. тр. Темат. вып.: Новые решения в современных технологиях.* 2012. № 66 (972). С. 67–73.

21. Невлюдов І.Ш., Євсєєв В.В., Бортникова В.О. Модели жизненного цикла программного обеспечения при разработке корпоративных информационных систем технологической подготовки производства. *Вестник Нац. техн. ун-та "ХПИ" : сб. науч. тр. Темат. вып.: Новые решения в современных технологиях. – Харьков : НТУ "ХПИ".* 2011. № 2. С. 94–101.

22. Yevsieiev V., Bronnikov A. Development of databases interconnection “essences” information model for cyber-physical production systems additive cyber design creation automation. *Збірник наукових праць національного університету кораблебудування ім. адмірала Макарова.* 2020. №3(481) . РР. 56–62. DOI: 10.15589/znp2020.3(481).7.

23. Милютіна С.С., Невлюдов І.Ш., Євсєєв В.В. Модуль для голосового управління роботом РМ-01. *Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №57666 від 17.12.2014.*

24. Євсєєв В.В., Невлюдов І.Ш., Милютіна С.С. Автоматизована система нормування «НОРМА». *Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №57667 від 17.12.2014.*

25. Гурін Л.А., Невлюдов І.Ш., Євсєєв В.В. Програма для програмування та віддаленого управління мобільним роботом «Programming robots». *Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №59439 від 24.04.2015.*

26. Горячевська Д.В., Невлюдов І.Ш., Євсєєв В.В., Горячевська І.В. Комп'ютерна програма «Програма для визначення синхронного контролю температурних режимів плат на виробництві «QUAcontrol»». *Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №59980 від 4.06.2015.*

27. Бортникова В.О., Невлюдов І.Ш., Євсєєв В.В. Комп'ютерна програма «Автоматизована система проектування технологічного процесу виготовлення акселерометрів «AcSAM» («AcSAM»». *Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 65348 від 16.05.2016.*

28. Голіков М.О., Невлюдов І.Ш., Євсєєв В.В., Функендорф А.О. «Модуль автоматизованого проектування конструкції роботів «Max -Robotics»». *Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 74642 від 13.11.2017.*

29. Голіков М.О., Невлюдов І.Ш., Євсєєв В.В., Функендорф А.О. «Модуль автоматизованого проектування технологічних схем складання роботів «Max-SAM»». *Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 74619 від 13.11.2017.*

30. Євсєєв В.В. «Автоматизована система проектування програмного забезпечення для корпоративно- інформаційних систем технологічної підготовки виробництва «CAD-Programming Code»». *Свідоцтво про реєстрацію авторського*

права на твір № 74576 від 09.11.2017.

31. Невлюдов І.Ш., **Євсєєв В.В.**, Бортнікова В.О., Чала О.О. «Автоматизація комп'ютерного зору та обробки відеопотоку для мобільних роботів». *Свідомство про реєстрацію авторського права на твір № 80306 від 16.07.18*.

32. Невлюдов І., **Євсєєв В.**, Демська А. Розробка синтаксичної та семантичної моделі мови визначення і опису даних предметної області. *Manufacturing & Mechatronic Systems 2018: Proceedings of IIst International Conference (M&MS 2018)*. (Kharkiv, 25–26 October 2018) P. 48–53.

33. **Yevsieiev V.**, Bronnikov A. Analysis of architectural models for representing the integration of cyber-physical production systems hierarchical levels. *Manufacturing & Mechatronic Systems 2020: Proceedings of IVth International Conference (M&MS 2020)*. (Kharkiv, 22–23 October 2020). P:17–19.

34. **Yevsieiev V.**, Miliutina S., Kollesnyk K. Software development Life Cycle Model . *Warsaw University of technology, Instiyte of Design Fundamenals XXIII Polish-Ukrainin conference CAD in MACHINERY DESIGN (CADMD 2015)*. (Polish, Bochnia, 9–10 October 2015). P.19–20.

35. Nevlyudov I., **Yevsieiev V.**, Miliutina S. Structured Language SQL Parametric Model Development. *CAD in Machinery Design. Implementation and Educational Issues. Proceedings of Ukrainian-Polish Conference (CADMD'2016)*. (Lviv, 21–22 October 2016). P. 49–50.

36. Nevlyudov I., **Yevsieiev V.**, Miliutina S., Kollesnyk K. Object semantic model for life cycle model “Jamp”. *CAD in Machinery Design. Implementation and Educational Issues. 25 Proceedings of Polish- Ukrainian Conference (CADMD'2017)*. (Polish, Bielsko Biala, 20–21 October 2017). P. 31–32.

37. Невлюдов І.Ш., **Євсєєв В.В.**, Бортнікова В.О. Анализ применимости математических моделей СОСОМО при разработке современных корпоративно - информационных систем технологической подготовки производства. *XI Международная научная конференция «Физические процессы и поля технических и биологических объектов»*. (Кременчук, 4–6 листопада 2011). Матеріали конференції. КНУ імені Михайла Остроградського. С. 147–148.

38. Невлюдов І.Ш., **Євсєєв В.В.**, Бортнікова В.О. Актуальность создания систем автоматизированного проектирования технического задания на разработку программных продуктов для сложных корпоративных информационных систем технологической подготовки производства. *XII Международная научная конференция «Физические процессы и поля технических и биологических объектов»*. (Кременчук, 2–4 листопада 2012). Матеріали конференції. КНУ імені Михайла Остроградського. С. 152–153.

39. Невлюдов І.Ш., **Євсєєв В.В.**, Милютіна С.С. Параметрическая модель области видимости памяти для языков объектно-ориентированного программирования. *XIV Міжнародна науково-технічна конференція “Фізичні процеси та поля технічних і біологічних об'єктів”*. (Кременчук, 6–8 листопада 2015). Матеріали конференції. КНУ імені Михайла Остроградського. С. 120.

40. Невлюдов І.Ш., **Євсєєв В.В.**, Милютіна С.С. Разработка графов принадлежности элементов языков программирования высокого уровня.

Материалы 4-й Международной научно-технической конференции «Информационные системы и технологи ИСТ-2015». (Харьков, 21–27 сентября 2015). С. 88–89.

41. Невлюдов И.Ш., **Евсеев В.В.**, Бортникова В.О. Разработка модели жизненного цикла проектирования корпоративных информационных систем технологической подготовки. *Международная научно-практическая конференция «Математическое моделирование процессов в экономике и управлении инновационными проектами (ММП-2013)».* (Алушта, 9–15 сентября 2013). ХНУРЭ. С. 139–140.

42. Невлюдов И.Ш., **Евсеев В.В.**, Бортникова В.О. Математическая модель расчета трудоемкости и стоимости программного продукта. *Proceedings XXIII International Conference “New Leading technologies in Machine Building”.* (Rybachie, 2–8 september 2013). P.24.

43. **Евсеев В.В.**, Бортникова В.О. Параметрическая модель декомпозиции структурированного языка SQL. *Сучасні проблеми радіотехніки та телекомунікацій «РТ-2013»: матеріали 9-ої міжнар. молодіжної на-ук.-техн. конф.* (Севастополь, 22–26 квітня 2013). СевНТУ. С.328.

44. **Евсеев В.В.**, Бортникова В.О. Анализ программных метрик при проектировании информационно-компьютерных систем технологии производства. *15 міжнародний молодіжний форум «Радіоелектроніка і молодь в ХХІ столітті».* (Харьков, 18–20 апреля 2011). Сб. материалов форума. ХНУРЭ. С.152–153.

45. **Евсеев В.В.**, Бортникова В.О. Анализ языков высокого уровня программирования применяемых для разработки корпоративно-информационных систем технологической подготовки производства. *16 міжнародний молодіжний форум «Радіоелектроніка і молодь в ХХІ столітті».* (Харьков, 17–19 апреля 2012). Сб. материалов форума. Том № 2. ХНУРЭ. С.142–143.

46. **Евсеев В.В.**, Бортникова В.О. Параметрическая модель декомпозиции структурированного языка SQL для решения задач расчета трудоемкости. *17 міжнародний молодіжний форум «Радіоелектроніка і молодь в ХХІ столітті».* (Харьков, 22–24 апреля 2013). Сб. материалов форума. Том № 2. ХНУРЭ. С. 119–120.

47. **Yevsieiev V.**, Jijavadze O. Analysis architectural model of Industry 4.0 (RAMI 4.0). *XXIV Міжнародний молодіжний форум «Радіоелектроніка та молодь у ХХІ столітті».* (Харків, 7–9 квітня 2020). Зб. матеріалів форуму. Т. 2. С.93–94.

48. Невлюдов И.Ш., **Евсеев В.В.**, Бортникова В.О. Информационная модель автоматизированной системы проектирования корпоративно-информационных систем технологической подготовки производства на ранней стадии разработки технического задания. *Перша Всеукраїнська науково-практична конференція «Актуальні проблеми створення електронних засобів промислових автоматизованих систем»* (м. Северодонецьк, 25–26 жовтня 2011). С. 18–21.

49. **Yevsieiev V.**, Bronnikov A. Analysis of the cyber-physical production systems implementation impact to achieve the goals of lean production. *The IIIth International scientific and practical conference «Development of scientific and practical approaches in the era of globalization»* (USA, Boston, 28–30 September. 2020). P.221–226.

DOI:10.46299/ISG.2020.II.II.

50. **Yevsieiev V.**, Bronnikov A. Analysis of the CMMI model application for solving the tasks of CPPS control processes automation development. *The IV th International scientific and practical conference «Actual Trends of Modern Scientific Research»* (Germany, Munich, 11–13 October 2020). P.128–132.

51. **Yevsieiev V.**, Bronnikov A. Information systems development methodologies application analysis for cyber-physical production systems development. *III International scientific-practical conference “Theory, science and practice”* (Japan, Tokyo, 5–8 October 2020). P. 398–401. DOI: 10.46299/ISG.2020.II.III.

52. **Yevsieiev V.**, Bronnikov A. Analysis of the multi-agent systems application to solve the problem of cyberphysical production systems development. *The IV th International scientific and practical conference «Integration of scientific bases into practice»*. (Sweden, Stockholm, 12–16 October 2020). P.459 – 462. DOI:10.46299/ISG.2020.IV.

53. **Yevsieiev V.**, Bronnikov A. Structural model of a cyber-physical production system based on multi-agent systems analysis. *Матеріали VII Міжнародної науково-технічної Internet-конференції «Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем керування організаційно-технічними та технологічними комплексами»*, (Київ, 26 листопада 2020). С.312–313.

54. **Yevsieiev V.**, Bronnikov A. Complexity development analysis of cyber-physical production systems for smart manufacturing. *The X th International scientific and practical conference «Trends in the development of modern scientific thought»* (Canada, Vancouver, 23–26 Nov. 2020). P.699–703. DOI:10.46299/ISG.2020.II.X.

АНОТАЦІЯ

Євсєєв В. В. Методи та моделі кібер-фізичного керування процесами в організаційно-технічних виробничих об'єктах. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.07 – автоматизація процесів керування. Харківський національний університет радіоелектроніки, Міністерство освіти і науки України, Харків, 2021.

В дисертаційній роботі вирішена актуальна наукова проблема розробки теоретичних основ створення методів, моделей та технології керування процесами в складних організаційно-технічних виробничих об'єктах на базі кібер-фізичних систем в рамках концепції Industry 4.0. Вперше запропонована архітектурно-логічна модель декомпозиції кібер-фізичного керування процесами в складних організаційно-технічних об'єктах, яка на відміну від існуючих еталонних архітектурних моделей дає можливість уявити керування процесом у вигляді єдиного інформаційного простору, що об'єднує в собі фізичні, кібернетичні і стратегічні складові. Вперше запропоновані взаємопов'язані методи керування процесами в організаційно-технічних об'єктах, як логічно узгоджені послідовності прийняття рішень, які формуються на фізичному рівні за допомогою апаратних засобів, що дозволило реалізувати технологію «Digital Twins». Вперше запропонована технологія розробки кібер-фізичних виробничих систем, яка

дозволяє представити їх структуру як логічно пов'язану послідовність алгоритмів функціонування кожного рівня, що дає можливість реалізувати гнучкість процесу керування організаційно-технічним об'єктом. Удосконалено метод представлення структурних системних моделей кібер-фізичного керування, що дозволило формалізувати алгоритм функціонування у вигляді системної моделі, який, на відмінну від існуючих, дає можливість побудови структурних і подієвих моделей функціонування організаційно-технічного об'єкта. Удосконалено метод синтезу алгоритмів функціонування кібер-фізичного керування, що дозволило об'єднати алгоритми функціонування кожного рівня керування організаційно-технічним об'єктом в єдину систему функціонування, який, на відмінну від існуючих методів, дозволив мінімізувати кількість операторів і спростити структуру системи функціонування організаційно-технічного об'єкта. Удосконалено модель життєвого циклу керування організаційно-технічним об'єктом, що дало можливість автоматизувати процес керування кібернетичною складовою організаційно-технічного об'єкта, яка, на відмінну від існуючих, дозволила визначити послідовність виконання і взаємозв'язки процесів, дій і завдань, з урахуванням структури синтезованої системи функціонування організаційно-технічним об'єктом. Вперше розроблена модель формалізації кібернетичної складової організаційно-технічного об'єкта, з представленням НМІ у вигляді взаємопов'язаних багаторівневих GUI елементів, з урахуванням параметрів і подій, що дозволило автоматизувати реалізацію заданих функцій, відповідно до вимог, які висуваються до організаційно-технічного виробничого об'єкта. Вперше запропоноване структурне уявлення кібернетичної складової організаційно-технічного об'єкта у вигляді математичного опису зв'язків між основними елементами НМІ, що дозволило реалізувати представлення адитивного кібер-дизайну, за рахунок автоматизації процесу реалізації подій GUI елементів у вигляді фрагментів програмного коду. Отримала подальший розвиток методологія сигнально-кодової конструкції, на базі якої запропонований метод графічного представлення конструкції кібернетичної складової організаційно-технічного об'єкта, яка, на відмінну від існуючих (методології Джексона, Гейн-Сарсон), дозволяє відображати взаємодію основних елементів НМІ для редукції розробки структури. Вперше розроблені синтаксична і семантична моделі декларативної мови визначення і маніпулювання даними предметної області, близької до деякої підмножини природної мови. Запропонована мова, на відмінну від існуючих, не вимагає від розробника знання об'єктно-орієнтованих мов високого рівня програмування, на базі яких розробляються кібернетичні складові, що істотно спрощує процес керування організаційно-технічним виробничим об'єктом. Впровадження розроблених у дисертаційній роботі методів, моделей та технологій дозволить модернізацію існуючих і розробку перспективних систем керування процесами в складних організаційно-технічних виробничих об'єктах на базі кібер-фізичних систем.

Ключові слова: організаційно-технічний об'єкт, функціонування, синтез, кібер-фізичні системи, керування процесами, методи, моделі, адитивний кібер-дизайн, гнучкість процесу керування, синтаксична модель, НМІ, GUI.

ABSTRACT

Yevsieiev V.V. Methods and models of cyber-physical process control in organizational and technical production facilities. – Manuscript.

The thesis for the degree of Doctor of Engineering Sciences in specialty 05.13.07 "Automation of control processes " (05 – technical sciences). – Kharkiv National University of Radio Electronics, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2021.

In the dissertation work, the urgent scientific problem of developing the theoretical foundations for creating methods, models and technology for processes control in complex organizational and technical production facilities based on cyber-physical systems within the framework of the concept of Industry 4.0 is solved. As a result of the research, the following results were obtained: firstly, an architectural and logical model of processes cyber-physical control decomposition in complex organizational and technical objects was proposed; firstly, methods of process control in organizational and technical objects are interconnected; firstly a technology for the development of cyber-physical production systems was proposed; the method of representing structural system models of cyber-physical control has been improved; the model of the the organizational and technical object control life cycle has been improved; the introduction of the methods, models and technologies developed in the dissertation work will allow the modernization of existing and development of promising process control systems in complex organizational and technical production facilities based on cyber-physical systems; the method of algorithms synthesis for the functioning of cyber-physical control has been improved, which made it possible to combine the algorithms for the functioning of each level of management of an organizational and technical object into a single functioning system; firstly, a model of the organizational and technical object cybernetic component formalization was developed; firstly, a structural representation of the organizational and technical object cybernetic component was proposed in the form of connections mathematical description the between the HMI main elements, which made it possible to implement the representations of additive cyber design; the methodology of signal-code construction was further developed; firstly, syntactic and semantic models of a declarative language for defining and manipulating data in the subject area have been developed

The implementation of the methods, models and technologies developed in the dissertation work will allow the modernization of existing and the development of promising process control systems in complex organizational and technical production facilities based on cyber-physical systems.

Keywords: organizational and technical objects, functioning, synthesis, cyber-physical system, process control, methods, models, additive cyber-design, flexibility of the control process, syntactic model, HMI, GUI.

Підп. до друку 24.03.21. Формат 60x84 1/16. Умов. друк. арк. 2,6.
Тираж 100 прим. Ціна договірна. Зам. №24/1

Віддруковано в типографії ФОП Андреев К.В.
61157, Харків, вул. Богомольця, 9, кв. 50.
Свідоцтво про державну реєстрацію
№24800170000045020 від 30.05.2003 р.
ep.zakaz@gmail.com
тел. 063-993-62-73