

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
„КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО”**

На правах рукопису

ДЬЯКОВ СЕРГІЙ ОЛЕКСАНДРОВИЧ

УДК 621.865.8

**ДИНАМІЧНЕ ОПЕРАТИВНЕ КЕРУВАННЯ ГНУЧКОЮ ВИРОБНИЧОЮ
СИСТЕМОЮ В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ**

Спеціальність: 05.13.07 – Автоматизація процесів керування

ДИСЕРТАЦІЯ

на здобуття вченого ступеня кандидата технічних наук

Науковий керівник:
Ямпольський Леонід Стефанович,
кандидат технічних наук, професор

Київ – 2017

ЗМІСТ

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ.....	6
ВСТУП.....	8
1. ЗАДАЧА ДИНАМІЧНОГО ОПЕРАТИВНОГО КЕРУВАННЯ ГНУЧКОЮ ВИРОБНИЧОЮ СИСТЕМОЮ	15
1.1. Гнучка виробнича система як динамічне середовище	15
1.2. Роль та місце динамічного оперативного керування ГВС у ієрархії задач управління ІВС	18
1.2.1. Аналіз ієрархії та задач рівнів управління ІВС	18
1.2.2. СОУ ГВС як об'єкт динамічного оперативного керування	21
1.3. Структурно-функціональний аналіз СОУ ГВС	24
1.4. Формалізація та автоматизація процесу ДОК	34
1.5. Аналіз існуючих підходів до проектування та вибору значень показників СОУ 38	
Висновки. Мета та задачі дослідження.....	41
2. ФОРМУВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧІ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ ДОК.....	43
2.1. Формування набору вирішальних динамічних показників та створення класифікатора СОУ	43
2.1.1. Аналіз підходів до оперативного планування.....	45
2.1.2. Визначення політик вибору часу перепланування	49
2.1.3. Особливості застосування стратегій перепланування.....	52
2.1.4. Аналітичний огляд методів оперативної диспетчеризації.....	53
2.2. Аналіз вимог та обмежень щодо процесу ДОК з боку ГВС	68
2.2.1. Визначення вимог ГВС як зворотнього зв'язку у процесі ДОК.	68
2.2.2. Аналіз обмежень ГВС.....	69

2.3. Побудова логічної послідовності налаштування вирішальних динамічних показників СОУ.....	80
2.4. Побудова концептуальної моделі СОУ	81
Висновки.	86
3. ФОРМУВАННЯ МУЛЬТИАГЕНТНОГО СЕРЕДОВИЩА ДИНАМІЧНОГО ОПЕРАТИВНОГО КЕРУВАННЯ ГВС.....	87
3.1. Визначення вагомості реляційних зв'язків між обмеженнями ГВС та показниками СОУ	87
3.2. Обґрунтування вибору агентно-орієнтованого підходу до автоматизації процесу ДОК.....	93
3.3. Розробка концепції нечіткої метайдентифікації у процесі ДОК	102
3.4. Аналіз задач компонент ГІМАК АОП та їх взаємодія в процесі функціонування	105
3.5. Синтез узагальненої моделі гнучкої інтелектуалізованої мультиагентної системи ДОК.....	107
Висновки	109
4. РОЗРОБКА СППР НА ОСНОВІ МУЛЬТИАГЕНТНОГО СЕРЕДОВИЩА ДОК.....	111
4.1. Проектування та розробка СППР на основі ГІМАС.....	111
4.2. Розробка алгоритмів синтезу структури ГІМАС та пошуку значень ВДП	113
4.3. Розробка програмного та інструментального забезпечення СППР	114
4.3.1. Проектування мультиагентного середовища СППР.....	116
4.3.2. Інформаційне узгодження складових СППР	119
4.3.3. Розробка інтерфейсу користувача СППР	120
Висновки	126

5. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМИ ДИНАМІЧНОГО ОПЕРАТИВНОГО КЕРУВАННЯ ГВС	127
5.1. Постановка задачі та розробка методики експериментального дослідження	127
5.2. Налаштування та використання СППР на основі ГІМАС для реалізації процесу ДОК.....	128
5.2.1. Визначення вимог та обмежень тестових ГВС	128
5.2.2. Налаштування СППР на основі ГІМАС	130
5.2.3. Отримання результатів роботи СППР.....	132
5.3. Побудова імітаційної моделі ГВС з методом диспетчеризації на основі МАС	134
5.3.1. Синтез моделі та архітектури мультиагентного середовища для реалізації прямої диспетчеризації	135
5.3.2. Визначення функцій агентів МАС ДК та міжагентна комунікація	137
5.3.3. Застосування СНВ для підвищення ефективності роботи методу МАС динамічного керування	143
5.4. Аналіз результатів експериментальних досліджень роботи СДОК, що містить СППР на основі ГІМАС	146
5.4.1. Порівняння результатів роботи ГВС зі СДОК та без неї при виникненні невизначеності в реальному часі	146
5.4.2. Перевірка ефективності застосування механізму нечіткого виведення у СОУ з методом диспетчеризації на основі МАС.....	149
Висновки	151
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	153
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	156
ДОДАТОК А.....	175

ДОДАТОК Б	177
ДОДАТОК В	179
ДОДАТОК Г	181

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ

АОП	-	агентно-орієнтована підсистема
АСНД	-	автоматизована система наукових досліджень
АСТПВ	-	автоматизована система технологічної підготовки виробництва
АСУ	-	автоматизована система управління
АТМ	-	автоматизований транспортний модуль
АТСС	-	автоматизована транспортно-складська система
БЗ	-	база знань
ВДП	-	визначальні динамічні показники
ВОГВС	-	вимоги і обмеження гнучкої виробничої системи
ВОМЗ	-	властивості і обмеження модельованої задачі
ГВМ	-	гнучкий виробничий модуль
ГВС	-	гнучка виробнича система
ГІМАК	-	гнучка інтелектуалізовано мультіагентна конфігурація
ГІМАС	-	гнучка інтелектуалізована мультіагентна система
ГКС	-	гнучка комп'ютеризована система
ДОК	-	динамічне оперативне керування
ЕС	-	експертна система
ІА	-	інтелектуалізований агент
ІВС	-	інтегрована виробнича система
КУПД	-	конкретна унікальна послідовність дій
ЛПН	-	логічна послідовність налаштування
МАПАВ	-	мультіагентна підсистема автоматизованого вибору
МАС	-	мультіагентна система
НВДП	-	набір вирішальних динамічних показників
ОУ	-	об'єкт управління
ПД	-	правило диспетчеризації
ПОІ	-	понад оперативні інтервали
ПР	-	промисловий робот

САПР	-	система автоматизованого проектування
СДОК	-	система динамічного оперативного керування
СНВ	-	система нечіткого виведення
СОУ	-	система оперативного управління
СППР	-	система підтримки прийняття рішень
СУ	-	система управління
УМВ	-	узагальнена модель вибору
ФСІА	-	функціонально спеціалізований інтелектуалізований агент
ЧПУ	-	чисельно-програмне управління
ШНС	-	штучна нейронна сітка

ВСТУП

Науково-технічний прогрес призводить до появи нових об'єктів керування, що призначені для функціонування в апріорі невизначених умовах при висуванні підвищених вимог до їх режимів функціонування. Такі умови мають місце при виконанні операцій у виробничих середовищах, ліквідації наслідків аварій, при роботі з вибухонебезпечними предметами тощо. Застосування автоматизованих об'єктів в таких умовах повинно сприяти ефективному виконанню поставлених задач та уникненню загроз здоров'ю та життю людини-оператора.

На сьогоднішній день виробничі середовища мають високу ступінь гнучкості, оскільки стикаються з постійною зміною вимог споживачів. Гнучкі виробничі системи (ГВС) з'явилися як потужні системи, висока гнучкість яких є важливим чинником для забезпечення конкурентоздатності у високо динамічному середовищі. Гнучка виробнича системи – це складна система реального часу, що включає такі основні елементи, як виробничі модулі, автономні транспортні модулі та складські системи.

Характерною ознакою ГВС, яка відрізняє її від звичайних виробничих систем, є принцип організації вантажопотоків, що передбачає наявність автоматизованої транспортно-складської системи (АТСС). Зазвичай об'єкти виробництва у ГВС проходять через різні виробничі модулі для здійснення відповідних операцій, що значно підвищує важливість використання транспортних модулів. Аналіз роботи звичайних комплексів устаткування з числовим програмним керуванням показує, що значні витрати робочого часу пов'язані із несвоєчасним забезпеченням цього устаткування заготовками, інструментом, оснасткою, тобто з неоптимальністю диспетчеризації матеріальних потоків. Транспортні операції являють собою прямий вираз зв'язків між окремими фазами технологічного процесу, визначаючи тим самим залежність його ефективності від реалізації міжопераційного транспортування об'єктів і засобів виробництва.

Проблеми керування ГВС пов'язані зі складністю взаємозв'язків між її компонентами. Для успішного функціонування ГВС необхідно ще на стадії їх проектування розв'язувати комплекс задач, серед яких однією з найважливіших є формування науково обґрунтованих вимог до технічних характеристик елементів АТСС та структури транспортних мереж (ТрМ), які забезпечують можливість оптимального керування адресуванням матеріальних потоків між компонентами ГВС.

Також надзвичайно важливим є оперативне управління на стадії функціонування ГВС для забезпечення вчасного переміщення об'єктів виробництва між виробничими модулями. Вирішення цієї проблеми повинне містити апіорне планування розкладу дій транспортних модулів для досягнення поставлених цілей. Однак значний вплив невизначеностей виробничого середовища на практиці часто робить застосування попередньо складеного розкладу неприйнятним. Тому виникає необхідність здійснення операцій контролю відповідності реального ходу виробничого процесу до запланованого та, за необхідності застосування механізмів корекції виробничого плану. Безпосередньо ж для керування матеріальними потоками в реальному часі застосовують диспетчеризацію. Існує значна кількість підходів до вирішення наведених задач, серед яких необхідно обирати такі, що найкращим чином задовольнятимуть конкретну виробничу систему.

Актуальність теми. Продуктивність роботи гнучких виробничих систем (ГВС) значною мірою залежить від ефективності їх систем керування. Дане твердження, з урахуванням наявних у процесі функціонування виробничих систем невизначених ситуацій, обумовлює зростаючий інтерес до вирішення задач керування ГВС в умовах невизначеності.

У ГВС основні управляючі функції здійснюються за допомогою системи оперативного управління (СОУ), головною метою якої є організація оперативного управління матеріальними потоками, що полягає в упорядкуванні проходження матеріальних потоків через оброблювальні ресурси.

Отже, актуальною є задача ефективного налаштування таких показників СОУ ГВС, які безпосередньо впливають на здійснення процесу оперативного управління виробництвом в реальному часі в умовах невизначеності щодо параметрів власне об'єкта і навколишнього середовища, що виявляє себе у вигляді контрольованих та неконтрольованих збурень і перешкод різної природи. У даній роботі ця задача визначається як *динамічне оперативне керування (ДОК)*, а зазначені показники – як *вирішальні динамічні показники (ВДП)* системи оперативного управління.

Необхідність вирішення таких задач потребує розвитку підходів та засобів автоматизованого та інтелектуалізованого керування ГВС в умовах невизначеності із застосуванням методів та технологій штучного інтелекту. Використання таких методів дозволить знизити трудомісткість та підвищити якість рішень щодо вибору значень вирішальних динамічних показників системи оперативного управління. Це в свою чергу дозволить забезпечити можливість виконання необхідних функцій ГВС в умовах невизначеності.

Об'єктом дослідження є процеси оперативного управління ГВС в умовах невизначеності.

Предметом дослідження є показники оперативного управління ГВС, що безпосередньо впливають на функціонування системи в умовах невизначеності.

Мета роботи. Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності роботи гнучкої виробничої системи шляхом збільшення рівня автоматизації процесів налаштування та функціонування складових системи оперативного управління.

Для реалізації поставленої мети в дисертації необхідно вирішити такі **задачі**:

1. На основі структурно-функціонального аналізу роботи СОУ ГВС створити формалізовану модель процесу динамічного оперативного

керування та синтезувати структуру системи динамічного оперативного керування (СДОК).

2. Створити класифікатор вирішальних динамічних показників СОУ.
3. Дослідити ГВС щодо можливих типів невизначених ситуацій, які можуть виникати у процесі функціонування.
4. Визначити логічну послідовність здійснення процесу вибору раціональних значень із класифікатора ВДП, за яких можливе адекватне обслуговування вимог та обмежень ГВС.
5. Синтезувати узагальнену концептуальну модель СОУ на основі створеної логічної послідовності налаштування вирішальних динамічних показників.
6. Обґрунтувати вибір методів прийняття рішень щодо визначення раціональних значень ВДП СОУ у процесі ДОК.
7. Розробити підхід до автоматизації процесу ДОК на основі обраних методів прийняття рішень в умовах невизначеності.
8. Створити алгоритмічне та програмне забезпечення СДОК на основі розробленого підходу у вигляді системи підтримки прийняття рішень (СППР).
9. Провести експериментальні дослідження та порівняти за обраними критеріями ефективності результати роботи СДОК для ГВС з різними значеннями показників.

Методи дослідження. У ході досліджень використовувалися методи загальної теорії автоматичного управління, теорії нечітких множин, нейронних мереж, системного аналізу, мультиагентних систем, методів функціонального аналізу (зокрема, Ф-функції).

Наукова новизна одержаних результатів полягає у наступному:

- Вперше запропоновано використовувати класифікатор показників системи оперативного управління, які безпосередньо впливають на керування

ГВС в умовах невизначеності, як основне джерело знань при автоматизації інтелектуалізованого процесу налаштування їх значень;

- Вперше розроблено мультиагентний підхід до автоматизації процесу вибору значень показників системи оперативного управління гнучкою виробничою системою на основі нечіткої метайдентифікації;
- Вдосконалено мультиагентний метод оперативної диспетчеризації ГВС шляхом використання системи нечіткого виведення на основі бази правил, що переважає існуючий підхід на основі міжагентної комунікації за часом визначення пріоритету обрання транспортними модулями завдання на обслуговування.

Практичне значення одержаних результатів роботи визначається спрямованістю на зменшення трудомісткості та підвищення якості рішень, котрі приймаються на етапі технологічної підготовки гнучких виробничих систем при виборі основних параметрів системи оперативного управління, що безпосередньо впливають на керування в реальному часі в умовах невизначеності, а також при модернізації, переналагодженні й зміні конфігурації виробничої системи.

У роботі створено класифікатор вирішальних динамічних показників оперативного управління ГВС, що можуть застосовуватися як інформаційне забезпечення вирішення завдання автоматизації процесу динамічного оперативного керування;

Також у роботі розроблено мультиагентний підхід до автоматизації процесу динамічного оперативного керування, що може бути використаний як методичне забезпечення для розробки програмних продуктів автоматизованих систем керування ГВС.

На основі розробленого підходу створено алгоритмічне та програмне забезпечення системи підтримки прийняття рішень для автоматизації процесу динамічного оперативного керування ГВС.

Зв'язок роботи з науковими програмами планами й темами.

Робота виконана в рамках планів наукових досліджень кафедри технічної кібернетики КПІ ім. Ігоря Сікорського, у виконанні яких здобувач брав безпосередню участь, як відповідальний виконавець, зокрема в рамках міжнародного проекту "Подвійний магістерський диплом по автоматизації / механотроні ці країн ЄС – країн партнерів" №517138-TEMPUS-1-2011-1-CZ-TEMP-JPCR.

Особистий внесок здобувача. Автором особисто проведено аналітичний огляд відомих підходів до налаштування та функціонування процесу оперативного управління гнучкою виробничою системою [144]. Розроблено класифікатор вирішальних показників системи оперативного управління, при роботі в реальному часі в умовах невизначеності [144, 149]. На основі отриманого класифікатора показників оперативного управління із використанням методу Ф-функції синтезовано концептуальну модель складової частини системи оперативного управління, що здійснює керування в реальному часі в умовах невизначеності [149]. Обґрунтовано необхідність використання методів штучного інтелекту, зокрема систем нечіткого виведення та інтелектуалізованих агентів у складі мультиагентних систем для вирішення задач налаштування та функціонування процесу оперативного управління гнучкою виробничою системою [148]. Розроблено підхід до автоматизації процесу вибору значень вирішальних динамічних показників оперативного управління на основі концептуальної моделі системи оперативного управління гнучкою виробничою системою із використанням мультиагентного підходу [147]. Створено алгоритмічне та програмне забезпечення системи підтримки прийняття рішень для автоматизації процесу динамічного оперативного керування гнучкою виробничою системою [145].

Апробація роботи. Основні положення дисертації доповідалися та обговорювалися на наступних науково-технічних конференціях: науково-

технічна конференція "Автоматизація: проблеми, ідеї, рішення 2013" з темою доповіді "Інтелектуальне керування рухом промислового робота в умовах невизначеності на основі гібридної нейрофаззи системи", 16-20.09.2013р., м. Київ; XXI міжнародна конференція з автоматичного управління "Автоматика 2014", з темою "Мультиагентна система диспетчеризації автономних транспортних модулів", 23-27.09.2014, м. Київ; III Міжнародна науково-практична конференція "Інформаційні управляючі системи та технології" з темою "Мультиагентна система диспетчеризації автономних транспортних модулів на основі нечіткої логіки", 23-25.09.2014, м. Одеса; Всеукраїнська науково-практична конференція "Електронні та мехатронні системи: теорія, інновації, практика", з темою "Узагальнена концептуальна модель системи динамічного керування у гнучкій виробничій системі" 05.11.2015, м. Полтава.

Публікації. За тематикою роботи опубліковано 10 наукових праць, у тому числі: 6 статей у наукових фахових виданнях (усі з них у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз: 1 – Index Copernicus, Ulrich's Periodicals Directory, Google scholar та PИHЦ; 1 – WorldCat, Ulrich's Periodicals Directory, Google scholar та PИHЦ; 4 – WorldCat, Google scholar та PИHЦ), 4 тези доповідей в збірниках матеріалів конференцій, в тому числі міжнародних.

1. ЗАДАЧА ДИНАМІЧНОГО ОПЕРАТИВНОГО КЕРУВАННЯ ГНУЧКОЮ ВИРОБНИЧОЮ СИСТЕМОЮ

1.1. Гнучка виробнича система як динамічне середовище

Продуктивність роботи сучасних виробничих систем значною мірою залежить від ефективної взаємодії та узгодженості всіх її складових на всіх етапах функціонування [136, 140]. У зв'язку з цим виробництво слід розглядати як інтегровану виробничу систему.

Визначення 1.1. *Інтегрована виробнича система (ІВС)* – це багаторівнева ієрархічна система, що реалізує комплексно-автоматизоване групове багатомономенклатурне виробництво, яке перебудовується оперативно у визначеному параметричному діапазоні продукції [172, 190].

Для комплексно автоматизованого виробництва характерною ознакою є наскрізна автоматизація виробництва продукції – починаючи із завдання на проект і закінчуючи готовою продукцією (проектування – планування – виготовлення) [174].

При груповій технології виробництва передбачається можливість організації багатомономенклатурного виробництва, при якому обладнання повинне автоматично переналаштовуватися на випуск нової продукції із використання необхідного набору інструментів.

Структура інтегрованої виробничої системи включає (рис. 1.1):

1) гнучкі комп'ютеризовані системи підготовки, організації та управління (ГКС ПОУ);

2) гнучку виробничу систему.

ГКС ПОУ включають:

- автоматизовані системи наукового дослідження (АСНД);
- система автоматизованого проектування (САПР);
- автоматизована система технологічної підготовки виробництва (АСТПВ);
- автоматизована система управління виробництвом (АСУВ).

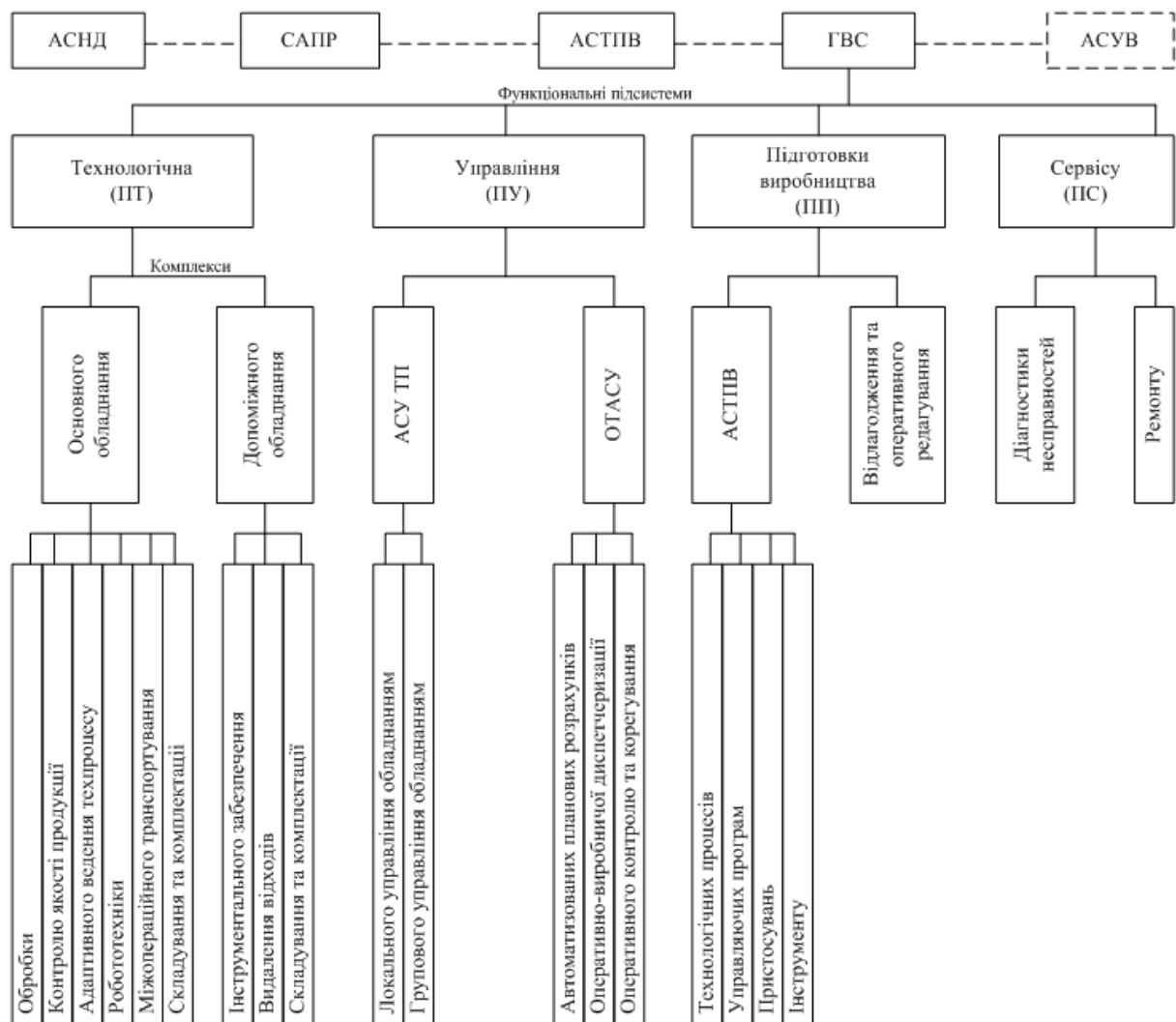


Рисунок 1.1. Узагальнена структура гнучких комп'ютеризованих систем в інтегрованому виробництві

Визначення 1.2. Гнучка виробнича система – це система, що являє собою сукупність різних комбінацій обладнання з числовим програмним керуванням (роботизованих технологічних комплексів, виробничих модулів або іншого технологічного устаткування) і систем забезпечення їх функціонування в автоматичному режимі протягом заданого інтервалу часу, що має здатність автоматизовано переналагоджуватися на виробництво виробів довільної номенклатури у заданих межах значень їх характеристик [172, 190].

ГВС складається з наступних функціональних підсистем:

а) технологічна підсистема (комплекси основного технологічного устаткування і допоміжного обладнання);

б) керуюча підсистема (організаційно-технологічні АСУ й автоматизована система управління технологічними процесами АСУТП);

в) сервісна підсистема (діагностика і ремонт основного технологічного устаткування);

г) підсистема підготовки виробництва (підготовка технологічних процесів, управляючих програм до технологічного устаткування, інструментів та пристроїв).

Отже, ГВС розглядається як виробнича одиницю (лінія, ділянка, цех, завод), що працює на основі безлюдної технології, функціонування усіх виробничих компонентів якої координується за рахунок багаторівневої системи керування, що робить можливою як найшвидшу перебудову системи на випуск нової продукції [142, 167].

Для функціонування ГВС характерним є виникнення у виробничому середовищі невизначених ситуацій у реальному часі. Це дає можливість стверджувати, що функціонування ГВС відбувається у динамічному виробничому середовищі.

Твердження 1.1. Під динамічним виробничим середовищем розуміється таке виробниче середовище, виробничий процес якого відбувається за наявності невизначених подій у реальному часі, що впливають на його хід та\або продуктивність [144].

Незважаючи на багатокомпонентність та високу інтегрованість, визначальною підсистемою ГВС являється виробнича підсистема, а серед задач синтезу ГВС – основними є задачі проектування транспортної підсистеми, технологічної підсистеми та системи управління ГВС [158]. Вдало обрана схема транспортної мережі та оптимально налаштовані системи управління виробництвом на всіх рівнях можуть допомогти мінімізувати втрати від виникнення нештатних ситуацій, що пов'язані з транспортними та оброблювальними ресурсами [182].

1.2. Роль та місце динамічного оперативного керування ГВС у ієрархії задач управління ІВС

1.2.1. Аналіз ієрархії та задач рівнів управління ІВС

При побудові структури систем управління ІВС зазвичай використовується ієрархічний та функціональний принципи поділу на підсистеми. Усі рівні характеризуються особливими цілями та задачами керування.

Згідно з ієрархічним принципом можуть бути виділені такі рівні та підсистеми в ГВС:

Виконавчий рівень (перший) утворений з окремих систем управління виробничими ланками та обладнанням. Мета даного рівня управління – вибір та підтримка необхідних режимів здійснення технологічних операцій. Управління в основному зводиться до контролю параметрів виконання технологічної операції і до безпосереднього впливу на виконавчі механізми [179].

Тактичний рівень (другий) складається з систем диспетчеризації виробничих ділянок і ліній. Основна мета управління на цьому рівні – оперативна диспетчеризація переміщення матеріальних потоків, що реалізується за допомогою вибору і підтримки режимів функціонування взаємозалежних виробничих ланок. На даному рівні здійснюється пристосування календарного плану технологічних операцій до поточної виробничої ситуації.

Стратегічний рівень (третій) ієрархії утворений системами організаційного керування виробничими підрозділами. Основна мета даного рівня – це напрацювання узгодженого плану роботи структурних підрозділів протягом оперативного планового періоду. На цьому рівні деталізуються виробничі завдання на випуск продукції виробничими ланками.

При поєднанні систем керування другого і третього рівнів утворюється організаційно-технологічна автоматизована система управління (ОТАСУ) виробничими підрозділами.

Адміністративний рівень (четвертий) ієрархії складають системи, які повинні забезпечувати управління підприємством у цілому. Мета управління – підготовка та організація спільної роботи виробничих та інших підрозділів підприємства, що здійснюють випуск заданої кількості продукції встановлених техніко-економічних показників. Для здійснення поставленої мети в управлінні мають бути реалізовані функції економічного характеру.

Особливості організаційно-економічних і організаційно-технологічних систем відображаються у основних задач управління (табл. 1.1), котрі забезпечують реалізацію загальної мети підприємства [190].

Твердження 1.2. *Метою роботи підприємства* є виконання планового завдання, що зазначає номенклатуру, обсяг, терміни та умови залучення виробничих ресурсів.

При здійсненні планування на основі планового завдання знаходяться техніко-економічні показники підприємства в цілому і визначається деталізація показників по підрозділах, цехах і т.д. Залежно від періоду планування поділяють на поточне та перспективне.

Перспективне планування передбачає створення планів роботи підприємства на довгий період (більше року).

Поточне планування може бути розділене на техніко-економічне (річне) та оперативне. Техніко-економічне планування конкретизує показники перспективного плану на поточний період і корегує їх згідно із вимогами завдання. Оперативним плануванням конкретизуються параметри техніко-економічного плану на малі проміжки планового періоду (місяць, декада, доба) та задаються дії щодо їх виконання. Оперативні плани враховують результати виконання попередніх планів.

Головною складовою виробничих відносин у складі ІВС являється ГВС, зв'язуючи різні підсистеми, такі як: проектування та підготовки виробництва з безпосередньо засобами обробки матеріалів. У ГВС функції керування здійснюються за допомогою ОТАСУ, головна мета якої полягає в організації оперативного управління матеріальними потоками, що полягає в упорядкуванні

проходження матеріальних потоків через оброблювальні ресурси. Таким чином, ОТАСУ також називають система оперативного управління матеріальними потоками (СОУ МП).

Таблиця 1.1.

Ієрархія і задачі рівнів управління ІВС

Рівень	Тип системи управління	Мета і виконувана функція управління	Задачі
АСУВ	Адміністративний	Техніко-економічне планування; Економічне управління	1. Формування підприємницької програми підприємства 2. Статистичний облік показників роботи підприємства 3. Управління збутом продукції 4. Контроль якості готової продукції 5. Управління матеріально-технічним постачанням
Стратегічний	ОТАСУ – система оперативного планування	Оперативне планування; Організаційне управління	1. Формування календарних планів змінно-добових завдань 2. Оперативний облік загальних показників роботи ІПС 3. Коректування календарних планів 4. Ведення оперативних баз даних
Тактичний	ОТАСУ – система оперативно-диспетчерського управління	Оперативна диспетчеризація; Технологічне управління	1. Диспетчеризація матеріальних потоків 2. Аналіз та оперативний контроль 3. Облік первинної інформації про стан обладнання 4. Диспетчеризація інформаційних потоків 5. Оперативне регулювання
Виконавчий	АСУТП СУ ГВМ СУ АТЗ СУ АНС	Логіко-програмне управління обладнанням; Локальне управління	1. Управління технологічними операціями 2. Управління транспортними операціями 3. Управління допоміжними операціями 4. Управління ПР

1.2.2. *СОУ ГВС як об'єкт динамічного оперативного керування*

Слід відмітити, що для забезпечення успішної взаємодії складових виробничої системи та збереження рівня її продуктивності необхідно здійснювати ефективне керування в умовах невизначеності [194]. Враховуючи значну кількість невизначених подій на стратегічному і тактичному рівнях функціонування та їх вплив на роботу системи, при розгляді ієрархії системи керування ГВС, слід детальніше зупинитися на *системі оперативного управління* (СОУ) [190].

У організаційно-технологічних системах разом розглядаються три задачі: оперативне планування, контроль (знаходження відхилення поточного стану від запланованого) та регулювання (диспетчеризація). Цей перелік задач лежить у основі оперативного управління і виконується системою оперативного управління.

Проаналізуємо функціональну структуру та основні принципи роботи СОУ ГВС (рис. 1.2). СОУ будується за принципом управління із зворотним зв'язком та утворюється з наступних основних блоків:

- оперативно-календарного планування (*P1*);
- оперативного обліку (*P2*);
- оперативного контролю (*P3*);
- оперативної диспетчеризації (*P4*);
- локального управління устаткуванням (*P5*);
- оперативного коректування (*P6*);
- статистичного обліку (*P7*).

До СОУ на вхід подається планове завдання, що представлене як виробнича програма, технологія обробки, фонди матеріальних ресурсів та техніко-економічні показники роботи ГВС [133]. На основі заданої цілі *Z* блок *P1* створює поопераційні календарні плани і складає змінно-добовий план *P* завантаженості обладнання.

У блоці *P2* здійснюється обробка та зберігання первинних даних про стан устаткування та матеріальних потоків, що утворюють об'єкт управління (ОУ).

Первинні дані надходять як сигнали X щодо зміни компонентів ОУ (наприклад сигнал про закінчення запланованих робіт згідно із завданням P). Також блок **P2** здійснює формування вектора S – поточного стану комплексу всіх компонентів ОУ.

У блоці **P3** проводиться подальший аналіз ситуацій, що мали місце в ОУ, визначається співвідношення між запланованим та реальним ходом виробництва. З цією метою розраховується ступінь неузгодженості $D = S - P$. У разі, коли дана величина не перевищує допустимого значення, дані про реальний стан ОУ надходять до **P4** задля визначення Y – керуючого впливу, що покликаний усунути неузгодженості та виконати наступне завдання з плану P . Реалізацію керуючого впливу Y здійснює блок **P5**, котрий додатково користується власними вхідними даними щодо стану K та керуючих команд V .

У разі перевищення величиною неузгодженості допустимого значення управління ГВС переходить до блоку **P6**, котрий здійснює перерахунок календарного плану на залишок планового періоду з урахуванням обмежень щодо виробничих ресурсів. Згідно із результатами розрахунків формується рішення щодо подальшого функціонування ГВС:

- продовжувати роботу ГВС згідно із перерахованим планом за умови можливості дотримання встановленого терміну виконання виробничої програми.
- надіслати повідомлення W про неможливість завершення виробничої програми в заданий термін без внесення змін до планового завдання та переліку наявних виробничих ресурсів.

Зберігання та статистичний аналіз інформації про стан S , що може бути використана на вищих рівнях управління (АСУВ), здійснюється у блоці **P7**. Там здійснюється обробка облікових даних щодо ОУ за зміну і формується узагальнююча інформація F , яка містить зокрема дані про число виготовлених деталей, рівень завантаження та простоїв обладнання, обсяг незакінченого виробництва.

управління ГВС, можна стверджувати, що СОУ відіграє провідну роль у здійсненні процесу управління ГВС в умовах невизначеності, враховуючи значну кількість невизначених подій на оперативному рівні функціонування виробництва та їх вплив на його хід та продуктивність.

Твердження 1.4. Враховуючи динамічний характер виробничого середовища та значну складність структури і функцій СОУ надзвичайно важливо виділити та правильно налаштувати *вирішальні динамічні показники (ВДП) СОУ* – такі показники, що безпосередньо впливають на здійснення процесу оперативного управління виробництвом в реальному часі в умовах невизначеності.

Визначення 1.3. Динамічне оперативне керування (ДОК) ГВС – це процес налаштування на етапах підготовки та функціонування гнучкої виробничої системи таких значень *вирішальних динамічних показників*, що здатні задовольнити поточні вимоги та обмеження ГВС (ВО ГВС).

Отже, для ефективної реалізації динамічного оперативного керування необхідно провести детальний структурно-функціональний аналіз СОУ при роботі в умовах невизначеності, на основі якого здійснити наступні кроки:

- визначити основні функції СОУ в умовах невизначеності та компонентний склад модулів, що їх реалізують;
- визначити узагальнені основні динамічні показники СОУ, що безпосередньо впливають на здійснення основних функцій в умовах невизначеності;
- синтезувати необхідні управляючі структури для реалізації ДОК, тобто для налаштування та корекції значень ВДП.

1.3. Структурно-функціональний аналіз СОУ ГВС

Сформулюємо визначення та структуру функції процесу оперативного керування Φ_{COY} в умовах невизначеності.

Твердження 1.1. Загальна функція процесу оперативного керування Φ_{COY} полягає у розв'язанні задачі просторового та часового упорядкування необхідного обсягу запланованих робіт. Під просторовим упорядкуванням розуміється призначенні всім виконавцям поопераційних планів робіт, а під часовим – визначення черговості або часу виконання операцій.

Процес розв'язання даної задачі може бути представлений організованою множиною пов'язаних між собою простих операцій, тобто сукупністю виконуваних СОУ функцій, необхідність яких випливає з наступного твердження.

Твердження 1.2. Через неможливість виключення ряду випадкових факторів, що здійснюють вплив на виробничий процес (поломки обладнання, брак, термінова зміна плану, перебої у постачанні ресурсів тощо) можна стверджувати, що для виконання календарних планів та виробничих програм, що були розроблені, необхідно здійснювати операції оперативного контролю та корегування виробничого процесу [133, 186].

Отже, відповідно до необхідності здійснення в рамках процесу динамічного керування окремих наведених операцій, загальна функція Φ_{COY} розділяється на функції цих операцій:

$$\Phi_{\text{COY}} \rightarrow \{\Phi_{\text{ОП}}, \Phi_{\text{ОКон}}, \Phi_{\text{ОКор}}, \Phi_{\text{ОД}}\} \quad (1.1)$$

де:

$\Phi_{\text{ОП}}$ – функція оперативного планування;

$\Phi_{\text{ОКон}}$ – функція оперативного контролю;

$\Phi_{\text{ОКор}}$ – функція оперативної корекції;

$\Phi_{\text{ОД}}$ – функція оперативної диспетчеризації.

Докладніше розглянемо функції динамічного керування.

Функція оперативного планування.

Тривалість оперативного планового інтервалу у ГВС зазвичай визначається однією змінною, а його виконавцем є технологічне устаткування [190].

Основною математичною формою подання таких задач являється оптимізаційна модель, а серед основних методів розв'язання – дискретне лінійне програмування (ДЛП) та імітаційне моделювання [133, 197].

Основними об'єктами у процесі планування виступають завдання (роботи), що являють собою сукупність технологічних операцій, партій деталей, для яких необхідно визначити послідовність обслуговування на обладнанні за фіксованих технологічних маршрутів.

Отже формалізуємо визначену задачу.

Номенклатура продукції складається з n найменувань ($j = 1, n$), що виробляються на m групах ($k = 1, m$) обладнання.

Для виготовлення кожного найменування продукції заздалегідь визначено технологічний маршрут – послідовність проходження через групи обладнання, що може бути подана у наступному вигляді: $G_j = (L_{ij} \mid i = 1, M_j)$, де L_{ij} – технологічна операція, що здійснюється i -ою у послідовності виготовлення j -ої одиниці продукції; M_j – загальна кількість операцій, що здійснюються над j -ою деталлю.

Технологічні операції $L_{ij} = (Q_{ij}, T_{ij})$, що утворюють маршрут, мають наступні характеристики:

$Q_{ij} = k$ – номер групи налаштованого на виконання операції L_{ij} обладнання;

T_{ij} – нормативний час виконання операції L_{ij} .

Отже, необхідно створити розклад $P = (T_{ij}^i \mid i = 1, M_j, j = 1, n)$, що задає час початку виконання операцій L_{ij} (час початку обробки партії деталей на певних одиницях обладнання) і водночас задовольняє системі наступних обмежень:

– $T_{ij}^H \geq T_{i-1,j}^K$ – умова дотримання технологічної послідовності;

– умова дотримання технологічних маршрутів;

– умова безперервного виконання операцій: $T_{ij}^K = T_{ij}^H + T_{ij}$;

– $(T_{i1j1}^H \leq T_{i2j2}^H) \Rightarrow (T_{i1j1}^K \leq T_{i2j2}^K)$ – умова одночасно можливого

здійснення лише однієї операції на одному обладнанні в кожен момент часу, де T_{ij}^K – момент закінчення виконання операції L_{ij} .

Вибір оптимального розкладу виконується за певним критерієм ефективності, вибір якого здійснюється індивідуально залежно від особливостей та потреб конкретної виробничої системи з метою досягнення найкращих показників економічної діяльності [190].

Найбільш поширеними типами критеріїв є:

1) **мінімізація виробничого циклу** – тобто часу, що необхідний для випуску потрібного обсягу продукції:

$$\min \left(\max_{j,i} \{T_{ij}^k\} \right); \quad (1.2)$$

$$\min \left(\max_k \{T_k^P + T_k^{\Pi}\} \right); \quad (1.3)$$

$$\min \left(\max_j \left\{ \sum_i T_{ij}^{\text{оч}} + T_{ij} \right\} \right); \quad (1.4)$$

де T_k^P – сумарний час виконання операцій на k -ій одиниці обладнання;

T_k^{Π} – сумарний час простоїв k -ої одиниці обладнання;

$T_{ij}^{\text{оч}}$ – очікування j -ої деталі перед обробкою на i -й операції;

2) **оптимізація використання обладнання** (фондовіддачі):

– **максимізація завантаження обладнання**, а саме:

$$\text{мінімального:} \quad \max \left(\min_k \{K_k^3\} \right); \quad (1.5)$$

$$\text{загального:} \quad \max \left(\sum_k K_k^3 \right); \quad (1.6)$$

де $K_k^3 = T_k^P / (T_k^P + T_k^{\Pi})$ – коефіцієнт завантаження k -ої одиниці обладнання;

– **мінімізація часу простою обладнання**, а саме:

$$\text{максимального:} \quad \min \left(\max_k \{T_k^{\Pi}\} \right); \quad (1.7)$$

$$\begin{aligned} &\text{Максимального} \\ &\text{міжопераційного:} \quad \min \left(\max_{i,j} \{T_{ij}^{\Pi}\} \right); \end{aligned} \quad (1.8)$$

$$\text{загального:} \quad \min \left(\sum_k T_k^{\Pi} \right); \quad (1.9)$$

де T_{ij}^{Π} – простій k -ої одиниці обладнання ($k = Q_{ij}$) перед виконанням операції L_{ij} ;

$T_k^{\Pi} = \sum_{i,j|Q_{ij}=k} T_{ij}^{\Pi}$ – сумарний простій k -ої одиниці обладнання;

– мінімізація середнього міжопераційного простою обладнання, а саме:

максимального:
$$\min \left(\max_k \{T_k^{\Pi} / N_k\} \right); \quad (1.10)$$

загального:
$$\min \left(\sum_k T_k^{\Pi} / N_k \right); \quad (1.11)$$

де N_k – кількість операцій (або простоїв, за рівної кількості операцій), які здійснюються на k -й одиниці обладнання;

3) мінімізація незавершеного виробництва:

– мінімізація очікування деталей перед обробкою, а саме:

максимального міжопераційного:
$$\min \left(\max_{i,j} \{T_{ij}^{\text{оч}}\} \right); \quad (1.12)$$

максимального подетального:
$$\min \left(\max_j \left\{ \sum_i T_{ij}^{\text{оч}} \right\} \right); \quad (1.13)$$

загального:
$$\min \left\{ \sum_{i,j} T_{ij}^{\text{оч}} \right\}; \quad (1.14)$$

– мінімізація середнього очікування деталей перед обробкою, а саме:

максимального:
$$\min \left(\max_j \left\{ \sum_i T_{ij}^{\text{оч}} / M_j \right\} \right); \quad (1.15)$$

максимального:
$$\min \left(\max_j \left\{ \sum_i T_{ij}^{\text{оч}} / N_j \right\} \right); \quad (1.16)$$

загального:
$$\min \left\{ \sum_{i,j} T_{ij}^{\text{оч}} / M_j \right\} \quad (1.17)$$

загального:
$$\min \left\{ \sum_{i,j} T_{ij}^{\text{оч}} / N_j \right\} \quad (1.18)$$

де N_j – час очікування j -ої деталі перед обробкою (у разі, якщо M_j однакове для всіх деталей).

Кожен з наведених типів критеріїв орієнтований на задоволення тільки власного показника ефективності виробництва. Часто в реальних виробничих умовах необхідно вирішувати задачу оперативного планування, враховуючи одночасно декілька критеріїв. Одним із засобів розв'язання багатокритеріальної задачі є створення компромісного критерію.

Функція оперативного (диспетчерського) контролю реалізується на базі оперативних даних щодо реального перебігу виробничого процесу.

Задачі оперативного контролю виконуються на трьох рівнях системи управління інтегрованим виробництвом.

На *третьому і четвертому рівнях керування* відбувається контроль працездатності устаткування, правильності дотримання програм системи ЧПУ, ефективність керуючих впливів виконавчих механізмів.

Одна з основних задач – це діагностика стану обладнання та інструментів, вирішення якої дозволяє запобігти аваріям та відмовам. Для діагностування використовується інформація від датчиків на найбільш важливих елементах обладнання.

Періодично керуючою системою проводиться зчитування даних з датчиків та порівняння їх з критичними величинами, а у випадку виходу за межі – видача повідомлення оператору або аварійне завершення роботи обладнання.

Задля забезпечення своєчасності реакції оператора зміни умов роботи ГВС та запобігання виникнення нештатних ситуацій на виробництві, інформація щодо стану системи повинна надходити до оператора вчасно та у зручній та легкій для сприйняття формі. Формою представлення таких даних зазвичай є дисплеї, де зображена мнемосхема контрольованої ділянки виробництва. Для сприяння швидкому прийняттю рішень, на екран також виводяться основні кількісні параметри виробництва. Будь-яку іншу інформацію оператор може отримати додатково сформувавши запит до системи.

На *другому ієрархічному рівні* реалізується диспетчерський контроль за ходом здійснення оперативного плану. Диспетчерський контроль характерний для всіх типів дискретного виробництва, але у ГВС він має свою специфіку.

Головною особливістю є складність одержання даних щодо стану обладнання, перебіг виконання технологічних операцій через майже повну відсутність людей у виробничих приміщеннях. В умовах такого високого рівня автоматизації дані щодо стану виробництва можуть бути отримані тільки від необхідних датчиків. Проте, через обмеженість їх кількості та надійності може виникати нестача інформації про процес.

Використовуються методи, котрі дозволяють організувати диспетчерський контроль із використанням математичних моделей та обчислювальної техніки. Серед них метод на основі синхронної імітаційної моделі технологічного процесу. У його основі лежить створення імітаційної моделі виробничої системи та синхронізувати її із процесом функціонування реального об'єкта. Таким чином можна використовувати засоби для аналізу розбіжностей моделі та реального процесу, а також функціонал, що дозволяє фіксувати на моделі та про важливі події, що не були зафіксовані на реальному об'єкті (рис. 1.3).

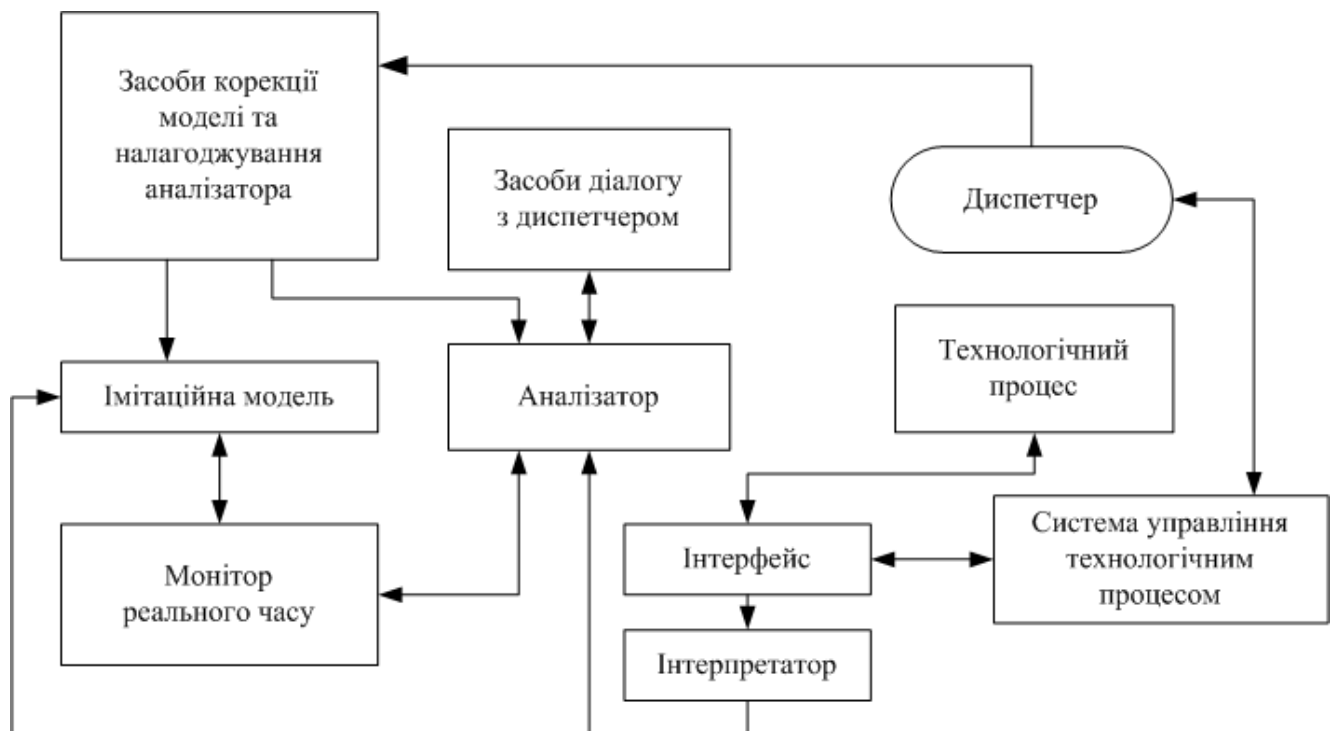


Рисунок 1.3. Система оперативного контролю із синхронною моделлю

Функція оперативного корегування реалізується за допомогою створення нового плану на повний оперативний період чи на його частину. Воно може полягати у вирішенні задач зміни частини плану за умови узгодженості з іншими частинами, що не змінилися або у зсуву часу запуску заготовок в роботу у межах допустимих інтервалів. Корегування стає необхідним зазвичай через відмову обладнання, проблеми з постачанням заготовок чи інструментів, випуск браку.

Для здійснення оперативного корегування необхідно, щоб така можливість була закладена у загальну стратегію оперативного управління і методику календарного планування.

Одна з стратегій оперативного керування – виділення понаднормових інтервалів планування, передбачає поділ оперативного місячного періоду на короткі понад оперативні інтервали (ПОІ). Вони можуть виділятися на період декади, тижні чи доби.

Наприклад, оберемо у якості ПОІ тиждень. Спочатку задача календарного планування вирішується для перших двох тижнів. По завершенню першого тижня формується календарний план на третій тиждень, після другого – на четвертий.

Така система планування називається оперативним плануванням з «пересувним» горизонтом.

Розглянемо, як здійснюються корегування у такій системі. Після закінчення k -го ПОІ планується $(k + 2)$ -й. На основі інформації щодо контролю за виконанням плану k -го ПОІ знаходиться множина невиконаних робіт P_1 . Після цього знаходиться множина робіт P_2 , котрі потрібно виконати для заміни браку. З урахуванням додаткової інформації диспетчер формує множину додаткових робіт P_3 , що можуть з'явитися у зв'язку із зміною замовлення на готову продукцію. Множина P^{k+2} на $(k+2)$ -му ПОІ визначається як об'єднання множин: $P^{k+2} = P_1 \cup P_2 \cup P_3 \cup P_4$, де P_4 – роботи, що заздалегідь заплановані на $(k+2)$ -й ПОІ.

Для виконання решти робіт, крім заздалегідь запланованих (P_1, P_2, P_3) потрібно мати у запасі необхідний резерв продуктивності, який повинен закладатися на етапі розбивання місячного плану на ПОІ.

Зазначені резерви можуть бути забезпечені наступним чином. Усі роботи можна поділити на обов'язкові $P_{об}$ – роботи з термінами виконання в рамках ПОІ та фонові $P_{ф}$ – терміни виконання яких поза ПОІ. Якщо видається можливим виконання множини робіт P^{k+2} – вона приймається повністю, якщо ж ні – то P^{k+2} розглядається як: $P^{k+2} = P_{об}^{k+2} \cup P_{ф}^{k+2}$. У такому випадку доступні ресурси виділяються для множини $P_{об}^{k+2}$, а ті, що залишилися вільними – на роботи із множини $P_{ф}^{k+2}$.

Зазначена стратегія може бути доповнена можливістю зміни календарного плану всередині одного ПОІ. Можливість такого корегування необхідно закладати при створенні календарного плану шляхом введення локальних резервів часу для найважливіших одиниць обладнання.

Локальний резерв – часовий інтервал, що дозволяє забезпечити збільшення тривалості операції без зміни часу початку наступної операції.

Локальні резерви часу можуть утворюватися самостійно, за рахунок неможливості повного завантаження обладнання, а також – вводиться у розклад спеціально. З їх допомогою можна нівелювати вплив тимчасового виходу з ладу обладнання, додати додаткові термінові замовлення без порушення структури календарного плану. Якщо локальні резерви не використовуються для компенсації збурюючі впливів – їх можна заповнити фоновими роботами для запобігання зниження завантаження обладнання.

Завдяки локальним резервам можна компенсувати незначні збурення, тоді як серйозні зміни пріоритетів, значні порушення термінів постачання матеріалів чи інструменту, тривала відмова обладнання – потребують розрахунку нового оперативного плану для залишку ПОІ. Перерахунок плану необхідно здійснити за час, не довший інтервалу, протягом якого ГВС все ще може працювати за старим планом. Необхідно обирати компромісні алгоритми

між швидкістю розрахунку та якістю отриманого нового плану в залежності від ситуації.

Функція оперативної диспетчеризації. Оперативна диспетчеризація зв'язана з визначенням фактичних моментів запуску деталей у виробництво та їх надходження на технологічне устаткування. При цьому враховуються витрати часу на підготовчо-заклучні операції, переналагодження, операції обслуговування та транспортування. Оперативна диспетчеризація здійснюється в реальному масштабі часу на підставі результатів оперативного контролю і встановлених планових графіків запуску-випуску деталей.

Тому синхронна модель і оптимальна стратегія повинні бути результатами розв'язку задачі оперативного планування при складанні розкладу роботи технологічного устаткування. Однак, особливості реалізації задач оперативного планування та оперативної диспетчеризації тісно взаємозв'язані, оскільки вибір алгоритму диспетчерського керування суттєво впливає на тривалість проходження партій деталей через виробничу систему, а отже, і на заплановані терміни запуску-випуску деталей на технологічному устаткуванні. Крім того, чим точніша процедура призначення планових термінів, тим простіше реалізуються алгоритми диспетчеризації, оскільки вимоги до обсягу додаткової оперативної інформації при прийнятті рішень істотно знижуються. Однак зростають обчислювальні витрати на розробку точного розкладу.

Безпосередньо ходом виробничого процесу керує підсистема оперативно-диспетчерського управління, що відповідно до обраного підходу (або при оперативному плануванні детально проробляється план роботи всього комплексу обладнання або визначається тільки план роботи технологічного обладнання та встановлюється стратегія диспетчеризації) реалізує спланований розклад роботи технологічного устаткування. Критерієм роботи такої системи є дотримання строків запуску-випуску деталей на технологічне обладнання відповідно до розробленого системою оперативного планування розкладу роботи за рахунок своєчасного транспортного обслуговування заявок, що надходять від технологічного обладнання.

Наочно відобразимо досліджені *функції оперативного керування* у вигляді функціональної схеми СОУ ГВС (рис. 1.4).

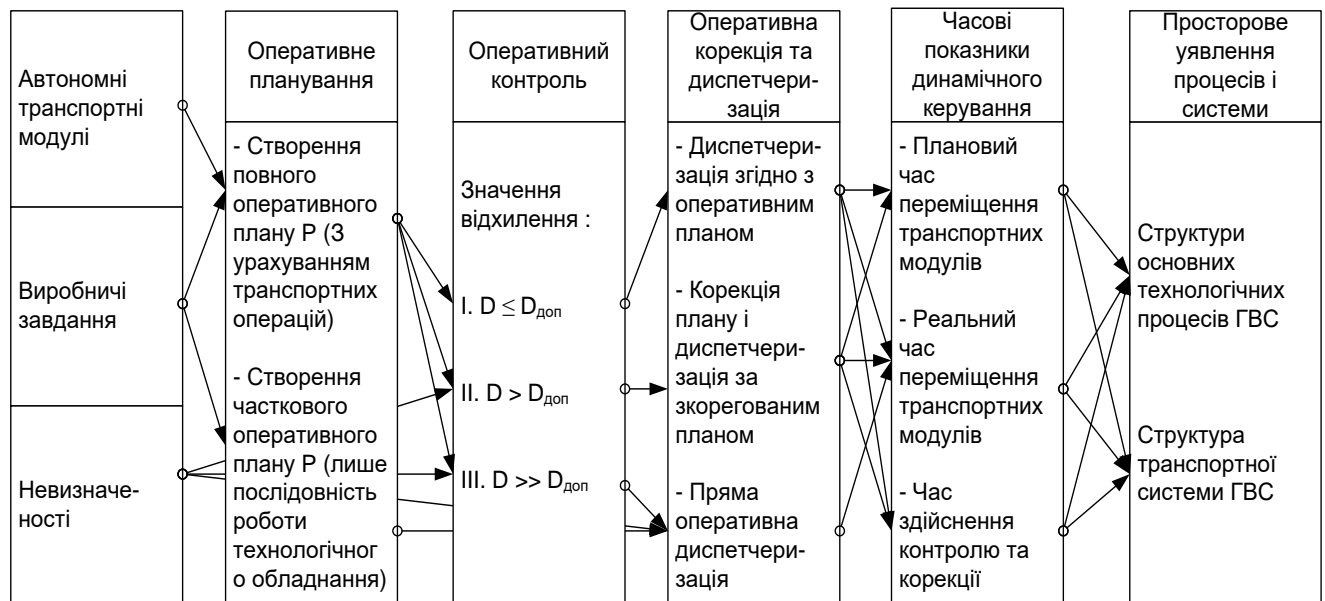


Рисунок 1.4. Функціональна схема СОУ ГВС

Кожна з множини виділених функцій $\{\Phi_{\text{оп}}, \Phi_{\text{окон}}, \Phi_{\text{окор}}, \Phi_{\text{од}}\}$ реалізується відповідним структурно-функціональним модулем СОУ ГВС:

$$\{\Phi_{\text{оп}} \rightarrow F^{\text{оп}}, \Phi_{\text{окон}} \rightarrow F^{\text{окон}}, \Phi_{\text{окор}} \rightarrow F^{\text{окор}}, \Phi_{\text{од}} \rightarrow F^{\text{од}}\} \quad (1.19)$$

де: $F^{\text{оп}}$ – модуль оперативного планування; $F^{\text{окон}}$ – модуль оперативного контролю; $F^{\text{окор}}$ – модуль оперативної корекції; $F^{\text{од}}$ – модуль оперативної диспетчеризації.

1.4. Формалізація та автоматизація процесу ДОК

Виходячи з сукупності функцій $\{\Phi_{\text{оп}}, \Phi_{\text{окон}}, \Phi_{\text{окор}}, \Phi_{\text{од}}\}$, що здійснюється системою оперативного управління та їх відображення $\{\Phi_{\text{оп}} \rightarrow F^{\text{оп}}, \Phi_{\text{окон}} \rightarrow F^{\text{окон}}, \Phi_{\text{окор}} \rightarrow F^{\text{окор}}, \Phi_{\text{од}} \rightarrow F^{\text{од}}\}$ на відповідні структурно-функціональні модулі, можна стверджувати, що основний вплив на функціонування СОУ мають значення наступних основних узагальнюючих

показників із множини $P_{ВДП}$, значення яких визначають перебіг процесу оперативного управління в умовах невизначеності:

$$P_{ВДП} = \{P_{ОП}, P_{ОКОН}, P_{ОКОР}, P_{ОД}\}, \quad \text{де:} \quad (1.20)$$

$P_{ОП}$ – показник оперативного планування передбачає визначення ступеня повноти оперативного плану, основних критеріїв його ефективності та механізмів їх досягнення;

$P_{ОКОН}$ – показник оперативного контролю передбачає визначення моменту здійснення процесу контролю та прийняття рішення про необхідність перепланування оперативної роботи виробничої системи;

$P_{ОКОР}$ – показник оперативної корекції передбачає визначення обсягу змін, що вносяться до початкового або попередньо визначеного плану;

$P_{ОД}$ – показник оперативної диспетчеризації передбачає визначення основних алгоритмів утворення керуючого впливу для своєчасного обслуговування транспортними модулями задач транспортування від оброблювальних ресурсів.

Твердження 1.3. Для забезпечення ефективного (за певними обраними показниками) функціонування ГВС в умовах невизначеності необхідним є ефективна реалізація процесу динамічного оперативного керування, тобто вибір раціональних значень ВДП СОУ.

Процес динамічного оперативного керування можна представити математично у вигляді нижченаведеної формалізованої моделі процесу D , що означає вибір p – набору значень показників СОУ із множини $P_{СОУ}$ і відповідає співставленню $\Phi_{СОУ}$ – функціональних можливостей СОУ з L – вимогами та обмеженнями конкретної ГВС та з урахуванням U – можливих типів невизначеностей, що характерні даний ГВС:

$$D: p = P_{СОУ_i}; \{ \Phi_{ОП} \vee \Phi_{ОКОН} \vee \Phi_{ОКОР} \vee \Phi_{ОД} \} \times L \times U \quad (1.21)$$

Достатньо широке різноманіття можливих значень показників ДОК дозволяє обрати серед них значення, що найбільш адекватні до вимог

конкретної ГВС з властивими їй видами невизначених ситуацій. Разом з тим, очевидно, що дана багатоваріантність вибору раціонального набору значень показників робить цей процес багатоетапним та трудомістким.

Потрібно врахувати, що СОУ функціонує у динамічному виробничому середовищі, а задача ДОК є багатокритеріальною і має специфіку, котра пов'язана з різномірністю природи та характеру ВДП, а також факторів, що мають вплив на їх вибір.

Задля зниження впливу суб'єктивних факторів, пов'язаних з рівнем компетенції оператора, що здійснює налагодження роботи системи та для підвищення якості отримуваних рішень, необхідно розробити підхід до *автоматизації ДОК*.

Визначення 1.4. *Автоматизація процесу ДОК* – це автоматизація та інтелектуалізація процедури відбору таких значень показників, з якими буде досягнуто оптимального функціонування СОУ відповідно до заданих критеріїв та з урахуваннями обмежень та невизначеностей властивих ГВС, що може бути досягнуто за рахунок розробки нових технічних рішень з використанням сучасних методів, технологій штучного інтелекту, спеціальних технічних засобів.

Для впровадження автоматизації динамічного оперативного керування у процесі функціонування ГВС пропонується створити *систему динамічного оперативного керування (СДОК)*, що включатиме до свого складу СОУ та окремий модуль корекції ВДП СОУ.

Твердження 1.3. Система динамічного оперативного керування покликана здійснювати основні функції ДОК, а саме:

1. Визначення раціональних значень визначальних динамічних показників СОУ, які задовольнятимуть вимоги та обмеження ГВС;
2. Передача визначених значень до відповідних модулів СОУ, що може здійснюватися у двох режимах:
 - а. *Підготовка виробництва* – на етапі проектування ГВС та зміни конфігурації між виробничими змінами (наприклад добовими);
 - б. *Функціонування виробництва* – здійснення ДОК в реальному часі роботи виробничої системи.

Твердження 1.4. Під реальним часом здійснення ДОК у даній роботі розуміється такий короткий проміжок часу від початку впливу невизначеного збурення, за який зміна ходу виробничого процесу є незначною та не впливає на продуктивність ГВС.

Зазначені основні функції у СДОК виконуватиме *модуль динамічної корекції ВДП СОУ*, що опрацьовуватиме отримані від виробничої системи дані про її поточний стан та статистику щодо роботи за попередній період та синтезуватиме адекватні до опрацьованих даних значення показники роботи СОУ. Знайдені значення показників будуть передаватися відповідним модулям СОУ, що визначатиме їх роботу на наступний період.

З урахуванням багатоетапності та складності процесу вибору значень показників СОУ, багатокритеріальності задачі та обов'язкової участі експертів в її розв'язанні автоматизація ДОК може бути здійснена завдяки використанню *системи підтримки прийняття рішень (СППР)*, що здатна опрацьовувати великі об'єми різномірної за формою та змістом інформації [131, 132, 153, 160, 176, 185].

Структура та зв'язки СДОК відображені на рис. 1.5, де:

Z	– виробниче завдання;
P	– календарний план;
S	– стан усього комплексу устаткування;
E	– збуджуючий вплив;
D	– відхилення від планових термінів завершення технологічних операцій;
$D_{\text{доп}}$	– локальні резерви часу виконання технологічних операцій;
Y	– керуючі завдання;
V	– мікрокоманди на виконання елементарних операцій;
K	– сигнал зворотного зв'язку від обладнання;
X	– інформація про завершення виконання завдання Y ;
F	– інформація про стан усього комплексу устаткування;
$P_{\text{оп}}$	– показник оперативного планування;
$P_{\text{окон}}$	– показник оперативного контролю;
$P_{\text{окор}}$	– показник оперативної корекції;
$P_{\text{од}}$	– показник оперативної диспетчеризації;
СУ АС	– система управління автоматизованим складом;
СУ АТС	– система управління автономним транспортним модулем;
СУ ГВМ	– система управління гнучким виробничим модулем.

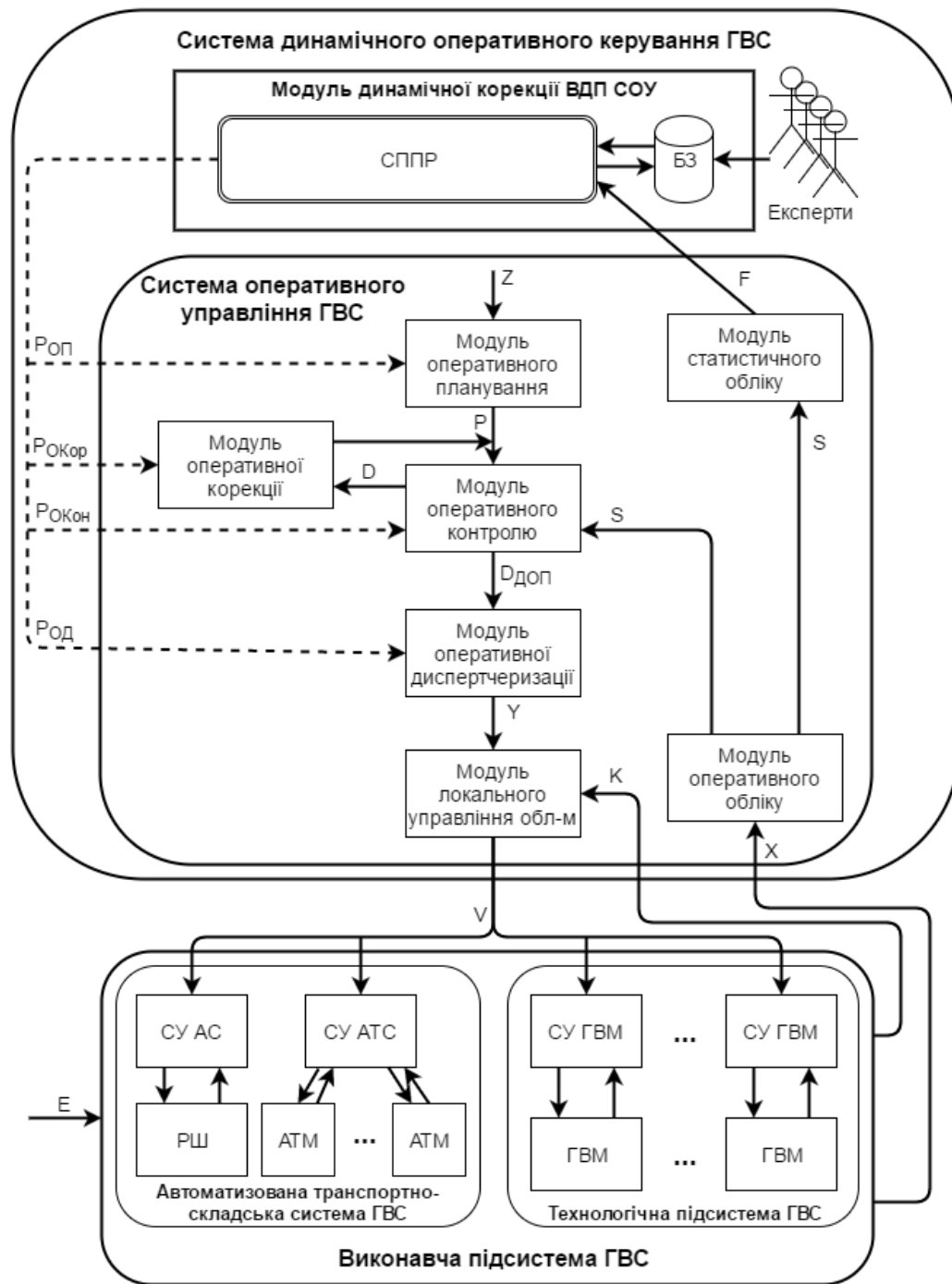


Рисунок 1.5. – Структура системи динамічного оперативного керування ГВС

1.5. Аналіз існуючих підходів до проектування та вибору значень показників СОУ

Вчені багатьох країн зробили значний вклад у накопичення знань та досвіду щодо проектування, налаштування та організації роботи автоматизованих систем управління ГВС, зокрема СОУ ГВС, включно з тими її

складовими, що у даній роботі виділені у систему динамічного керування. Відомі роботи Горанського Г.К. [138], Пономарьова В.М. [143], Костюка В.І. [158], Лисенка Е.В. [165], Пуховського Е.С. [173, 174], Слепцова А.І. [177], Черпакова Б.І. [183], Ямпольського Л.С. [187, 188, 196], Viera G. E. [119, 120, 121], Wu S. D. [124, 125]. Але автоматизація цього процесу з урахуванням невизначеностей виробничого середовища досі залишається недостатньо вивченою і складною задачею.

У роботах [138, 139, 143, 158, 161, 165, 168, 175, 177, 183, 187, 188, 196] були розглянуті питання синтезу систем керування ГВС, зокрема загальні принципи побудови систем управління ГВС в реальному часі та рекомендації щодо вибору та налаштування їх компонентів. Основна цінність наведених робіт полягає у наявності у них значної кількості певним чином систематизованого матеріалу щодо особливостей проектування та функціонування модулів системи оперативного управління. Однак наведені роботи не містять конкретних рекомендацій щодо автоматизації вибору значень показників СОУ та можливості практичної реалізації таких методик.

У роботах [3, 19, 20, 92, 93, 98, 99, 119, 120, 121, 124, 125, 190] запропоновано деякі класифікації систем оперативного управління та їх окремих компонентів за певними властивостями. Дані напрацювання можуть розглядатися для побудови основи автоматизованого вибору значень показників СОУ. Досить часто інформація щодо класифікації у даних джерелах подається в текстовому або табличному вигляді за відсутності формалізованого опису класифікаційних ознак та їх значень.

Проведений аналіз знайдених класифікацій показав, що їм властивий ряд недоліків, серед яких:

- неуніверсальність та проблемна орієнтованість;
- відсутність формалізованого опису класифікаційних ознак та їх значень, що значно ускладнює їх використання у процесі автоматизації ДОК;

- обмеженість окремих класифікацій через неврахування всіх вагомих класифікаційних ознак.

Таким чином, жодну з розглянутих класифікацій у початковому вигляді, без попереднього доопрацювання, не можна застосувати у процесі автоматизації ДОК. Однак обсяги та якість даних представлених в окремих класифікаціях достатні для побудови на їх основі більш універсального класифікатора, що буде спрямований на вирішення поставленої задачі.

На основі проведеного аналізу було визначено ряд вимог, які має задовольняти розроблюваний класифікатор для реалізації автоматизованого ДОК:

- інформативність, змістовність та однозначність структури;
- можливість автоматизованої обробки класифікаційних даних;
- врахування лінгвістичної невизначеності з можливістю виділення та подання нечітких ознак;
- можливість подальшого розвитку та доповнення класифікатора.

Отже, необхідно систематизувати наявні класифікації, що містять достатню кількість корисних даних та створити на їх основі класифікатор, що відповідатиме вказаним вимогам.

Здійснений аналітичний огляд відомих інформаційних джерел дає змогу зробити висновок, що для ефективного вирішення задачі автоматизації ДОК необхідно:

- Створити інформаційне забезпечення процесу автоматизації ДОК, що вимагає систематизації, формалізація та класифікація опису різномірних вхідних та вихідних даних.
- Створити методичне забезпечення автоматизації процесу ДОК, що полягає у виборі ефективного для даної задачі математичного апарату або технології штучного інтелекту та у розробці конкретного підходу до процесу автоматизації.
- Створити алгоритмічне та програмне забезпечення СДОК для реалізації розробленого підходу до автоматизації ДОК.

Висновки. Мета та задачі дослідження

1. Проведений аналіз сучасного стану проблем керування ГВС в реальному часі в умовах невизначеності свідчить про важливість та перспективність вдосконалення відповідних систем управління. Також результати аналізу дозволяють зробити висновок, що засобом такого вдосконалення є підвищення ступеня автоматизації процесів синтезу та аналізу систем управління ГВС.

2. З метою аналізу процесу управління у ГВС в умовах невизначеності було досліджено задачі підсистем управління на різних ієрархічних рівнях. Було визначено рівні керування, на яких виникають невизначеності та підсистеми управління, котрі покликані їх долати. Такий аналіз дає змогу виявити, що більшість нештатних ситуацій виникають на рівні, де керування здійснюється СОУ.

3. Було проведено структурно-функціональний аналіз СОУ, що включав визначення основних функцій, відповідних модулів та узагальнених показників роботи в умовах невизначеності. На його основі було створено формалізовану модель процесу ДОК та виділено узагальнені вирішальні динамічні показники СОУ.

4. Синтезовано структуру системи СДОК. Для безпосереднього здійснення динамічного керування СОУ вперше розроблено модуль корекції ВДП СОУ. Даний модуль на основі даних оперативного та статистичного обліку дозволяє підвищити ефективність роботи СОУ шляхом вибору раціональних значень ВДП для налаштування відповідних модулів.

5. Здійснений аналітичний огляд відомих інформаційних джерел дає змогу зробити висновок, що для ефективного вирішення задачі автоматизації процесу ДОК, необхідно доопрацювати існуючі класифікації СОУ згідно з розробленими вимогами, розробити конкретний підхід та алгоритм ДОК.

На основі вищенаведеного було сформовано *мету дисертаційної роботи*: підвищення ефективності роботи гнучкої виробничої системи шляхом збільшення рівня автоматизації процесів налаштування та функціонування складових системи оперативного управління.

Для реалізації поставленої мети в дисертації необхідно вирішити такі задачі:

1. На основі структурно-функціонального аналізу роботи СОУ ГВС створити формалізовану модель процесу динамічного оперативного керування та синтезувати структуру системи динамічного оперативного керування (СДОК).
2. Створити класифікатор вирішальних динамічних показників СОУ.
3. Дослідити ГВС щодо можливих типів невизначених ситуацій, які можуть виникати у процесі функціонування.
4. Визначити логічну послідовність здійснення процесу вибору раціональних значень із класифікатора ВДП, за яких можливе адекватне обслуговування вимог та обмежень ГВС.
5. Синтезувати узагальнену концептуальну модель СОУ на основі створеної логічної послідовності налаштування вирішальних динамічних показників.
6. Обґрунтувати вибір методів прийняття рішень щодо визначення раціональних значень ВДП СОУ у процесі ДОК.
7. Розробити підхід до автоматизації процесу ДОК на основі обраних методів прийняття рішень в умовах невизначеності.
8. Створити алгоритмічне та програмне забезпечення СДОК на основі розробленого підходу у вигляді системи підтримки прийняття рішень (СППР).
9. Провести експериментальні дослідження та порівняти за обраними критеріями ефективності результати роботи СДОК для ГВС з різними значеннями показників.

2. ФОРМУВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧІ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ ДОК

2.1. Формування набору вирішальних динамічних показників та створення класифікатора СОУ

Оскільки прийняття рішення щодо вибору значень визначальних динамічних показників СОУ у процесі ДОК покладається на оператора системи, то з метою зниження впливу суб'єктивних факторів, пов'язаних з рівнем його компетенції, необхідно розробити інформаційне забезпечення автоматизації даного процесу, який був формалізований у попередньому розділі.

Для цього, у першу чергу, необхідно вирішити одну з основних задач даного дослідження, а саме: створити класифікатор вирішальних динамічних показників СОУ, що задовольнятиме вимогам, сформованим у п. 1.5 та сформулювати коректну послідовність обґрунтування вибору відповідностей між значеннями показників СОУ та ГВС з властивими їй умовами й обмеженнями.

Для розв'язання поставленої задачі використаємо підхід, запропонований в [193]. Даний підхід було успішно застосовано для визначення топологій штучних нейронних сіток, що задовольняють вимогам певних прикладних задач. Згідно з розглянутим підходом, на першому етапі автоматизації налаштування системи динамічного керування адекватної до заданої виробничої системи необхідно:

- сформувати *набір вирішальних динамічних показників (НВДП)* і на його основі створити *класифікатор СОУ*;
- побудувати *логічну послідовність налаштування (ЛПН)* ВДП;

Визначення 2.1. *Набір вирішальних динамічних показників СОУ* – це їх найменша можлива сукупність *необхідна* для формалізації процесу представлення та вибору значень вирішальних динамічних показників СОУ і *достатня* для адекватного обслуговування вимог ГВС в умовах невизначеності.

Формування НВДП. У п. 1.4 було визначено множину узагальнених динамічних показників роботи системи динамічного керування $P_{COY} = \{P_{OP}, P_{OKOH}, P_{OKOP}, P_{OD}\}$, де:

P_{OP} – показник оперативного планування;

P_{OKOH} – показник оперативного контролю;

P_{OKOP} – показник оперативної корекції;

P_{OD} – показник оперативної диспетчеризації.

На основі зазначеної множини основних узагальнених динамічних показників роботи СОУ та виходячи із власного досвіду та здійсненого аналітичного огляду результатів численних досліджень в інших джерелах [3, 19, 20, 92, 93, 98, 99, 119, 120, 121, 124, 125, 144, 190], що присвячені даній проблемі, можемо сформулювати НВДП, що дасть змогу здійснювати послідовне обґрунтування вибору відповідностей між ГВС, з властивими їй умовами й обмеженнями та СОУ. Отже, нижче наведений перелік НВДП, що для кожного узагальненого динамічного показника визначає відповідну конкретну величину:

- показник оперативного планування P_{OP} – *підхід до оперативного планування*;
- показник оперативного контролю P_{OKOH} – *політика вибору часу перепланування*;
- показник оперативної корекції P_{OKOP} – *стратегія перепланування*;
- показник оперативної диспетчеризації P_{OD} – *метод оперативної диспетчеризації*.

Класифікація СОУ. На основі розробленого НВДП було проаналізовано можливі варіанти значень показників та створено класифікатор ВДП СОУ (рис. 2.1):

- Підходи до оперативного планування (*реактивне, прогностично-реактивне, робастне прогностично-реактивне, робастне превентивне*);
- Політики вибору часу перепланування (*періодична, подієва, гібридна*);
- Стратегії перепланування (*повне перепланування, корекція плану*);

- Методи диспетчеризації (правила диспетчеризації, евристики, метоевристики, ситуаційне управління, мультиагентні системи).

Далі наводиться більш детальний опис та аналіз показників, що розглядаються:

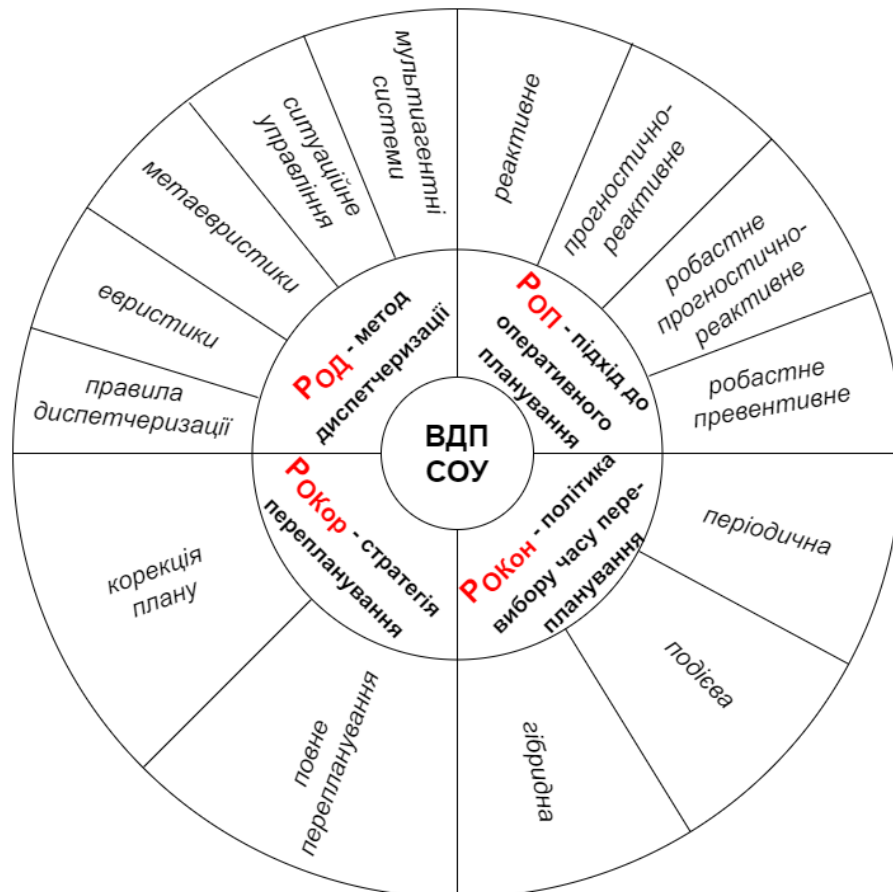


Рисунок 2.1 Класифікатор ВДП СОУ

2.1.1. Аналіз підходів до оперативного планування

Оперативне планування у СОУ можна поділити на чотири категорії: *реактивне планування*, *прогностично-реактивне планування*, *робастне прогностично-реактивне планування* і *робастне превентивне планування* [9, 43, 65, 119, 121].

Реактивне планування. При повністю реактивному плануванні жоден чіткий розклад не генерується заздалегідь і рішення приймаються локально в режимі реального часу. Для визначення пріоритету часто використовуються правила диспетчеризації. Правило диспетчеризації використовується для

вибору для обробки наступної операції з найвищим пріоритетом з набору операцій, які очікують обслуговування на машині, що звільняється. Пріоритет операції визначається на основі параметрів операцій і машини. Правила диспетчеризації швидкі, зазвичай інтуїтивно зрозумілі та прості у реалізації. Проте, глобальне планування може значно підвищити продуктивність виробництва порівняно з локальними або короткостроковими правилами диспетчеризації, де важко передбачити продуктивність системи, оскільки рішення приймаються на локальному рівні в реальному часі. Детальний опис правил диспетчеризації представлено у пункті 2.1.4.

Прогностично-реактивне планування. Прогностично-реактивне планування є найбільш поширеним підходом планування, що використовується у виробничих системах. Більшість визначень планування у рамках СОУ описаних у літературі стосуються прогностично-реактивного планування. Це є процес планування/перепланування, в якому розклад переглядається у відповідь на події в реальному часі. Прогностично-реактивне планування складається з двох етапів. По-перше, прогностичний графік генерується заздалегідь з метою оптимізації продуктивності виробництва без урахування можливих збоїв в цеху. Цей розклад модифікується під час виконання у відповідь на події в реальному часі.

Робастне прогностично-реактивне планування. Більшість прогностично-реактивних стратегій планування засновані на простих корегуваннях у розкладі, які враховують тільки ефективність виробництва. Новий графік може значно відхилятися від початкового графіка, що може серйозно вплинути на планування інших видів діяльності, заснованих на початковому графіку і може привести до низької продуктивності графіка. Тому бажано генерувати прогностично-реактивні графіки, що є робастними. Робастне прогностично-реактивне планування спрямоване на побудову графіку, що мінімізував би вплив невизначеної ситуації на критерій продуктивності реалізованого графіка [58, 124, 125].

Навіть незважаючи на те, що необхідності створення робастного графіка була визнана більше двох десятиліть тому, у літературі небагато досліджень, щодо створення робастного графіка в динамічному середовищі. Типовим рішенням цієї проблеми є перепланування з одночасним урахуванням як ефективності виробництва так і відхилення від первісного графіка (стабільності). Стабільність вимірює відхилення від первісного прогностичного графіка [20, 59, 124, 125]. У [124, 125] визначено бі-критерії міри робастності для задачі перепланування у системі з однією машиною при виході з ладу машини. Критерії включають в себе мінімізацію тривалості виконання (ефективність планування) і впливу зміни розкладу (стійкість планування).

Для стійкості, вони досліджували дві міри: відхилення часу початку операцій від вихідних значень і відхилення від вихідної послідовності. Їх експериментальні результати показали ефективність робастних мір в тому, що стабільність планування може бути значно збільшена практично без втрат часу виконання. У [3] автори також використовували дві міри, щоб визначити робастне планування: ефективність (час виконання) і міри стабільності (відхилення часу початку і відхилення послідовності). Мета планування полягає в тому, щоб максимізувати ефективність виробництва, і в той же час мінімізувати впливи у системі, викликані змінами розкладу. У [48] автор досліджував різні міри робастності для поліпшення показників затримок і загального часу обробки при поломках машин. У [58] було розроблено міри робастності і робастне планування для випадку з поломкою машин і змінним часом обробки у разі, коли для ремонту використовується стратегія зсуву вправо. Робастність визначається як мінімізація бі-критеріальної цільової функції вираженої з точки зору очікуваного часу обробки і очікуваної затримки. Очікувана затримка – це відхилення між детермінованим часом обробки до поломки, і фактичним часом обробки після застосування зміщення вправо.

Результати експериментів показали, що робастні графіки значно перевершують графіки на основі лише часу обробки. У [25] визначені робастні

міри для середовища з однією машиною для подолання невизначеності часу обробки, де мета планування полягає в мінімізації часу виконання операції. Робастність визначається мінімізацією як часу виконання так і абсолютного відхилення від первинного графіку. Результати розрахунків продемонстрували дієвість та ефективність запропонованих мір робастності. У [20] визначили загальні міри корисності і стабільності, щоб визначити стратегію реакції на події в реальному часі, для побудови робастного графіка. Корисність вимірює зміну цільової функції планування після перегляду графіку. Це виражається різницею між значенням цільової функції нового графіка після реакції на події в реальному часі та цільовою функцією прогностичного графіку перед врахуванням подій в реальному часі. Потім вони дослідили ряд мір корисності та стабільності для моделі планування з однією машиною з метою мінімізації середнього часу завершення.

Робастне превентивне планування. Робастні превентивні підходи планування зосереджені на створенні прогностичних графіків, які задовольняють вимогам до продуктивності в динамічному середовищі [65, 26, 119]. Основні труднощі цього підходу полягають у визначенні прогностичних мір. У [65] запропонували прогностичну модель планування для середовища з однією машиною у випадку поломок з метою мінімізації максимального запізнення. Ефект руйнування вимірюється по відхиленню реального часу завершення роботи за реалізованим розкладом від запланованого часу завершення за прогностичним графіком. Відхилення зменшується вставлянням додаткового часу у прогностичний графік з метою досягнення високої передбачуваності.

Обчислювальні експерименти показали, що прогностичне планування забезпечує значне поліпшення передбачуваності за рахунок дуже малого погіршення максимального запізнення. У [75] автор розширив підхід прогностичного планування, де показником продуктивності розкладу стало запізнення виконання операцій. У [119] також досліджували різні стратегії для генерації робастних превентивних графіків на основі введення тимчасового

простою з метою зведення до мінімуму запізнення виконання операцій. Основна ідея полягає в забезпеченні здійснення кожної операції з додатково прогностичним часом обробки для поглинання певного рівня невизначеності без перепланування.

Проаналізувавши особливості вибору підходів зведемо у табл. 2.1 їх основні характеристики з метою здійснення найбільш оптимального вибору в умовах певної ГВС. Для відображення відповідності певних характеристик до розглянутих підходів використано наступні позначки: «+» - повністю відповідає, «+/-» - відповідає частково або на певних етапах, «-» - не відповідає.

Таблиця 2.1.

Основні характеристики підходів до оперативного планування

Підхід до планування	Наявність початкового плану	Мінімізація відхилень від початкового плану	Прогностичне врахування невизначеностей	Глобальна ефективність плану	Висока складність Критеріїв
Реактивний	-	-	-	-	-
Прогностично-реактивний	+	-	-	+/-	-
Робастний прогностично-реактивний	+	+	-	+/-	+
Робастний превентивний	+	+	+	+	+

2.1.2. *Визначення політик вибору часу перепланування*

Щодо проблеми, коли здійснювати перепланування, в літературі були запропоновані три політики поведінки [98, 119]: періодична, подієва і гібридна. Періодичні та гібридні політики часто визначаються як рухомий часовий горизонт [19,81, 99, 121, 9] .

У *періодичній політиці*, графіки генеруються через регулярні проміжки часу, за які збирається вся наявна інформація від виробничої системи. Динамічна задача планування розкладається на ряд статичних задач, які можна вирішити за допомогою класичних алгоритмів планування. Потім цей графік виконується і не переглядається, поки не почнеться наступний період, де

горизонт планування оновлюється з урахуванням нової інформації, отриманої від поточного стану системи. Періодична політика дає більше стабільності розкладу і менше відхилень. На жаль, слідування встановленому графіку в умовах істотних змін стану виробничої системи може несприятливо позначитися на продуктивності. Визначення періоду перепланування також є складним завданням.

Основи застосування підходу рухомого горизонту до динамічного планування було запропоновано в [69]. Вони досліджували, як частота планування у динамічному виробничому середовищі впливає на продуктивність, де випадково можуть змінюватись час обробки і виникати поломки машин. На кожному періоді перепланування, за допомогою правил диспетчеризації генерується статичний графік поточних завдань. Як і слід було очікувати, продуктивність зазвичай погіршується, коли збільшується період перепланування. У [81] автори використовували політику рухомого горизонту для задачі динамічного планування середовища з однією машиною з часом налаштування залежним від порядку для мінімізації максимального запізнення. Вони виявили, що за продуктивністю рухомий горизонт планування перевершує короткострокові правила диспетчеризації. У [99] вивчалася частота перепланування в мульти-процесному гнучкому виробничому середовищі при поломках машин і варіації часу обробки. Продуктивність системи вимірюється по критеріям середнього запізнення і часу обробки. Їх результати дослідження частоти планування показали, що періодичної реакції з відповідною тривалістю періоду було б достатньо, щоб впоратися з подіями в реальному часі. Було відзначено, що поломки машин мають більш істотний вплив на продуктивність системи, ніж зміна часу обробки. У [51] автори запропонували механізм, що періодично здійснює моніторинг системи і запускає правило диспетчеризації знайдене за допомогою моделювання роботи декількох правил. Якщо різниця між фактичною продуктивністю, що погіршується під впливом відмов машин, та очікуваною продуктивністю перевищує задану межу, то виконується нове моделювання для вибору нового правила диспетчеризації. Експерименти

показують, що інтервал моніторингу та обмеження продуктивності мають бути ретельно визначені, щоб досягти кращої продуктивності.

У *подієвій політиці* перепланування спрацьовує у відповідь на несподівану подію, яка змінює поточний стан системи. Більшість підходів до планування у СОУ використовують цю політику. У роботі [126] дослідили політику подієвого перепланування для виробничих середовищ з виникненням поломок випадкових машин. Перепланування відбувається кожного разу, коли виникає поломка машини. Результати показали, що подієве перепланування з нижчим обчислювальним навантаженням і вищою передбачуваністю за продуктивністю перевершує політику періодичного перепланування та правила диспетчеризації. У роботі [121] описані аналітичні моделі для оцінки ефективності системи з однією машиною при періодичній і подієвій стратегіях перепланування в умовах, коли задачі надходять динамічно. Вони запропонували оцінити роботу періодичного та подієвого перепланування за допомогою аналітичних моделей, які можуть легко і швидко оцінити важливі показники продуктивності, такі як середній час обробки і завантаженість обладнання. У [120] автори розширили роботу дослідженням систем паралельних машини. Було показано, що частота перепланування може істотно вплинути на продуктивність системи (середній час обробки). Низька частота перепланування знижує кількість налаштувань. Більш висока частота перепланування дозволяє системі більш оперативно реагувати на збої, але може збільшити кількість налаштувань. Всі ці дослідження доводять, що подієве перепланування набагато краще, ніж періодичне.

Гібридна політика перепланує систему періодично, а також при виникненні виключних ситуацій. Події, що зазвичай розглядаються: поломки машин, надходження термінових задач, скасування задач, або зміна пріоритетів задач. У [19] автори розробили гібридну подієву політику перепланування в середовищі з однією машиною і паралельними машинами з динамічними надходженням задач. Розроблена система здійснює перепланування періодично. Події, що класифікуються як періодично виникаючі між періодами

перепланування ігноруються до наступного моменту перепланування. Проте, коли подія класифікується як термінова, негайно виконується повне перепланування. Результати показали, що продуктивність періодичного планування погіршується в міру збільшення тривалості періоду перепланування, у той же час подієвий метод досягає достатнього рівня продуктивності.

2.1.3. Особливості застосування стратегій перепланування

Що стосується питання які стратегії необхідно використовувати для перепланування, у літературі вирізняються дві основні стратегії перепланування[98, 119, 20]: корегування плану і повне перепланування. Стратегія корегування плану відноситься до деякого локального врегулювання поточного розкладу і може мати перевагу завдяки потенційній економії процесорного часу і збереження стабільності системи.

Стратегія повного перепланування передбачає регенерацію нового розкладу з нуля. Дана стратегія, в принципі, може бути кращою для підтримки оптимальних рішень, але ці рішення рідко досягаються на практиці і вимагають надлишкового часу обчислення. Крім того, повне перепланування може призвести до нестабільності і відсутності безперервності у деталізованих виробничих планах, що призводить до додаткових виробничих витрат, що називається виробничою нестабільністю.

У [113] і [28] зазначається, що більшість реактивних систем планування намагаються переглянути тільки частину первинно створеного розкладу для реагування на зміни у виробничому середовищі без регенерації нового плану з нуля. У роботі [3] автори заявляли, що на практиці перепланування проводиться за допомогою корекції плану. У той же час повне перепланування у певній мірі також використовується. У [98] показано потенційну ефективність корекції розкладу з точки зору стабільності та процесорного часу в порівнянні з повним переплануванням.

Ще однією проблемою практичного значення є визначення того, чи варто здійснювати перепланування з нуля (повне перепланування), чи здійснювати корекції розкладу, і яку стратегію корекції плану обрати для того, щоб була можливість реагувати на події в реальному часі. Для вирішення даної проблеми, щоб оцінити ефективність стратегій перепланування і вибрати кращу стратегію, було застосовано моделювання та міри робастності. Для вирішення, яку стратегію перепланування краще застосовувати використовуються виміри робастності (ефективність і стабільність) [3, 124, 125, 25, 48]. У [20, 76] використовували міри корисності та стабільності для оцінки продуктивності різних стратегій корекції плану і повного перепланування, що допомагало обрати кращу стратегію перепланування.

2.1.4. Аналітичний огляд методів оперативної диспетчеризації

Правила диспетчеризації.

Правила диспетчеризації є одним з поширених методів оперативної диспетчеризації АТМ в реальному часі в динамічних умовах. Протягом багатьох років, у літературі була запропонована значна кількість простих і складних правил диспетчеризації (табл. 2.2).

Твердження 2.1. Правила диспетчеризації відображають відносини між АТМ, як ресурсом, і набором заготовок, що необхідно перемістити.

В залежності від того, у який спосіб генерується запит на транспортування, правила диспетчеризації АТМ поділяються на дві категорії:

- правила ініційовані оброблюваними модулями;
- правила ініційовані транспортними модулями.

Правила ініційовані оброблюваними модулями генеруються з боку ГВМ для вибору між АТМ, що простоюють, наприклад найближчий АТМ, АТМ з найбільшим часом простою, найменше застосовуваний АТМ.

Правила ініційовані транспортними модулями генеруються АТМ для вибору, яку задачу виконати, наприклад найменший час або довжина шляху,

найбільший розмір черги на обробку, найменший розмір вільного місця у черзі, модифіковане правило перший прийшов перший обслуговував.

Таблиця 2.2.

Правила диспетчеризації АТМ

Ініційовані транспортними модулями	Ініційовані обробними модулями
Перший надійшов перший обслугований (<i>First-Come-First-Served – FCFS</i>)	Найвіддаленіший АТМ (<i>Farthest Vehicle – FV</i>)
Перший обраний перший обслугований (<i>First-Encountered-First-Served – FEFS</i>)	Перший доступний АТМ (<i>First Available Vehicle – FAFS</i>)
Найбільший розмір черги (<i>Largest Queue Size – LQS</i>)	Найменший загальний час простою (<i>Least Cumulative Idle Time – LIT</i>)
Найбільший час між надходженнями (<i>Longest Inter-Arrival Time – LIT</i>)	Найменш використовуваний АТМ (<i>Least Utilized Vehicle – LUV</i>)
Найбільший час переміщення (<i>Longest Travel Time – LTT</i>)	Найдовший простій АТМ (<i>Longest Idle Vehicle – LIV</i>)
Найбільший час очікування (<i>Longest Waiting Time – LWT</i>)	Найбільший загальний час простою (<i>Most Cumulative Idle Vehicle – MIT</i>)
Максимальний попит (<i>Maximum demand – MD</i>)	Найближчий (вільний) АТМ (<i>Nearest (Idle) Vehicle – NV чи NIV</i>)
Максимальний розмір вихідної черги (<i>Maximum Outgoing Queue Size – MOQS</i>)	Випадковий АТМ (<i>Random Vehicle – RV</i>)
Мінімальний залишок вихідної черги (<i>Minimum Remaining Outgoing Queue – MROQS</i>)	
Мінімум операцій в черзі (<i>Minimum Work-in-Queue – MWQ</i>)	
Модифікований FCFS (<i>Modified First-Come-First-Served – MFCFS</i>)	
Випадковий ГВМ (<i>Random Workstation – RW</i>)	
Найкоротший час прибуття (<i>Shortest time to Travel First – STTF</i>)	

Було встановлено, що жодне з правил повністю не задовольняє всім критеріям. У зв'язку з цим проводилось багато досліджень для визначення комбінації декількох правил диспетчеризації, для того щоб знайти ряд станів системи, в яких відносна продуктивність кожного правила є найвищою.

Для того щоб оцінити продуктивність різних правил диспетчеризації при різних динамічних і стохастичних умовах цеху, використовувалось моделювання. Моделювання дозволяє спробувати застосувати декілька правил диспетчеризації і обрати правило, яке дає найкращий результат. Моделювання правил диспетчеризації АТМ показує що у високонавантаженому виробництві переважають правила ініційовані транспортними модулями через малу ймовірність простою. Правила ініційовані оброблювальними модулями недостатньо ефективні в таких умовах.

Багато авторів використовували моделювання для оцінки ефективності правил диспетчеризації. Роботи [93, 92] показали докладні огляди правил диспетчеризації в дрібносерійному та крупносерійному виробництві. Вони оцінили продуктивність різноманітних правил диспетчеризації щодо деяких загальних критеріїв ефективності, які зустрічаються в літературі, таких як, зміна часу роботи, мінімальний і максимальний час роботи, середнє запізнення, максимальне запізнення, зміна запізнення і т.д. Вони класифікують ці правила на п'ять категорій:

- правила, що включають в себе час обробки;
- правила, які включають в себе строки виконання;
- прості правила, що не включають в себе ні час обробки, ні строки виконання;
- правила, пов'язані з умовами виробництва;
- правила, що включають два або більше з перших чотирьох категорій.

Було відзначено, що жодне одиничне правило не задовольняє всіх важливих критеріїв, що відносяться до часу роботи і запізнення виконання операцій. Загалом, було відзначено, що правила засновані на тривалості обробки, працюють краще в умовах високого навантаження, в той час як

правила, засновані на терміні обробки працювати краще в умовах малого навантаження. У [45] автор наводить аналіз на основі моделювання правил диспетчеризації для планування у виробничому середовищі з поломками машин. Що стосується критеріїв на основі часу обробки та кінцевого терміну, були оцінені відносна продуктивність добре відомих і нових запропонованих правил диспетчеризації для різних значень параметрів моделі. Результати показали, що відносна продуктивність правил може бути порушена при зміні параметрів поломок.

У [100] наводиться комплексне дослідження моделювання правил диспетчеризації для гнучких виробничих систем за наявності різних рівнів поломок і змін в часі обробки. Він повідомив, що жодне правило не є найкращим при всіх можливих умовах. Також в статті представлено докладне дослідження літератури. У роботі [103] автори на основі моделювання досліджували продуктивність ряду правил диспетчеризації для динамічних виробничих систем. Їх мірою продуктивності був економічний критерій, який включав в себе основні витрати, пов'язані зі здійсненням диспетчеризації.) У [53] представлено всебічний порівняльний аналіз більше двадцяти правил диспетчеризації в динамічному виробничому середовищі зі зваженим критерієм запізнення для динамічного надходження завдань.

У [51] запропоновано систему диспетчеризації на основі моделювання з двох основних компонентів: механізм моделювання та механізм реактивного управління. Механізм моделювання оцінює різні правила і вибирає найкраще. Механізм реактивного управління періодично контролює роботу системи і визначає термін початку нового моделювання. Також використовувалося моделювання та правила диспетчеризації для диспетчеризації в режимі реального часу гнучкої виробничої системи за наявності надходження термінових задач, поломок машин та інструменту. Моделювання оцінює диспетчерські правила і на основі цієї оцінки вибирається краще правило диспетчеризації, яке задовольняє необхідні критерії.

У дослідженні [54] використовували моделювання для вивчення ефективності різних планових ремонтних евристик на основі перенаправлення задач на альтернативні машини (без зміни маршруту, зміна маршруту черги, зміна маршруту прибуваючих і зміна маршруту всіх) для несподіваних поломок машин в динамічних виробничих середовищах. Результати експерименту показали, що правильний вибір хорошої евристики корекції плану базується не тільки на характеристиках системи (завантаженість, час поломки машин і частота відмов машин), але і на швидкості роботи та кількості складових системи подачі матеріалу.

Евристики оперативної диспетчеризації.

Твердження 2.2. *Евристики у контексті оперативної диспетчеризації є проблемно-орієнтованими методами корекції графіку, які не гарантують знаходження оптимального розкладу, але мають можливість знайти досить хороші рішення в короткі терміни. Найбільш поширеними евристичними методами корекції графіку є:*

- *Евристика зсуву вправо*, яка у разі відмови машини, здійснює зсув розкладу інших операцій вперед у часі на величину простою;
- *Евристика співпадаючої корекції графіка*, що здійснює перепланування зі збігом деяких моментів в майбутньому з попереднім графіком;
- *Часткова корекція графіка*, що переплановує тільки невдалі операції.

У роботі [126] досліджували продуктивність *евристики зсуву вправо* у порівнянні з правилами диспетчеризації і повного перепланування за допомогою методу гілок та границь. Результати експерименту показали, що зміщення вправо перевершує за продуктивністю правила диспетчеризації і повне перепланування. У роботах [65] і [75] використовували евристику зсуву вправо для вставки часу простою для визначення прогностичних графіків.

У роботі [3] автори порівняли продуктивність *евристики часткової корекції графіка* (корекція планування невдалих операцій), повного перепланування і корекції графіка зсувом вправо відносно показників результативності (час виконання) і стабільності (відхилення від початкового

графіку). Евристика часткового перепланування графіку перепланує лише ті операції, що безпосередньо або побічно піддалися впливу невизначеностей так, щоб мінімізувати як збільшення часу виконання, так і відхилення від початкового графіка. Результати показали, що евристика часткової корекції усуває більшу частину недоліків і обчислювальних складностей, пов'язаних з повним переплануванням і зсувом вправо. Зсув вправо дає гірші характеристики щодо часу виконання у зв'язку з тим, що цей спосіб є простим зміщенням графіку на величину відхилення. Таким чином, чим більше відхилення, тим більший очікуваний зсув, і тим більше зростання часу виконання.

У [10] запропоновано *евристику співпадаючої корекції плану* для виробничої системи з декількома ресурсами за наявності поломок машин. Стратегія перепланує розклад в момент поломки машин так, щоб деякі моменти в майбутньому співпали з попереднім графіком. Їх експериментальні результати показали, що цей метод забезпечує практично оптимальні рішення при досягненні більш високої передбачуваності, ніж при повному переплануванні. Пізніше, у [5] застосовували цей підхід для перепланування у крупносерійному виробництві. Результати показали, що евристика співпадаючої корекції є дуже ефективною з точки зору якості графіка, обчислювального часу і стабільності розкладу.

Також в літературі були запропоновані різні більш специфічні евристики корекції графіка. У [72] автори запропонували кілька стратегій перепланування для зміни часу обробки, поломки машин і надходження нових операцій до виробничої системи. Існують наступні стратегії перепланування: перенаправлення задач до альтернативних машин, розділення задач (для серійного виробництва) і повне перепланування. У [54] запропоновано кілька евристик корекції графіку за наявності поломок машин. Ці евристики корекції графіку ґрунтуються на перенаправленні задач до альтернативних машин. У [56] розглянуто задачу мінімізації часу. Автори запропонували і оцінили роботу двох евристик корекції графіку, евристика корекції графіку із затримкою

(затримує обробку партії щоб об'єднати надходження задач у найближчому майбутньому), і евристика корекції графіку з оновленням (оновлює час закінчення обробки задачі для затримки партії). Результати показали, що евристика має чудову середню продуктивність із посереднім обчислювальним навантаженням. У [47] автори запропонували різні евристики корекції графіку для перепланування виробництва у гнучких виробничих системах для поломки машин, надходження термінових задач, підвищення пріоритету задач та скасування задач. При виникненні поломок машин, решта операцій виконуються на альтернативних машинах. При надходженні нових задач, якщо нова задача не термінова, то пріоритет призначається на основі EDD (Earliest Due Date – найменший строк виконання) або FCFS (First Come First Served – перший прийшов перший був обслугований) правил диспетчеризації, в іншому випадку присвоюється найвищий пріоритет і всі неочікувані задачі переміщуються вперед в часі. Коли пріоритет задачі збільшується або задача скасовується завдання, що залишилися зсуваються вперед у часі на відповідних машинах.

Мета-евристики: табу пошук та генетичні алгоритми.

Визначення 2.2. *Мета-евристики* – евристики високого рівня, які керують евристичними локального пошуку для виходу з локальних оптимумів [95, 38, 90].

В останні роки, мета-евристики (табу пошук, генетичні алгоритми) успішно використовувалися для вирішення завдань складання виробничих розкладів. Евристики локального пошуку є методами пошуку околу. При локальному пошуку околу, пошук починається з деякого даного рішення, і намагається ітеративно рухатися до кращого рішення у відповідно визначеному околі поточного рішення з використанням рухомих операторів. Процес пошук припиняється, коли жодне краще рішення не може бути знайдено в околі поточного рішення, яке є локальним оптимумом. Мета-евристики покращують алгоритми локального пошуку для уникнення локальних оптимумів або прийняттям неоптимальних рішень, або шляхом створення хороших

початкових умов для локального пошуку в більш інтелектуальний спосіб, ніж просто надання випадкових початкових умов.

Табу пошук та генетичні алгоритми широко використовуються для вирішення статичних детермінованих задач диспетчеризації виробництва у виробничих системах. Проте, недостатньо дослідницької роботи було спрямовано на використання мета-евристик у оперативній диспетчеризації. У [28, 130] розглянуто важливість використання мета-евристик для корекції розкладу замість використання локального пошуку або простих евристик, оскільки вони можуть потрапити у локальний оптимум.

Табу пошук (ТП). Ідея алгоритму полягає в тому, щоб не зупинятися у локальному оптимумі, як це запропоновано в алгоритмах локального спуску, а продовжити пошук, керуючись тими ж правилами, забороняючи відвідування вже пройдених точок.

На k -му кроці алгоритму точка x_{k+1} знаходиться з рішення задачі:

$$\min\{F(x) \mid x \in N(x_0) \mid \cup_{i=0}^k x_i\}$$

Множина $\cup_{i=0}^k x_i$ виступає в якості списку заборон, що і послужило приводом для назви алгоритму. Цей список поповнюється на кожному кроці новою точкою. Очевидно, що якщо стара інформація не буде видалятися зі списку, то продуктивність алгоритму буде падати з ростом числа ітерацій. Тому довжина списку обмежується зверху деякою константою l , і список заборон містить тільки останні l точок. Перевірка і поповнення списку може виявитися досить трудомісткою операцією. Тому, іноді доцільно зберігати не самі рішення $x_i, i=k-l+1, \dots, k$, а або функції від них (наприклад, значення цільової функції), або номери змінюваних координат, атрибути переходу від x_k до x_{k+1} . Позначимо через $N'(x)$ частину околу $N(x)$, взятую випадковим чином.

Тоді алгоритм табу пошуку можна представити в наступному вигляді.

1. Обираємо початкове рішення x , приймаємо $F_{\text{ПЗ}} = F(x)$. Формуємо порожній список заборон.

2. Знаходимо нове рішення z таке, що:

а) $z \in N'(x)$;

$$\text{б) } F(z) = \min\{F(y) \mid y \in N'(x)\};$$

в) перехід $x \rightarrow z$ не є забороненим або $F(z) < F_{\text{ПЗ}}$.

3. Переходимо в нову точку $x = z$.

Якщо $F(x) < F_{\text{ПЗ}}$, то змінюємо список заборон $F_{\text{ПЗ}} = F(x)$.

4. Якщо виконано критерій зупинки, то STOP, інакше йти на п.2.

Як критерій зупинки використовується або зупинка по числу ітерацій, або необхідна точність по відношенню до заданої нижньої межі. Початкове рішення вибирається за допомогою якогось простого алгоритму. Змінюючи довжину списку заборон, можна керувати процесом пошуку. При зменшенні довжини, інтенсифікується пошук в поточній області, збільшення довжини сприяє переходу до іншої області. Як околиці можна розглядати безліч всіх рішень, які виходять з поточного рішення зміною однією з координат.

Табу пошук у [65] використовувався для пошуку прогностичних графіків. У [28] використовували табу пошук для корекції розкладу, викликаного невизначеністю часу обробки. Було встановлено, що табу пошук генерують розклади хорошої якості в короткі терміни.

Генетичні алгоритми. Їх загальну схему простіше всього зрозуміти, розглядаючи задачі безумовної оптимізації [135]:

$$\max\{F(i) \mid i \in \{0, 1\}^n\}$$

Прикладами служать задачі планування, розміщення, стандартизації, здійсненності та інші. Стандартний генетичний алгоритм починає свою роботу з формування початкової популяції $I_0 = \{i_1, i_2, \dots, i_s\}$ – скінченного набору допустимих рішень задачі. Ці рішення можуть бути обрані випадковим чином або отримані за допомогою імовірнісних алгоритмів. Як ми побачимо нижче, вибір початкової популяції не має значення для збіжності процесу асимптотики, проте формування "хорошої" початкової популяції (наприклад з безлічі локальних оптимумів) може помітно скоротити час досягнення глобального оптимуму.

На кожному кроці еволюції за допомогою імовірнісного оператора селекції вибираються два рішення, батьки i_1, i_2 . Оператор схрещування за рішеннями $i_1,$

i_2 будує нове рішення i' , яке потім піддається невеликим випадковим модифікаціям, які прийнято називати мутаціями. Потім рішення додається в популяцію, а рішення з найменшим значенням цільової функції видаляється з популяції.

Завдання формалізується таким чином, щоб її рішення могло бути закодовано у вигляді вектора генів ("генотипу"). Де кожен ген може бути бітом, числом або якимсь іншим об'єктом. У класичних реалізаціях ГА передбачається, що генотип має фіксовану довжину. Однак існують варіації ГА, вільні від цього обмеження.

Деяким, звичайно випадковим, чином створюється безліч генотипів початкової популяції. Вони оцінюються з використанням "функції пристосованості", в результаті чого з кожним генотипом асоціюється певне значення ("пристосованість"), яке визначає наскільки добре фенотип їм описуваний вирішує поставлене завдання.

З отриманого безлічі рішень ("покоління") з урахуванням значення "пристосованості" обираються рішення (зазвичай кращі особини мають велику ймовірність бути вибраними), до яких застосовуються "генетичні оператори" (у більшості випадків "схрещування" - crossover і "мутація" - mutation), результатом чого є отримання нових рішень. Для них також обчислюється значення пристосованості, і потім проводиться відбір ("селекція") кращих рішень у наступне покоління.

Цей набір дій повторюється ітеративно, так моделюється «еволюційний процес», що триває декілька життєвих циклів (поколінь), поки не буде виконано критерій зупинки алгоритму. Таким критерієм може бути:

- знаходження глобального, або субоптимального рішення;
- вичерпання числа поколінь, відпущених на еволюцію;
- вичерпання часу, відпущеного на еволюцію.

Генетичні алгоритми служать, головним чином, для пошуку рішень в багатовимірних просторах пошуку.

Таким чином, можна виділити наступні етапи генетичного алгоритму:

0. Поставити цільову функцію (пристосованості) для особин популяції.

1. Вибрати початкову популяцію I_0 і покласти :

$$f^* = \max\{F(i) \mid i \in I_0\}, k = 0.$$

2. Якщо не виконаний критерій зупинки робити наступне.

2.1. Вибрати батьків i_1, i_2 з популяції I_k .

2.2. Схрещення: побудувати i' по i_1, i_2 .

2.3. Мутація: модифікувати i' .

2.4. Селекція: Якщо $f^* < f(i')$, то $f^* = f(i')$.

2.5. Оновити популяцію і покласти $k = k + 1$.

3. Якщо виконуються умови зупинки, то кінець циклу, інакше до п.2.

У [18] використовувалися генетичні алгоритми для оперативної диспетчеризації виробничих систем за наявності поломок машин і альтернативного маршруту вирішення задач. Були використані дві міри продуктивності, а саме: середня затримка виконання задачі і середня вартість виконання задачі. Щоразу, коли відбувається динамічна подія використовуються генетичні алгоритми, щоб запропонувати альтернативний графік. Крім того, рішення генетичних алгоритмів порівнювали з кількома поширеними правилами диспетчеризації. Результати показали, що продуктивність генетичних алгоритмів значно вище, ніж у поширених правил диспетчеризації. У [96] використовували генетичні алгоритми для оперативної диспетчеризації у СОУ ГВС. Вони розглядали наступні події в реальному часі: надходження нової партії, недоступність деталей для обробки(через відмову систем подачі, при наявності дефектів на заготовках і т.д.), і поломки машин (через відсутність інструментів, незаплановане обслуговування і т.д.). Розклади, отримані з використанням правил диспетчеризації були покращені з використанням генетичних алгоритмів. Результати показали, що генетичні алгоритми значно зменшили час виконання. У [58, 48] використовували генетичні алгоритми для генерації робастних графіків і для оцінки продуктивності різних мір робастності. У роботах [124, 125] порівняли продуктивність генетичних алгоритмів і евристик локального пошуку для

генерації робастних графіків. Результати показали ефективність генетичних алгоритмів при генерації графіків з набагато кращим часом виконання і стабільністю, ніж евристики локального пошуку. Проте, у [12] автори повідомили у своїх експериментальних результатах, що можливості генетичних алгоритмів знижуються зі збільшенням розміру задачі, і вони не є ефективними для знаходження близьких до оптимальних рішень у встановлені терміни.

Методи штучного інтелекту.

У ряді задач оперативної диспетчеризації у СОУ застосовуються методи штучного інтелекту такі, як: системи засновані на знаннях, нейронні мережі, нечітка логіка і т.д., які розглядаються нижче.

Підходи, засновані на знаннях базуються на тому факті, що є велика різноманітність технічних знань щодо керування, яке може бути здійснене за наявності подій в реальному часі. Системи, засновані на знаннях зосереджуються на збиранні знань або досвіду експерта у конкретній області та використовують механізм виведення для отримання висновків або рекомендацій щодо здійснення корегуючих дій. Тому часто термін система, заснована на знаннях використовується в якості синоніма *експертної системи* [195].

ISIS [34, 109], розроблений в Carnegie Mellon у 1982 році, була першою спробою використання системи, заснованої на знаннях у плануванні виробничої системи. ISIS виконує обмежений прямий пошук, для отримання розкладу. Динамічні ситуації обробляються переплануванням відповідних задач шляхом вибіркового послаблення деяких обмежень. OPIS [108] є наступником ISIS. OPIS це система, заснована на знаннях початково розроблена для диспетчеризації промислового виробництва, яка використовує ймовірнісний підхід вирішення проблеми для поступової генерації і корекції графіка у відповідь на зміни. OPIS реалізовано на основі модульної архітектури, що поєднує багато різних евристик, що називаються джерелами знань, які вибірково використовується для генерації і перегляду загального графіка. Евристики корекції графіку визначені в OPIS:

- планувальник задач;
- планувальник ресурсів;
- зсувач вправо;
- зсувач вліво;
- планувальник попиту.

IOSS [82] є ще однією інтерактивною системою диспетчеризації, заснованою на знаннях на основі ймовірнісного та інтерактивного вирішення проблем. SONIA [55] це прогнозуюча реактивна система диспетчеризації виробничої системи, заснована на знаннях. Були визначені різні евристичні корекції графіку:

- послаблення термінів виконання;
- розширення робочих змін;
- відкладання роботи до наступної зміни;
- скорочення простоїв ресурсів за допомогою переставляння операцій.

Деякі дослідники поєднували системи, засновані на знаннях і моделювання у плануванні, для вибору найкращих корегуючих дій для обробки події в реальному часі [11]. Деякі системи, засновані на знаннях, були розроблені, щоб допомогти користувачеві реагувати інтерактивно на події в режимі реального часу [32, 101, 42, 74].

Штучні нейронні сітки (ШНС) посідають чільне місце серед інших методів штучного інтелекту, які були використані для вирішення проблеми диспетчеризації у СОУ.

Широке обговорення методів нейронних мереж, зокрема вибір архітектури та методу навчання для використання у СОУ можна знайти в [114, 115, 130, 50, 66].

Гібридні системи, які поєднують різні методи штучного інтелекту, використовуються для отримання кращих динамічних систем диспетчеризації.

У [68] було розроблено фреймворк CABINS для корекції розкладу виробничого середовища на основі ситуаційного керування. Ситуації представляються змістом і відповідною корегуючою дією. Ситуаційне

керування дозволяє зберігати і повторно використовувати знання для подібних ситуацій. Графік корегується поступово, в міру необхідності, з використанням ситуацій, що зберігаються в системі.

У [46] та [60] було розроблено гібридний фреймворк для оперативної диспетчеризації, що складається з бази знань, яка описує правила диспетчеризації, модуля моделювання для оцінки продуктивності правил диспетчеризації, штучної нейронної мережі та генетичних алгоритмів, які дозволяють методами машинного навчання адаптувати підходи в окремих проблемних випадках.

У [29] використовується ситуаційне керування і нечітка логіка для реактивного планування в сталеливарній промисловості. У [102] використовується нечітку логіку для виявлення критичних задач для того, щоб перепланувати їх. В результаті, особа, яка приймає рішення, на виробництві отримує інформацію, які задачі повинні бути переплановані зараз, найближчим часом, пізніше або, можливо, взагалі ніколи. У [30] використовувалася нечітка логіка для оперативної диспетчеризації безперервного розливання сталі.

У [89] була представлена система підтримки прийняття рішень на основі нечіткої логіки для планування і перепланування виробничого середовища з паралельними машинами за наявності невизначених ситуацій. Невизначеною ситуацією вважався брак матеріалу, що описувався числом невизначених подій і тривалістю ремонту. Ці параметри були визначені нечітко і моделювалися в поєднанні з використанням нечітких множин і нечітких множин другого рівня, відповідно. Нечіткі правила Сугено були запропоновані для визначення, коли і яким способом здійснювати перепланування.

У [35, 36] використовувалися системи на основі знань і нейронні мережі для вирішення задачі реактивного планування. Нейронні мережі використовувалися для прийняття рішень щодо найкращого набору диспетчерських правил, за наявності подій в режимі реального часу.

У [97] автор запропонував систему діагностики несправностей для реактивного планування на хімічних заводах. Система поєднує в собі

процедуру адаптивного навчання нейронних мереж та експертної системи, заснованої на знаннях.

Мультиагентна оперативна диспетчеризація.

Існують вагомі докази того, що мультиагентні системи є одним з найбільш перспективних підходів до побудови складних, надійних і економічно ефективних систем диспетчеризації виробництва наступного покоління з огляду на їх автономний, розподілений і динамічний характер та відмовостійкість [83, 85, 106]. Мультиагентна система являє собою мережу інтелектуальних агентів, які працюють разом задля вирішення проблем, які поза їх індивідуальними можливостями [73]. Використання мультиагентних систем для вирішення проблеми оперативної диспетчеризації мотивується наступними ключовими моментами [83, 85, 105, 24, 16, 105].

По-перше, мультиагентні системи диспетчеризації визначаються тим, що дані та управління розподілені по виробничій системі. Ці системи складаються з автономних агентів, приєднаних до кожної фізичної чи функціональної виробничої одиниці на виробництві (ресурсів, операторів, деталей, задач тощо). Локальна автономність дозволяє агентам брати відповідальність за проведення локальної диспетчеризації для одного або декількох об'єктів у процесі виробництва і локально та ефективно реагувати на локальні невизначеності, збільшуючи надійність і гнучкість системи.

По-друге, ці окремі агенти мають значну свободу реагування на локальні умови, взаємодії один з одним для досягнення глобально оптимальних і надійних графіків. Загальна продуктивність системи глобально не планується, вона досягається через динамічну взаємодією агентів у реальному часі. Таким чином, система складається з паралельних незалежних локальних рішень агентів.

По-третє, програмне забезпечення для кожного агента набагато менш об'ємне і простіше, ніж це було б для централізованого підходу, і в результаті воно простіше у написанні, установці і супроводі. Крім того, можна інтегрувати нові ресурси або видаляти існуючі зі своїми прикріпленими агентами для

моделювання відповідного виробничого середовища без будь-яких змін в існуюче програмне забезпечення, просто підключивши їх до виробничої мережі.

2.2. Аналіз вимог та обмежень щодо процесу ДОК з боку ГВС

У процесі оперативного динамічного керування необхідно реагувати на *вимоги* ГВС, що надходять у якості зворотного зв'язку та враховувати наявні *обмеження* щодо структурних та архітектурних особливостей будови ГВС.

2.2.1. Визначення вимог ГВС як зворотнього зв'язку у процесі ДОК.

У даній роботі, у вигляді зворотнього зв'язку (*вимог*) у системі динамічного оперативного керування ГВС, що надходить до модуля корекції ВДП СОУ від модулів оперативного та статистичного обліку СОУ використовується *інформація про вид невизначеної (нештатної) ситуації*, що виникла у процесі функціонування ГВС.

Визначення 2.3. Невизначеності – події в реальному часі, які виникають у процесі функціонування системи можуть змінити її стан та/або впливають на її продуктивність.

Література з динамічного керування розглядає значне число подій в реальному часі і їх вплив з урахуванням різних виробничих систем, в тому числі одно-машинних систем, систем паралельних машин, конвеєрів, цехів і гнучких виробничих систем.

Події у режимі реального часу були розділені на дві категорії: пов'язані з ресурсами та пов'язані із задачами [112, 114, 20, 119]. Дослідимо більш детально окремі найпоширеніші невизначеності двох зазначених типів на предмет виникнення на певному етапі керування виробничою системою, результати зведемо у таблицю 2.3.

Таблиця 2.3.

Невизначеності на різних рівнях керування ГВС

Тип невизначеності	Невизначеність	Тип системи управління
Пов'язані з ресурсами	<i>несправність машини</i>	СОУ
	<i>помилка оператора</i>	СОУ
	<i>відсутність або несправність інструмента</i>	СОУ, АСАУ
	<i>ліміти завантаження</i>	СОУ, АСАУ
	<i>затримки у доставці матеріалів</i>	СОУ, АСАУ
	<i>дефектність матеріалу</i>	СОУ
Пов'язані з операціями	<i>термінові операції</i>	СОУ
	<i>відміна операцій</i>	СОУ
	<i>зміни терміну виконання</i>	СОУ
	<i>невчасне надходження операцій</i>	СОУ
	<i>зміна пріоритету операцій</i>	СОУ
	<i>зміна тривалості виконання операцій</i>	СОУ

2.2.2. Аналіз обмежень ГВС.

У якості **обмежень** щодо структурних та архітектурних особливостей будови ГВС, що можуть вплинути на процес ДОК, визначено наступні показники: *обчислювальна потужність апаратного забезпечення СОУ, архітектури СОУ та типова компоновальна структура ГВС.*

1. Обчислювальна потужність апаратного забезпечення СОУ є показником функціонування електронно-обчислювальної техніки, що застосовується на типовій СОУ ГВС для виконання комплексу програм, метою яких є синхронізація функціонування виробничого устаткування гнучких виробничих систем, досягнення максимально можливого коефіцієнта завантаження устаткування і забезпечення ефективного розподілу матеріальних та інформаційних потоків на стадії експлуатації ГВС. Умовно можна виділити наступні значення обчислювальної потужності:

- низька;

- середня;
- висока.

2. *Архітектури СОУ*, що використовуються у промислових умовах:

- централізовані;
- розподілені (окрім мультиагентних);
- мультиагентні (автономні та медіаторні).

Централізовані системи. Більшість систем планування та управління, розроблених в промислових умовах традиційно розглядалися з огляду на вертикальне поширення команд і відповідей, що значною мірою спирається на централізовані та ієрархічні моделі [83, 41, 105, 14, 106]. Для забезпечення узгодженості даних в масштабах всього підприємства, централізовані та ієрархічні системи планування сильно залежать від центральних баз даних. Для оптимізації продуктивності рішення з планування робляться централізовано на рівні супервізора, а потім розподіляються на рівень виробничих ресурсів для виконання. Така архітектура покладає на центральний комп'ютер відповідальність за планування, диспетчеризацію ресурсів, моніторинг будь-яких відхилень і диспетчеризацію коригувальних дій.

Централізовані і ієрархічні системи планування мають ряд недоліків [83, 116, 105, 14, 16]. Основним недоліком є наявність центрального комп'ютера, який являє собою вузьке місце, яке може обмежити масштабованість виробництва і це єдина точка відмови, яка може його повністю зупинити. Крім того, зміна конфігурації ієрархічно керованих виробничих систем є дорогим і трудомістким процесом, оскільки передбачає заміну дорогого програмного забезпечення. Виробничі системи з ієрархічним плануванням набувають все більш складного рівня інтеграції компонентів. Іншим недоліком є те, що вертикальний потік інформації збільшує час прийняття рішень. Крім того практичний досвід показав, що ієрархічні централізовані системи планування, як правило, мають проблеми з реагуванням на відхилення і можуть неефективно реагувати на наявність подій в реальному часі. Коли виникає невизначена ситуація, інформація передається до вищого рівня ієрархії, і тільки

після адаптації планувальника, новий графік ініціює новий потік команд, який формує реакцію на невизначеність. Це вертикальне переміщення інформації призводить до повільної реакції і, як наслідок, до низької надійності. Незважаючи на те, що централізовані та ієрархічні системи планування можуть забезпечити глобально кращі графіки в середовищах, де невизначеності в режимі реального часу виникають рідко, у динамічному середовищі у більшості випадків вони є неефективними. Таким чином, централізоване ієрархічне планування є надто складним, важко підтримуваним і переналаштовуваним, негнучким, дорогим і повільним, щоб задовольнити потреби сучасних складних виробничих середовищ.

Розподілені системи. Глобальний конкурентний тиск у виробництві призвів до фундаментальних змін у роботі виробничих систем. Сучасні системи повинні швидко адаптуватися до впливу невизначеностей з підтримкою більш коротких виробничих циклів, підвищення продуктивності праці і збільшення експлуатаційної гнучкості. Для вирішення цієї проблеми застосовуються високо автоматизовані системи, що спроможні забезпечити надійність, стабільність, здатність до адаптації і ефективного використання наявних ресурсів за рахунок модульної та розподіленої архітектури [83, 16, 106]. Існує тенденція до зростання кількості розподілених виробничих систем в результаті необхідності підвищення інтенсивності реагування виробництва до змін ринків і технологій. Основною мотивацією при розробці цих систем є децентралізація контролю над виробничою системою і, як результат, зниження складності і вартості, підвищення гнучкості та відмовостійкості.

Окремо більш детально розглянемо такий підвид розподілених архітектур, як агентні архітектури.

Архітектури СОУ на основі агентів. Все більше число підприємств звертаються до агентної технології для роботи у складному і динамічному середовищі та досягають успішних результатів. Було реалізовано два основні типи мультиагентних архітектур для динамічного планування: автономні

архітектури і посередницькі архітектури. Вони описані більш детально в наступних підрозділах.

Автономні архітектури. В автономних архітектурах (рис. 2.2), агенти, що представляють виробничі об'єкти, такі як ресурси і задачі мають можливість визначити свої локальні графіки, реагувати на локальні зміни і безпосередньо співпрацювати один з одним для створення глобального оптимального і надійного розкладу.

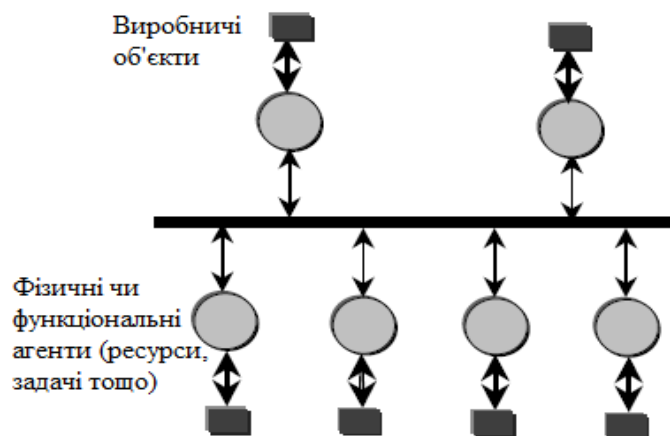


Рисунок 2.2. Автономні архітектури

Yams (Yet Another Manufacturing System) є однією з найбільш ранніх агентних виробничих систем, яка призначає агента для кожного вузла в ієрархії управління (виробництво, цех, виробничий модуль)[87]. Основна ідея Yams в тому, що агенти завдань здійснюють переговори з агентами ресурсів для призначення завдань до виробничих модулів агентів за допомогою мережевого протоколу контракту (CNP – contract net protocol). У [104] розробив систему динамічного планування у модульній виробничій системі. У своїй роботі агент виробничого модуля може одночасно працювати з іншими модулями через CNP [110]. Запит повідомлень про ставки поширюються по модулям, які оцінюють специфікацію операцій і подають заявки, що описують їх очікуваний час завершення або тривалість обробки. Модуль, який оптимізує визначений критерій обирається для виконання операції. У [40] та [80, 78, 79] запропоновано просту мультиагентну архітектуру для динамічного планування

в гнучких виробничих систем, включає тільки агенти ресурсів. Агенти ресурсів відповідають за динамічне планування ресурсів і вони жодним чином не контролюють один одного. Вони ведуть переговори за допомогою CNP для створення глобального розкладу. Кожен агент ресурс виконує наступні функції: планування, виявлення, діагностика та обробка помилок. Агенти ресурсів реагують локально в режимі реального часу подій, що відбуваються на відповідному ресурсі використовуючи коригувальні дії, описані у базі знань. Коли в режимі реального часу відбуваються події, такі як поломки машини, агент ресурс проводить нові переговори щодо пошуку альтернативного агента ресурсу для поточної операції. Для підвищення гнучкості та надійності у [111] автори запропонували мультиагентну архітектуру для динамічного планування у виробничих системах, яка включає агентів задач і ресурсів. Агенти задач здійснюють переговори щодо операцій задач з агентами ресурсів використовуючи CNP. Коли агент ресурс виявляє несправність, він посилає повідомлення про несправність машини до кожного агента задачі, що є в черзі на обробку. Отримавши повідомлення про несправності машини, агент задачі повторно домовляється про виконання задачі з іншими агентами ресурсів, здатних її виконувати. У роботах [21, 22, 23] і [77, 76] було запропонували нову мультиагентну архітектуру для комплексного і динамічного планування у виробництва сталі. Кожен виробничий процес представлений агентом. Робастне прогностично-реактивне планування генерує надійні прогностично-реактивні графіки за наявності подій у реальному часі, використовуючи міри корисності, стабільності та надійності, а також різноманітні евристичні перепланування.

Деякі мультиагентні системи планування використовують механізми торгів і ставок для переговорів між агентами. Агенти обмінюють ресурси на гроші за цінами, визначеними за допомогою ставок. У [62, 61] автори запропонували автономну мультиагентну архітектуру для динамічного планування виробництва на основі валютної моделі, що поєднує цілі планування і механізм цін. Їхня модель розглядає кожну задачу і ресурс в якості агента. Агенти задач ведуть переговори з агентами ресурсів через CNP

механізм, щоб оптимізувати зважений критерій, який є функцією кінцевого часу виконання, ціни, якості та інших визначені користувачем параметрів. Агент деталі входить в систему з певною валютою, запитує та оцінює конкурсні пропозиції кількох агентів ресурсів, здатних виконувати вимоги до обробки і вибирає той, який оптимізує його критерій. Кожен агент ресурсу встановлює ціну на основі його статусу, потім він вирішує, яка з оголошених задач є найбільш цікавою для можливого подання пропозиції. Агент задачі намагається мінімізувати ціну, виплачену, а метою агента ресурсу є максимізація стягнутої ціни. Кожен контракт вважається завершеним після того, як агенти задач і ресурсів взаємно виконали роботу. Коли агент ресурсу вийшов з ладу, він інформує відповідний агент задачі, а останній переходить до процесу повторних переговорів щодо провалених задач з іншими агентами ресурсів. AARIA (Autonomous Agents for Rock Island Arsenal) являє собою автономну мультиагентну архітектуру розроблену для планування у оборонних виробничих об'єктах [86]. Виробничі ресурси, деталі і люди розглядаються як автономні агенти. Система включає в себе функції оптимізації розкладу та усунення несправностей. Агенти співпрацювати з використанням CNP.

Інші мультиагентні системи динамічного планування використовували навчальні підходи для динамічного планування. У [8] запропонували динамічне планування виробництва із використання здатних до перенавчання агентів. Агент тренується за поліпшеним навчальним алгоритмом на стадії навчання, а потім успішно приймає рішення для планування операцій. Система планування складається з двох частин: середовища моделювання та інтелектуального агента. Агент вибирає найбільш відповідне правило пріоритету, для вибору задачі і присвоєння її ресурсу відповідно до виробничих умов, в той час середовища моделювання здійснює планування з використанням правила обраних агентом. У [88] автор запропонував мультиагентні навчальні підходи для динамічного планування. У мультиагентній архітектурі, робочі площі контролюються агентами з базою знань, яка містить правила диспетчеризації і використовує навчання на основі генетичного алгоритму для оновлення правил

у базі знань через певні проміжки часу. Вища частота навчання може допомогти агенту швидше адаптуватися до змін у виробничому середовищі.

Медіаторні архітектури. Незважаючи на хороші показники автономних архітектур, як правило, вони стикаються з проблемами в забезпеченні глобально оптимізованих графіків і прогнозування за наявності великої кількості агентів [16, 105, 14, 106, 116]. Деякі дослідники запропонували медіаторні архітектури для динамічного планування у таких складних умовах щоб поєднувати надійність, оптимальність і передбачуваність.

Медіаторна архітектура має базову структуру, що складається з автономних співпрацюючих місцевих агентів, які здатні до переговорів один з одним з метою досягнення виробничих цілей [41 105, 14, 106]. Ця основна структура розширюється медіаторами агентів щоб координувати поведінку місцевих агентів для виконання глобального динамічного планування, рис. 2.3. Агенти медіатори працюють одночасно з локальними агентами над тими ж процесами прийняття рішень. Локальні агенти здійснюють прийняття рішень автономно, але можуть попросити поради у агента медіатора. Цей агент має можливість консультувати, нав'язувати або оновлювати рішення, прийняті агентами ресурсів з метою досягнення глобальних цілей і вирішення конфліктних ситуацій. Таким чином, агент медіатор може координувати і впливають на загальну поведінку системи. Агент медіатор має картину всієї системи, в той час як локальні агенти можуть мати більш детальну, більш правильну і більш актуальну картину локальних ситуацій. Таким чином, місцеві агенти можуть більш оперативно реагувати на невизначеності, в той час як агенти медіатори можуть координувати поведінку агентів і часто підвищувати глобальну продуктивність.

Медіаторна архітектура забезпечують обчислювальну простоту, в той же час цілком підходять для розробки розподілених промислових систем, які є складними, динамічними і складається з великої кількості агентів ресурсів. [16, 14, 17] показали у своїх порівняльних дослідженнях, що медіаторні архітектури поліпшили продуктивність порівняно з автономними архітектурами, через їх

здатність планувати далі в майбутнє, в поєднанні з їх здатністю реагувати на порушення, які можуть вплинути на глобальну продуктивність.

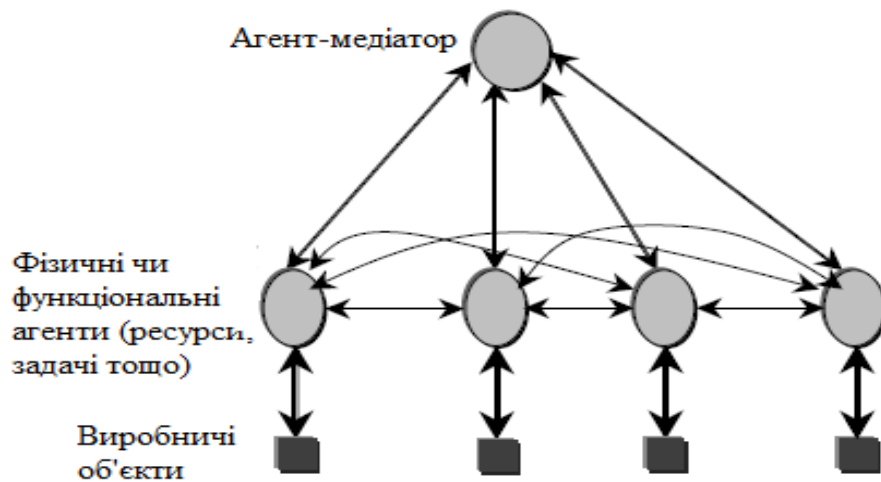


Рисунок 2.3. Медіаторні архітектури

Дуже проста медіаторна архітектура була запропонована у [94] для динамічного планування в гнучких виробничих системах. Архітектура складається із агентів завдань, агента диспетчера задач, агентів ресурсів та агента медіатора ресурсу. Агент диспетчера завдань створює агентів завдань. Агент медіатор ресурсу веде переговори з агентами ресурсів з використанням CNP протоколу щодо виконання завдань. Коли відбуваються збої з ресурсами, повідомлення про провалені операції відправляються на агента медіатора ресурсів, який проводить повторні переговори з іншими агентами ресурсів. Цей режим обробки помилок досить є простим.

Для покращення надійності в складних виробничих системах, деякі автори запропонували інтеграцію агентів медіаторів на кожному виробничому рівні. У [64] запропоновано медіаторну архітектуру Metaphor I, для динамічного планування великих гетерогенних виробничих систем для вирішення задач, віртуальних підприємств, об'єднання підзадач і віртуальної кластеризації агентів. Задачі співпраці віртуального підприємства пов'язані з об'єднанням різномірних виробничих підсистем у велике, динамічне віртуальне об'єднання скооперованих підсистем. Є два основних типи агентів в архітектурі: агенти

ресурсів та агенти медіатори. Агенти ресурсів використовуються для представлення виробничого обладнання та операцій, в той час як агенти медіатори використовуються для координації агентів ресурсів за допомогою CNP протоколу. Збої у роботі агента ресурсів оброблюється на локальному рівні. Збій ресурсів моделюється шляхом введення періоду збою в ресурси. Кожне завдання, що включає період простою перепланується на інші доступні часові проміжки, в тому ж ресурсі (де виник збій) або в іншому ресурсі. На основі Metaphor I, у [106] розробили Metaphor II, для інтеграції інших видів діяльності виробничого підприємства, таких як проектування, планування, диспетчеризація, моделювання, обробка, постачання матеріалів, і маркетингових послуг. У цій архітектурі виробнича система організована через ієрархію підсистем медіаторів. Були введені чотири типи медіаторів: підприємства, ресурсів, маркетингу та дизайну. Кожна підсистема являє собою систему на основі агентів інтегровану в систему за допомогою спеціального медіатора. Агенти виробничих ресурсів координуються відповідними медіаторами на всіх рівнях системи. Медіатори ресурсів високого рівня координують медіатори низького рівня, такі як медіатори машини, інструменту, робочих і транспорту. Співпраця між агентами ресурсів реалізується шляхом об'єднання медіаторного механізму і CNP протоколу. Кілька механізмів корекції графіку були розроблені для реагування на наявність подій у реальному часі, таких як: надходження нових завдань, скасування завдань, поломки машини і затримки в часі виконання завдання. У [113] розробили реактивну медіаторну архітектуру планування для реагування на зміни в завданнях і виробничих ресурсах. Виробничі ресурси, включаючи об'єкти і ресурси представлені агентами, які координуються двома медіаторами, а саме об'єктним і особистим, використовую CNP протокол. Реактивне планування здійснюється для зміни створеного розкладу у відповідь на зміни завдань, таких як скасування завдання або додавання термінового завдання, і виробничих умов, таких як поломки машин або раптової хвороби людини-оператора в процесі виробництва.

3. *Компонувальні структури (схеми) ГВС* залежать, зокрема, від серійності виробництва, для якого створюється ГВС [171, 142] та можуть бути класифіковані за двома наведеними ознаками.

1. *Типи організації матеріальних потоків (рис. 2.4):*

- з централізованим складом;
- з проміжним накопичувачем;
- з комбінованою структурою.

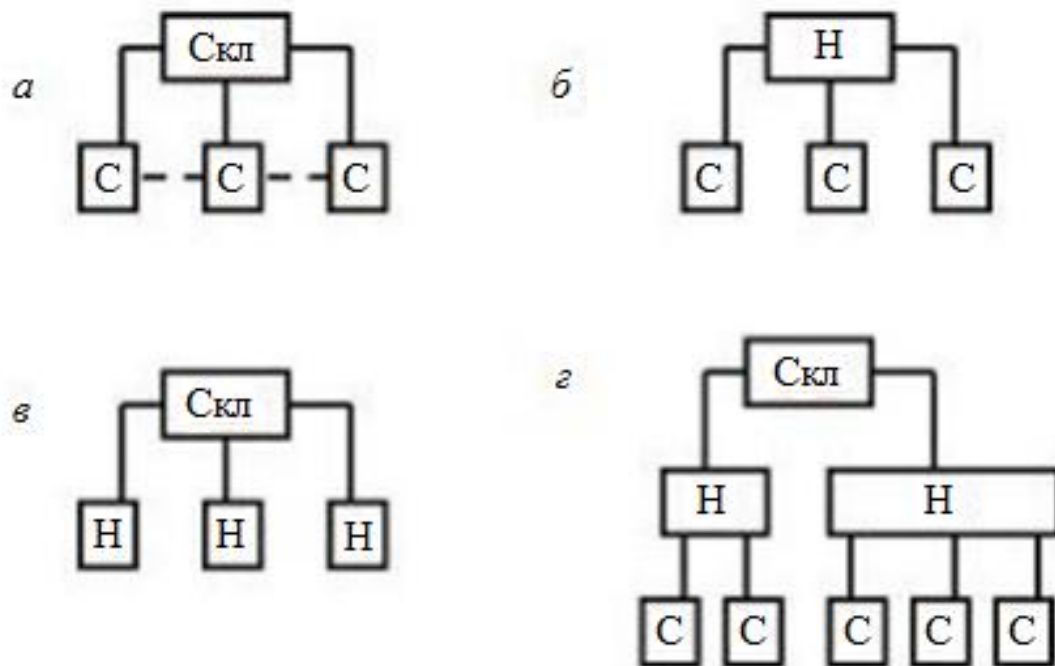


Рисунок 2.4. Типи організації матеріальних потоків

Централізована структура застосовується в одиничному та дрібносерійному виробництві, найчастіше для великогабаритної продукції. Таке розміщення реалізується за схемою склад – верстат - склад (Скл-В-Скл) у ГВС (рис. 2.4, а) або за схемою дільничний накопичувач - верстат - дільничний накопичувач (Н-В-Н) у ГВС, де потрібна мала місткість нагромадження керування АТСС [152, 159] (рис. 2.4, б).

Розміщення із проміжним нагромадженням реалізується за схемою Скл-Н-В-Н-Скл-Н-В-Н-Скл і Скл-Н-В-Н-В-Н-Скл у виробничих системах, що

вимагають частих переналагоджень (рис. 2.4, в-г). Такі схеми є найпоширенішими [152, 159].

2. Взаємне розташування виробничих та обслуговувальних зон зображено на рис. 2.5: *а* – фронтальна; *б* – поперечна; *в* – дипольна; *г* – кутова; *д* – кругова; *е* – комбінована.

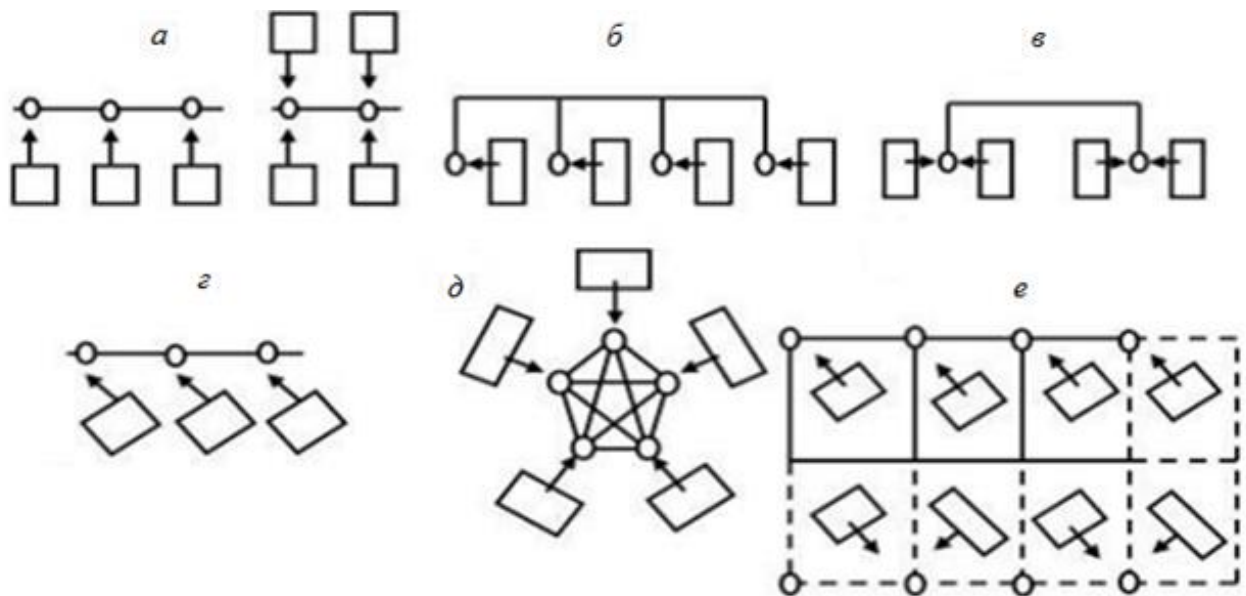


Рисунок 2.5. Схеми розміщення технологічного обладнання

Найбільш простою лінійною структурою компоновання є *фронтальна*. Вона використовується у ГВС для виготовлення виробів у вигляді тіл обертання із застосуванням портальних роботів або маніпуляторів, а також для виготовлення корпусних виробів [167].

Дипольна структура рекомендується за необхідності перестановок і дає змогу промисловому роботу чи маніпулятору обслуговувати два верстати.

Поперечна структура компоновання використовується у ГВС, що виготовляють корпусні вироби або вироби типу тіл обертання. У якості транспортного модуля може бути використано конвеєр або портальний робот.

Кутове компоновання ГВС дає змогу зменшити її довжину та мають сенс у випадку випуску виробів типу тіл обертання.

Кругова структура компоновання застосовується у ГВС для виготовлення різних виробів при використанні маніпулятора обертового типу у якості транспортного та завантажувального засобу.

Комбіноване компоновання доцільне, коли воно виконується у формі решітки із квадратами.

2.3. Побудова логічної послідовності налаштування вирішальних динамічних показників СОУ

Визначення 2.4. Логічна послідовність налаштування ВДП СОУ – така послідовність перебирання значень показників в просторі НВДП згідно із створеним класифікатором, яка дозволяє, здійснюючи ДОК у вигляді ітераційної процедури, виокремити набір значень ВДП СОУ, здатний задовольнити визначені вимоги та обмеження ГВС (рис. 2.6).

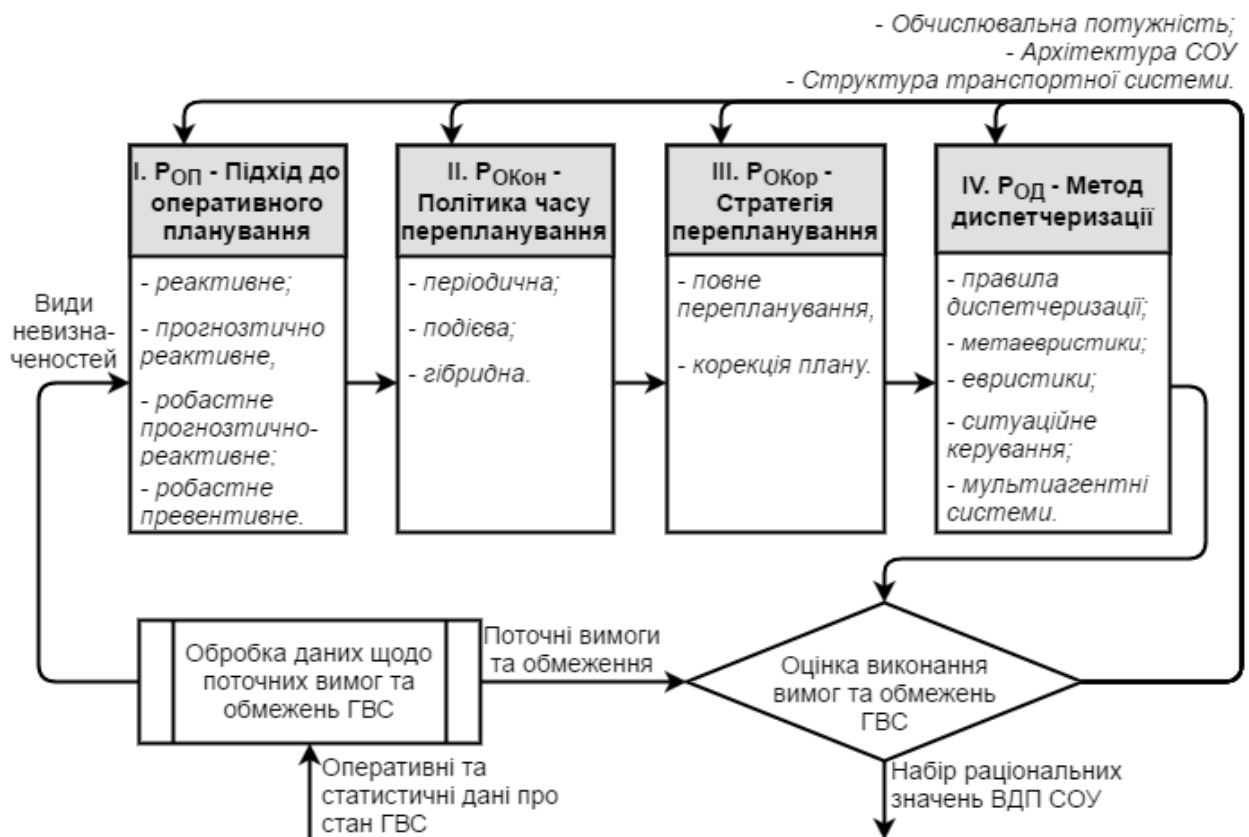


Рисунок 2.6. Логічна послідовність налаштування ВДП СОУ

2.4. Побудова концептуальної моделі СОУ

Обрана логічна послідовність налаштування ВДП СОУ для здійснення оперативного управління у певній ГВС використовується для поетапного визначення показників: підходу до оперативного планування ($P_{\text{ДОК}}$), стратегії перепланування ($C_{\text{ДОК}}$), політики вибору часу перепланування ($ПЧ_{\text{ДОК}}$) та методу диспетчеризації ($M_{\text{ДОК}}$). Визначений склад і послідовність етапів вибору значень показників повинні забезпечити набір ітераційних процедур, які й визначатимуть вибір такої моделі СОУ, яка здатна адекватно реагувати на *вимоги та обмеження ГВС* (ВОГВС), зокрема види невизначеностей (ВН), що виникають у ГВС.

Отже, необхідно отримати набір всіх можливих варіантів поєднань відповідних значень ВДП, серед яких шляхом багатоітераційного перебирання можна визначити складові умовної бажаної моделі СОУ. Для цього потрібно вирішити наступну важливу задачу дослідження – синтезувати *узагальнену концептуальну модель СОУ* на основі набору ітераційних процедур, що забезпечуються складом і послідовністю етапів синтезу. Синтезована модель СОУ повинна узагальнювати в собі всі характеристики останньої, спроможні обслуговувати у повному обсязі ВОГВС.

Оскільки динамічне оперативне керування ГВС є частиною виробничого процесу, доцільно застосувати для формалізації елементів СОУ відповідні методи функціонального аналізу.

Формалізація елементів виробничого процесу зв'язана з описом функцій процесів (як об'єктів керування - ОК), операцій (як сукупності перетворень і зв'язків у ОК), складу та функціональних задач елементів ОК (як відношення перетворень і зв'язків, що характеризують елементи). Так, функцією Φ будь-якого виробничого процесу у загальному випадку є встановлення відповідності між об'єктами праці (матеріалами M , енергією E , інформацією I), способами впливу B на об'єкти праці, моменти часу T впливу та просторовими координатами K об'єктів праці, що може бути записано декартовим добутком [170]:

$$\Phi_{\text{COY}} \subset \{M, E, I\} \times T \times V \times K \quad (3.1)$$

Також даний підхід до формалізації системи було застосовано у роботі [189] для синтезу моделі ШНС, здатної здійснити обслуговування необхідної задачі.

Згідно із обраним підходом на узагальненому верхньому рівні абстрагування концептуально функція СОУ (Φ_{COY} -функція) (як і будь-якої організаційно-технічної системи) як *об'єкта динамічного оперативного керування* подається декартовим добутком множин: $VH, P_{\text{док}}, C_{\text{док}}, PC_{\text{док}}, M_{\text{док}}$.

$$\Phi_{\text{COY}} \subset VH \times P_{\text{док}} \times C_{\text{док}} \times PC_{\text{док}} \times M_{\text{док}} \quad (3.2)$$

Φ -функція відображає постулат діалектичного матеріалізму про існування матерії у просторі та часі у своїх різноманітних формах та проявах [195]. *Метод Φ -функцій* за якими встановлюється відповідність множин рухомих об'єктів, технологій динамічного керування, що відбувається у просторових координатах ГВС у відповідні часові інтервали. Таке представлення може використовуватися як основа формалізації при кінематичному, геометричному, технологічному та структурному описах СОУ. Отже метою синтезу/аналізу СОУ є визначення складу та закономірностей організації окремих компонентів в єдину систему, з урахуванням того, що *функція останнього визначає його структуру*.

При виборі та дослідженні СОУ вирізняють дві постановки задачі:

- *прямую (задача аналізу)* – відомі складові моделі СОУ. Треба визначити ВОГВС – властивості та обмеження ГВС;
- *обернену (задача синтезу)* – відомі ВОГВС (властивості та обмеження прикладної ГВС). Треба визначити складові моделі СОУ, що адекватно реалізує ВОГВС.

Пряма задача виникає при перевірці можливості використання певної моделі СОУ для обслуговування властивостей конкретної ГВС, а обернена – при створенні нової або суттєвій модифікації існуючої моделі СОУ під певні ВОГВС.

Отже, верхній рівень абстрагування визначає перебирання всіх варіантів складових моделі СОУ.

За основу формалізації опису функціональної бази ОК – моделі СОУ та її підфункціональних компонентів – елементарних складових (ЕЛС) на виділених ієрархічних рівнях використовуються скінчені графи, що відображають через НВДП властивості та обмеження задачі з ОК і його складовими, а також метод Ф-функцій [195], за якими встановлюється відповідність множин у виразі (3.2).

Отже, якщо загальна $\Phi_{\text{СОУ-функція}}$ як ОК може бути подана на вищому ієрархічному рівні абстрагування виразом (3.2), то сукупність підфункцій складових процесів ($\Phi_{\text{склад-процеси}}$) перебирання на *другому рівні абстрагування* має вигляд: $\Phi_{\text{ВН}}, \Phi_{\text{П}_{\text{док}}}, \Phi_{\text{С}_{\text{док}}}, \Phi_{\text{ПЧ}_{\text{док}}}, \Phi_{\text{М}_{\text{док}}}$. Дана сукупність підфункцій призначена для варіативного формування траєкторій tr руху в межах змінних кожної з наведених складових до кінцевої мети – оптимального шляху $tr_{\text{опт}}$. Іншими словами, варіативний перетин всіх підфункцій в процесі реалізації ЛМН ВДП СОУ являє собою багатоваріантну ієрархічну ітераційно-пошукову оптимізаційну задачу щодо послідовного перебирання складових моделі СОУ, що задовольняють ГВС:

$$\begin{aligned}\Phi_{\text{ВН}} &\subset \text{П}_{\text{док}} \times \text{С}_{\text{док}} \times \text{ПЧ}_{\text{док}} \times \text{М}_{\text{док}} \\ \Phi_{\text{П}_{\text{док}}} &\subset \text{ВН} \times \text{С}_{\text{док}} \times \text{ПЧ}_{\text{док}} \times \text{М}_{\text{док}} \\ \Phi_{\text{С}_{\text{док}}} &\subset \text{ВН} \times \text{П}_{\text{док}} \times \text{ПЧ}_{\text{док}} \times \text{М}_{\text{док}} \\ \Phi_{\text{ПЧ}_{\text{док}}} &\subset \text{ВН} \times \text{П}_{\text{док}} \times \text{С}_{\text{док}} \times \text{М}_{\text{док}} \\ \Phi_{\text{М}_{\text{док}}} &\subset \text{ВН} \times \text{П}_{\text{док}} \times \text{С}_{\text{док}} \times \text{ПЧ}_{\text{док}}\end{aligned}\tag{3.3}$$

Визначення 2.5. Траєкторія tr руху – це слід у послідовності етапів вибору значень показників СОУ, що визначається перетином складових моделі СОУ з показниками відповідності згідно з ВОГВС [189].

Таким чином, вирази (3.3) являють собою проекції функціональних залежностей, що описують $\Phi_{\text{склад-процеси}}$, на відповідні координатні гіперплощини. Зокрема, серед виразів (3.2) є подання всіх складових, що утворюють моделі СОУ і формують НВДП останніх.

Визначення 2.6. Оптимальна траєкторія tr_{opt} руху – слід у послідовності етапів вибору значень ВДП СОУ, що визначається перетином складових моделей СОУ з максимальними показниками відповідності до ВОГВС на кожному з етапів [189].

На подальших *рівнях абстрагування (третьому – шостому)* відповідно до моделі і залежностей (3.3) реалізується ітеративне перебирання можливих варіацій моделей СОУ при відповідних фіксованих (за кращими результатами попереднього ієрархічного рівня) сполучень складових:

$$\begin{aligned}
 \Phi(VH) &\subset P_{док} \times C_{док} \times PC_{док} \times M_{док} \\
 \Phi(VH, P_{док}) &\subset C_{док} \times PC_{док} \times M_{док} \\
 &\dots \\
 \Phi(VH, P_{док}, C_{док}) &\subset PC_{док} \times M_{док} \\
 \Phi(VH, P_{док}, PC_{док}) &\subset C_{док} \times M_{док} \\
 &\dots \\
 \Phi(VH, P_{док}, C_{док}, PC_{док}) &\subset M_{док}
 \end{aligned} \tag{3.4}$$

Виходячи з функції (3.2) послідовність реалізацій Φ_{COY} може бути представлена оргграфом (рис. 2.7), що являє собою *нижній ієрархічний рівень* подання функцій ОК.

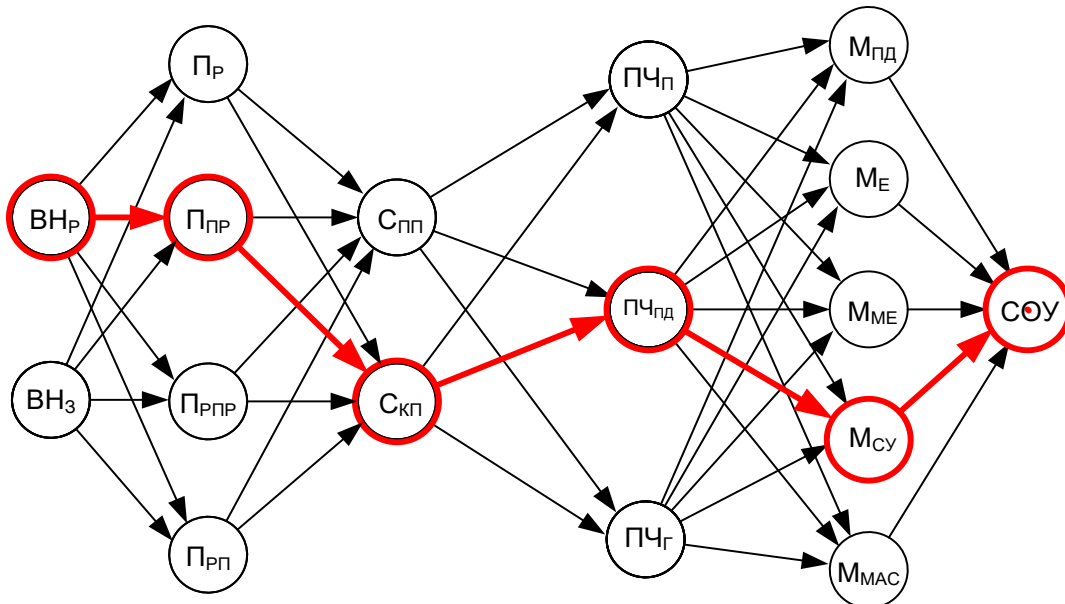


Рисунок 2.7. Повний функціональний оргграф процесу вибору значень ВДП СОУ

На рис. 2.7. використано, відповідно, наступні скорочення:

- ВН – види невизначеностей (ВН_р – пов’язані з ресурсами, ВН_з – з задачами);
- П – підходи до перепланування (П_р – реактивний, П_{пр} – прогностично-реактивний, П_{рпр} – робастний прогностично-реактивний, П_{рп} – робастний превентивний);
- С – стратегія перепланування (С_{пп} – повне перепланування, С_{кп} – корекція плану);
- ПЧ – політика вбору часу перепланування (ПЧ_п – періодична, ПЧ_{пд} – подієва, ПЧ_г – гібридна);
- М – метод перепланування (М_{пд} – правила диспетчеризації, М_е – евристики, М_{ме} – метаевристики, М_{су} – ситуаційне управління, М_{мас} – мультиагентні системи).

Виділення цього рівня ієрархії, що характеризує узагальнену процедурну частину, є надзвичайно важливим етапом системного аналізу/синтезу моделі СОУ. Синтезовані на цьому етапі типи функціональних сполучень $\Phi_{\text{склад-процесів}}$ ($\Phi_{\text{ВН}}$, $\Phi_{\text{ПДК}}$, $\Phi_{\text{СДК}}$, $\Phi_{\text{ПЧДК}}$, $\Phi_{\text{МДК}}$) є необхідними і достатніми для розв’язання прикладних задач побудови системи автоматизованого вибору структури СОУ.

Як вже вище наголошувалося, серед траєкторій tr процедурного руху за оргграфом, наведеним на рис. 3.1, що відбиває реалізацію залежностей (3.4), є й оптимальні $tr_{\text{опт}}$ за умов відповідності до певних ВОГВС. Зокрема, на рис. 3.1 червоною лінією виділений слід умовно оптимальної траєкторії $tr_{\text{опт. ум.}}$, яка в результаті багатоітераційного перебирання визначає складові умовної бажаної моделі СОУ:

$$\text{СОУ} \rightarrow tr_{\text{опт. ум.}} \subset \text{ВН}_р \times \text{П}_{\text{пр}} \times \text{С}_{\text{кп}} \times \text{ПЧ}_{\text{пд}} \times \text{М}_{\text{су}} \quad (3.5)$$

Висновки.

1. На основі аналізу значної кількості джерел було сформовано *набір вирішальних динамічних показників*, до якого увійшли: підхід до планування, стратегія перепланування, політика вибору часу перепланування, метод оперативної диспетчеризації. Формування НВДП дозволяє ефективно вирішити задачу класифікації СОУ та на відміну від існуючих класифікацій задовольняє вимогам, що було висунуто для можливості використання при автоматизованому виборі відповідностей між ГВС, з властивими їй умовами й обмеженнями та показниками СОУ.

2. Визначено *логічну послідовність налаштування* ВДП СОУ, що дозволяє знизити вплив суб'єктивних факторів, пов'язаних з рівнем компетенції оператора, що здійснює налагодження роботи системи, а також вирішує задачу формування коректної послідовності при подальшому здійсненні автоматизованого ДОК.

3. Створено концептуальну модель СОУ на основі логічної послідовності налаштування ВДП із використанням Ф-функції. За допомогою концептуальної моделі встановлюється відповідність множини складових процесів динамічного керування, що відбувається у просторових координатах ГВС у відповідні часові інтервали. Запропоноване представлення може використовуватися як основа формалізації при здійсненні синтезу чи аналізу СОУ, що дає змогу визначати склад та закономірностей організації окремих компонентів в єдину систему.

3. ФОРМУВАННЯ МУЛЬТИАГЕНТНОГО СЕРЕДОВИЩА ДИНАМІЧНОГО ОПЕРАТИВНОГО КЕРУВАННЯ ГВС

3.1. Визначення вагомості реляційних зв'язків між обмеженнями ГВС та показниками СОУ

Подальше вдосконалення процесу ДОК ГВС вбачається в автоматизації вибору значень показників шляхом використання інтелектуалізованих систем для здійснення послідовності ітераційних процедур перебору їх можливих варіантів з метою пошуку $tr_{\text{опт}}$, що дозволить сформувати СОУ здатну задовольнити ВОГВС.

На основі реляційних відношень між окремими компонентами розробленої *концептуальної моделі* була сформована структура *узагальненої моделі вибору* (УМВ), формування якої являє *першу складність* реалізації моделі (рис. 3.1).

Друга складність полягає у кількісному визначенні вагомості реляційних зв'язків між визначальними класифікаційними ознаками і реалізується експертним рейтинговим оцінюванням альтернативних варіантів з використанням методів ранжування і попарних порівнянь [195, 151].

Твердження 3.1. *Експертні системи* зосереджуються на збиранні знань або досвіду експерта у конкретній області та використовують механізм виведення для отримання висновків або рекомендацій щодо здійснення корегуючих дій [169, 195].

Експертна система відрізняється від інших прикладних програм наявністю таких ознак:

1. Моделює механізм мислення людини при застосуванні для розв'язання задач в цій предметній області.
2. Система, окрім виконання обчислювальних операцій, формує певні висновки, базуючись на тих знаннях, якими вона володіє. Знання в системі, зазвичай, описані деякою спеціалізованою мовою і зберігаються окремо від

Типові експертні системи мають структуру зображену на рис. 3.2 і включають: базу даних (не обов'язкова), базу знань, машину виведення (розв'язувач), підсистему пояснень, інтерфейс користувача.

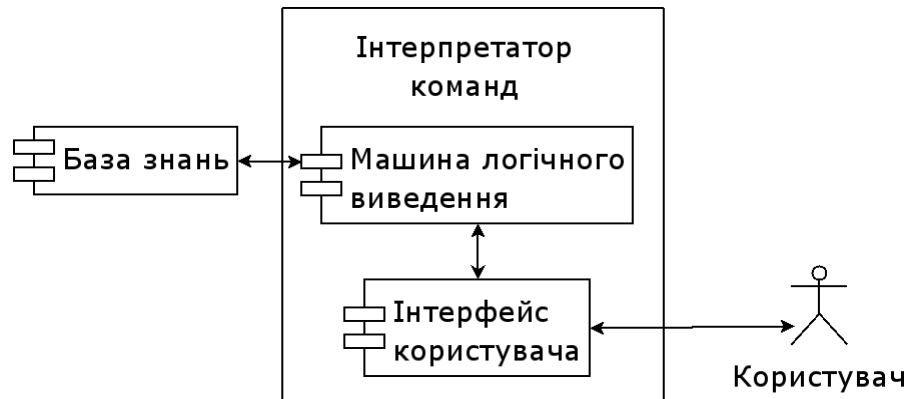


Рисунок 3.2. Структура ЕС

База знань складається з правил аналізу інформації від користувача з конкретної проблеми. ЕС аналізує ситуацію і, залежно від спрямованості ЕС, дає рекомендації з розв'язання проблеми.

ЕС створюється за допомогою двох груп людей:

- інженери, які розробляють ядро ЕС;
- експерти за фахом.

Представлення знань є однією з найважливіших функцій ЕС. Найбільш розповсюдженим способом представлення знань є правила (продукції). В їх основі лежить конструкція виду "ЯКЩО {умова}, ТО {наслідок}". Умовна частина називається антецедентом, а заключна - консеквентом. У загальному вигляді правило можна описати як: $(n); S; U; B \Rightarrow C; P$, де n – ім'я (ідентифікатор) продукції; S - характеристика сфери застосування продукції (область компетенції); U – умова застосування; $B \Rightarrow C$ - ядро (власне конструкція "ЯКЩО; ТО"); P - постумови продукції (котрі виконуються після її реалізації).

Таким чином, частина правил "ЯКЩО" має назву посилення, а "ТО" - виведення або дія. Антецедент зазвичай описується кон'юнкцією більш простих умов $b_1 \wedge b_2 \wedge \dots \wedge b_n$; консеквент може складатися із кількох компонентів, при

чому це можуть бути не лише факти, твердження, але і операції виклику спеціальних процедур. В останньому випадку правило має вигляд: "ЯКЩО { умова}, ТО {дія}". Наприклад, "ЯКЩО B_1, B_2, \dots, B_n , ТО C ". Такий запис означає, що "коли всі умови від B_1 до B_n являються істинними, то C також є істинним" або ж "коли всі умови від B_1 до B_n являються істинними, то слід виконати дію C ".

Кількісна оцінка вагомості реляційних зв'язків між окремими величинами здійснюється на основі експертного рейтингового оцінювання. Експерти оцінюють кожну величину окремим числом балів виходячи із власного досвіду. Нижче наведені два методи визначення узгодженості експертів: метод ранжування та метод парних порівнянь [151, 195].

Метод ранжування. Припустимо, що ми маємо m експертів, котрі оцінюють n критеріїв. Кожен експерт проводить ранжування критеріїв шляхом присвоєння номерів від 1 до n у відповідності зі зменшенням степені важливості цих критеріїв. Результати зводимо в таблицю 3.1.

Таблиця 3.1.

Ранжування величин експертами

		Величини			
		1	2	...	n
Експерти	1	x_{11}	x_{12}	...	x_{1n}
	2	x_{21}	x_{22}	...	x_{2n}

	m	x_{m1}	x_{m2}	...	x_{mn}

Тут x_{ij} – номер, котрий i -й експерт присвоїв j -му критерію. У подальшій роботі зручно перерахувати цю таблицю, так щоб присвоїти більш важливому критерію більше значення y_{ij} ($i = 1, 2, \dots, m$; $j = 1, 2, \dots, n$). Введемо нові вагові коефіцієнти $y_{ij} = n - x_{ij}$. Тепер найбільше важливий критерій має оцінку $n-1$, а найменш важливий – 0. Вагові коефіцієнти в адитивному критерії

визначаються наступним чином:

$$\lambda_k = \frac{\sum_{i=1}^m y_{ik}}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n y_{ij}}, \quad k = 1, 2, \dots, n. \quad (3.1)$$

Степінь узгодженості результатів роботи експертів визначається коефіцієнтом:

$$w = \frac{12S}{m^2(n^3 - n)}, \text{ де: } S = \sum_{j=1}^n d_j^2, \quad d_j = 0,5m(n+1) - \sum_{i=1}^m x_{ij}, \quad j = 1, 2, \dots, n. \quad (3.2)$$

Значення w змінюються в межах $w \in [0; 1]$.

Якщо: $w = 1$ – усі експерти дають однакові оцінки; $w = 0$ – думки експертів неузгоджені. В залежності від величини коефіцієнта w результати оцінки критеріїв або приймаються або відхиляються.

Метод парних порівнянь. Цей метод застосовується коли експерти не в змозі оцінити важливість критеріїв у балах. У цьому випадку кожен k -й експерт заповнює наступну таблицю 3.2:

Таблиця 3.2.

Таблиця парних порівнянь експерта

	1	2	J	n
1	a_{11}	a_{12}	\dots	a_{1n}
2	a_{21}	a_{22}	\dots	a_{2n}
I	\dots	\dots	\dots	\dots
n	a_{n1}	a_{n2}	\dots	a_{nn}

Тут $a_{ij}^k = 1$, ($i = 1, 2, \dots, n$; $j = 1, 2, \dots, n$; $k = 1, 2, \dots, m$), якщо i -й критерій має перевагу над j -м критерієм, $a_{ij}^k = 0$, в протилежному випадку.

Для кожного експерта визначаємо таку таблицю, тобто всього m таблиць. Далі здійснюється об'єднання таблиць в одну шляхом сумування чисел у

відповідних клітинках: $b_{ij} = \sum_{k=1}^m a_{ij}^k$.

Визначимо вагові коефіцієнти:

$$\lambda_k = \frac{\sum_{j=1}^n b_{kj}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n b_{ij}}, \quad (k=1,2,\dots,m) \quad (3.3)$$

Цей метод також передбачає визначення ступеня узгодженості експертів:

$$\gamma = \frac{2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n C_{b_{ij}}^2}{C_m^2 C_n^2} - 1, \quad (3.4)$$

де $C_v^r = \frac{v!}{r!(v-r)!}$ - число v поєднань по r .

Максимальне значення коефіцієнта узгодженості $\gamma_{\max} = 1$. Мінімальне значення $\gamma_{\min} = -\frac{1}{m-1}$ для m – парного і $\gamma_{\min} = -\frac{1}{m}$ - для m непарного.

Отже, при залученні експертів було проведено опитування оцінок ефективності поєднання ознак СОУ наведеними експертними методами. Також, після отримання результатів оцінювання було проведено аналіз на узгодженість експертів у даній області (коректність відповідей щодо відповідності між ВДП).

Після проведення обчислень було отримано наступний результат:

- ступінь узгодженості методом ранжування ($\omega = 0,85$);
- ступінь узгодженості методом парних порівнянь ($\gamma = 0,78$).

У результаті бачимо, що степені узгодженості, отримані двома методами, не менше 0,5, а отже можемо записати значення в таблиці порівняння ефективності поєднання ознак СОУ (Додаток А).

Відповідні дослідження вимагають глибоких і ретельних опрацювань щодо однозначності вирішення цієї частини задачі автоматизованого ДОК. На рис. 3.5 наведені умовні кількісні результати попередніх обробок даних від джерел, що не претендуючи на строгість експертного оцінювання, можна розглядати в якості прикладу узагальненої методики при вирішенні задачі ДОК.

3.2. Обґрунтування вибору агентно-орієнтованого підходу до автоматизації процесу ДОК

Використовуючи синтезовану концептуальну модель системи оперативного управління та отриману узагальнену модель вибору її визначальних динамічних показників шляхом багатоітераційного перебирання можна визначити бажані значення показників СОУ, реалізуючи таким чином процес ДОК. Враховуючи значну кількість необхідних ітерацій та можливість впливу суб'єктивних людських факторів на даному етапі необхідно розробити підхід до автоматизації процесу ДОК на основі набору ітераційних процедур та набору таких значень ВДП СОУ, який здатен адекватно задовольняти вимогам та обмеженням певної ГВС, що функціонує в умовах невизначеності.

Однією з основних особливостей сучасних інформаційних систем, до яких можна віднести і систему оперативного управління виробництвом, є те, що вони не призначені для самостійного прийняття рішень в умовах невизначеності. Усі можливі варіанти поведінки таких систем мають бути спроектовані людиною і закладені в них на етапі розробки. Потрапляння подібної системи в умови, не враховані її розробниками, може призводити до аварійного завершення або більш тяжких наслідків.

Одним з підходів, направлених на вирішення цієї проблеми, є застосування *агентно-орієнтованого методу* для автоматизації проектування і розробки.

Відмітною властивістю концепції агента (програмного агента) є наявність зовнішнього середовища, з яким агент здатний взаємодіяти, але не володіє можливістю його контролювати і тому завжди повинен бути готовий до того, що вжиті ним дії не призведуть до бажаних результатів. Ця властивість робить концепцію агента привабливим інструментом для вирішення багатьох завдань, серед яких створення систем управління складними пристроями і комплексами (у тому числі ГВС) в умовах невизначеності.

Для сучасних інформаційних систем все частіше постає вимога здатності до оптимізації поведінки в умовах мінливого зовнішнього середовища.

Іншим завданням, що виникає при розробці самоналагоджувальних мультиагентних систем, є реалізація методів накопичення та аналізу досвіду. Набір методів, запропонованих для вирішення цього завдання дуже широкий, активно розвивається донині і включає найрізноманітніші методи - від ШНС до складних баз знань.

Зазначені задачі, певною мірою, входять у конфлікт з жорсткими обмеженнями на час реакції і обчислювальну потужність обладнання. Тому однією із значущих тенденцій в сучасних інформаційних системах є паралелізація обчислень та інтеграція окремих інформаційних систем в більш потужні обчислювальні комплекси. Вплив цих тенденцій на розвиток самоналагоджувальних систем також призвів до популяризації концепції соціальних агентів і мультиагентних систем.

Перші роботи, які пропонують декомпозицію системи у вигляді набору автономних взаємодіючих сутностей, з'явилися в 70-х роках 20-го століття [117, 44, 57], проте термін агент вперше з'явився лише через десять років [37]. Хороший огляд сучасних теоретичних і практичних підходів до побудови мультиагентних систем міститься у роботі [123]. Робота [67] містить більш критичний аналіз, а також задається питанням, чому агентно-орієнтовані методи не настільки популярні, якими могли б бути.

На сьогоднішній день мультиагентні системи використовуються для розробки широкого спектра інформаційних систем, серед яких умовно можна виділити три основні класи: відкриті системи, складні розподілені системи, інтерактивні системи.

У промисловості мультиагентні системи найбільш поширені в наступних областях:

- *автоматизація управління складними системами* (платформа ARCHON [118], систему управління виробництвом YAMS [84], систему управління повітряним рухом OASIS [63] та ін.);
- *збір та обробка інформації* (більшість сучасних пошукових машин реалізовано з використанням агентів),

- *ігри* (сьогодні в комп'ютерних іграх противниками гравця людини часто стають гравці, реалізовані як інтелектуальні агенти).

Формальна модель інтелектуалізованого агента.

Поняття "агент" останнім часом було адаптовано до багатьох областей як прикладного та системного програмування, так і до досліджень в областях штучного інтелекту і розподілених інтелектуальних систем. Отже, зафіксуємо поняття "агента", яке буде використовуватися далі в роботі.

Основною відмінною властивістю агентів є те, що агенти здійснюють дії.

Твердження 3.2. Можна стверджувати, що агенти не просто здійснюють дії, але вони діють автономно і раціонально.

Визначення 3.1. Автономність роботи агента – діяльність агента без прямого втручання людини чи іншої керуючої сутності.

Визначення 3.2. Раціональність роботи агента – прагнення агента оптимізувати значення деякої оціночної функції. Міра раціональності неявно вказує на те, що агент має цілі, яких агент "хоче" досягти, і уявлення про зовнішній світ, на які агент спирається при виборі дії.

Ще однією важливою властивістю агента є те, що він поміщений в зовнішнє середовище, з яким він здатний взаємодіяти. Як правило, середовище не контролюється агентом, тобто він здатний лише впливати на нього, але не контролювати повністю.

У підсумку, можна сформулювати наступне визначення агента, адаптоване багатьма сучасними дослідниками.

Визначення 3.3. Агент - обчислювальна система, поміщена в зовнішнє середовище, здатна взаємодіяти з ним, здійснюючи автономні раціональні дії для досягнення цілей.

Очевидно, що перераховані вище властивості не є достатніми для визначення інтелектуального агента, оскільки не передбачають явно гнучкості поведінки.

Твердження 3.3. Зазвичай для того, щоб вважатися "інтелектуальним" агент повинен володіти такими властивостями.

- Реактивність (reactivity) - агент повинен відчувати зовнішнє середовище і реагувати на зміни в ньому, здійснюючи дії, спрямовані на досягнення цілей.
- Проактивність (pro-activeness) - агент повинен показувати керовану цілями поведінку, проявляючи ініціативу, здійснюючи дії спрямовані на досягнення цілей.
- Соціальність (social ability) - агент повинен взаємодіяти з іншими сутностями зовнішнього середовища (іншими агентами, людьми тощо) для досягнення цілей.

Формалізуємо одну з найбільш абстрактних моделей інтелектуального агента зі станом, структура якого на рис. 3.3.



Рисунок 3.3. Модель агента зі станом

У цьому випадку агент розглядається як набір:

$$AG = (S, A, env, I, refine, action), \text{ де}$$

- S є непорожня скінченна множина станів зовнішнього середовища;
- A є непорожня скінченна множина дій агента;
- $env: S \times A \rightarrow 2S$ є функція поведінки зовнішнього середовища, що зіставляє поточному стану зовнішнього середовища і заданої агентом дії, непорожню множину можливих наступних станів зовнішнього середовища. Дії агента можуть впливати на навколишнє середовище, але не контролювати його повністю;

- I є непорожня скінченна множина внутрішніх станів агента;
- **refine**: $I \times S \rightarrow I$ є функція оновлення стану, що зіставляє попередньому внутрішньому стану і новому стану зовнішнього середовища новий внутрішній стан агента;
- **action**: $I \rightarrow A$ є функція прийняття рішення, що зіставляє поточному внутрішньому стану агента деяку дію.

Опис агента в такому вигляді не дає ніякої інформації про його внутрішню структуру і зводить опис агента практично до моделі кінцевого автомата з вхідним алфавітом S , множиною станів I і вихідним алфавітом A . Далі в цьому розділі ми уточнимо структуру внутрішнього стану агента і процеси його перетворень.

Інтелектуальний агент володіє деякою інформацією про зовнішнє середовище, а також активно використовує цю інформацію при взаємодії із зовнішнім середовищем. Саме цю інформацію і називають знаннями або уявленнями агента. У разі ізольованого інтелектуального агента (діючого окремо, а не в складі мультиагентної системи) можна виділити два основних блоки уявлень:

- уявлення про поточний стан зовнішнього середовища, часто іменовані *сприйняття*;
- уявлення про закономірності поведінки зовнішнього середовища, що дозволяють агенту прогнозувати наслідки своїх дій;

Сприйняття описується відношенням $see \subseteq S \times S$, визначаючим для даного стану $s \in S$ множина станів невідмітних від s для даного агента:

$$see(s) \triangleq \{s' \in S \mid (s, s') \in see\} \quad (3.5)$$

Для моделювання уявлень агента про поведінку зовнішнього середовища введемо відношення $bel \subseteq S \times A \times S$. Якщо деяка трійка (s, a, s') входить у відношення $bel((s, a, s') \in bel)$, то, за уявленнями агента, при виконанні дії a в стані зовнішнього середовища s зовнішнє середовище може перейти в стан s' .

Таким чином, уявлення агента за своєю структурою аналогічні опису поведінки зовнішнього середовища *env* і, по суті, є моделлю зовнішнього середо-

вища з точки зору агента. Якщо для будь-яких $s, s' \in S$ и $a \in A$ виконано тотожність $s \in env(s, a)$ тоді і тільки тоді, коли $(s, a, s') \in bel$, можна сказати, що уявлення агента повністю відповідають реальності (в цьому випадку уявлення можна вважати знаннями). Множину всіх можливих уявлень позначимо:

$$Bel(S, A) \triangleq 2^{S \times A \times S} \quad (3.6)$$

До моделюванню поняття мети агента також існує кілька підходів. Найпростішим прикладом мети може служити деяка підмножина станів зовнішнього середовища $G \subseteq S$, одного з яких агенту необхідно досягти. Розширеними цілями часто називають множину кінцевих ланцюжків станів зовнішнього середовища $G \subseteq S^+$. Розширена мета вважається досягнутою в тому випадку, якщо історія взаємодії агента з зовнішнім середовищем має кінцевий префікс, стан зовнішнього середовища в якому збігається зі станами одного з ланцюжків множини G .

Одним з найбільш загальних описів мети агента є опис функції-критерію goal: $(P \times Bel(S, A)) \rightarrow \{completed, continue, failure\}$, співставляючої ланцюжку пар $(p, bel) \in P \times Bel(S, A)$ одне з наступних значень:

- completed в тому випадку, якщо мета остаточно досягнута;
- continue в тому випадку, якщо досі історія взаємодії відповідала меті, але остаточно мета не досягнута;
- failure в тому випадку, якщо мета не була досягнута і не може бути досягнута в майбутньому;

На вхід функції-критерію подається частина історії взаємодії агента з середовищем, що містить інформацію про сприйняття відповідних станів зовнішнього середовища та інформацію про уявлення агента на даний момент (ця частина необхідна для моделювання епістемологічних цілей). Результатом функції є прапор, що показує досягнута мета і чи можливо її досягнення в майбутньому.

Позначимо множину всіх можливих функцій-критеріїв для множини сприйнять P , множини станів зовнішнього середовища S і множини дій аген-

та A як $Goal(P, S, A)$. У цьому випадку бажання агента є кінцевою підмножиною $des \subseteq Goal(P, S, A)$ множини всіх можливих функцій-критеріїв.

Одним з характерних властивостей інтелектуального агента є проактивність, що передбачає здатність агента до побудови планів взаємодії із зовнішнім середовищем.

План агента можна формально розглядати як кінцевий *автомат*:

$$plan = (P, A, I_{pln}, \sigma_{pln}, i_{pln}, 0), \text{ де}$$

- P є вхідний алфавіт автомата, що співпадає з множиною можливих сприймань агентом станів зовнішнього середовища;
- A є вихідний алфавіт автомата, що співпадає з множиною дій агента;
- I_{pln} є множина внутрішніх станів автомата, що є частиною множини внутрішніх станів агента I в тому сенсі, що $I = I_{pln} \times I'$;
- $\sigma_{pln} \subseteq P \times I_{pln} \times I_{pln} \times A$ є відношення переходів, що визначає по сприйняттю p поточного стану зовнішнього середовища і поточного внутрішнього стану плану i_{pln} наступний стан для плану i_{pln} і дію, яку слід виконати агенту;
- $i_{pln, 0} \in I_{pln}$ є початковий стан автомата.

Можливим результатом плану $plan$ в початковому стані зовнішнього середовища s_0 і початковому стані $i_{0,pln} = i_{0/I_{pln}} \in I_{pln}$ за уявленнями агента $bel = i_{0/Bel(S,A)} \in Bel(S,A)$ назовемо множину ланцюжків $out_{plan,bel}(s_0, i_{0,pln}) = \{\lambda \in (S \times I_{pln} \times A)^+\}$, де для кожного ланцюжка $\lambda \in out_{plan,bel}(s_0, i_{0,pln})$ виконано, $\lambda[0]/_S = s_0$ і $\lambda[0]/_{I_{pln}} = i_{0,pln}$ і для будь-якого $j < |\lambda|$ якщо існують такі $s \in S$, $a \in A$ і $i'_{pln} \in I_{pln}$, що $(\lambda[j]/_S, a, s) \in bel$ і $(see(\lambda[j]/_S), \lambda[j]/_{I_{pln}}, i'_{pln}, a) \in \sigma_{pln}$, то $j+1 < |\lambda|$ і існує таке $a' \in A$, що

- $(\lambda[j]/_S, a', \lambda[j+1]/_S) \in bel$.
- $(see(\lambda[j]/_S), \lambda[j]/_{I_{pln}}, \lambda[j+1]/_{I_{pln}}, a') \in \sigma_{pln}$.

Зауважимо, що результат плану може відрізнятися від реальних результатів плану в тому випадку, якщо уявлення агента розходяться з реальністю.

Будемо говорити, що план $plan$ реалізує мету $goal$ за уявленнями агента $bel \in I_B$ в поточному стані середовища, що сприймається як p_0 , якщо для будь-якого ланцюжка $\lambda \in out(plan, bel, p_0)$ виконано $goal(\lambda|_{P \times IB}) \neq failure$.

Множину всіх можливих планів позначимо як 2^{Plan} . У тих випадках, коли це не буде вести до двозначності, будемо ототожнювати план з його відношенням переходів.

План агента не є статичним - при зміні бажань чи уявлень агента він може бути перебудований. Цей процес ми змоделюємо функцією оновлення плану (plan revision function): $prf: I_B \times I_D \times 2^{Plan} \times P \rightarrow 2^{Plan}$ співставляючи поточним уявленням агента $bel \in I_B$, поточним бажанням агента $des \in I_D$, поточному плану $plan \in 2^{Plan}$ і сприйняттю поточного стану зовнішнього середовища $p \in P$ новий план $plan' \in 2^{Plan}$. У більшості випадків новий план буде збігатися зі старим, проте, якщо бажання або подання агента радикально змінилися або зміни, що відбулися у зовнішньому середовищі, не були передбачені вихідним планом, може бути побудований новий план.

Крім того, з кожним планом можна асоціювати деяку множину цілей $int \subseteq Goal(P, S, A)$, які реалізуються планом за поданнями агента і які містилися в множині бажань агента des на момент побудови плану. Такі цілі ми будемо називати намірами агента.

Формальна модель мультиагентної системи.

Визначення 3.4. Мультиагентна система – система, що представляється трійкою $MAS = (S, AG, env)$, де

- S є кінцева множина станів зовнішнього середовища;
- $AG = \{ag1, \dots, agn\}$ є скінченна множина агентів, кожен з яких представлений розширеною моделлю інтелектуального агента;
- $env: S \times A_{ag1} \times \dots \times A_{agn} \rightarrow 2S$ є функція, що описує можливу реакцію зовнішнього середовища на дії всіх агентів системи. Множину всіх можливих спільних дій системи позначимо $ACS = A_{ag1} \times \dots \times A_{agn}$.

Оперативна комунікація - це вид комунікації, який використовується агентами для координації своїх дій у поточний момент. В рамках оперативної кому-

нікації агентам необхідно обмінюватися відносно невеликими обсягами інформації. Для моделювання цього виду комунікації найкраще підійде модель сигналів.

Для кожного з агентів ag_i системи визначено скінченну множину сигналів Sig_{agi} , а також функцію $Send_{agi}: P_{agi} \times AG \rightarrow Sig_{agi}$, що описує які сигнали агент agi надішле кожному з інших агентів в поточній ситуації. Зауважимо, що кожен з агентів може послати кожному іншому агенту не більш, ніж один сигнал. Для моделювання ситуації, коли агент не посилає сигнал іншому агенту, введемо виділений фіктивний сигнал $sg^o \in Sig_{agi}$. Поведінка функції $Send_{agi}$ змінюється в процесі взаємодії із зовнішнім середовищем, а послані і отримані сигнали впливають на прийняття іншими агентами рішення про дію. Отже, функцію $Send_{agi}$ зручно моделювати в контексті поточного плану агента. У цьому випадку план агента представляється як взаємодіючий кінцевий автомат

$$plan_{agi} = (P_{agi}, A_{agi}, Sig_{agl} \times \dots \times Sig_{agn}, Sig_{agi}, I_{pln}, send_{pln}, \sigma_{pln}, i_{pln}, 0), \text{ де}$$

- $P_{agi} \in$ вхідний алфавіт автомата, що співпадає з множиною можливих сприймань агентом agi станів зовнішнього середовища;
- $A_{agi} \in$ вихідний алфавіт автомата, що співпадає з множиною дій агента agi ;
- $Sig_{agl} \times \dots \times Sig_{agn} \in$ множина вхідних сигналів автомата, що збігається з декартовим добутком множин сигналів всіх агентів системи;
- $Sig_{agi} \in$ множина вихідних сигналів автомата, що збігається з множиною сигналів агента AG_I ;
- $I_{pln} \in$ множина внутрішніх станів автомата;
- $send_{pln}: P_{agi} \times I_{pln} \times AG \rightarrow Sig_{agi} \in$ функція посилки сигналів, що визначає за поточним сприйняттям зовнішнього середовища і станом автомата сигнал, який буде посланий кожному з агентів системи;
- $\sigma_{pln} \subseteq P_{agi} \times Sig_{agl} \times \dots \times Sig_{agn} \times I_{pln} \times I_{pln} \times A \in$ відношення переходів, що визначає по сприйняттю p поточного стану зовнішнього середовища, набору отриманих сигналів $(sg_1, \dots, sg_n) \in Sig_{agl} \times \dots \times Sig_{agn}$ та поточному внутрішньому стану плану i_{pln} наступний стан плану i'_{pln} і дію, яку слід виконати агенту;
- $i_{pln,0} \in I_{pln} \in$ початковий стан автомата.

Таким чином, рішення про вибір дії і зміну стану автомата відбувається в два етапи.

1. Визначення та розсилка сигналів - на цьому етапі кожен з агентів системи визначає за своїм сприйняттям поточного стану зовнішнього середовища і поточного стану свого плану, які сигнали він повинен послати іншим агентам і розсилає їх.

2. Вибір дії - на цьому етапі, ґрунтуючись на сприйнятті поточного стану зовнішнього середовища, поточний стан плану й отриманих від інших агентів сигналах, агент вибирає свою дію і наступний стан для свого плану.

Запропонована модель комунікації досить проста в реалізації і дозволяє забезпечити швидке прийняття кожним з агентів системи рішення про поточну дію. Зауважимо, що в запропонованій моделі агент може відправити сигнал сам собі, в чому, як правило, не виникає необхідності. Ця можливість збережена з метою спрощення опису.

3.3.Розробка концепції нечіткої метаідентифікації у процесі ДОК

У [193] була запропонована можливість використання мультиагентної моделі із вбудованим реляційним механізмом для перебирання на основі ЛПВ *функціонально-спеціалізованими інтелектуалізованими агентами* (ФСІА) критеріїв обслуговуваності з боку прикладних задач для вибору необхідної топології *штучної нейронної сітки* (ШНС).

Використаємо запропонований підхід, щоб на основі створеної у попередньому розділі *узагальненої концептуальної моделі СОУ* [149] та *узагальненої моделі вибору ВДП СОУ* створити строгу модель вибору, що базується на *гнучких інтелектуалізованих мультиагентних конфігураціях* (ГІМАК) *агентно-орієнтованих підсистем* (АОП) для конкретних ГВС [147].

Основна ідея запропонованого підходу полягає у тому, щоб, розглядаючи нечіткі ідентифікуючі компоненти як складні *агентно-орієнтовані підсистеми*

(АОП), використати переваги нечіткого підходу до процесу ідентифікації моделі СОУ самими АОП.

Визначення 3.5. *Метаідентифікація СОУ* – це ітераційна процедура вибору таких значень ВДП, за яких СОУ виявиться спроможною найкращим чином задовольняти умови обслуговуваної ГВС.

При цьому завдання нечіткої метаідентифікації полягає в динамічному побудуванні з існуючих *функціонально-спеціалізованих інтелектуалізованих агентів (ФСІА)* таких *гнучких інтелектуалізованих мультиагентних конфігурацій (ГІМАК)* АОП, які найкращим чином задовольняють умови обслуговуваної ГВС.

Визначення 3.6. *Функціонально-спеціалізований інтелектуалізований агент* – це ІА з функціями метаідентифікації в просторі *вирішальних динамічних показників СОУ*.

Твердження 3.4. *Алгоритм дії ФСІА* може мінятися і коректуватися по ходу виконання завдання заради досягнення мети.

Визначення 3.7. *Агентно-орієнтована підсистема* – це складна підсистема ГІМАК, в якій функціонують два або більше ФСІА, орієнтованих на розв’язання задач ідентифікації за певною ВДП СОУ і утворюючих *агентно-орієнтоване середовище*.

Реалізація вищезначеної ідеї можлива за допомогою побудування ГІМАК, особливостями якої є: використання об’єктно-орієнтованих ФСІА всіляких типів, реалізуючих складові класифікатора СОУ; високий ступінь паралелізму; децентралізована структурна і параметрична метаідентифікація в межах АОП. Для узагальнення підходу розглядається більш складний випадок нечіткої метаідентифікації вирішальних динамічних показників СОУ щодо вимог з боку ГВС. В разі чіткої взаємозалежності “вимога – ознака” реалізація процесу спрощується.

Визначення 3.8. *Гнучка інтелектуалізована мультиагентна конфігурація* – така мультиагентна конфігурація, яка: містить агенти $A^{(M)}$ з функціями *метаідентифікації*, які реалізують механізм розподіленого динамічного

виявлення “ступеня важливості” інших агентів із всілякою природою; формує різні закони ідентифікації; забезпечує паралельність роботи агентів різнорідних “шарів”; реагує на зміни стану зовнішнього середовища (вихідних умов задачі) шляхом підналаштування загального виходу у відповідності з ідентифікацією, задовольняючою поточний набір умов на вході.

Визначення 3.9. *Агенти з функціями метайдентифікації* – це ФСІА, які спроможні приймати рішення щодо: активації інших агентів ГІМАК; формуванню виведень щодо задоволення поточного набору умов на вході ГІМАК.

Твердження 3.5. Сукупність певним чином організованих ФСІА, що забезпечують визначений НВДП рівень ідентифікації СОУ, утворюють *мультіагентне середовище* відповідної АОП.

Мультіагентна структура ГІМАК АОП (рис. 3.4) формується з множини $A = \{A_1, \dots, A_n\}$ зв’язаних між собою ФСІА. На вхід АОП від зовнішніх джерел (в тому числі, і від користувача) надходить множина $U^{(x)} = \{U(X_1), \dots, U(X_k)\}$ значень вхідних змінних $X = \{X_1, \dots, X_k\}$, які відображують умови ВО ГВС.

Фазі (F)-перетворювач (“чіткий \rightarrow нечіткий”) трансформує U^x у множину факторів $F^{(x)} = \{F_1^{(x)}, \dots, F_l^{(x)}\}$ (є нечіткими множинами, заданими на значеннях вхідних змінних) з відповідними факторами достовірності (ступенями приналежності за експертними оцінками) $C^{(x)} = \{C_1^{(x)}, \dots, C_l^{(x)}\}$.

Дефазі (D)-перетворювач (“нечіткий \rightarrow чіткий”) трансформує множину своїх вхідних факторів $F^{(y)} = \{F_1^{(y)}, \dots, F_p^{(y)}\}$ і відповідних факторів достовірності $C^{(y)} = \{C_1^{(y)}, \dots, C_p^{(y)}\}$ у множину $W^{(x)} = \{W(Y_1), \dots, W(Y_k)\}$ значень умов сумісності $Y = \{Y_1, \dots, Y_m\}$ пропонованої ГІМАК АОП моделі СОУ із заданим на вході набором властивостей ГВС.

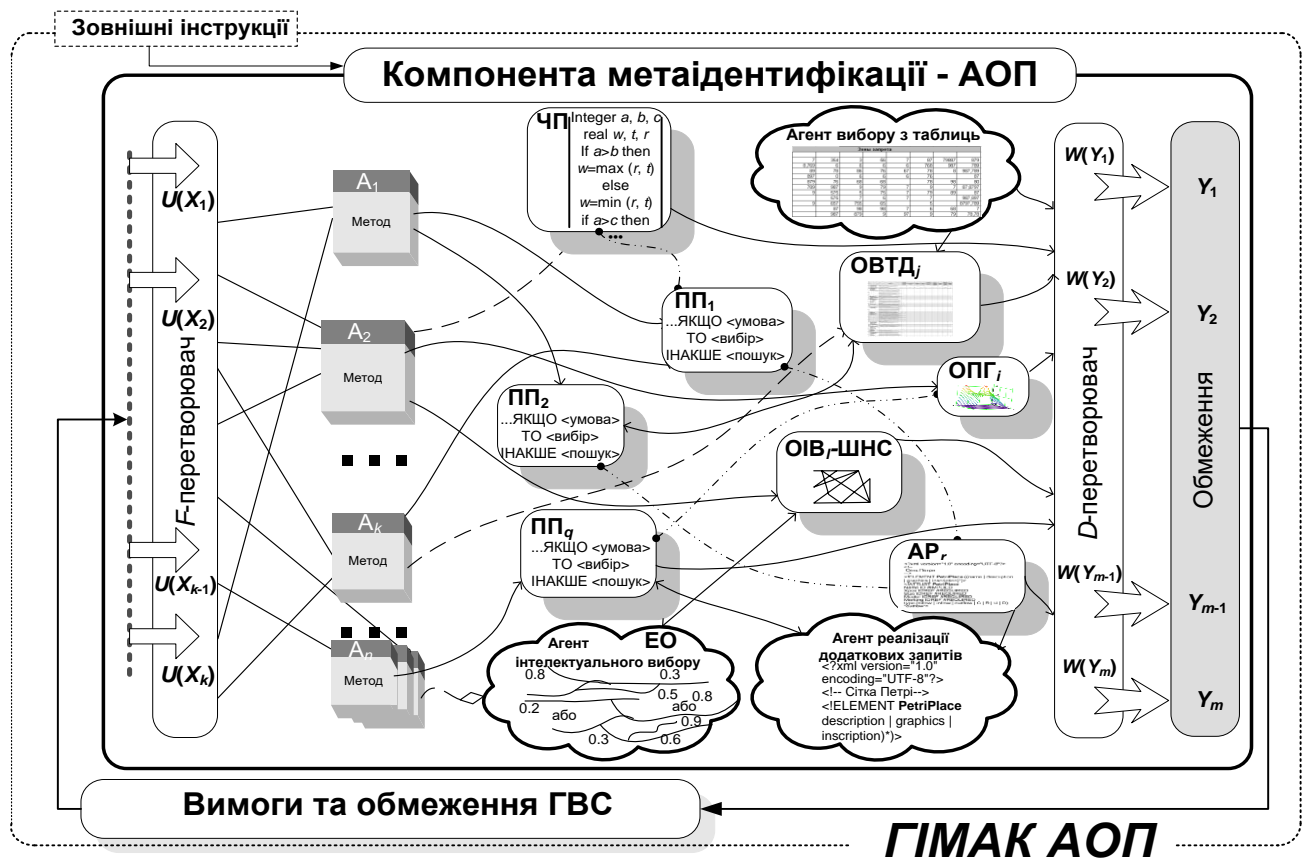


Рисунок 3.4. Структура ГІМАК АОП

3.4. Аналіз задач компонент ГІМАК АОП та їх взаємодія в процесі функціонування

Функціонування ГІМАК АОП формується із загального вкладу її компонент – ФСІА (див. рис. 3.4): продукційних правил (ПП), експертних оцінок (ЕО), об'єктів інтелектуального вибору ОІВ – штучних нейросіток (ШНС), чисельних процедур (ЧП), об'єктів вибору з табличних даних (ОВТД), об'єктів побудування графіків (ОПГ), реалізації (АР) – якщо експерт або відповідний агент робить висновок щодо необхідності введення нових правил, обмежень тощо. Базуючись на вхідних даних і меті ідентифікації в залежності від етапу послідовності вибору значень показників СОУ, ГІМАК АОП реалізує на виході підхід, стратегію, політику часу, метод і як наслідок – модель СОУ, що задовольняє умовам і обмеженням ГВС, точності апроксимації, складності реалізації, розмірності та швидкодії, рівню кваліфікації користувача.

Прийнявши за H, G відповідно набори (імена) змінних на вході і виході, а за Z — набір з усіх змінних (вхідних і на виході включно), приймаючих участь у міжагентному інформаційному обміні $Z \supset H, Z \supset G$, а також враховуючи, що структура ГІМАК АОП формується з множини $A = \{A_1, \dots, A_n\}$ взаємозв'язаних ФСІА, тоді, використавши множину компонент зі складових $S_i \subset S \cup A$ (вхідних відносно цього агента A_i) і дій $M_i \subset M \cup A$ (на виході відносно A_i), формальний опис i -го агента A_i можна подати у вигляді:

$$A_i = (T_i, D_i, U_i, W_i, S_i, M_i, B_i, E_i), \quad (3.7)$$

де T_i — тип агента (ЕС, НС, ЧП тощо); D_i — тип умови для активації (наприклад: D_1 — зміною вхідних даних агента; D_2 — естафетною умовою, тобто завершенням поточного прогону визначених попередніх агентів; D_3 — незалежною активацією, в тому числі відповідно до часового закону; D_4 — у відповідь на запит від іншого агента, і так далі); U_i, W_i — набори вхідних і вихідних змінних агента A_i відповідно; B_i, E_i — набори розташованих вище відносно A_i (чий вказівки він виконує) і підлеглих (відносно A_i) агентів відповідно. При цьому:

$$\begin{aligned} \forall A_i \in A: & (U_i \cap W_i = \emptyset) \wedge (S_i \neq \emptyset) \wedge (A_i \neq \emptyset) \wedge (U_i \neq \emptyset, U_i \subset H \cup (\cup W_j)) \wedge \\ & \wedge (W_i \neq \emptyset, W_i \subset G \cup (\cup U_j)), \end{aligned} \quad (3.8)$$

а реалізація $|B_i| > 0$ вказівок вище розташованого агента є припустимою. Для відображення факту можливості активізації A_i рішенням інших ФСІА вважаємо, що значення спеціальної “перемикаючої” змінної $\bar{\theta} \in U_i \setminus (H \cup G)$ визначає стан (“активний”, “очікування”) агента A_i .

Агенти мультиагентного середовища ГІМАК АОП можуть характеризуватися: використовуваною моделлю — N_1 (тобто НС, ПП, ЧП тощо); типом подання — N_2 (наприклад, числовий, символічний або більш детально: фреймовий, семантичний и т. д. Ясно, що N_1 и N_2 тісно зв'язані); особливостями виконання — N_3 (як окремі фізичні (мікросхеми, комп'ютери) або віртуальні об'єкти (в межах цієї ж програми), і так далі).

Тип N_2 передбачає необхідність проміжних перетворень даних, інтеграцію множин чисельних значень і формування символічних умов для логічного виведення, а також навпаки — перетворення фактів (виведень) у чисельні значення (у випадку нечітких уявлень це відповідає перетворенням “чіткий \rightarrow нечіткий” і “нечіткий \rightarrow чіткий” відповідно). Ці перетворення можуть бути або “вбудованими” у загальне функціонування ФСІА, або виконуються спеціальними процедурами трансформацій. Сам ФСІА, у свою чергу, може також мати мультиагентну структуру. Так, для реалізації перетворень “нечіткий \rightarrow чіткий”, наприклад, за наявності невизначеності при ідентифікації етапів вибору значень показників СОУ, у процесі здійснення ДОК, такий ФСІА може виконуватися у вигляді фазі-контролера [128, 155, 195]. При цьому кожний такий агент A_i формується з множини специфікацій SP якісних правил $SP_i = \{R_{i1}, R_{i2}, \dots, R_{ik}\}$, наприклад, у формі: “ЯКЩО вхідній вимозі відповідає множина X значень змінних, ТО відгуковій реакції вектора ідентифікації у фазовому просторі відповідає множина Y ”. Для математичного опрацювання таких правил необхідні операції взаємодії між окремими нечіткими множинами, які належать до частини “ТО”. Тоді продукування рішень для фазі-контролерів характеризується взаємодією задаваних експертом вхідних і вихідних функцій належності, причому, операції “І” и “АБО” використовуються як зв’язка в правилах у множинах, елементи яких належать до різних основних множин.

3.5. Синтез узагальненої моделі гнучкої інтелектуалізованої мультиагентної системи ДОК

Наведена на рис. 3.5 узагальнена модель *гнучкої інтелектуалізованої мультиагентної системи* (ГІМАС) об’єднує *необхідну* для формування алгоритму вибору значень СДП СОУ і *достатню* для задоволення вимог з боку обслуговуваної ГВС сукупність цільових компонент метайдентифікації: АОП_{ВН}, АОП_П, АОП_С, АОП_{ПЧ}, АОП_М — видів невизначеності, підходів до оперативного

планування, стратегії оперативного перепланування, політики вибору часу перепланування, метода оперативної диспетчеризації (згідно із концептуальною моделлю СОУ).

Визначення 3.10. Гнучка інтелектуалізована мультиагентна система – це сукупність ГІМАК АОП, в якій реалізується логічна послідовність налаштування ВДП СОУ з такою послідовністю їх перебирання в просторі НВДП, яка, будучи виконувана користувачем і/або внутрішнім ініціюючим джерелом, відтворює принципи агентно-орієнтованого підходу та автономно дозволяє виокремити модель/моделі СОУ, здатні задовольнити критерії обслуговування властивостей ГВС.

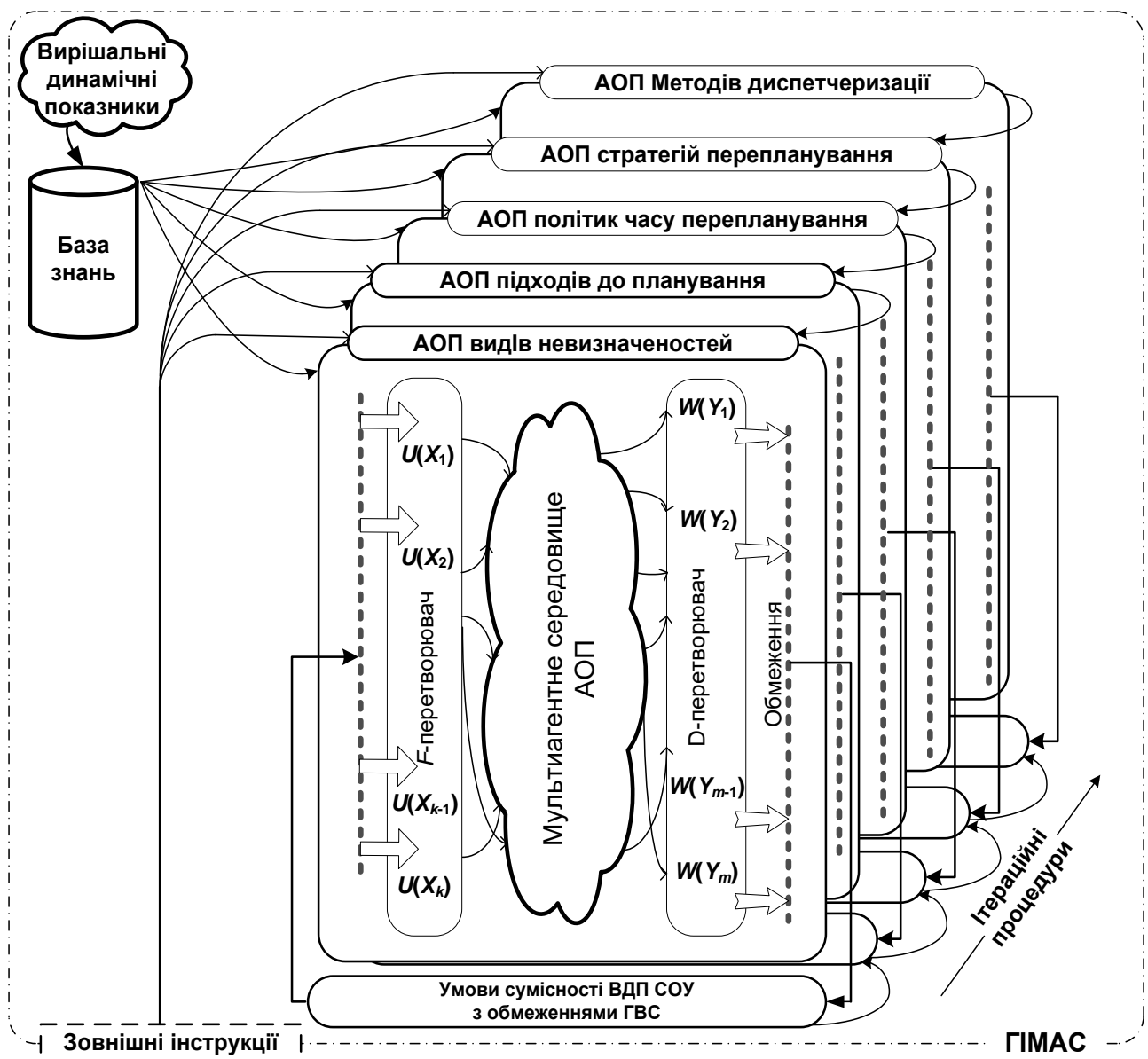


Рисунок 3.5. Узагальнена модель ГІМАС налаштування ВДП СОУ

Заключна процедура ДОК у ГІМАС зводиться до реляційного перебирання ФСІА умов виконання критеріїв обслуговуваності поточним вектором можливостей конкретної СОУ вимог з боку ГВС.

Саме перевірка при реалізації покрокового алгоритму ДОК виконання умов задоволення певною компонентою АОП вимог/обмежень з боку ГВС найчастіше виявляється причиною появи лінгвістичних невизначеностей, опрацювання яких і потребує використання методів і засобів нейро-фазі-технологій із залученням для розв'язання проблеми *процедур фазифікації та дефазифікації* [192].

Ітераційні процедури дозволяють більш “тонко” відфільтровувати в процесі ідентифікації такі остаточні рішення, які у визначеній обмеженнями задачі мірі задовольняють критерій узгодженості за даною властивістю синтезованої СОУ.

Необхідні компоненти для підтримки процесів ідентифікації на кожному з кроків алгоритму вибору значень показників СОУ надходять з відповідних баз знань (БЗ), а після узгодження з умовами задачі нові реалізації поповнюють ці БЗ, розширюючи таким чином коло ГВС, для яких є вже готові розв'язки.

Висновки

1. Проведений аналіз особливостей задачі автоматизованого ДОК вказує на її багатоваріантність, складність та слабку формалізованість зв'язків її компонентів, наявність елементів нечіткості, що разом із відсутністю існуючих ефективних моделей дозволяє зробити висновок про необхідність використання сучасних інтелектуальних технологій. У даному розділі зокрема було розглянуто особливості застосування, наступних методів: експертні системи, нечітке логічне виведення, інтелектуалізовані агенти та мультиагентні системи.

2. Було розроблено підхід до автоматизованого динамічного оперативного керування, який дозволяє шляхом багатоітераційного перебирання значень визначальних динамічних показників системи оперативного управління, із використанням побудованої концептуальної моделі, обрати такі значення

показників, які здатні адекватно задовольняти властивостям та обмеженням певної ГВС. Запропонований підхід до автоматизації відрізняється створенням *строкої узагальненої моделі вибору СОУ*, що базується на гнучких інтелектуалізованих мультиагентних конфігураціях агентно-орієнтованих підсистем для кожної властивості з НВДП.

4. РОЗРОБКА СППР НА ОСНОВІ МУЛЬТИАГЕНТНОГО СЕРЕДОВИЩА ДОК

4.1. Проектування та розробка СППР на основі ГІМАС

З метою використання розробленого у попередньому розділі підходу до автоматизованого динамічного оперативного керування ГВС необхідно здійснити його практичну реалізацію у вигляді програмно-інструментального середовища для використання у якості програмного забезпечення модуля корекції визначальних динамічних показників СОУ, що входить до системи динамічного оперативного керування ГВС. Такі системи автоматизації прийняття рішень та управлінської діяльності, зазвичай, організаційно представляються у вигляді систем підтримки прийняття рішень.

Визначення 4.1. *СППР для автоматизації процесу ДОК* – це автоматизована інтерактивна комп'ютерна система, що поєднує методичне, алгоритмічне та програмне забезпечення у єдине програмно-інформаційне середовище та функціонує з метою підвищення якості та зменшення трудомісткості рішень, що приймаються з її використанням [137, 162].

Таким чином, реалізація автоматизованого динамічного оперативного керування на основі запропонованої узагальненої моделі ГІМАС передбачає формування СППР як інформаційно-програмного комплексу інтерактивних функціональних підсистем у вигляді інтелектуалізованих агентів, які діючи автономно забезпечують комплексне виконання всіх етапів вибору значень показників СОУ. Для цього необхідно здійснити програмну модель відповідних інтелектуалізованих агентів та надати можливість формувати зв'язки між ними з необхідною структурою та типом [180].

З урахуванням значних можливостей та перспектив використання мультиагентних систем та обмеженості наявних засобів для їх дослідження, які на сьогодні представлені у спеціалізованих програмних пакетах Matlab, Simulink, Deductor [150, 163], що лише частково реалізують необхідні функції та обмежують практичне використання для реалізації СППР, було прийнято рішення про створення повноцінного програмно-інструментального засобу, призначеного для проектування та дослідження складних моделей на основі мультиагентних систем з використанням нечіткої логіки.

З метою підвищення універсальності та забезпечення можливості повторного використання СППР було вирішено розробити у вигляді програмного забезпечення (ПЗ), що на основі узагальненої моделі ГІМАС практично реалізує підхід поетапного синтезу структури та значень динамічних показників не тільки СОУ, а і будь-якої системи, для якої здійснені/можуть бути здійснені наступні дії:

- визначення набору ВДП;
- побудова логічної послідовності налаштування ВДП;
- побудова концептуальної моделі та узагальненої моделі вибору ВДП.

Розроблювана СППР має забезпечувати виконання ряду задач щодо синтезу структури та розрахунку значень показників системи:

- автоматизація процесу синтезу структури системи за заданими складовими та обмеженнями;
- інтелектуалізований вибір значень показників системи, що реалізується в рамках ГІМАС шляхом реляційного перебирання ІА умов виконання критеріїв обслуговуваності поточним вектором можливостей конкретної системи наявних вимог та обмежень.
- використання експертних знань, в тому числі у нечіткій формі із забезпеченням механізмів фазифікації, дефазифікації та нечіткого виведення;
- можливість підключення додаткових модулів для розширення функціональності системи. Наприклад, модуля введення, обробки та зберігання знань експертів.
- забезпечення зручного та наочного відображення інформації кінцевому користувачу у вигляді графічного інтерфейсу.

При розробці системи мають застосовуватись наступні стандартні етапи життєвого циклу створення інформаційних систем:

- аналіз вимог;
- проектування;
- розробка;
- тестування.

Для забезпечення виконання поставлених задач була розроблена СППР зі структурою, що визначена на рис. 4.1.

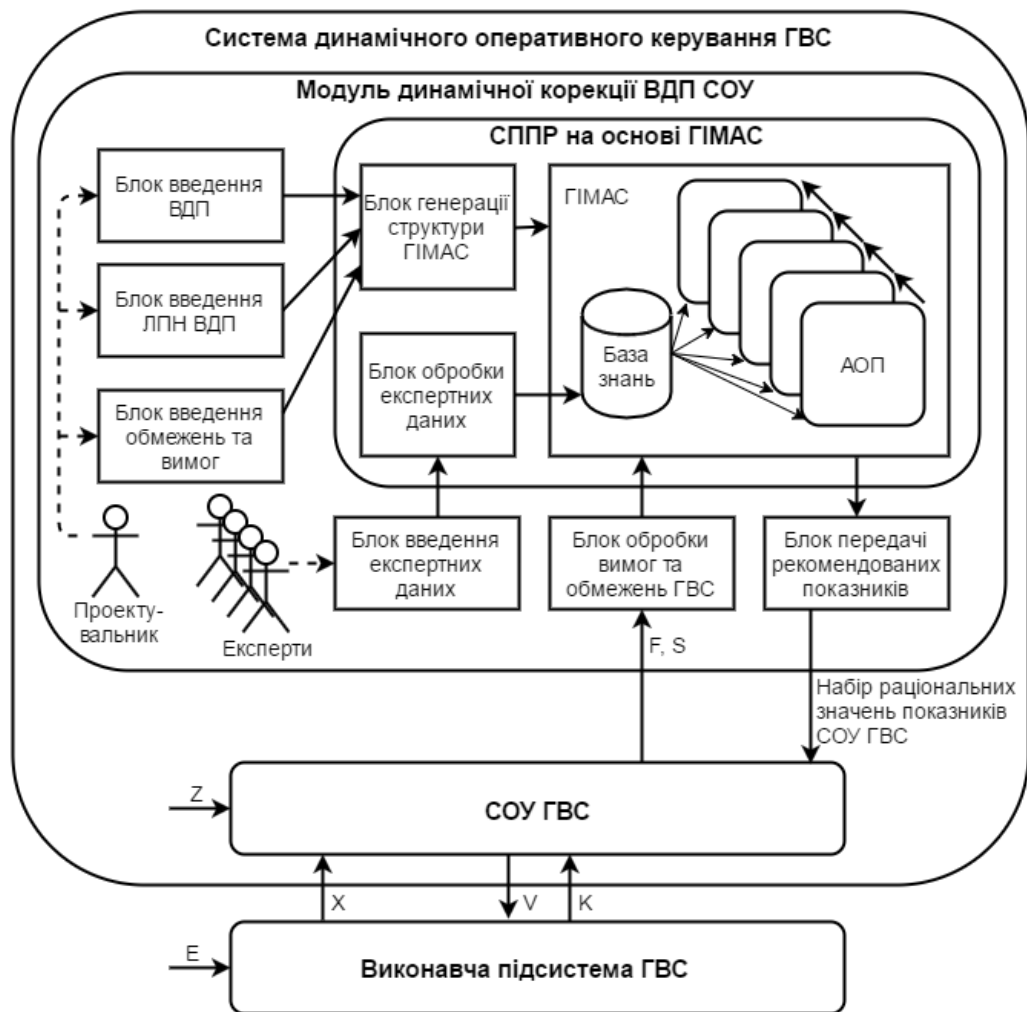


Рисунок 4.1. Структурна схема СППР на основі ГІМАС

4.2. Розробка алгоритмів синтезу структури ГІМАС та пошуку значень ВДП

Розроблено алгоритм налаштування системи (синтезу структури ГІМАС):

1. Додавання користувачем вирішальних динамічних показників синтезованої системи та наборів їх значень, що утворюють класифікатор.
2. Задавання користувачем послідовності налаштування класифікаційних ознак згідно із ЛПН ВДП.
3. Додавання користувачем додаткових обмежень, що можуть накладатися на будь-якому етапі відповідно до ЛПН ВДП.
4. Введення користувачем отриманих від експертів даних щодо кількісного визначення вагомості реляційних зв'язків між визначальними класифікаційними ознаками та обмеженнями, а також їх обробка методами експертного рейтингового оцінювання

альтернативних варіантів.

5. Автоматична генерація структури ГІМАС та ініціалізація АОП з усіма необхідними для функціонування ФСІА для кожної класифікаційної ознаки та, за наявності, кожного обмеження.
6. Зберігання структури та налаштувань системи для повторного використання.

Розроблено алгоритм використання системи для знаходження значень вирішальних динамічних показників об'єкта керування:

1. Введення користувачем або зчитування з заданої інформаційної підсистеми значень показників та обмежень, що є вхідними згідно з ЛПН.
2. Реалізація ітераційної процедури ДОК, для вибору значень ВДП, що найкращим чином задовольняють вхідним значенням та обмеженням.
3. Виведення результату у зручній для користувача графічній формі.

Процеси, що мають бути реалізовані у СППР було проаналізовано та подано у вигляді графічної нотації (Додаток Б1).

4.3. Розробка програмного та інструментального забезпечення СППР

Для розробки програмного продукту було обрано мову програмування С#, відповідно, платформу .NET, інтегроване середовище розробки Microsoft Visual Studio 2015. Вибір платформи .NET зумовлений рядом переваг:

- вся платформа .NET ґрунтується на єдиній об'єктно-орієнтованій моделі;
- в склад платформи .NET входить «збиральник сміття», який звільняє ресурси, що захищає програми від втрат пам'яті і від необхідності звільняти ресурси вручну;
- будь-яка програма, розроблена з допомогою .NET є автономною, в тому сенсі, що не залежить від інших програм та від ОС;
- встановлення програми може бути проведене звичайним копіюванням файлів;
- використання безпечних типів даних, що підвищує надійність програми та сумісність;
- програма взаємодіє з єдиною моделлю обробки помилок;
- програми, написані на різних мовах можуть легко взаємодіяти;

- абсолютно всі помилки оброблюються механізмом виключних ситуацій, що дозволяє запобігти неоднозначностям;
- зручний спосіб повторного використання коду;
- можливість використання C# для створення графічного інтерфейсу з використанням технології WPF.
- вбудована підтримка автоматичної генерації XML-документів.

Проте є і деякі недоліки, які не впливають на досягнення поставлених вимог та остаточного результату:

- швидкість виконання коду менша, порівняно з мовою програмування C++;
- необхідна наявність бібліотеки .Net Framework.

Мова програмування C# найбільше відповідає C# платформі, у порівнянні з іншими мовами програмування, які входять до складу Visual Studio 2015 (Visual J#, Visual C++, Visual Basic), саме тому її використано для розробки програмного продукту.

Також слід відмітити, що програмна реалізація створювалася із використанням патерну *MVVM (Model – View – Viewmodel)*, дозволяє відокремити складову візуалізації даних від розрахункової. За допомогою прив'язки даних застосовується вільний взаємозв'язок, який синхронізує користувацький інтерфейс і пов'язані дані, а також відправляє командам вхідні дані, які ввів користувач.

Одним з найважливіших моментів, який робить MVVM дуже зручним шаблоном є інфраструктура прив'язки даних. За рахунок механізму прив'язки властивостей подання до моделі подання виходить слабке зв'язування цих компонентів, що повністю звільняє розробника від необхідності писати в моделі подання код, який безпосередньо відповідає за оновлення подання. Дана система також підтримує перевірку допустимості введення, яка перевіряє наповнення введених даних.

Шаблон MVVM складається з трьох частин:

Model – модель відповідає даним, які бажано відобразити на екрані і маніпулювати ними;

View – подання, компонент презентаційного рівня і UI;

ViewModel – модель подання, яка використовує *Model* і відображає подання через зв'язування з даними, а також реагує на дії користувача.

Однією з переваг поділу коду є те, що код стає більш легким для розуміння. Це відбувається завдяки тому, що код для певних компонентів може залишатися окремим від іншого коду, що дозволяє отримувати про нього більше відомостей, а також повторно використовувати в інших проектах.

Ще однією важливою перевагою поділу користувацького інтерфейсу є те, що це спрощує автоматичне модульне тестування коду, не пов'язаного з інтерфейсом, порівняно з перевіркою без поділу. Microsoft Visual Studio підтримує проекти модульних тестів, які можна використовувати для перевірки конструкції коду під час розробки, а також при виявленні та діагностиці помилок [169].

У цілому надійно пов'язана архітектура ускладнює внесення змін та діагностику помилок. Основною перевагою розділеної архітектури є те, що вона ізолює вплив змін. Це дозволяє менш ризиковано експериментувати з новими можливостями, виправляти помилки і впроваджувати внесок співавторів [170].

Отже, патерн проектування MVVM, в тому числі технологія WPF, що його реалізує, завдяки своїй розподіленій архітектурі, може бути застосований для проектування мультиагентного середовища.

4.3.1. *Проектування мультиагентного середовища СППР*

Відповідно до патерну MVVM, що було використано при проектуванні, основна логіка роботи додатку міститься у моделях. Отже, розглянемо структуру класів моделей, що була спроектована для реалізації мультиагентної системи, поки що без приділення уваги до класів представлення інформації.

На рис. 4.2 зображено структуру модулів мультиагентного середовища (FIMAE). До складу середовища входить середовище імен ГІМАС (FIMAS) та модуль допоміжних агентів (Helpers).

До середовища імен ГІМАС (FIMAS) входять дві класи: ГІМАС (FIMAS) та АОП (AOS), а також наступні модулі: Визначальні ознаки (DefiningFeatures), Обмеження (Limits), Експертна система (ExpertSystem), Нечітка система (FuzzySystem), База знань (KnowledgeBase).

До модуля допоміжних агентів (Helpers) входить агент серіалізації (SerializeAgent). Даний модуль може бути розширений будь-якими іншими агентами, що необхідні для налаштування специфічного режиму функціонування ГІМАС.

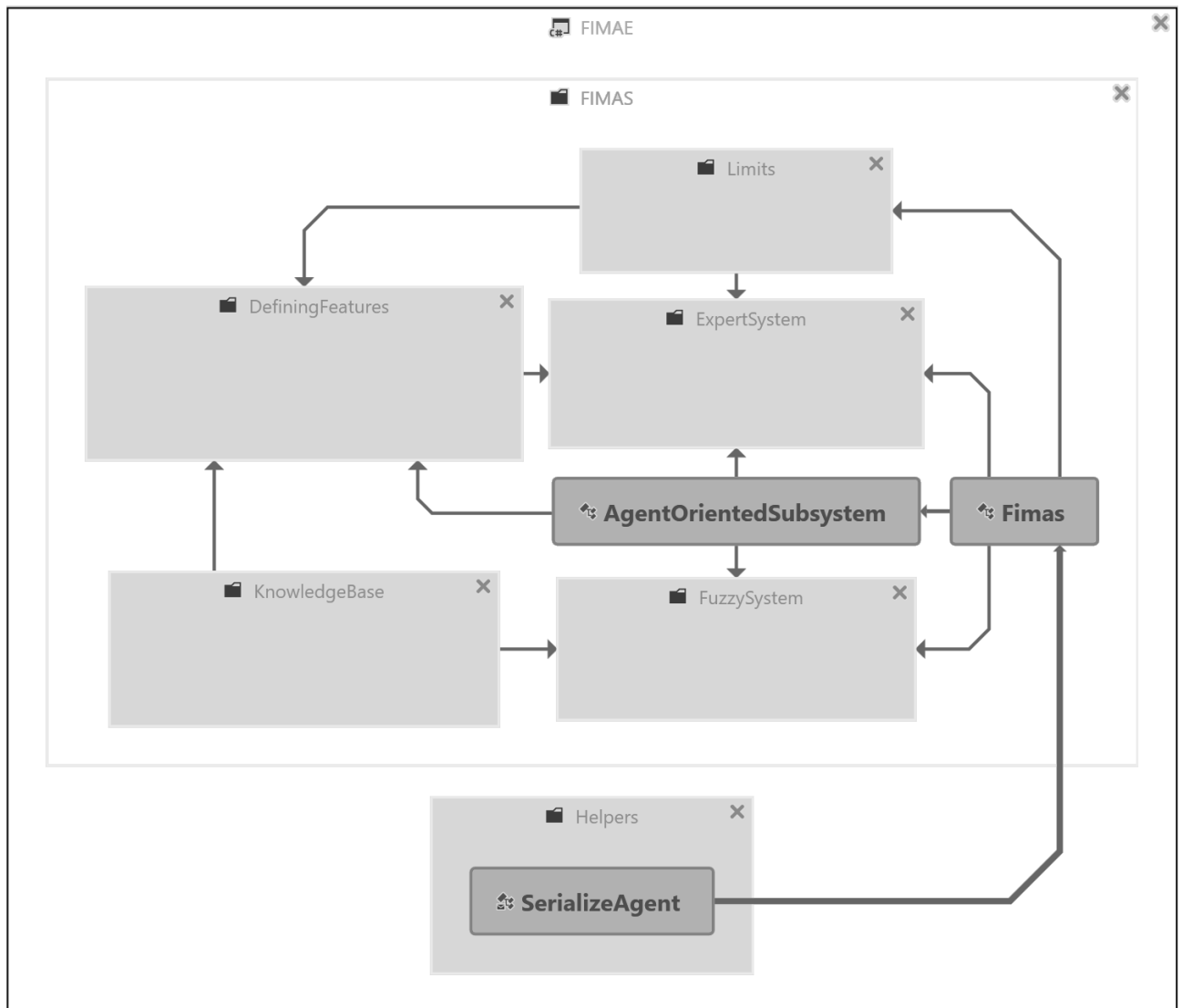


Рисунок 4.2. Структура модулів СППР

Детальна структура модулів СППР, що містить усі класи, які входять до складу модулів та зв'язки між ними зображена у додатку В1. Розглянемо детальніше роботу даних класів.

Клас **"FIMAS"** є узагальнюючим класом для структури ГІМАС, він містить у собі:

- Список усіх АОП, що відповідають усім класифікаційним ознакам. При додаванні нового ВДП користувачем, АОП створюється автоматично та додається до вказаного списку.
- Список усіх обмежень, що необхідно враховувати при інтелектуалізованому виборі значень показників системи.
- Агент експертної системи, що виконує розрахунки при

інтелектуалізованому виборі значень показників системи на основі експертних даних.

- Агент нечіткої системи, що виконує необхідні перетворення (фазифікацію та дефазифікацію) даних для здійснення розрахунків.

Даний клас запускає процедуру ітеративного розрахунку кожною АОП значень показників системи на основі експертних знань.

Клас *"AgentOrientedSubsystem"* представляє агентно-орієнтовану підсистему та містить у своєму складі:

- Поточну класифікаційну ознаку, яку реалізує АОП.
- Посилання на агента експертної системи.
- Посилання на агента нечіткої системи.

Клас здійснює розрахунок значення відповідної класифікаційної ознаки на певній ітерації та передає до *"FIMAS"*.

Клас *"DefiningFeaturesAgent"* призначений для створення та роботи з екземплярами класу *"DefiningFeature"*, що містять інформацію про конкретну класифікаційну ознаку, а саме її ім'я та набір можливих значень, що мають тип іншого класу *"DefiningFeatureValue"*.

Клас *"LimitsAgent"* призначений для створення та роботи з екземплярами класу *"Limit"*, що містять інформацію щодо певного обмеження, котре накладається на роботу системи, а саме його ім'я та набір можливих значень.

Клас *"KnowledgeBaseAgent"* реалізує агент по роботі з базою знань, що може створювати нові змінні типу *"KnowledgeBaseVariable"*, ініціалізувати та задавати список їх термів *"KnowledgeBaseTerm"*. Також агент дає можливість формувати нові правила типу *"KnowledgeBaseRule"* на основі логічних виразів *"KnowledgeBaseExpression"*.

Клас *"FuzzySystemAgent"* описує агент, що реалізує операції з нечіткими даними, зокрема здійснює фазифікацію та дефазифікацію даних у процесі інтелектуалізованого вибору значень показників системи. Для здійснення необхідних операцій, агент використовує функції та структури даних зовнішнього модуля *FuzzySystem*, що у структурі додатку реалізований у вигляді окремої dll-бібліотеки, що була також розроблена. Це дає змогу повторно використовувати дану бібліотеку в інших дослідженнях або, при необхідності, замінити її на більш нову версію з, імовірно, вищою продуктивністю роботи чи на бібліотеку сторонньої розробки.

Клас *"ExpertSystemAgent"* описує агент, що реалізує логіку представлення експертних знань та роботи з ними. Зокрема інтерфейс *"IExpertVariable"* описує структуру змінної, що відображає експертні дані та містить назву та набір значень. Так, наприклад, даний інтерфейс у системі реалізують класи *"DefiningFeature"* та *"Limit"*. Пара *"IExpertVariable"* та поточного значення змінної описується класом *"ExpertExpression"*.

Клас *"ExpertTable"* описує структуру даних, що відображає кількісне визначення вагомості реляційних зв'язків між визначальними класифікаційними ознаками і реалізується експертним рейтинговим оцінюванням альтернативних варіантів.

4.3.2. Інформаційне узгодження складових СППР

Після введення вхідних даних у вигляді ВДП та обмежень, відбувається автоматизований синтез структури ГІМАС з усіма необхідними складовими. Ця структура може бути збережена для повторного завантаження та використання у вигляді XML-документа.

Розглянемо приклад збереженої структури системи, що містить 3 класифікаційні ознаки та 2 обмеження. XML-документ матиме вигляд:

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<Fimas xmlns:xsd="http://www.w3.org/2001/XMLSchema"
xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance">
  <AosList>
    <AgentOrientedSubsystem>
      <CurrentFeature>
        <Name>Ознака 1</Name>
        <Values>
          <string>Значення 11</string>
          ...
        </Values>
      </CurrentFeature>
    </AgentOrientedSubsystem>
    ...
  </AosList>
  <LimitsList>
    <Limit>
      <Name>Обмеження 1 (Limit)</Name>
      <Values>
        <string>Значення 11</string>
        ...
      </Values>
      <DependedFeature>
```

```

        <Name>Ознака 2</Name>
        <Values>
            <string>Значення 21</string>
            ...
        </Values>
    </DependedFeature>
</Limit>
    ...
</LimitsList>
<ExpertSystemAgent>
    <ExpertSystemTables>
        <ExpertSystemTable>
            <InputVar xsi:type="DefiningFeature">
                <Name>Ознака 1</Name>
                <Values>
                    <string>Значення 11</string>
                    ...
                </Values>
            </InputVar>
            <OutputVar xsi:type="DefiningFeature">
                <Name>Ознака 2</Name>
                <Values>
                    <string>Значення 21</string>
                    ...
                </Values>
            </OutputVar>
            <ValuesTable>
                <ArrayOfDouble>
                    <double>0</double>
                    ...
                </ArrayOfDouble>
                ...
            </ValuesTable>
        </ExpertSystemTable>
        ...
    </ExpertSystemTables>
</ExpertSystemAgent>
</Fimas>

```

4.3.3. *Розробка інтерфейсу користувача СППР*

Графічний інтерфейс користувача СППР побудовано з використанням технології **Windows Presentation Foundation (WPF)**. *WPF* – графічна (презентаційна) підсистема в складі .NET.

Однією з найбільших значних переваг WPF став спосіб чіткого відділення зовнішнього вигляду і поведінки додатку Windows від програмної логіки, що управляє ним. Безпосередньо для створення розмітки графічного інтерфейсу

використовується мова *XAML* (*Extensible Application Markup Language*). Елементи управління WPF можуть бути модифіковані стилями і шаблонами, що дозволяє будувати зовнішній вигляд програми з мінімальними зусиллями. Ця розмітка приєднується до керованого коду для забезпечення деталей функціональності програми.

Головне вікно програми (рис. 4.4) поділяється на 3 основні частини:

- а* – панель керування зліва;
- б* – основна інформаційна панель праворуч зверху;
- в* – панель відображення експертних таблиць.

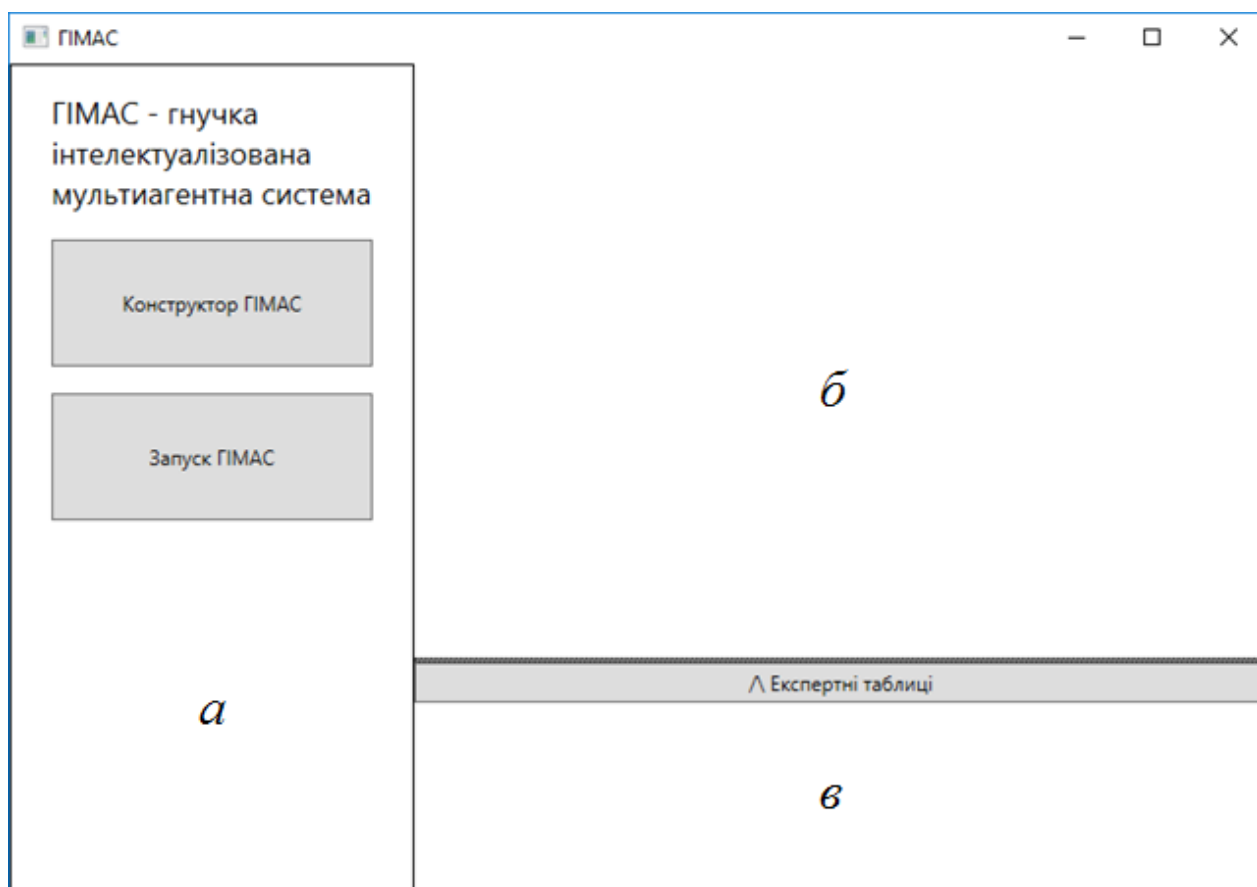


Рисунок 4.3. Головне вікно СППР "ГІМАС"

Можна виділити два основних режими функціонування СППР: налаштування та функціонування. Цим режимам відповідають кнопки на лівій панелі керування:

- Конструктор ГІМАС;
- Запуск ГІМАС.

Режим налаштування (конструктора) ГІМАС.

Кнопка "Конструктор ГІМАС" переводить СППР у режим налаштування

ГІМАС. У цьому режимі змінюється зовнішній вигляд панелі керування (рис. 4.5). Відповідні елементи керування, що з'явилися у даному режимі дозволяють виконати наступні дії:

- "*Відкрити*" – завантажити з диску збережені у наведеному вище форматі XML-документу структуру та дані ГІМАС;
- "*Зберегти*" – зберегти структуру та дані ГІМАС на диск;
- "*Додати ознаку*" – відкриває панель додавання визначальної ознаки;
- "*Додати обмеження*" – відкриває панель додавання обмеження.

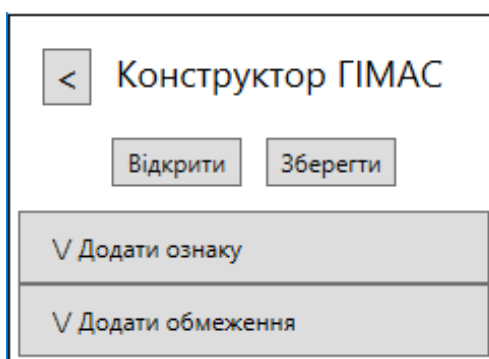


Рисунок 4.4. Панель керування СППР у режимі конструктора

Розглянемо **панель додавання ознаки** (рис. 4.6). На даній панелі розташовані елементи керування, що дозволяють ввести всі необхідні дані про визначальну ознаку та додати її до ГІМАС.

У поле "*Назва*" вводиться назва ознаки.

Елементи до поля "*Список значень*" додаються шляхом введення значення до поля вводу під списком та натискання кнопки "+".

При натисканні кнопки "*Додати*", ознака додається до системи та автоматично створюються всі відповідні об'єкти ГІМАС, в тому числі АОП з відповідними агентами та таблиці експертних даних щодо вагомості реляційних зв'язків між поточною та іншими визначальними класифікаційними ознаками.

Обмеження дій користувача:

- кнопка "+" є недоступною, доки не введено значення у текстове поле зліва від неї;
- кнопка "*Додати*" є недоступною, доки не введена назва ознаки та не додано до списку значень хоча б одне значення.

Рисунок 4.5. Панель додавання визначальної ознаки

Розглянемо **панель додавання обмеження** (рис. 4.7). На даній панелі розташовані елементи керування, що дозволяють ввести всі необхідні дані обмеження та додати його до ГІМАС.

У поле *"Назва"* вводиться назва обмеження.

Елементи до поля *"Список значень"* додаються шляхом введення значення до поля вводу під списком та натискання кнопки "+".

При натисканні кнопки *"Додати"*, обмеження додається до системи та автоматично створюються всі відповідні об'єкти ГІМАС, у тому числі таблиці експертних даних щодо вагомості реляційних зв'язків між обмеженням та обмежуваною класифікаційною ознакою.

Обмеження дій користувача:

- кнопка "+" є недоступною, доки не введено значення у текстове поле зліва від неї;
- кнопка *"Додати"* є недоступною, доки не введена назва обмеження, не додано хоча б одне значення та не вибрана хоча б одна обмежувана ознака.

Рисунок 4.6. Панель додавання обмеження

Розглянемо *основну інформаційну панель* СППР ГІМАС на прикладі системи, до якої додано 3 класифікаційні ознаки (рис. 4.8). Інформація про ГІМАС на даній панелі представлена у вигляді повного функціонального орграфу процесу вибору значень визначальних класифікаційних ознак.

Граф містить окремий блок для кожної АОП. У середині кожного блоку містяться записи зі значеннями відповідної класифікаційної ознаки. Ребра графу відображають можливі зв'язки між значеннями класифікаційних ознак.

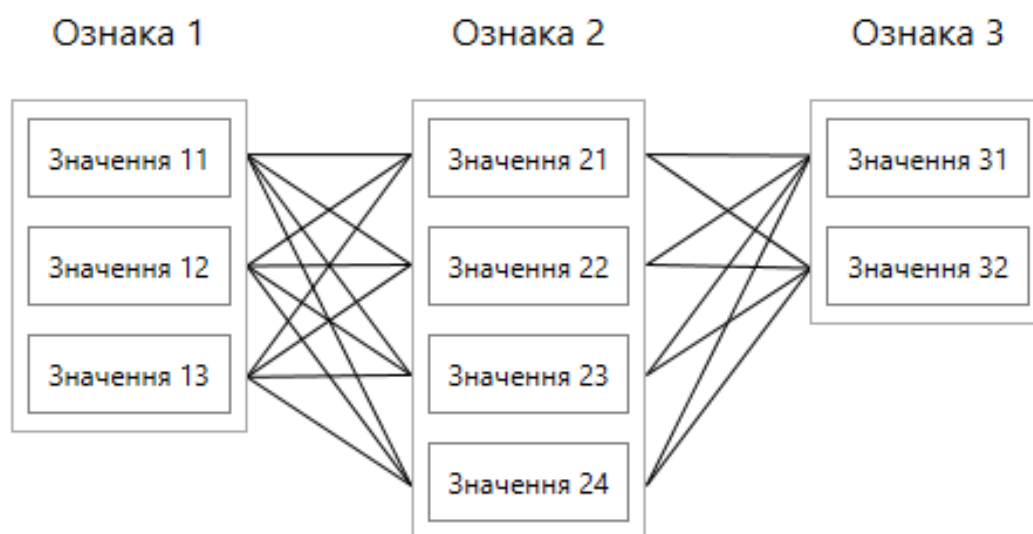


Рисунок 4.7. Основна інформаційна панель

Розглянемо *панель експертних таблиць* СППР ГІМАС на прикладі системи, до якої додано 3 класифікаційні ознаки та 2 обмеження (рис. 4.9).

V Експертні таблиці					
Обмеження 1 (Limit) - Ознака 2				Обмеження 2 (Limit) - Ознака 3	
Ознака 1 - Ознака 2				Ознака 2 - Ознака 3	
	0	1	2	3	
0	0	0	0	0	
1	0	0	0	0	
2	0	0	0	0	

Рисунок 4.8. Панель експертних таблиць

При додаванні класифікаційних ознак та обмежень СППР автоматично генерує таблиці, що мають містити кількісне визначення вагомості реляційних зв'язків між визначальними класифікаційними ознаками та обмеженнями.

Кількісне визначення даних зв'язків виражене коефіцієнтами, що розраховується експертним рейтинговим оцінюванням альтернативних варіантів з використанням методів ранжування і попарних порівнянь.

Таблиці можуть заповнюватися коефіцієнтами у ручному режимі, шляхом введення оператором значень до відповідних чарунок таблиці. Для цього необхідно попередньо виконати розрахунок коефіцієнтів, опрацювавши отримані від експертів дані за наведеними у попередньому розділі експертними методами.

Процес заповнення експертних таблиць може бути автоматизовано, за допомогою додавання у архітектуру СППР модуля обробки експертних даних. Даний модуль може бути реалізований за допомогою агентів, що прийматимуть дані від множини експертів та у автоматичному режимі розраховуватимуть коефіцієнти та вноситимуть їх до таблиць.

Режим функціонування (запуску) ГІМАС.

Для запуску ГІМАС необхідно задати вхідні показники та натиснути кнопку "Обробка" (рис. 4.10).

Червоною лінією позначено слід умовно-оптимальної траєкторії руху по функціональному орграфу. Вершини через які вона проходить і є обраними значеннями показників системи.

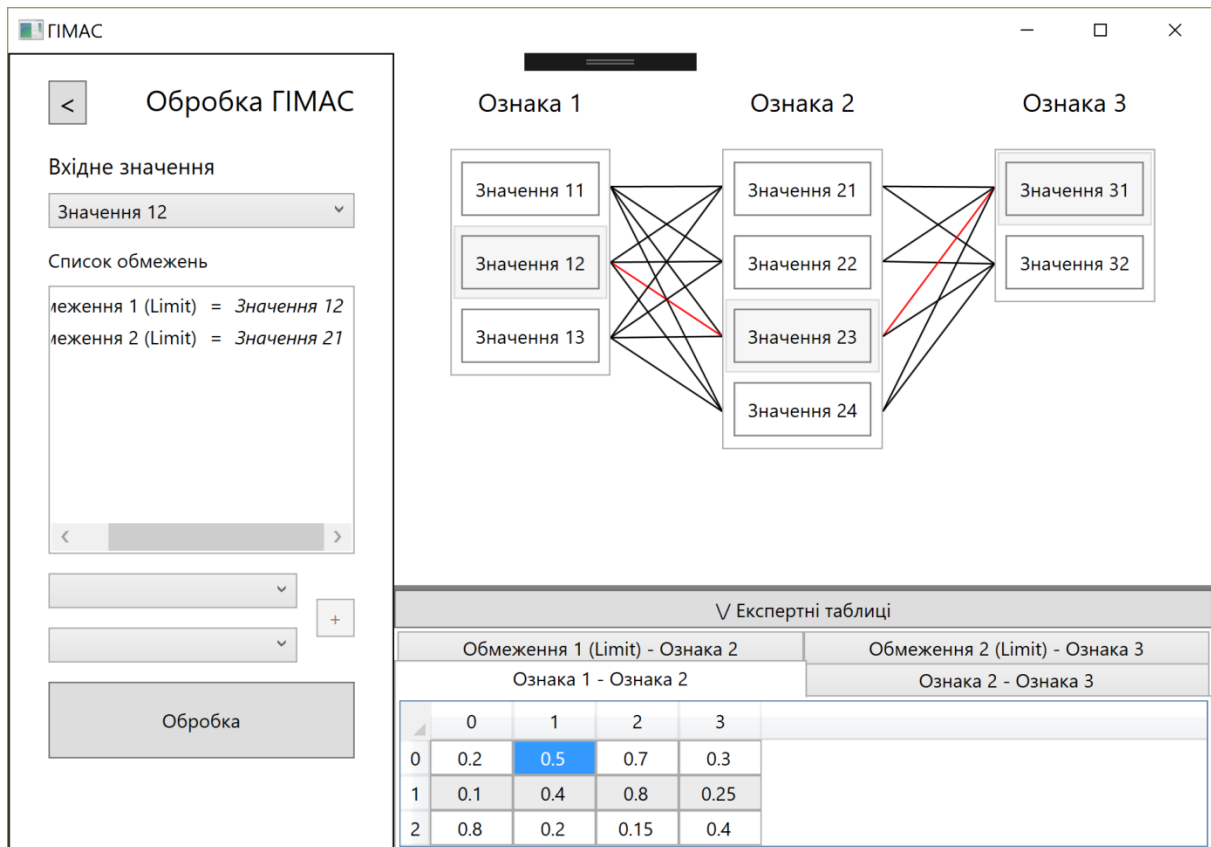


Рисунок 4.9. Режим функціонування ГІМАС

Висновки

1. Спроековано узагальнену структуру системи автоматизації прийняття рішень та управлінської діяльності. Вона організаційно представлена у вигляді систем підтримки прийняття рішень, що дозволяє вирішувати задачі проектування або налагодження систем управління ГВС, котрі потребують прийняття рішення проектувальником чи оператором.

2. Розроблено алгоритмічне забезпечення СППР, що дає змогу виконувати повний перелік задач, що ставляться перед системою. Отримана функціональна модель СППР відрізняється універсальністю та може застосовуватись для вибору необхідних значень показників з урахуванням конкретних вимог та обмежень будь-якої системи, для якої може бути визначено НВДП та ЛПН.

3. Розроблено програмне забезпечення у вигляді повноцінного програмно-інструментального засобу, що дозволяє здійснювати проектування та дослідження складних моделей прийняття рішень. Ні відміну від існуючих програмних комплексів дозволяє у зручній формі поєднувати використання мультиагентних систем та нечіткої логіки та надає можливість практичного використання у якості СППР.

5. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМИ ДИНАМІЧНОГО ОПЕРАТИВНОГО КЕРУВАННЯ ГВС

5.1. Постановка задачі та розробка методики експериментального дослідження

При вирішенні задачі автоматизованого динамічного оперативного керування повинні бути враховані відповідним чином відповідні вимоги та обмеження ГВС. Саме така узгодженість налаштувань СОУ та вимог і обмежень ГВС у значній мірі визначають практичну важливість розробленої СППР на основі ГІМАС.

Для дослідження роботи запропонованої моделі необхідно спланувати та провести експериментальні дослідження, що дасть змогу зібрати та проаналізувати експериментальні дані. Планування та проведення експерименту повинні дозволити здійснити перевірку адекватності та стійкості запропонованої моделі [164, 184].

Проведення дослідження роботи ГІМАС передбачає його попереднє планування з розробкою певної послідовності етапів експерименту, тобто методики проведення. Вона повинна дозволяти з мінімальною витратою ресурсів отримати значущі результати для аналізу.

Сформуємо наступну багатоетапну методику експериментального дослідження:

1. Формування експертних таблиць, що містять кількісне визначення вагомості реляційних зв'язків між визначальними класифікаційними ознаками та обмеженнями.
2. Задавання значень вимог та обмежень для тестових ГВС:
 - a. обчислювальна потужність апаратного забезпечення СОУ;
 - b. архітектура СОУ;
 - c. структурно-компонувальна схема;
 - d. матриця часу переміщень АТМ;
 - e. властиві види невизначеностей для ГВС.

3. Ініціалізація СППР вибору значень показників СОУ на основі ГІМАС та налаштування усіх необхідних компонентів.
4. Визначення значень показників СОУ для обраних тестових ГВС за допомогою синтезованої ГІМАС.
5. Розробка моделі ГВС з обраним методом динамічного керування.
6. Розв'язання тестових задач на основі наборів технологічних операцій, що можуть бути виконані на тестових ГВС.
7. Вибір критеріїв оптимальності та інтерпретація отриманих результатів.

5.2.Налаштування та використання СППР на основі ГІМАС для реалізації процесу ДОК

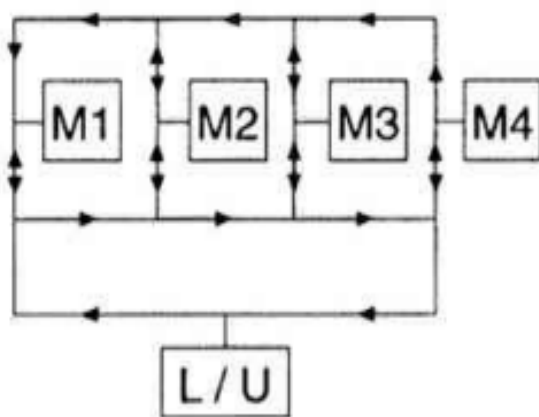
5.2.1. Визначення вимог та обмежень тестових ГВС

За наведеною методикою проведення експериментальних досліджень для ГВС необхідно задати наступні обмеження та вимоги:

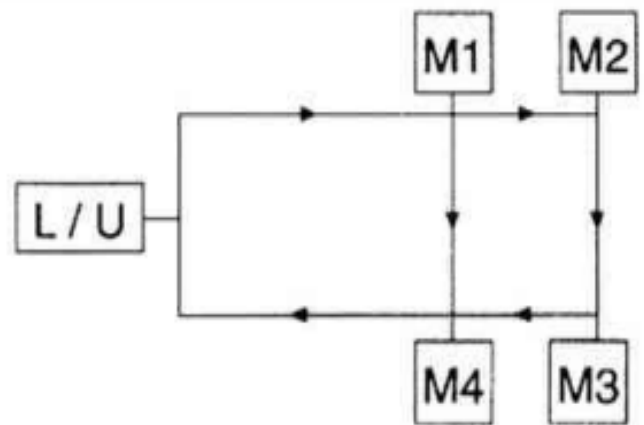
Обчислювальна потужність апаратного забезпечення СОУ – висока.

Архітектура СОУ – централізована.

Структурно компоновальні схеми. Розглянемо дві ГВС з типовими структурно-компоновальними схемами.



Структура 1



Структура 2

Рисунок 5.1. – Варіанти структур транспортної системи ГВС

На рис. 5.1 зображено два варіанти структур транспортної системи ГВС, що містить 2 автономні транспортні модулі, де:

- М1 – ГВМ токарних операцій;
- М2 – ГВМ свердлильних операцій;
- М3 – ГВМ фрезерувальних операцій;
- М4 – ГВМ штампувальних операцій;
- L/U – складський модуль завантаження-розвантаження заготовок та готової продукції.

Матриці часу переміщення між ГВМ. У таблицях 5.1 та 5.2 наведено матриці часу переміщень між ГВМ для двох варіантів структур ГВС 1 та ГВС 2.

Таблиця 5.1.

Матриця часу переміщення між модулями ГВС1

	L/U	М1	М2	М3	М4
L/U	0	6	8	10	12
М1	12	0	6	8	10
М2	10	6	0	6	8
М3	8	8	6	0	6
М4	6	10	8	6	0

Таблиця 5.2.

Матриця часу переміщення між модулями ГВС2

	L/U	М1	М2	М3	М4
L/U	0	4	6	8	6
М1	6	0	2	4	2
М2	8	12	0	2	4
М3	6	10	12	0	2
М4	4	8	10	12	0

Невизначеності характерні для ГВС. Для даних ГВС характерними є невизначеності, що пов'язані з ресурсами, а саме:

- несправність автономних транспортних модулів;

5.2.2. *Налаштування СППР на основі ГІМАС*

З метою використання розробленого СППР у якості програмного забезпечення модуля корекції ВДП СОУ, для знаходження значень показників СОУ адекватних до заданої ГВС, необхідно налаштувати програму відповідним чином. Алгоритм налаштування СППР наступний:

1. Додавання вирішальних показників;
2. Додавання обмежень для відповідних вирішальних ознак;
3. Заповнення експертних таблиць.

Додавання вирішальних динамічних показників. Необхідно додати до СППР усі ВДП СОУ. Для цього необхідно перейти у режим *Конструктора ГІМАС* та натискаючи кнопку *Додати ознаку* заповнити необхідну інформацію про кожен вирішальний показник.

Так по чергово необхідно додати наступні вирішальні показники та можливі варіанти їх значень:

- тип невизначеності;
- підхід до планування;
- стратегія перепланування;
- політика вибору часу перепланування;
- метод динамічного керування.

Після додавання кожної з ознак у системі буде автоматично створюватися відповідна АОП з усіма необхідними ІА. Також автоматично будуть згенеровані експертні таблиці, що міститимуть коефіцієнти кількісного визначення вагомості реляційних зв'язків між суміжними визначальними класифікаційними ознаками.

Додавання обмежень ГВС. Потрібно додати обмеження, що накладаються на окремі вирішальні показники з певних, характерних для СОУ, причин. Для цього, залишаючись у режимі *Конструктора ГІМАС* та натискаючи кнопку *Додати обмеження* потрібно заповнити необхідну інформацію про кожне обмеження та вказати відповідний вирішальний показник.

Так по чергово необхідно додати наступні обмеження з відповідними їм вирішальними показниками та можливими варіантами їх значень:

- *Обчислювальна потужність СОУ – Стратегія перепланування;*
- *Архітектура СОУ – Політика часу перепланування;*

- *Компонувальна схема АТСС – Метод диспетчеризації;*

Після додавання кожного обмеження автоматично будуть згенеровані експертні таблиці, що міститимуть коефіцієнти кількісного визначення вагомості реляційних зв'язків між обмеженнями та відповідними їм визначальними класифікаційними ознаками.

Заповнення експертних таблиць. Отже, як було зазначено у п. 3.1 при залученні 15 експертів було проведено опитування оцінок ефективності поєднання ознак СОУ наведеними експертними методами:

Метод ранжування. Припустимо, що ми маємо m експертів, котрі оцінюють n критеріїв. Кожен експерт проводить ранжування критеріїв шляхом присвоєння номерів від 1 до n у відповідності зі степенем важливості.

Метод парних порівнянь. Цей метод застосовується коли експерти не в змозі оцінити важливість критеріїв у балах. У цьому випадку кожен k -й експерт заповнює власну таблицю. Далі здійснюється об'єднання таблиць.

Після отримання результатів оцінювання було проведено аналіз на узгодженість експертів у даній області (коректність відповідей щодо відповідності ВДП). Отримані двома методами не менше 0,5, тому можемо записати значення в таблиці порівняння ефективності поєднання ознак СОУ.

Для прикладу таблиця 5.3 містить оцінки поєднання підходів до динамічного керування у ГВС та невизначеностей, що властиві певній ГВС. Повні результати розрахунків наведені у Додатку А.

Таблиця 5.3.

Оцінка поєднання ознак СОУ: підходи, невизначеності

Підходи	Реактивний	Прогностично-реактивний	Робастний прогностично-реактивний	Робастний превентивний
Невизначеності				
Несправність виробничого модуля	0,6	0,7	0,8	0,4
...
Зміна пріоритету задач	0,7	0,6	0,8	0,3
Зміна терміну виконання операції	0,5	0,8	0,7	0,6

Отже, СППР налаштована і може використовуватись у режимі *Запуск ГІМАС*, при введенні конкретних вхідних даних (рис. 5.2).

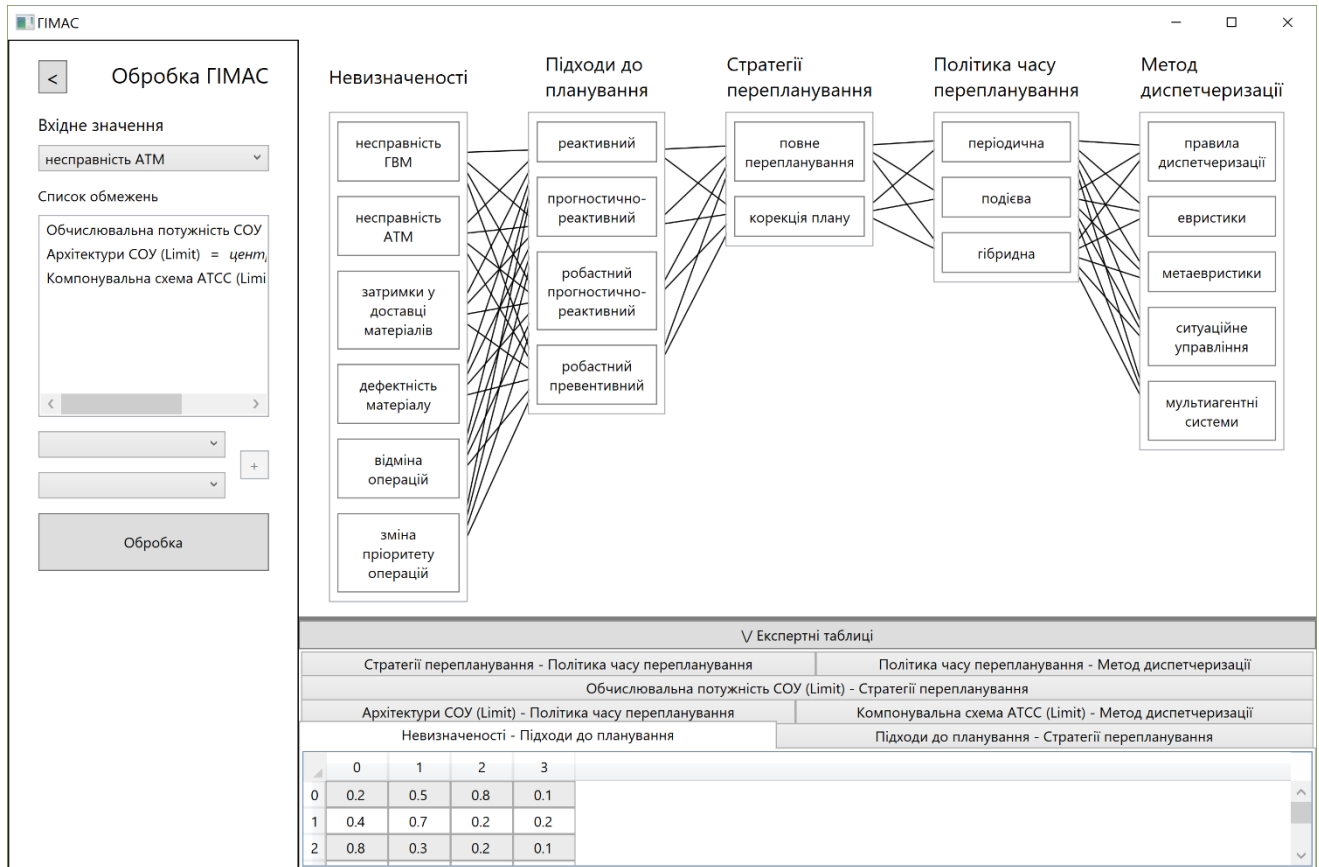


Рисунок 5.2. Налаштована СППР на основі ГІМАС для вибору значень показників СОУ

5.2.3. Отримання результатів роботи СППР

У результаті роботи попередньо налаштованої СППР на основі ГІМАС на головній формі програми отримуємо результат розрахунків щодо вибору значень показників СОУ у вигляді оптимальної траєкторії на повному функціональному орграфі процесу вибору значень показників СОУ.

Нагадаємо, що *оптимальна траєкторія руху* tr_{opt} – слід у послідовності етапів вибору значень показників СОУ, що визначається перетином значень показників СОУ з максимальними показниками відповідності до вимог і обмежень ГВС на кожному з етапів [189].



Рисунок 5.3. Умовно-оптимальна траєкторія з результатами вибору значень показників СОУ

Як вже вище наголошувалося, серед траєкторій tr процедурного руху за оргграфом, наведеним на головній формі СППР (рис. 5.3), є й умовно оптимальні $tr_{\text{опт}}$ за умовами відповідності до введених ВО ГВС. Зокрема, червоною лінією виділений слід умовно оптимальної траєкторії $tr_{\text{опт ум}}$, яка в результаті багатоітераційного перебирання визначає складові умовної бажаної моделі СОУ:

$$\text{СОУ} \rightarrow tr_{\text{опт ум}} \subset \text{ВН}_p \times \text{П}_{\text{пр}} \times \text{С}_{\text{кп}} \times \text{ПЧ}_{\text{пд}} \times \text{М}_{\text{мас}} \quad (5.3)$$

Для обох тестових ГВС (ГВС 1 та ГВС 2) було отримано рекомендації щодо налаштування СОУ з наступними показниками:

Підхід до динамічного керування: прогностично-реактивний.

Стратегія динамічного керування: корекція плану.

Політика вибору часу перепланування: подієва.

Метод диспетчеризації метод на основі мультіагентних систем.

5.3. Побудова імітаційної моделі ГВС з методом диспетчеризації на основі МАС

Як уже зазначалося, зі зростанням складності виробничих систем задачі керування в реальному часі стають занадто складними для одного контролера. У такому випадку доцільно застосовувати децентралізовану систему, де кожна підсистема керується окремим контролером, що незалежно базується на локальній інформації і керує локальними діями.

Використання *мультіагентного середовища* (МАС) – приклад формування децентралізованої системи керування на основі застосування наборів впорядкованих інтелектуальних і автономних програмних агентів, що співпрацюють або змагаються для знаходження розв’язку задачі, що є занадто складною для розв’язання одним програмним агентом. Автономність тут означає, що агент є активною сутністю, яка може приймати власні рішення. Агент відрізняється від об’єкта в об’єктно-орієнтованому підході, який виконує заздалегідь визначені операції, на які хтось інший відправив запит, тим, що сам вирішує виконувати чи ні запитувану операцію, враховуючи власні цілі, пріоритети та умови. Зв’язок між агентами зазвичай відбувається завдяки переговорам – процесу комунікації, для подальшої координації та взаємодії [52]. Популярність децентралізованих систем, які базуються на МАС, зростає через те, що ці системи спроектовані для розподіленої і автономної роботи.

Не дивлячись на деяку кількість наявних досліджень щодо керування АТМ з використанням МАС, для розв’язання задачі прямої диспетчеризації даний метод використовується значно рідше ніж традиційні правила диспетчеризації. Однією з причин є недостатня ступінь чіткості формулювань у літературі узагальненого процесу переговорів і призначення задач. Тому однією з задач даного дослідження є розробка, із дотриманням підходів та рекомендацій із [156, 181], моделі та архітектури розподіленої системи реального часу – МАС динамічного керування (МАС ДК).

5.3.1. Синтез моделі та архітектури мультиагентного середовища для реалізації прямої диспетчеризації

Модель MAC у загальному вигляді має наступний вигляд $MAS = \{A, S, env\}$, де:

- $AG = \{ag_1, \dots, ag_n\}$ – скінченна множина агентів, кожен із яких представлений моделлю інтелектуального агента;
- S – скінченна множина станів зовнішнього середовища;
- $env : S \times A_{ag_1} \times \dots \times A_{ag_n}$ – функція, що описує можливу реакцію зовнішнього середовища на дії всіх агентів системи.

На основі [146] пропонується включити до складу MAC ДК необхідну для моделювання роботи ГВС кількість агентів та мета агентів.

Визначення 5.1. *Метаагент (ag^*_i)* – це агент, що складаються з інших агентів.

Тоді модель MAC ГВС набуде наступного вигляду:

$$MAS_{ГВС} = \{ag_M \times ag^*_{ATM} \times ag^*_{ГВМ} \times ag^*_3, S, env\}, \text{ де:}$$

- ag_M – агент-менеджер;
- ag^*_{ATM} – метаагент системи АТМ;
- $ag^*_{ГВМ}$ – метаагент системи ГВМ;
- ag^*_3 – метаагент системи замовлення.

Розподілена архітектура MAC ДК зображена на рис. 5.4.

АТМ у виробничій системі відображений двома окремими типами агентів:

$ag_{ДАТМ}$ – агент диспетчеризації АТМ;

$ag_{РАТМ}$ – агент ресурсів АТМ.

Коли в ГВС додається АТМ_i, то одночасно в MAC додається два агенти $ag^i_{ДАТМ}$ і $ag^i_{РАТМ}$. Ці два типи агентів формують метаагент АТМ (ag^*_{ATM}).

Схожим чином, ГВМ у ГВС також відображається двома окремими типами агентів, що утворюють метаагент ГВМ ($ag^*_{ГВМ}$):

$ag_{ДГВМ}$ – агент диспетчеризації ГВМ;

$ag_{РГВМ}$ – агент ресурсів ГВМ.

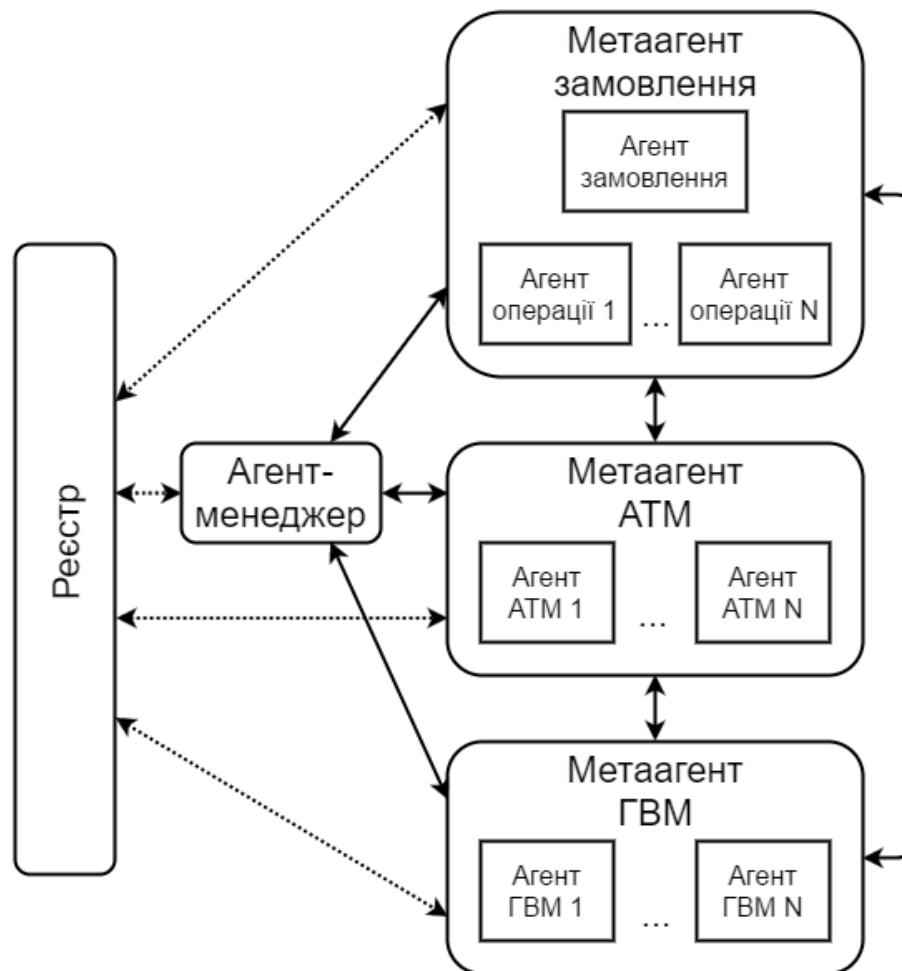


Рисунок 5.4. Архітектура МАС диспетчеризації

Метаагент замовлення ag^*_3 складається з множини агентів:

ag_3 – агент замовлення, кожен з яких в свою чергу створює множину агентів:

ag_o – агент операції, що входить до складу замовлення.

Агенти ag_o створюються агентом ag_3 використовуючи інформацію отриману від агента ag_m .

Сховище даних Реєстр (Reg) – зберігає інформацію про ag^*_{ATM} і ag^*_{GBM} . Використовуючи сховище, агенти знають про доступність інших агентів. Використовуючи канали інформаційного обміну у сховищі, агенти знають про доступність інших агентів.

Далі більш детально визначається механізм і поведінка всіх типів агентів.

5.3.2. *Визначення функцій агентів МАС ДК та міжагентна комунікація*

Агент-менеджер. Агент ag_M має дві основні функції: ініціалізація систем і створення задач. Для ініціалізації системи потрібні два агенти: ag_M і ag_Z , решта агентів ними створюються динамічно. Агент ag_M створює агенти у ag_{ATM}^* , $ag_{ГВМ}^*$ та ag_Z . Кількість транспортних і виробничих модулів передається до ag_M через сховище даних *Reg*. Архітектура агента наведена у Додатку Г1.

У МАС ПД виділяють два типи сигналів: *внутрішні сигнали* та *зовнішні сигнали*. Внутрішні сигнали, які агент відсилає сам собі зазвичай є результатом виконання відповідних методів у планах агента, тоді як зовнішні сигнали – це повідомлення від інших агентів або середовища. У роботі розглядаються обидва типи сигналів. Агент ag_M створює наступні агенти – ag_Z , $ag_{ДАТМ}$, $ag_{РАТМ}$, $ag_{ДГВМ}$ і $ag_{РГВМ}$ – за допомогою відсилання сигналу “Ініціювати створення Агентів ГВМ, АТМ і замовлення” (*Initiate_creation_of_machine_AGV_and_staff_agents*) до своїх локальних планів: “Створити замовлення” (*CreateStaff*), “Створити ГВМ” (*CreateMachine*), “Створити АТМ” (*CreateAGV*).

Агент ag_M відсилає керуючі сигнали і чекає на відповідь від створених агентів. Сховище даних *Reg* надає доступ всім агентам до інформації про всіх зареєстрованих агентів. Це дозволяє іншим агентам системи знати про статус системи. Якщо ag_{ATM}^* чи $ag_{ГВМ}^*$ додаються чи видаляються з системи відповідні зміни вносяться до *Reg*. Це супроводжується відповідним планом АМ.

Інша важлива функція ag_M – це створення задач у певний визначений час. Він визначає кількість операцій які має задача, їх послідовність і час виконання. Коли створюється нове замовлення – воно додається до списку ag_M "Замовлення" (*Orders*). Коли у список додається новий запис генерується внутрішній сигнал “Сповістити про нове замовлення” (*Alert_new_order*), що містить інформацію про замовлення і оброблюється планом “Відіслати нове замовлення до Агенту замовлення” (*Send_new_order_to_staff_agent*). Ця інформація про задачу пересилається агенту ag_Z за допомогою зазначеного плану і генерації сигналу

“Надіслати подію замовлення” (*Send_order_event*). Цей цикл повторюється щоразу, коли надходить нове замовлення.

Агент замовлення. Коли нове замовлення надходить до ag_z від ag_m , він отримує сигнал “Надіслати подію замовлення” (*Send_order_event*) та ітеративно створює відповідні ag_o згідно з планом “Створення Агентів операцій” (*CreateOperationAgents*) (Додаток Г2). Агенти ag_o зберігають власну інформацію і автономно шукають найефективніший $ag_{дaтm}$, що перемістить їх до бажаного ГВМ.

Агент операції. ag_o , що створені ag_z , поділяються на два підтипи: активні і пасивні. Оскільки ag_o залежні від черги, то вони стають активними коли попередні операції завершені. Кожен ag_o має дві функції: Транспортування (*transportation*) і Обробка (*processing*) (Додаток Г3).

Агент ag_o має два приватних списки: один з них для зберігання операцій, а інший – для ставок, що надходять від $ag_{дaтm}$. Після отримання інформації про операцію від ag_z , ag_o записує її до списку “Інформація про операції” (*OperationInfo*) згідно з планом “Запис до списку операцій” (*RecordIntoBeliefSet*). Після додавання інформації автоматично генерується сигнал “Зберегти інформацію про операцію” (*Post_operation_information*), що оброблюється планом “Відіслати запит до агентів АТМ і ГВС” (*Send_a_request_to_AGV_machine_agents*). Цей план спочатку перевіряє чергу операцій. Якщо це перша операція – план надсилає запит на транспортування всім $ag_{дaтm}$, що містяться у *Reg*. У іншому разі план призупиняється до моменту, коли будуть здійснені всі попередні операції, за допомогою функції “Чекати чергу” (*waitfor*). Ця функція перевіряє чергу у списку “Інформація про операції” (*OperationInfo*). Коли попередні операції завершено, ag_o отримує сигнал “Активувати наступний Агент операції” (*Activate_next_operation_agent*). Цей сигнал оброблюється планом “Оновити статус Агента операції” (*Update_operation_agent_status*), що змінює статус операції у списку “Інформація про операції” (*OperationInfo*). Потім план розсилає запит на транспортування всім $ag_{дaтm}$ і цей запит записується до їх робочих списків. На цьому етапі

план знову призупиняється за допомогою функції “Чекати чергу” (*waitfor*), доки не отримає ставок на задачу транспортування від будь-якого $ag_{ДАТМ}$. Як тільки перша ставка в переговорах про здійснення транспортування замовлення зроблена $ag_{ДАТМ}$ за допомогою сигнал “Зробити ставку” (*Submit_bid*), процес переговорів починає керуватися планом ago “Оцінка ставок” (*Assesment_of_biddings*) заснованому на Contract Net Protocol (CNP) зображеному на рисунку 5.5.

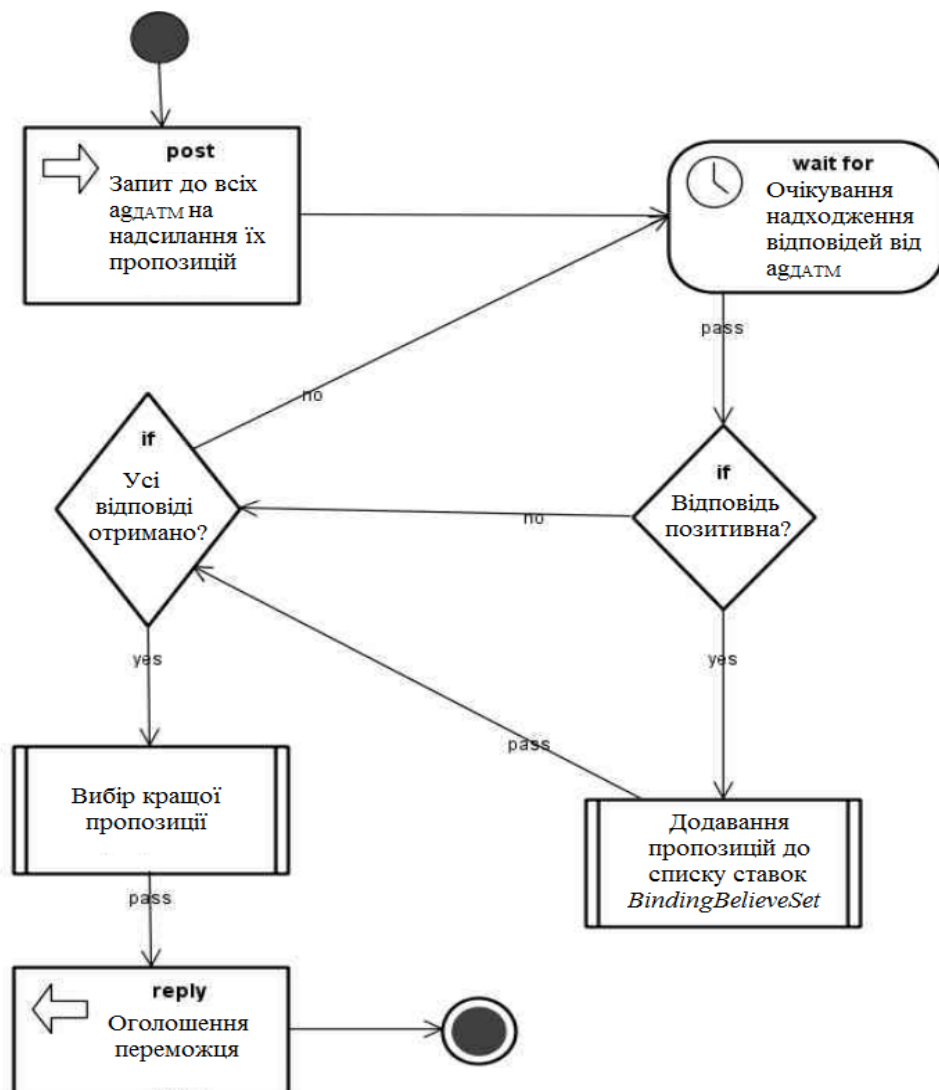


Рисунок 5.5. План “Оцінка ставок” (*Assesment_of_biddings*) агента ago

Після отримання агентом $ag_{ДАТМ}$ першої ставки план стартує. В першу чергу іншим $ag_{ДАТМ}$ надсилається сигнал “Запит на ставку” (*Request_a_bid*). Позитивні відповіді, що приходять від $ag_{ДАТМ}$ через сигнал “Зробити ставку”

(*Submit_bid*) додаються до списку "Ставки"(*Bidding*). Найкраща пропозиція визначає *ag_{ДАТМ}*-переможця через сигнал "Оголосити переможця" (*Declare_winner*), а інші *ag_{ДАТМ}* -учасники переговорів інформуються про результати і отримують запит на видалення задачі із робочих списків через сигнал "Видалити операцію" (*Delete_event*). Це останній крок плану "Оцінка ставок" (*Assesment_of_biddings*). Після того, як транспортування здійснено *ag_{ДАТМ}* -переможцем, ця інформація надсилається через сигнал "Транспортування завершено" (*Transportation_completed*) і оброблюється планом АО "Оновити інформацію про транспортування" (*Update_transportation_information*).

Агент диспетчеризації АТМ. У архітектурі *ag_{ДАТМ}* є деякі сигнали, що його активують (Додаток Г4).

Як тільки *ag_{РАТМ}* стає вільним він інформує *ag_{ДАТМ}* сигналом "Інформація про простій" (*IdleInfo*). Агент *ag_{ДАТМ}* відсилає сигнал "Транспортування завершено" (*Transportation_completed*) до *ag_О* згідно з планом "Перевірити робочий список" (*Check_the_blackboard*). Він визначає наступну задачу. Рис. 5.6 підсумовує цей процес.

Коли операція розпочалася на ГВМ, *ag_{ДГВМ}* відсилає сигнал "Активувати наступний Агент операції" (*Activate_next_operation_agent*) наступному *ag_О*. Після цього надходить запит на транспортування від наступного *ag_О* через сигнал "Відіслати запит до АТМ" (*Send_request_to_AGV*). Агент *ag_О* також повідомляє про мінімальний можливий час початку обробки транспортної задачі. Ця інформація записується планом *ag_{ДАТМ}* "Записати до робочого списку" (*Record_in_blackboard*) і використовується планом "Перевірити робочий список" (*Check_the_blackboard*) для визначення найбільш підходящої задачі.

Під час визначення задачі транспортування *ag_{ДАТМ}* робить висновки, що базуються на оцінці часу переміщення і часу власного очікування найближчого можливого початку обробки відповідної операції з робочого списку.

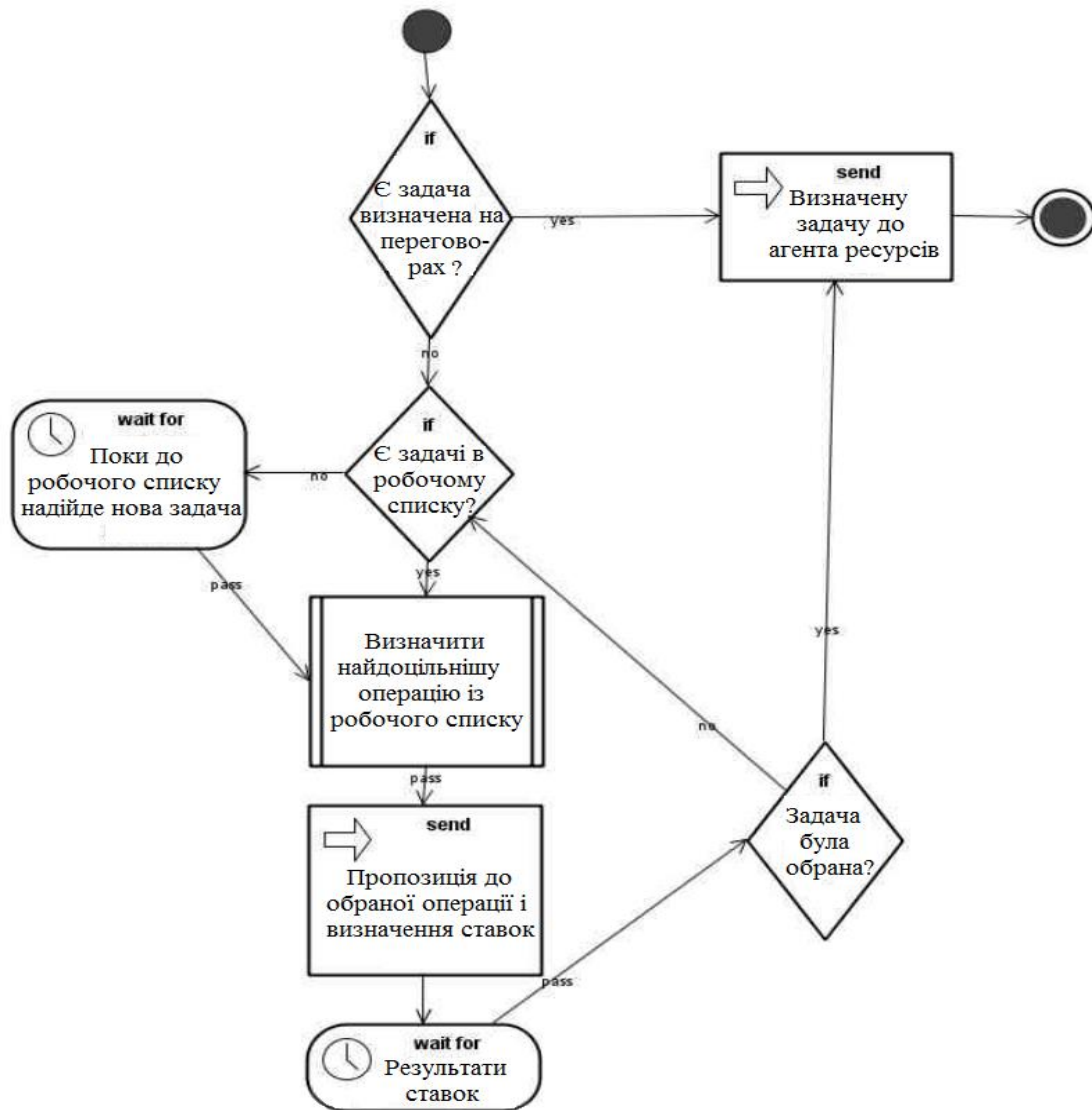


Рисунок 5.6. План “Перевірити робочий список” (*Check_the_blackboard*)
агента $ag_{ДАТМ}$

Мета цих висновків у виборі задачі з найближчим часом початку з робочого списку використовуючи наступне рівняння:

$$ELT_i = \begin{cases} t + \Delta t(CL, PCP_i), t > EPT_i \\ t + \max\{\Delta t(CL, PCP_i), (EPT_i - t)\}, t \leq EPT_i \end{cases} \quad (5.3)$$

де: ELT_i — найближчий час початку опрацювання задачі i ; CL — поточне розташування АТМ; PCP_i — розташування точки початку обробки задачі i ; t — поточний момент часу; $\Delta t(..., ...)$ — час переміщення між двома точками; EPT_i — найближчий час можливого початку обробки задачі i .

Далі обирається ELT_s за допомогою рівняння:

$$ELT_s = \min\{ELT_i\}, \quad (5.4)$$

Час PR виконання відповідної операції, запропонований $ag_{ДАТМ}$ визначається як сума EPT_s і відповідного часу доставки вантажу за допомогою рівняння:

$$PR = ELT_s + \Delta t(PCP_s, DP_s), \quad (5.5)$$

Після того, як почали робитися пропозиції, ag_o запрошує всі $ag_{ДАТМ}$ зробити свою, використовуючи план «Підготовка пропозиції» (*Prepare_a_proposal*). План спершу перевіряє наявність призначення задачі. Якщо не призначена, він готує пропозицію, шукаючи задачу з мінімальним ELT , використовуючи рівняння 3.2 і наступне:

$$ELT_i = \begin{cases} EFT + \Delta t(NL, PCP_i), & EFT > EPT_i \\ EFT + \max\{\Delta t(NL, PCP_i), (EPT_i - EFT)\}, & EFT \leq EPT_i \end{cases} \quad (5.6)$$

де: EFT – найближчий час звільнення; NL – наступне розташування.

Якщо задача у поточній пропозиції співпадає з обраною задачею у робочому списку, АДАТМ робить пропозицію відповідній операції додаванням ELT_s до відповідного часу перевезення (рівняння 5.5).

Агент диспетчеризації ГВМ. Під час роботи системи, ag_o , що був перевезений до пункту призначення надсилає до ГВМ сигнал «Відіслати запит до ГВМ» (*Send_request_to_AGV*). Цей сигнал оброблюється планом «Записати у робочий список» (*Record_in_blackboard*) і запит записується до робочого списку $ag_{ДГВМ}$. Після отримання сигналу «Інформація про простій» (*IdleInfo*) від $ag_{РГВМ}$, план «Перевірка робочого списку» (*Check_the_blackboard*) шукає у робочому списку нову задачу. У даному дослідженні гнучкість маршрутизації не враховується, тому $ag_{ДГВМ}$ не включається в переговори. Задача з найменшим часом обробки обирається як нова задача і надсилається до $ag_{РГВМ}$. Після вибору нової задачі $ag_{ДГВМ}$ інформує наступний ag_o . $ag_{ДГВМ}$ також інформує про найшвидший можливий час початку виконання надсиланням сигналу «Активувати наступний Агент операції» (*Activate_next_operation_agent*). Цей цикл триває коли отримано новий запит на задачу від АО і сигнал «Інформація про простій» (*IdleInfo*) від $ag_{РГВМ}$. Архітектуру $ag_{ДГВМ}$ зображено у Додатку Г5.

Агенти ресурсів АТМ і ГВМ. $ag_{РАТМ}$ і $ag_{РГВМ}$ відображають фізичні ресурси транспортних і виробничих модулів. Ці модулі мають лише один план і один список. Після отримання нової задачі від $ag_{ДАТМ}$ чи $ag_{ДГВМ}$ через сигнал «Відіслати розклад» (*Send_schedule*) вони починають обробку замовлення. Після завершення задачі, вони записують завершену задачу у свій список статистики для побудови діаграми Ганта і запитують у $ag_{ДАТМ}$ чи $ag_{ДГВМ}$ нову задачу відсилаючи сигнал «Інформація про простій» (*IdleInfo*). Цей процес виконується планом «Задача доставлена» (*Task_transport*). Архітектура Агентів ресурсів зображена у Додатку Г5.

5.3.3. Застосування СНВ для підвищення ефективності роботи методу МАС динамічного керування

Щоб забезпечити зменшення часу переговорів агентів та для функціонування системи диспетчеризації в умовах невизначеності інтелектуальними агентами, що входять до складу МАС. Для вирішення даної задачі пропонується застосувати систему нечіткого виведення. Нечітка логіка раніше була застосована для розробки правил диспетчеризації на основі кількох критеріїв [33, 122], також аналізувалася можливість використання нейро-фазі технологій для керування рухомими об'єктами у ГВС [148]. Далі більш детально визначається механізм і поведінка АДАТМ висвітлений у роботі [145].

У запропонованому підході кожен АДАТМ використовує систему нечіткого виведення (СНВ) для підтримки прийняття рішень. Агент АДАТМ збирає інформацію про його оточення і надає цю інформацію до СНВ, яка оцінює наявні варіанти і допомагає агенту вирішити, яку саме задачу транспортування краще починати виконувати.

СНВ використовує три змінні як входні (Відстань, Час очікування і Частоту запитів), і одну в якості вихідної (Пріоритет).

Відстань ($X1 \in \{\text{Далеко, Середня, Близько}\}$) відповідає найкоротшому шляху до місця призначення.

Час очікування ($X_2 \in \{\text{Короткий, Середній, Довгий}\}$) – це час, що минув з моменту прибуття АТМ до ГВМ.

Частота запитів ($X_3 \in \{\text{Низька, Середня, Висока}\}$) – це відношення між кількістю задач, на які було здійснено запит, і загальною кількістю доступних задач, що відображає перевантаженість ГВМ.

Пріоритет ($Y \in \{\text{Низький, Середньо низький, Середній, Середньо високий, Високий}\}$) є значенням, яке АДАТМ присвоює кожному АО.

Нечіткі змінні і пов'язані з ними нечіткі множини зображені на рис. 5.7.

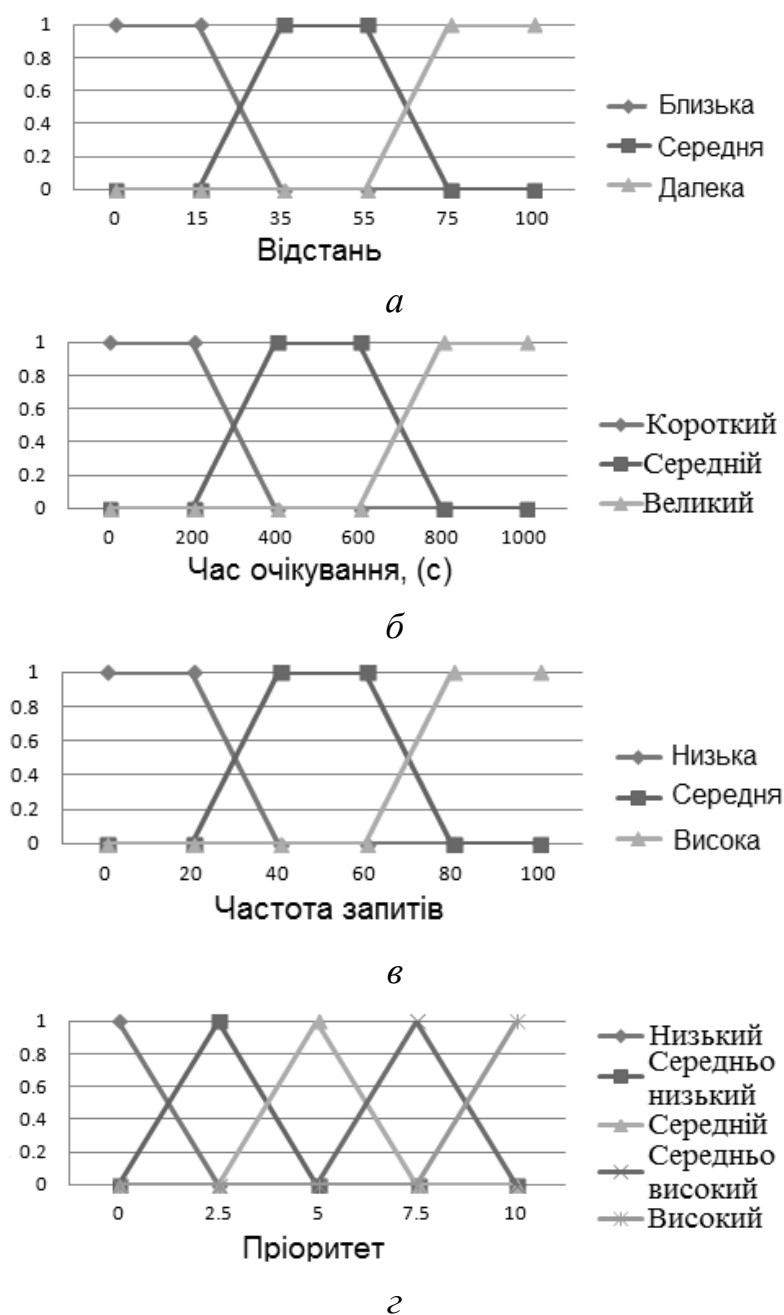


Рисунок 5.7. – Множини вхідних (*a*, *б*, *в*) і вихідної (*г*) нечітких змінних

Нечіткі правила, використовувані у СНВ, наведено у таблиці 4.1. Перший рядок таблиці можна подати як правило "Якщо відстань "далеко" і час очікування "короткий" і частота запитів "висока", то пріоритет "низький"". Інші правила формуються аналогічно. Для виведення використовується метод Mamdani.

Таблиця 5.4.
База нечітких правил СНВ

№	Відстань	Час очікування	Частота запитів	Пріоритет
1	Далеко	Короткий	Висока	Низький
2	Далеко	Короткий	Середня	Середньо низький
3	Далеко	Короткий	Низька	Середній
4	Далеко	Середній	Висока	Низький
5	Далеко	Середній	Середня	Низький
6	Далеко	Середній	Низька	Середній
7	Далеко	Довгий	Висока	Середньо низький
8	Далеко	Довгий	Середня	Середній
9	Далеко	Довгий	Низька	Середньо високий
10	Середня	Короткий	Висока	Середній
11	Середня	Короткий	Середня	Середній
12	Середня	Короткий	Низька	Середньо високий
13	Середня	Середній	Висока	Середньо низький
14	Середня	Середній	Середня	Середньо низький
15	Середня	Середній	Низька	Середній
16	Середня	Довгий	Висока	Середній
17	Середня	Довгий	Середня	Середньо високий
18	Середня	Довгий	Низька	Високий
19	Близько	Короткий	Висока	Середній
20	Близько	Короткий	Середня	Середньо високий
21	Близько	Короткий	Низька	Високий
22	Близько	Середній	Висока	Середньо низький
23	Близько	Середній	Середня	Середньо високий
24	Близько	Середній	Низька	Високий
25	Близько	Довгий	Висока	Середній
26	Близько	Довгий	Середня	Високий
27	Близько	Довгий	Низька	Високий

Процес прийняття рішення відбувається наступним чином. Як тільки $ag_{ДАТМ}$ стає вільним, він перевіряє робочий список. $ag_{ДАТМ}$ призначає кожному ag_O зі списку пріоритет відповідно до нечітких правил. Він обчислює відстань і запитує час очікування і частоту запитів від ag_O . Далі $ag_{ДАТМ}$ передає цю інфор-

мацію до СНВ, яка визначає пріоритет. На виході СНВ маємо вже дефазіфікований пріоритет, тобто його значення є дійсним числом, а не лінгвістичною змінною, яка використовується в нечітких правилах. Після того, як кожен ag_o отримав пріоритет, $ag_{ДТМ}$ вибирає ag_o з найвищим пріоритетом і запитує задачу від нього. Якщо два або більше ag_o мають однаковий пріоритет, буде обрано той, запит від якого надійшов раніше.

5.4. Аналіз результатів експериментальних досліджень роботи СДОК, що містить СППР на основі ГІМАС

5.4.1. Порівняння результатів роботи ГВС зі СДОК та без неї при виникненні невизначеності в реальному часі

Мета. Аналіз ефективності роботи ГВС, що містить розроблену систему динамічного оперативного керування, у разі виникнення невизначеності в реальному часі.

Суть та вхідні дані експерименту. Проаналізуємо ефективність роботи ГВС, що містить СДОК. Початково, у якості методу диспетчеризації використовується метод на основі правил диспетчеризації із правилом:

- FCFS (*First-Come-First-Served*) – правило "Перший надійшов перший обслугований".

Для порівняння результатів, розглянемо три варіанти ГВС без СДОК, у яких СОУ налаштовані такими ж значеннями вирішальних динамічних показників, за виключенням методу на основі правил диспетчеризації, що використовує варіанти з іншими широко відомими правилами диспетчеризації:

- MFCFS (*Modified First-Come-First-Served*) – Модифіковане правило "Перший надійшов перший обслугований".
- STD (*Shortest traveling distance*) – правило "Найкоротший шлях переміщення";
- STT (*Shortest traveling time*) – правило "Найкоротший час переміщення".

Змодельюємо виникнення у процесі функціонування невизначеної ситуації, а саме: *вихід з ладу АТМ на 20-й секундні процесу*.

Критерієм продуктивності обрано **період обробки**.

Для перевірки запропонованого підходу візьмемо 4 тестові задачі з [13].

У таблицях 5.5 - 5.8 наведено 4 набори технологічних операцій для експериментальних задач. У дужках подано час виконання кожної операції.

Таблиця 5.5.

Набір технологічних операцій 1

НТО 1	M1(8); M2(16); M4(12)
НТО 2	M1(20); M3(20); M2(18)
НТО 3	M3(12); M4(8); M1(15)
НТО 4	M4(24); M2(18)
НТО 5	M3(10); M1(15)

Таблиця 5.6.

Набір технологічних операцій 2

НТО 1	M1(10); M4(18)
НТО 2	M2(10); M4(18)
НТО 3	M1(10); M3(20)
НТО 4	M2(10); M3(15); M4(12);
НТО 5	M1(10); M2(15); M4(12);
НТО 6	M1(10); M2(15); M3(12);

Таблиця 5.7.

Набір технологічних операцій 3

НТО 1	M1(16); M3(15)
НТО 2	M2(18); M4(15)
НТО 3	M1(20); M2(10)
НТО 4	M3(15); M4(10)
НТО 5	M1(18); M2(10); M3(15); M4(17)

Таблиця 5.8.

Набір технологічних операцій 4

НТО 1	M4(11); M1(10); M2(7)
НТО 2	M3(12); M2(10); M4(8)
НТО 3	M2(7); M3(10); M1(9); M3(8)
НТО 4	M2(7); M4(8); M1(12); M2(6)
НТО 5	M1(9); M2(7); M4(8); M2(10); M3(8)
НТО 6	M2(10); M3(15); M4(8); M1(15)

Хід експерименту. Отже, після виходу з ладу одного з АТМ на 20-й секунді у ГВС, що містить систему динамічного оперативного керування, у результаті роботи останньої, буде зкореговано один з вирішальних динамічних показників – *метод диспетчеризації* на значення *метод на основі МАС*.

Для розв’язання експериментальних задач в рамках моделі ГВС, що містить СОУ з методом диспетчеризації на основі МАС, було використано наведену вище модель. Набори технологічних операцій відправляються до агента замовлення, де вони розділяються на операції і для кожної створюється агенти операції, що мають дві функції: транспортування та обробки. Далі відповідно до зазначеної моделі розраховуються часові показники обробки та транспортування.

У якості середовища моделювання було використано Simulink. Результати, отримані системою з трьома обраними для порівняння правилами диспетчеризації взяті з моделі, наведеної у [13].

Результати експерименту. Отже, для 2 тестових ГВС, що описані у п. 5.2, було розв’язано 4 наведені експериментальні задачі, при використанні методу диспетчеризації, визначеного за допомогою СДОК та 3 методів на основі правил диспетчеризації. Результатами розв’язання експериментальних задач є періоди обробки наборів технологічних операцій, що зведено у таблицю 5.9.

Таблиця 5.9.

Періоди обробки ГВС з різними методами диспетчеризації

Приклад	FCFS/ MAS	MFCFS	STD	STT	Зменшення періоду обробки, %
1-1	118	121	114	132	3.19
1-2	131	150	135	148	9.04
1-3	130	126	126	132	-1.61
1-4	186	198	208	225	11.32
2-1	86	98	92	106	12.54
2-2	74	106	92	102	25.73
2-3	102	104	104	104	1.92
2-4	117	143	139	167	21.32

Інтерпретація результатів. З таблиці 5.9 видно, що система з МАС випереджає інші правила диспетчеризації за показником тривалості періоду обробки в середньому на 10,4%. У 7 з 8 прикладів використання МАС показує найкращий результат. Однак роботи по удосконаленню запропонованого підходу продовжуються, що дає можливість сподіватися на подальше підвищення продуктивності системи з використанням МАС.

5.4.2. Перевірка ефективності застосування механізму нечіткого виведення у СОУ з методом диспетчеризації на основі МАС

Мета. Аналіз ефективності роботи ГВС, що містить СОУ з методом диспетчеризації на основі МАС із застосуванням механізму нечіткого виведення замість переговорів за протоколом CNET.

Суть та вхідні дані експерименту. Для зазначеної у п. 5.2 тестової структури ГВС 1, було застосовано циклічно задачу 1 із попереднього експерименту.

Вирішальні динамічні показники СОУ ГВС налаштовані за допомогою СДОК в режимі підготовки виробництва між добовими змінами на основі статистичної інформації, за якою характерним видом невизначеності є вихід з ладу АТМ, та відповідають значенням отриманим у п. 5.2.3.

Для розв'язання експериментальної задачі в рамках моделі ГВС, що містить СОУ з методом динамічного керування на основі МАС, було використано наведену вище імітаційну модель. У якості середовища моделювання було використано Simulink.

1) Для першого випадку було застосовано обраний за допомогою СДОК метод диспетчеризації на основі МАС, у якій переговори між агентами здійснюються за протоколом CNET.

2) Для другого випадку було застосовано вдосконалений метод оперативної диспетчеризації із використанням системи нечіткого виведення на базі наведеної вище бази правил.

3) Для третього випадку змінено метод диспетчеризації на метод на основі правил диспетчеризації з правилом FCFS. Результати взяті з моделі, наведеної у [13].

Критерієм продуктивності обрано *середній час очікування АТМ*.

Результати експерименту. Результати роботи ГВС, що містить СОУ з методом динамічного керування на основі MAC із застосуванням механізму нечіткого виведення порівнювалися з відповідними результатами мультиагентної системи на основі CNET та з використанням правила диспетчеризації First Come First Served (FCFS). На рис. 5.8 зображено графік залежності середнього часу простою АТМ від часу моделювання для трьох наведених методів.

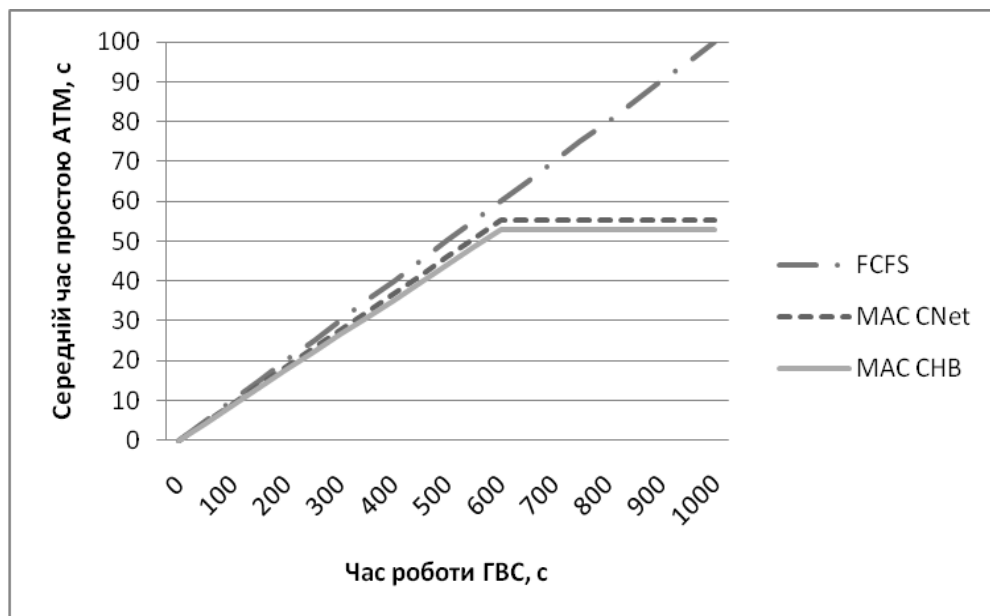


Рисунок 5.8. – Графік залежності середнього часу очікування АТМ

Інтерпретація результатів. З графіку на рис. 5.8, що відображає залежність середнього часу простою АТМ від часу роботи ГВС для трьох наведених методів, видно, що метод на основі MAC з CHB переважає за продуктивністю обидва інші методи: MAC з CNET – на 8%, правило FCFS – на 12%.

Мультиагентну систему на основі CHB було розроблено з урахуванням завантаженості, відстані і часу очікування.

При використанні Методу FCFS може виникнути скупчення АТМ біля одного оброблювального ресурсу, що найдовше чекає на виконання транспортної операції. Це і було враховано при розробці СНВ.

При використанні CNET сам процес переговорів займає багато часу, оскільки АДГВМ повинен чекати відповіді від кожного агента АДАТМ, які можуть надійти не одразу. Час прийняття рішення значно зменшено в порівнянні з часом проведення переговорів. Замість надання пропозиції і очікування відповіді АДАТМ оцінює параметри виробничого середовища і обирає рішення (задачу для виконання), яке найбільш підходить для всієї ГВС.

Недоліком такої системи диспетчеризації є те, що обравши задачу, АДАТМ більше не змінює свого рішення. Через це можливості, що можуть з'явитися у високо-динамічному середовищі можуть бути втрачені. Якщо не дочекатися всіх пропозицій — можна не отримати найвигіднішу, якщо чекати — можна втратити багато часу.

Висновки

1. Розроблено методику експериментального дослідження якості роботи ГВС, яка містить СОУ налаштовану значеннями показників, обраними з використанням розроблених інтелектуальних підходів до прийняття рішень, що дозволяє оцінити ефективність цих підходів.

2. Синтезовано модель ГВС, що містить СОУ з методом динамічного керування на основі МАС, що дає змогу перевірити ефективність роботи ГВС з даним типом динамічного керування за обраним показником. У досліджених джерелах присутня недостатня ступінь чіткості формулювань узагальненого процесу переговорів і призначення задач, натомість запропонована модель детально описана, зокрема чітко викладено процес присвоєння задачі транспортування агенту, що має її виконувати.

3. Розв'язання експериментальних задач показує, що у більшості випадків ГВС, що містить СОУ з значеннями показників, обраними з використанням автоматизованого підходу на основі ГІМАС, показала вищу продуктивність за

обраними критеріями: тривалість періоду обробки на 10,4% та середній час очікування на 12%. Отримані результати свідчать про перспективність застосування СППР на основі ГІМАС для налаштування значень показників систем керування у реальному часі.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. На основі проведеного структурно-функціонального аналізу СОУ ГВС, що включав визначення основних функцій, відповідних модулів та узагальнених показників роботи в умовах невизначеності, було створено формалізовану модель процесу ДОК. Це дозволило синтезувати структуру системи динамічного оперативного керування (СДОК), у якій СОУ є об'єктом керування. Для здійснення динамічного керування СОУ вперше запропоновано включити модуль корекції ВДП СОУ, що на основі даних оперативного та статистичного обліку дозволяє підвищити ефективність роботи шляхом вибору раціональних значень ВДП для налаштування відповідних модулів.

2. При розробці інформаційного забезпечення процесу розв'язання задачі автоматизації процесу ДОК, на основі отриманої формалізованої моделі та узагальнених показників ДОК, було створено класифікатор вирішальних динамічних показників СОУ та їх можливих значень. Класифікатор включає наступні показники: підхід до оперативного планування, стратегія перепланування, політика вибору часу перепланування та метод диспетчеризації. На основі отриманого класифікатора було побудовано логічну послідовність налаштування ВДП, що дозволяє вирішити задачу формування коректної черговості ітераційних процедур при здійсненні автоматизованого ДОК.

3. Створено концептуальну модель СОУ як об'єкта керування на основі Ф-функції. Така формалізація дає змогу визначати склад та закономірності організації окремих компонентів в єдину систему при здійсненні ДОК. Представлено отриману модель у вигляді повного функціонального оргграфа СОУ, що дозволяє встановлювати відповідність множини складових процесів динамічного керування, що відбувається у просторових координатах СОУ у відповідні часові інтервали.

4. Результати аналізу особливостей задачі автоматизованого ДОК вказують на її багатоваріантність, слабку формалізованість зв'язків її компонентів,

наявність елементів нечіткості, що разом із відсутністю існуючих ефективних моделей дозволяє зробити висновок про необхідність використання сучасних інтелектуальних технологій. Зокрема було обґрунтовано застосування, наступних методів: нечітке логічне виведення, експертні системи, інтелектуалізовані агенти та мультиагентні системи.

5. Було розроблено підхід до автоматизації динамічного оперативного керування, що дозволяє шляхом багатоітераційного перебирання значень ВДП із використанням побудованої концептуальної моделі обрати такі з них, які здатні адекватно задовольняти властивостям та обмеженням певної ГВС. Запропонований підхід до автоматизації відрізняється створенням строгої узагальненої моделі вибору СОУ, що базується на гнучких інтелектуалізованих мультиагентних конфігураціях агентно-орієнтованих підсистем для кожної властивості.

6. Створено алгоритмічне та програмне забезпечення СДОК у вигляді системи підтримки прийняття рішень, яка дозволяє розв'язувати задачі проектування або налагодження систем управління ГВС, у процесі професійної діяльності проектувальника чи оператора. Даний програмний комплекс, на відміну від існуючих, дозволяє у зручній формі поєднувати використання мультиагентних систем та нечіткої логіки та надає можливість практичного використання у якості СППР з можливістю перенаправлення керуючих впливів до відповідних модулів ОК.

7. Запропоновано вдосконалення мультиагентного методу оперативної диспетчеризації ГВС шляхом використання системи нечіткого виведення на основі розробленої бази правил. Це дозволяє агентам транспортних модулів самостійно визначати пріоритет обрання завдання на транспортне обслуговування. Даний підхід, на відміну від існуючого підходу на основі міжагентної комунікації за протоколом CNet, дозволяє агентам приймати рішення не чекаючи відповіді решти агентів.

8. Результати моделювання роботи СДОК та вирішення експериментальних задач демонструють, що СОУ, налаштована рекомендованими системою

оперативного динамічного керування значеннями показників, показала вищу продуктивність за обраними критеріями: тривалість періоду обробки – на 10,4% та середній час очікування – на 12%. Отримані результати дозволяють зробити висновки про перспективність застосування СДОК, що містить СППР на основі ГІМАС для налаштування значень показників системи оперативного управління.

9. Запропонований у роботі підхід до динамічного оперативного керування носить узагальнюючий характер та може бути застосований для динамічного корегування показників оперативного управління об'єктами різної природи. Для реалізації цього підходу мають бути виконані етапи, що докладно викладені у роботі, зокрема: визначення набору вирішальних динамічних показників ОК, створення класифікатору ВДП та логічної послідовності налаштування їх значень, визначення вимог та обмежень щодо ОК і середовища його функціонування, побудова узагальненої моделі ОК, визначення кількісних значень реляційних зв'язків між показниками та обмеженнями ОК (наприклад, на основі експертних методів), застосування розроблених алгоритмів з синтезу та безпосереднього використання гнучкого інтелектуалізованого мультиагентного середовища для вибору раціональних значень НДП.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. A multi-agent architecture for control of AGV systems / P. Farahvash, T.O. Boucher // *Robotics and computer-Integrated Manufacturing*, 20 (2004).
2. A time window approach to simultaneous scheduling of machines and material handling system in FMS / U. Bilge, G. Ulusoy // *Operations Research*, 43 (1995)
3. Abumaizar R. J. Rescheduling job shops under random disruptions / R. J. Abumaizar and J. A. Svestka. – *International Journal of Production Research*, 1997. – 35 (7). – p.p. 2065-2082.
4. Adaptive genetic fuzzy, predictive and multiobjective approach for AGVs dispatching / O. Morandin Jr, V. F. Carida, E. R. R. Kato, and C. C. M. Tuma. – *Industrial Electronics Conference*, 2011. – pp. 2317–2322.
5. Akturk, M. S. and Gorgulu, E., Match-up scheduling under a machine breakdown, *European Journal of Operational Research*, 112 (1), 81-97 (1999).
6. An approach for agent modeling in manufacturing on JADE / V.R. Komma, P.K. Jain, N.K. Mehta // *International journal of advanced manufacturing*, 2010.
7. Automated Negotiation and Decision Making in Multiagent Environments / S. Kraus. – *Mutli-agents systems and applications*, 2001
8. Aydin, M. E. and Öztemel, E., job-shop scheduling using reinforcement learning agents, *Robotics and Autonomous Systems*, 33 (2-3), 169-178 (2000).
9. Aytug, H., Lawley, M. A., McKay, K., Mohan, S., and Uzsoy, R., Executing production schedules in the face of uncertainties: A review and some future directions, *European Journal of Operational Research*, 161 (1), 86-110 (2005).
10. Bean J. C. Match up scheduling with multiple resources release dates and disruptions / J. C.Bean, J. R. Birge, J. Mittenthal, and C. E. Noon. – *Journal of Operations Research*, 1991. – 39 (3). – p.p. 471-483.
11. Belz, R. and Mertens, P., Combining knowledge-based systems and simulation to solve rescheduling problems, *Decision Support Systems*, 17 (2), 141-157 (1996).

12. Bierwirth C. Production scheduling and rescheduling with genetic algorithms / C. Bierwirth and D. C. Mattfeld. – *Evolutionary Computation*, 1999. – 7 (1). – p.p. 1-17.
13. Bilge U. A time window approach to simultaneous scheduling of machines and material handling system in FMS / U. Bilge, G. Ulusoy. – *Operations Research*, 43 (1995)
14. Bongaerts, L., Monostori, L., McFarlane, D., and Kadar, B., Hierarchy in distributed shop floor control, *Computers in Industry*, 43 (2), 123-137 (2000).
15. Brandimarte P. Modelling manufacturing systems: From aggregate planning to real-time control / P. Brandimarte and A. Villa. – Springer-Verlag, 1999.
16. Brennan R. W. Evaluating the performance of reactive control architectures for manufacturing production control / R. W. Brennan and D. H. Norrie. – *Computers in Industry*, 2001. – 46 (3). – p.p. 235-245 ().
17. Cavalieri, S., Garetti, M., Macchi, M., and Taisch, M., An experimental benchmarking of two multi-agent architectures for production scheduling and control, *Computers in Industry*, 43 (2), 139-152 (2000).
18. Chryssolouris G. Dynamic scheduling of manufacturing job shops using genetic algorithms / G. Chryssolouris and V. Subramaniam. – *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2001. – 12 (3). – p.p. 281-293.
19. Church L. K. Analysis of periodic and event-driven rescheduling policies in dynamic shops / L. K. Church and R. Uzsoy. – *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 1992. – 5 (3). – p.p. 153-163.
20. Cowling, P. I. and Johansson, M., Using real-time information for effective dynamic scheduling, *European Journal of Operational Research*, 139 (2), 230-244 (2002).
21. Cowling, P. I., Ouelhadj, D., and Petrovic, S., A Multi-agent architecture for dynamic scheduling of steel hot rolling, in *Proceedings of the Third International ICSC World Manufacturing Congress*, pp. 104-111, Rochester, NY, USA, 2001.

22. Cowling, P. I., Ouelhadj, D., and Petrovic, S., A Multi-agent architecture for dynamic scheduling of steel hot rolling, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 14, 457-470 (2003a).
23. Cowling, P. I., Ouelhadj, D., and Petrovic, S., Dynamic scheduling of steel casting and milling using multi-agents, to appear in the *Journal of Production Planning and Control, Special Issue on the Application of Multi Agent Systems to Production Planning and Control*, 2003b.
24. Cowling, P. I., Ouelhadj, D., and Petrovic, S., Multi-agent systems for dynamic scheduling, in *Proceedings of the Nineteenth Workshop of Planning and Scheduling of the UK*, pp. 45-54, Ed. Garagnani, Max, The Open University, UK., pp. 45-54, 2000.
25. Daniels, R. L. and Kouvelis, P., Robust scheduling to hedge against processing time uncertainty in single-stage production, *Management Science*, 41 (2), 363-737 (1995).
26. Davenport A. J. Slack-based techniques for robust schedules / A. J. Davenport, C. Gefflot, and J. C. Beck. – Proceedings of the Sixth European Conference on Planning (ECP2001), 2001.
27. Development of an intelligent agent-based AGV controller for a flexible manufacturing system / S.C. Srivastava, A.K. Choudhary, S. Kumar, M.K. Tiwari // *International journal of advanced manufacturing technology*, 36 (2008).
28. Dorn J. Reactive scheduling: improving the robustness of schedules and restricting the effects of shop floor disturbances by fuzzy reasoning / J. Dorn, R. M. Kerr, and G. Thalhammer. – *International Journal of Human Computer Studies*, 1995. – 42. – p.p. 687- 704.
29. Dorn, J., Case-based reactive scheduling, in Kerr, R. M. and Szelke, E. (Eds.), *Artificial Intelligence in Reactive Scheduling*, pp. 32-50, Kluwer Academic Publishers, 1995b.
30. Dorn, J., Kerr, R. M., and Thalhammer, G., Reactive scheduling in a fuzzy temporal framework, in Szelke, E. and Kerr, R. M (Eds.), *Knowledge-based Reactive Scheduling*, pp. 39-55, North-Holland, 1994.

31. Duffie, N. A. and Piper, R. S., Non-Hierarchical Control of Manufacturing Systems, *Journal of Manufacturing Systems*, 5 (2), 137-139 (1986).
32. Dutta, A., Reacting to scheduling exceptions in FMS environments, *IIE Transactions*, 22 (4), 33-314 (1990).
33. Farahvash P. A multi-agent architecture for control of AGV systems / P. Farahvash, T.O. Boucher.– Robotics and computer-Integrated Manufacturing, 20 (2004).
34. Fox, M. S., ISIS: A retrospective. Intelligent Scheduling, in Zweben, Monte and Fox, M. S. (Eds.), *Intelligent Scheduling*, pp. 1-28, Morgan Kaufmann Publishers, INC, pp. 1-28, 1994.
35. Garetti, M. and Taisch, M., Using neuronal networks for reactive scheduling, in Kerr, R. M. and Szelke, E. (Eds.), *Artificial Intelligence in Reactive Scheduling*, pp. 146-147, Kluwer Academic Publishers, 1995.
36. Garner, B. J. and Ridley, G. J., Application of neuronal network process in reactive scheduling, in Szelke, E. and Kerr, R. M. (Eds.), *Knowledge-based Reactive Scheduling*, pp. 19-28, North-Holland, 1994.
37. Gasser, L. MACE: A flexible testbed for distributed AI research. / L. Gasser, C. Braganza, N. Hermann. // Distributed Artificial Intelligence. – 1987. – Pp. 119-152
38. Glover, F. and Laguna, M., *Tabu search*. Kluwer Academic Publishers, Boston, 1997.
39. Glover, F., Kelly, J. P., and Laguna, M., Genetic algorithms and tabu search: hybrids for optimisation, *Computers of Operation Research*, 22 (1) (1995), 111-134.
40. Goldsmith, S. Y. and Interrante, L. D., An autonomous manufacturing collective for job shop scheduling, in *The Proceedings of AI & Manufacturing Research Planning Workshop*, pp. 69-74, Albuquerque, AAAI Press, 1998.
41. Gou, L., Luh, P. B., and Kyoya, Y., Holonic manufacturing scheduling: architecture, cooperation mechanism, and implementation, *Computers in Industry*, 37 (3), 213-231 (1998).

42. Henning, G. P. and Cerda, J., Knowledge-based predictive and reactive scheduling in industrial environments, *Computers and Chemical Engineering*, 24(9), 2315-2338 (2000).
43. Herroelen W. Project scheduling under uncertainty: Survey and research potentials / W. Herroelen and R. Leus. – *European Journal of Operational Research*, 2005. – 165(2). – p.p. 289-306.
44. Hewitt, C. A universal modular ACTOR formalism for AI // *Proc. Third International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-73)*. – 1973. – Pp. 235-245.
45. Holthaus, O., Scheduling in job shops with machine breakdowns: an experimental study, *Computers & Industrial Engineering*, 36 (1), 137-162 (1999).
46. Jahangirian M. Intelligent dynamic scheduling system: the application of genetic algorithms / M. Jahangirian and G. V. Conroy. – *Integrated Manufacturing Systems*, 2000. – 11 (4). – p.p. 247-257.
47. Jain, A. K. and Elmaraghy, H. A., Production scheduling/rescheduling in flexible manufacturing, *International Journal of Production Research*, 35 (1), 81-309 (1997).
48. Jensen, M. T., Improving robustness and flexibility of tardiness and total flow-time job shops using robustness measures, *Applied Soft Computing*, 1 (1), 35-52 (2001).
49. Jozefowska, J., Mika, M., Roycki, R., Waligora, G., and Wglarz, J. W., Local search meta-heuristics for discretecontinuous scheduling problems, *European Journal of Operational Research*, 107 (2) (1998), 354-370.
50. Kerr, R. M. and Szelke, E., *Artificial intelligence in reactive scheduling*, Kluwer Academic Publishers, 1995.
51. Kim M. Simulation based real-time scheduling in a flexible manufacturing system / M. Kim and Y. Kim. – *Journal of Manufacturing Management Systems*, 1994. – 13 (2). – p.p. 85-93.
52. Kraus S. Automated Negotiation and Decision Making in Multiagent Environments / S. Kraus. – *Multi-agents systems and applications*, 2001.

53. Kutanoglu, E. and Sabuncuoglu, I., An analysis of heuristics in a dynamic job shop with weighted tardiness objectives, *International Journal of Production Research*, 37 (1), 165-187 (1999).
54. Kutanoglu, E. and Sabuncuoglu, I., Routing-based reactive scheduling policies for machine failures in dynamic job shops, *International Journal of Production Research*, 39 (14), 3141-3158 (2001).
55. Le Pape, C., Scheduling as intelligent control of decision-making and constraint propagation, in Zweben, M. and Fox, M. S. (Eds.), *Intelligent Scheduling*, Morgan Kaufmann Publishers, INC, pp. 67-98, 1994.
56. Lee, C. Y. and Uzsoy, R., Minimizing makespan on a single batch processing machine with dynamic job arrivals, *International Journal of Production Research*, 37 (1), 219-236 (1999).
57. Lenat, D. BEINGs: knowledge as interacting experts // Proc. International Joint Conference on Artificial Intelligence. – 1975. – Pp. 126-133.
58. Leon, V. J., Wu, S. D., and Storer, R. H., Robustness measures and robust scheduling for job shops, *IIE Transactions*, 26 (5), 32-41 (1994).
59. Leus, R. and Herroelen, W., The complexity of machine scheduling for stability with a single disrupted job, *Operations Research Letters*, 33 (2), 151-156 (2005).
60. Li, H., Li, Z., Li, L. X., and Hu, B., A production rescheduling expert simulation system, *European Journal of Operational Research*, 124 (2), 283-293 (2000).
61. Lin, G. Y. and Solberg, J. J., An agent based flexible routing manufacturing control simulation system, in *Proceedings of the 1994 Winter Simulation Conference*, pp. 970-977, 1994.
62. Lin, G. Y. and Solberg, J. J., Integrated shop floor control using autonomous agents, *IIE Transactions*, 24 (3), 57-71 (1992).
63. Ljunberg, M. The OASIS air traffic management system // Proc. Second Pacific Rim International Conference on AI.— 1992.
64. Maturana, F., Shen, W., and Norrie, D. H., MetaMorph: an adaptive agent-based architecture for intelligent manufacturing, *International Journal of Production Research*, 37 (10), 2159-2173 (1999).

65. Mehta S. V. Predictable scheduling of a single machine subject to breakdowns / S. V. Mehta and R. Uzsoy. – International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 1999. – 12 (1). – p.p. 15-38.
66. Meziane, F., Vadera, S., Kobbacy, K., and Proudlove, N., Intelligent systems in manufacturing: current developments and future prospects, *Integrated Manufacturing Systems*, 11 (4), 218-238 (2000).
67. Miraftabi, R. Agents on the loose: An overview of agent technologies.— University of Joensuu.— 2000.
68. Miyashita K. CABINS: a framework of knowledge acquisition and iterative revision for schedule improvement and reactive repair / K. Miyashita and K. Sycara. – Artificial Intelligence, 1995. – 76 (1). – p.p. 377-426.
69. Muhlemann A. P. Job shop scheduling heuristics and frequency of scheduling / A. P. Muhlemann, G. Lockett, and C. K. Farn. – International Journal of Production Research, 1982. – 20 (2). – p.p. 227-241.
70. Multi-agent negotiation strategies utilizing heuristic for the flow of AGVs / A. Wallace // International journal of production research, 45 (2007).
71. Multicriteria meta-heuristics for AGV dispatching control based on computational intelligence / D. Naso and B. Turchiano. – 2005. – pp. 208–226.
72. Nof, S. Y. and Grant, F. H., Adaptive/predictive scheduling: review and a general framework, *Production Planning & Control*, 2 (4), 298-312 (1991).
73. O'Hare G. Foundations of Distributed Artificial Intelligence / G. O'Hare and N. Jennings. – Wiley, 1996.
74. O'kane, J. F., A knowledge-based system for reactive scheduling decision-making in FMS, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 11 (5), 461-474 (2000).
75. O'Donovan, R., Uzsoy, R., and McKay, K. N., Predictable scheduling of a single machine with breakdowns and sensitive jobs, *International Journal of Production Research*, 37 (18), 4217-4233 (1999).
76. Ouelhadj, D., Cowling, P. I., and Petrovic, S. (2003b) Utility and stability measures for agent-based dynamic scheduling of steel continuous casting, in

- Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 175-180, Taipei, Taiwan, 2003b, Selected in the finalist best student award.
77. Ouelhadj, D., Cowling, P. I., and Petrovic, S., Contract net protocol for cooperative optimisation and dynamic scheduling of steel production, in Ajith, Ibrahim, Katrin, Franke and Mario, Koppen (Eds.), *Intelligent Systems Design and Applications*, pp. 457-470, Springer-Verlag, 2003a.
 78. Ouelhadj, D., Hanachi, C., and Bouzouia, B., Farhi, A. and Moualek, A., A Multi-contract net protocol for dynamic scheduling in flexible manufacturing systems, in *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1114-1120, USA, 1999.
 79. Ouelhadj, D., Hanachi, C., and Bouzouia, B., Multi-agent architecture for distributed monitoring in flexible manufacturing systems (FMS). In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1120-1126, San Francisco, USA, 2000.
 80. Ouelhadj, D., Hanachi, C., and Bouzouia, B., Multi-agent system for dynamic scheduling and control in manufacturing cells, in *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.1256-1262, Belgium, 1998.
 81. Ovacik, I. M. and Uzsoy, R., Rolling horizon algorithms for a single-machine dynamic scheduling problem with sequence-dependent set-up times, *International Journal of Production Research*, 32 (6), 1243-1263 (1994).
 82. Park, J., Kang, M., and Lee, K., Intelligent operations scheduling system in a job shop, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 11, 111-119 (1996).
 83. Parunak H. V. Applications of distributed artificial Intelligence in industry, in O'Hare G. M. P. and Jennings N. R (Eds.), *Foundation of Distributed Artificial Intelligence*, Wiley Inter-science, 1996. – Chapter 4.
 84. Parunak, H. V. D. Foundations of Distributed Artificial Intelligence / H. V. D. Parunak // *Foundations of Distributed Artificial Intelligence*.— Wiley Inter-Science, 1994.

85. Parunak, H. V., Agents in Overalls: experiences and issues in the development and deployment of industrial agentbased systems, *International Journal of Cooperative Information Systems*, 9(3), 209-227 (2000).
86. Parunak, H. V., Baker, A. D., and Clark, S. J., The AARIA agent architecture: an example of requirements-driven agent based system design, in *Proceedings of the 1st International Conference on Autonomous Agents*, pp.482-483, California, USA, 1997.
87. Parunak, H. V., Manufacturing experience with the contract net, in Huhns, M. (Eds.), *Distributed Artificial Intelligence*, pp. 285-310, Pitman, London, 1987.
88. Pendharkar, P. C., A computational study on design and performance issues of multi-agent intelligent systems for dynamic scheduling environments, *Expert Systems with Applications*, 16 (2), 121-133 (1999).
89. Petrovic, D., and Duenas, A., (2006), A Fuzzy Logic Based Production Scheduling/Rescheduling in the Presence of Uncertain Disruptions, to appear in *Fuzzy Sets and Systems*.
90. Pham D. T. Intelligent optimisation techniques: genetic algorithms, tabu search, simulated annealing and neural networks / D. T. Pham and D. Karaboga. – Springer, 2000.
91. Pinedo M. Scheduling theory, algorithms and systems / M. Pinedo. – First edition, Prentice Hall, 1995.
92. Rajendran C. A comparative study of dispatching rules in dynamic flow shops and job shops / C. Rajendran and O. Holthaus. – European Journal of Operational Research, 1999. – 116 (1), 156-170.
93. Ramasesh, R., Dynamic job shop scheduling: a survey of simulation research, *OMEGA International Journal of Management Science*, 18 (1), 43-57 (1990).
94. Ramos, C., An architecture and a negotiation protocol for the dynamic scheduling of manufacturing systems, in *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 8-13, 1994.
95. Reeves, C. R., *Modern heuristic techniques for combinatorial problems*, John Wiley & Sons, McGraw-Hill International (UK) Limited, 1995.

96. Rossi, A. and Dini, G., Dynamic scheduling of FMS using a real-time genetic algorithm, *International Journal of Production Research*, 38 (1), 1-20 (2000).
97. Ruiz D. On-line fault diagnosis system support for reactive scheduling in multipurpose batch chemical plants / D. Ruiz, J. Canton, and N. J. Mara, A. Espuna and L. Puigjaner. – Computers and Chemical Engineering, 2001. – 25 (4). – p.p 829-837.
98. Sabuncuoglu I. Analysis of reactive scheduling problems in a job shop environment / I. Sabuncuoglu and M. Bayiz. – European Journal of Operational Research, 2000. – 126 (3). – p.p. 567-586.
99. Sabuncuoglu, I. and Karabuk, S., Rescheduling frequency in an FMS with uncertain processing times and unreliable machines, *Journal of Manufacturing Systems*, 18 (4), 268-283 (1999).
100. Sabuncuoglu, I., A study of scheduling rules of flexible manufacturing systems: a simulation approach, *International Journal of Operational Research*, 36(2), 527-546 (1998).
101. Sarin, S. C. and Salgame, R. R., Development of a knowledge-based system for dynamic scheduling, *International Journal of Production Research*, 28(8), 1499-1513 (1990).
102. Schmidt G. How to apply fuzzy logic to reactive scheduling, in Szelke E. and Kerr R. M. (Eds.), *Knowledge-based Reactive Scheduling*, North-Holland, 1994. – p.p. 57-67.
103. Shafaei, R. and Brunn, P., Workshop scheduling using practical (inaccurate) data Part 1: The performance of heuristic scheduling rules in a dynamic job shop environment using a rolling time horizon approach, *International Journal of Production Research*, 37 (17), 3913-3925 (1999a).
104. Shaw, J. M., Dynamic scheduling in cellular manufacturing systems: a framework for Network decision making, *Journal of Manufacturing Systems*, 7 (2), 83-94 (1988).

105. Shen, W. and Norrie, D. H., Agent based systems for intelligent manufacturing: a state of the art survey, *International Journal of Knowledge and Information Systems*, 1 (2), 129-156 (1999).
106. Shen, W., Norrie, D. H., and Barthes, J. P. A., *Multi-agent systems for concurrent intelligent design and manufacturing*. Taylor & Francis, London, 2001.
107. Shukla, C. S. and Chen, F. F., The state of the art in intelligent real-time FMS control: a comprehensive survey, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 7, 441-455 (1996).
108. Smith F. S. OPIS: A methodology and architecture for reactive scheduling, in Zweben, M. and Fox, M. S. / F. S. Smith. – *Intelligent Scheduling*, Morgan Kaufmann Publishers, INC, 1994.
109. Smith, F. S., Reactive scheduling systems, in Brown, D. and Scherer, W. T. (Eds.), *Intelligent Scheduling Systems*, pp. 155-192, Kluwer Academic Publisher, 1995.
110. Smith, R., The contract net protocol: high level communication and control in distributed problem solver, *IEEE Transactions on Computers*, 29 (12), 1104-1113 (1980).
111. Sousa, P. and Ramos, C., A distributed architecture and negotiation protocol for scheduling in manufacturing systems, *Computers in Industry*, 38 (2), 103-113 (1999).
112. Stoop P. P. M. The complexity of scheduling in practice, *International Journal of Operations and Production management* / P. P. M. Stoop and V. C. S. Weirs, 1996. – 16 (10). – p.p. 37-53.
113. Sun, J. and Xue, D., A dynamic reactive scheduling mechanism for responding to changes of production orders and manufacturing resources, *Computers in Industry*, 46 (2), 189-207 (2001).
114. Suresh V. Dynamic scheduling a survey of research / V. Suresh and D. Chaudhuri. – *International Journal of Production Economics*, 1993. – 32 (1). – p.p. 53-63.

115. Szelke, E. and Kerr R. M., *Knowledge-based reactive scheduling*, North-Holland, 1994.
116. Tharumarajah, A. and Bemelman, R., Approaches and issues in scheduling a distributed shop-floor environment, *Computers in Industry*, 34 (1), 95-109 (1997).
117. The Hearsay-I speech understanding system: An example of the recognition process / D. Reddy, L. Erman, R. Fennell, R. Neely // Transactions on Computers. – 1976. – April. – no. 4. – Pp. 422–431.
118. Using ARCHON to develop real-world DAI applications for electricity transportation management and particle acceleration control / N. R. Jennings, J. M. Corera, I. Laresgoiti et al. // *EEE Expert Special Issue on Real World Applications of DAI systems*.— 1996.
119. Vieira G. E. Rescheduling manufacturing systems: a framework of strategies, policies and methods / G. E. Vieira, J. W. Hermann, and E. Lin. – *Journal of Scheduling*, 2003. – 6 (1). – p.p. 36-92.
120. Vieira, G. E., Hermann, J. W., and Lin, E., Predicting the performance of rescheduling strategies for parallel machine systems, *Journal of Manufacturing Systems*, 19 (4), 256-266 (2000b).
121. Vieira, G. E., Herrmann, J. W., and Lin, E., Analytical models to predict the performance of a single machine system under periodic and event-driven rescheduling strategies, *International Journal of Production Research*, 38 (8), 1899- 1915 (2000a).
122. Wallace A. Multi-agent negotiation strategies utilizing heuristic for the flow of AGVs / A. Wallace.— *International journal of production research*, 45 (2007).
123. Wooldridge, M. J. Intelligent agents: Theory and practise / M. J. Wooldridge, N. R. Jennings // *The Knowledge Engineering Review*.— 1995.
124. Wu S. D. A rescheduling procedure for manufacturing systems under random disruptions / S. D. Wu, R. H. Storer and P. C. Chang. – *Proceedings Joint USA/German Conference on New Directions for Operations Research in Manufacturing*, 1991. – p.p. 292-306.

125. Wu, S. D., Storer, R. H., and Chang, P. C., One machine rescheduling heuristics with efficiency and stability as criteria, *Computers Operations Research*, 20 (1), 1-14 (1993).
126. Yamamoto M. Scheduling/rescheduling in the manufacturing operating system environment / M. Yamamoto and S. Y. Nof. – International Journal of Production Research, 1985. – 23 (4). – p.p. 705-722.
127. Youssef, H., Sait, S.M., and Adiche, H., Evolutionary algorithms, simulated annealing and tabu search: a comparative study, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 14 (2) (2001), 167-181.
128. Zadeh Lotfi A. Fuzzy Sets / Lotfi A. Zadeh. – Information and Control, 8 (1965).
129. Zhou, H., Feng, Y., and Han, L., The hybrid heuristic genetic algorithm for job shop scheduling, *Computers and Industrial Engineering*, 40 (3) (2001), 191-200.
130. Zweben M. Intelligent scheduling / M. Zweben and M. S. Fox. – Morgan Kaufmann Publishers, INC, 1994.
131. Алексеев А.В. Интеллектуальные системы принятия проектных решений / А.В. Алексеев, А.Н. Борисов, Э.Р. Вилюмс. – Рига: Зинатне, 1997. – 317 с.
132. Алиев Р.А. Производственные системы с искусственным интеллектом / Р.А. Алиев, Н.М. Абдикеев, М.М. Шахназаров. – М.: Радио и связь, 1990. – 264 с.
133. Блехерман М.Х. Оперативно-производственное планирование гибких производственных систем / М.Х.Блехерман. - М.:Высш.шк., 1989. -95с.
134. Васильев В.Н. Организация, управление и экономика гибкого интегрированного производства в машиностроении / В.Н. Васильев. – М.: Машиностроение, 1986. – 312 с.
135. Вороносский Г.К. Генетические алгоритмы, искусственные нейронные сети и проблемы виртуальной реальности / Г.К. Вороновский, К.В. Махотило, С.Н. Петрашев, С.А. Сергеев. – Х.: Основа, 1997. – 112 с.
136. Гавриш А.П. Гибкие производственные системы / А.П. Гавриш, Л.С. Ямпольский. – К.: Вища школа, 1989. – 407 с.

137. Герасимов Б.Н. Інтелектуальні системи підтримки прийняття рішень / Б.М. Герасимов, В.М. Локазюк, О.Г. Оксіюк, О.В. Поморова. – К.: Європ. ун-т, 2007. – 255 с.
138. Горанский Г.К. Автоматизированные системы технологической подготовки производства в машиностроении / Г.К. Горанский. – К: Техника, 1976.
139. Грувер М. САПР и автоматизация производства / М. Грувер, Э. Зиммерс. М.: Мир, 1987. — 528 с.
140. Давыгора Н.В. Гибкие производственные системы, промышленные роботы, робототехнические комплексы / Н.В. Давыгора, - М.: Высш. шк., 1989. – 110 с.
141. Джексон П. Введение в экспертные системы / П.Джексон. – М.: Вильямс, 2001. – 624 с.
142. Довбня Н.М. Работизированные технологические комплексы и гибкие производственные системы в машиностроении / Н.М. Довбня, А.Н. Кондратьев, Е.И. Юревич. – Л.: Машиностроение, 1990. – 303 с.
143. Домарацкий А.Н. Системное проектирование интегрированных производственных комплексов / А.Н. Домарацкий, А.А. Лескин, В.М. Пономарев и др.; под общ. ред. д-ра техн. наук проф. В.М. Пономарева. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1986. – 319 с.
144. Дьяков С.О. Динамічне планування у виробничих системах в умовах невідзначеності / Дьяков С.О., Ямпольський Л.С. – Технологічні комплекси, 2014. – 2 (10). – С. 22-26
145. Дьяков С.О. Мультиагентна система диспетчеризації автономних транспортних модулів на основі нечіткої логіки / С.О. Дьяков, Л.С. Ямпольський. – Адаптивні системи автоматичного управління, № 1 (26) 2015.
146. Дьяков С.О. Мультиагентне середовище моделювання задач диспетчеризації автономних транспортних модулів / С.О. Дьяков, Л.С. Ямпольський. – АСАУ, 2013 № 2(23). – с. 9-17.

147. Дьяков С.О. Мультиагентне середовище поетапного синтезу системи динамічного керування у гнучкій виробничій системі / С.О. Дьяков. – Адаптивні системи автоматичного управління, №1 (28) 2016.
148. Дьяков С.О. Обґрунтування вибору топології нейромережі в задачах навігації рухомих об'єктів / С.О. Дьяков, Л.С. Ямпольський. – Адаптивні системи автоматичного управління, 1 (22) 2013.
149. Дьяков С.О. Узагальнена концептуальна модель системи динамічного керування у гнучких виробничих системах / Дьяков С.О., Ямпольський Л.С. – Вісник ЖДТУ. Серія: Технічні науки, 2015. – 1 (72).
150. Дьяконов В.П. Matlab 6.5 SP1/7/7 SP1/7 SP2 + Simulink 5/6. Инструменты искусственного интеллекта и биоинформатики / В.П. Дьяконов, В.В. Круглов. – М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2006. – 456 с.
151. Дэвид Г. Метод парных сравнений. Статистика / Г. Дэвид. – М.: Статистика, 1978. – 144 с.
152. Егоров В.А. Транспортно-накопительные системы для ГПС / В.А. Егоров, В.Д. Лузанов, С.М. Щербаков. – Л.: Машиностроение, 1989. – 293 с.
153. Емельянов С.В. Многокритериальные методы принятия решений / С.В. Емельянов, О.И. Ларичев. – М.: Знание, 1985. – 32 с.
154. Емельянов С.В. Управление ГПС: модели и алгоритмы/Под общ. ред. С.В.Емельянова. - М.: Машиностроение, 1987. -368с.
155. Зайченко Ю.П. Нечеткие модели и методы в интеллектуальных системах / Ю.П. Зайченко. – Киев: Слово, 2008. – 344 с.
156. Зайченко Ю.П. Основы проектування інтелектуальних систем. Навчальний посібник / Ю.П. Зайченко. - К.: Слово, 2004. - 352 с.
157. Коровин Б.Г. Системы программного управления промышленными установками и робототехническими комплексами / Б.Г.Коровин, Г.И. Прокофьев, Л.Н. Рассудов– Л.: Энергоатомиздат, 1990. –352с.
158. Костюк В.И. Промышленные роботы / В.И. Костюк, А.П. Гавриш, Л.С. Ямпольский, А.Г. Карлов. – К.: Вища шк. Главное изд-во, 1985. – 359 с.

159. Костюк В.І. Робототехніка: Підручник / В.І. Костюк, Г.О. Спину, Л.С. Ямпольський, М.М. Ткач. – К.: Вища шк., 1994. – 447 с.
160. Кравченко Т.К. Экспертная система принятия решений / Т.К. Кравченко, Г.И. Пернинов. – М.: ГУ-ВШЭ, 1998. – 209 с.
161. Лапковський С.В. Системно-структурні принципи комплексної технологічної підготовки виробництва при проектуванні гнучких виробничих систем / С.В. Лапковський, О.А.Стенін, М.О. Солдатова. – Системні дослідження та інформаційні технології №1, 2004.
162. Ларичев О.И. Системы поддержки принятия решений. Современное состояние и перспективы их развития / О.И. Ларичев, А.В. Петровский. – Итоги науки и техники, 1997.
163. Леоненков А. Нечеткое моделирование в среде MATLABи FuzzyTECH/ А. Леоненков. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 736 с.
164. Лоу А.М. Имитационное моделирование / А.М. Лоу, В. Дэвид Кельтон. – СПб.: BHV, 2004. – 848 с.
165. Лысенко Э.В. Проектирование автоматизированных систем управления технологическими процессами / Лысенко Э.В.- М.:Радио и связь, 1987.- 272с.
166. Макаров И.М. Основы автоматизации управления производством/Под ред. И.М.Макарова. - М.:Высш.шк., 1983. -504с.
167. Макаров И.М. Робототехника и ГАП. В 9-ти кн. Кн.3. Управление робототехническими системами и гибкими автоматизированными производствами / Под ред. Макарова И.М. -М.:Высш.шк., 1986. -159с.
168. Меткин Н.П. Технологическая подготовка гибких автоматизированных сборочно-монтажных производств в приборостроении / Н.П. Меткин, М.С. Лапин, В.И. Гольц, П.И. Алексеев. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1986. – 192 с.
169. Основы MVVM Pattern'а [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://svyatoslavpankratov.blogspot.com/2011/11/mvvm-pattern-1.html>

170. Приложения WPF с шаблоном проектирования модель-представление-модель представления [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://msdn.microsoft.com/ru-ru/magazine/dd419663.aspx>
171. Проников А.С. Проектирование металлорежущих станков и станочных систем : справочник-учебник в 3-х т. Т. 3: Проектирование станочных систем / под общ ред. А. С. Проникова. – М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана; Станкин, 2000. – 584 с.
172. Пуховский Е.С. Гибкие производственные системы машиностроительного производства / Е.С. Пуховский. – К.: УМК ВО, 1991. – 240с.
173. Пуховский Е.С. Технологические основы гибкого автоматизированного производства: Учеб. пособие / Е.С. Пуховский. – К.: Вища шк., 1989. – 240с.
174. Пуховский Е.С. Технология гибкого автоматизированного производства / Е.С. Пуховский, Н.Н. Мясников. – К.: Техника, 1989. – 207 с.
175. Сатановский Р.Л. Организационное обеспечение гибкости машиностроительного производства / Р.Л. Сатановский. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1987. – 96 с.
176. Ситник В.Ф. Системи підтримки прийняття рішень: навчальний посібник / В.Ф. Ситник. – К.: КНЕУ, 2004. – 614 с.
177. Слепцов А.И. Автоматизация проектирования управляющих систем гибких автоматизированных производств / А.И.Слепцов, А.А.Юрасов. -К.: Техника, 1986. -110с.
178. Соломенцев Ю.М. Управление гибкими производственными системами / Ю.М.Соломенцев,В.Л. Сосонкин.- М.:Машиностроение, 1988.- 352с.
179. Сосонкин В.Л. Программное управление технологическим оборудованием / В.Л.Сосонкин.- М.:Высш.шк., 1991. – 512с.
180. Томашевский В.Н. Решение практических задач методами компьютерного моделирования / В.Н. Томашевский, Е.Г. Жданова, А.А. Жолдаков - К.: Изд-во "Корнійчук", 2001. - 268 с.
181. Томашевський В.М. Моделювання систем: Підручник / В.М. Томашевський. – К.: Видавн. група ВНУ, 2005. – 352 с.

182. Федотов А.И. Гибкие производственные системы сборки / А.И. Федотов. – Л.: Машиностроение, 1989. – 349 с.
183. Черпаков Б.И. Проблемы комплексной автоматизации производства / Б.И. Черпаков. – М.: ВНТИЦентр, 1986. – 128 с.
184. Шеннон Р.Н. Имитационное моделирование систем – искусство и наука / Р.Н. Шеннон. – М.: Мир, 1978. – 425 с.
185. Шифрин Б.М. Исследование и разработка моделей и средств поддержки принятия организационных решений в нечетком аспекте: Дис. канд. техн. наук. – СПб.: ГЭТУ, 1999. – 134 с.
186. Шкурба В.В. Задачи календарного планирования и методы их решения / В.В. Шкурба.- К.:Наукова думка, 1966
187. Ямпольский Л.С. Автоматизация проектирования и управления в гибком производстве / Л.С.Ямпольский, З.Банашак. - К.: Техника, Варшава: Научно-техническое издательство, 1989. -268с.
188. Ямпольский Л.С.Автоматизированные системы технологической подготовки робототехнического производства / Л.С.Ямпольский, О.М. Калинин, М.М. Ткач. – К.: Вища школа, 1987. – 271 с.
189. Ямпольський Л.С. Агентно-орієнтована ідентифікація нейронних сіток / Л.С. Ямпольський. – Адаптивні системи автоматичного управління, 2015. – 2 (27).
190. Ямпольський Л.С. Гнучкі комп'ютеризовані системи: проектування, моделювання і управління: підручник / Л.С. Ямпольський, П.П. Мельничук, Б.Б. Самотокін, М.М. Поліщук, М.М. Ткач, К.Б. Остапченко, О.І. Лісовиченко. – Житомир: ЖДТУ, 2005.
191. Ямпольський Л.С. Концептуальна модель групового виробництва / Л.С. Ямпольський, Е.С. Пуховський. – АСАУ №11 (31), 2007. – с. 99-111.
192. Ямпольський Л.С. Нейротехнології та нейросистеми / Л.С. Ямпольський. – К.: Монографія. – "Дорадо-Друк", 2015. – 508 с.
193. Ямпольський Л.С. Нечітка ітераційна метайдентифікація штучних нейросіток в мультиагентному середовищі / Л.С. Ямпольський. – Вісник кіровоград-

ського національного технічного університету – Кіровоград: КНТУ. – №26 – 2013. – С. 207 – 218.

194. Ямпольский Л.С. Оптимизация технологических процессов в гибких производственных системах / Л.С.Ямпольский, М.Н. Полищук. - К.: Техника, 1988. – 175 с.
195. Ямпольский Л.С. Системи штучного інтелекту в плануванні, моделюванні та управлінні: підруч. для студ. вищ. навч. закл. / Л.С. Ямпольський; Б.П. Ткач; О.І. Лісовиченко. – К.: ДП «Вид Дім «Персонал», 2011, – 544 с.
196. Ямпольский Л.С. Технологическая подготовка роботизированного производства / Л.С.Ямпольский, М.М. Ткач, В.И. Костюк. – Киев: Вища школа, 1984. – 72 с.
197. Ямпольский Л.С. Управление дискретными процессами в ГПС/Под ред. Л.С. Ямпольского -К.: Техника, 1992. -251с.

ДОДАТОК А

Таблиця А1.

Оцінка поєднання показників СОУ та вимог і обмежень ГВС: підходи до оперативного планування, невизначеності

Підходи	Реактивний	Прогностично-реактивний	Робастний прогностично-реактивний	Робастний превентивний
Невизначеності				
Несправність виробничого модуля	0,6	0,7	0,8	0,4
Несправність інструменту	0,7	0,8	0,3	0,6
Затримка або дефектність матеріалу	0,6	0,7	0,4	0,8
...
Зміна пріоритету задач	0,7	0,6	0,8	0,3
Зміна терміну виконання операції	0,5	0,8	0,7	0,6

Таблиця А2.

Оцінка поєднання показників СОУ та вимог і обмежень ГВС: архітектури СОУ, підходи до оперативного планування

Архітектури	Централізована	Розподілена
Підходи		
Реактивний	0,7	0,4
Прогностично-реактивний	0,5	0,8
Робастний прогностично-реактивний	0,3	0,8
Робастний превентивний	0,4	0,7

Таблиця А3.

Оцінка поєднання показників СОУ та вимог і обмежень ГВС: методи оперативної диспетчеризації, підходи до оперативного планування

Методи	Правила диспетчеризації	Евристики	...	Мультиагентні системи
Підходи				
Реактивний	0,9	0,3	...	0,4
Прогностично-реактивний	0,7	0,5	...	0,9
Робастний прогностично-реактивний	0,5	0,8	...	0,8
Робастний превентивний	0,4	0,6	...	0,6

Таблиця А4.

Оцінка поєднання показників СОУ: стратегії оперативного перепланування, підходи до оперативного планування

Стратегії	Повне перепланування	Корекція плану
Підходи		
Реактивний	0,2	0,9
Прогностично-реактивний	0,4	0,6
Робастний прогностично-реактивний	0,2	0,8
Робастний превентивний	0,3	0,7

Таблиця А5.

Оцінка поєднання показників СОУ: політики часу оперативного перепланування, підходи до оперативного планування

Політики часу	Періодична	Подієва	Гібридна
Підходи			
Реактивний	0,3	0,8	0,5
Прогностично-реактивний	0,5	0,7	0,9
Робастний прогностично-реактивний	0,4	0,6	0,8
Робастний превентивний	0,8	0,5	0,7

ДОДАТОК Б

ГРАФІЧНА НОТАЦІЯ IDEF0

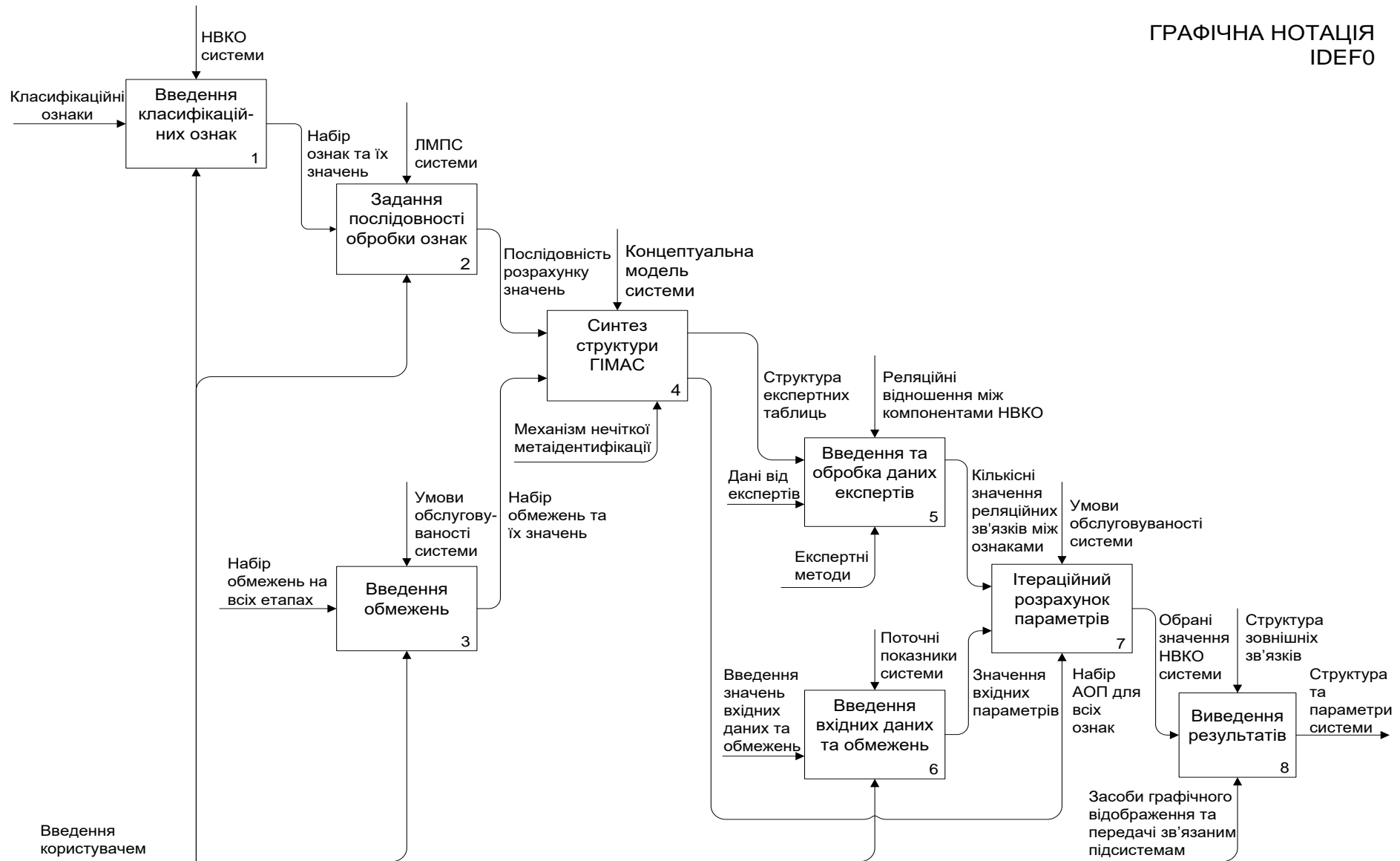


Рисунок Б1. Графічна нотація функціональної моделі СППР

ДОДАТОК В

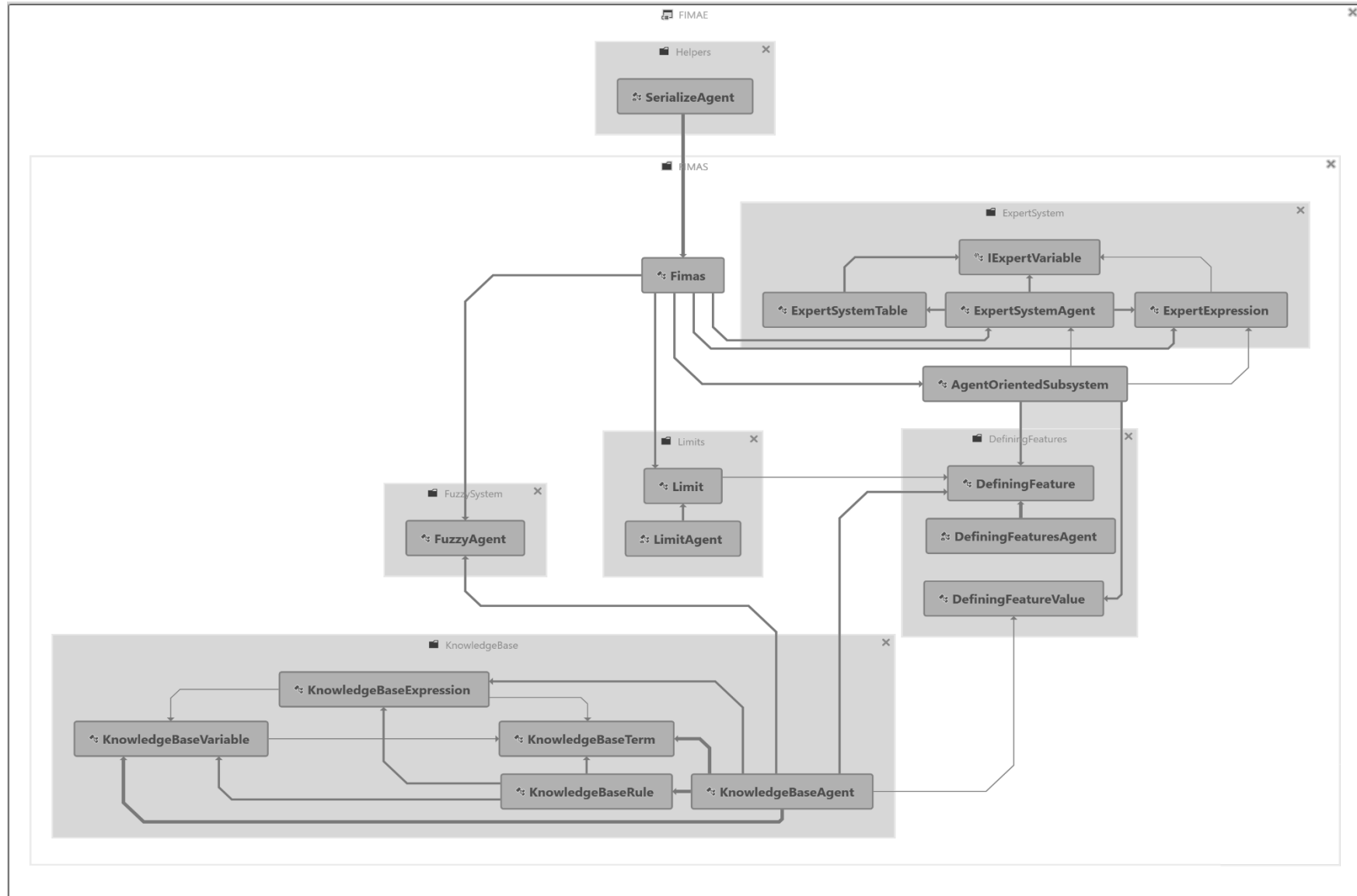
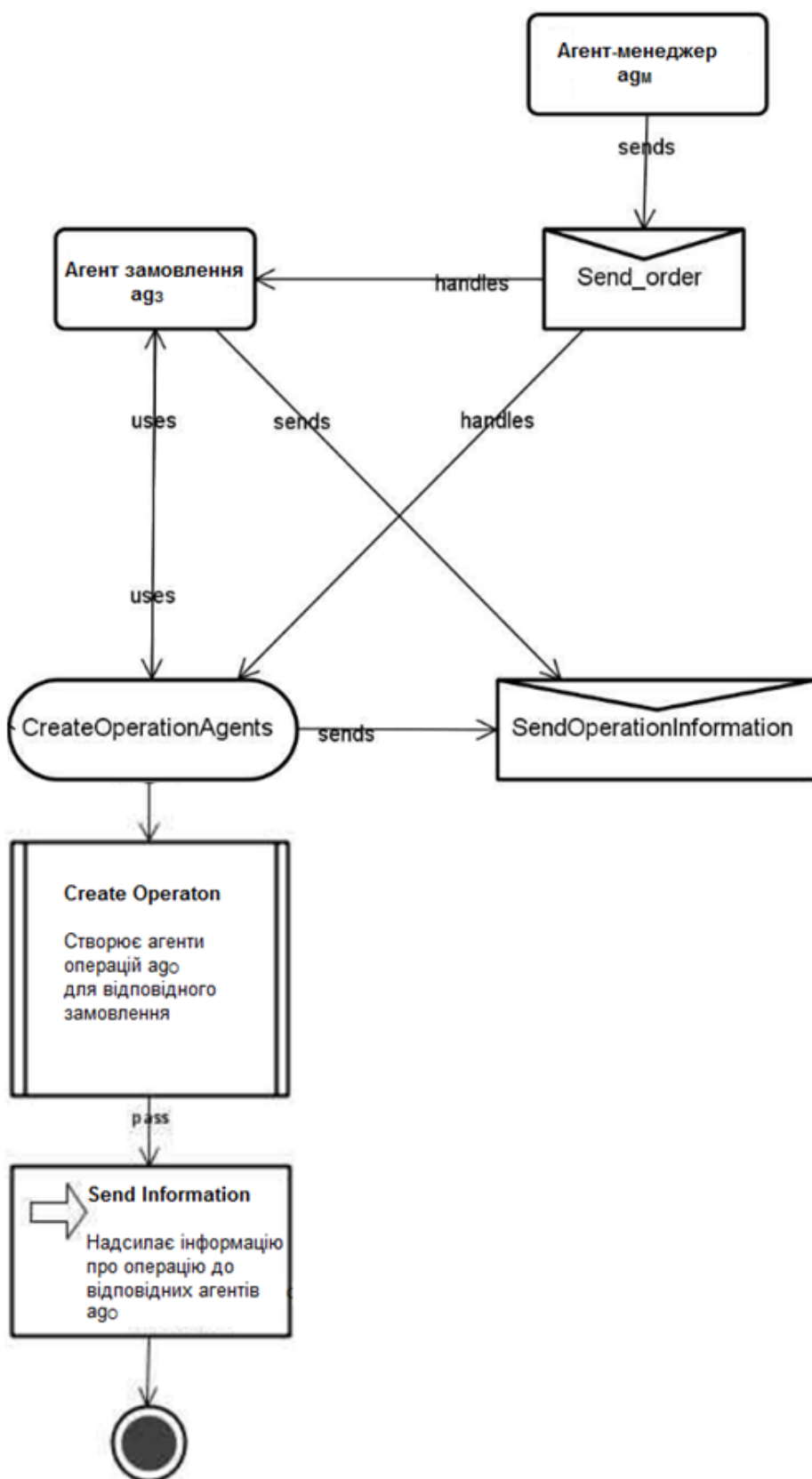
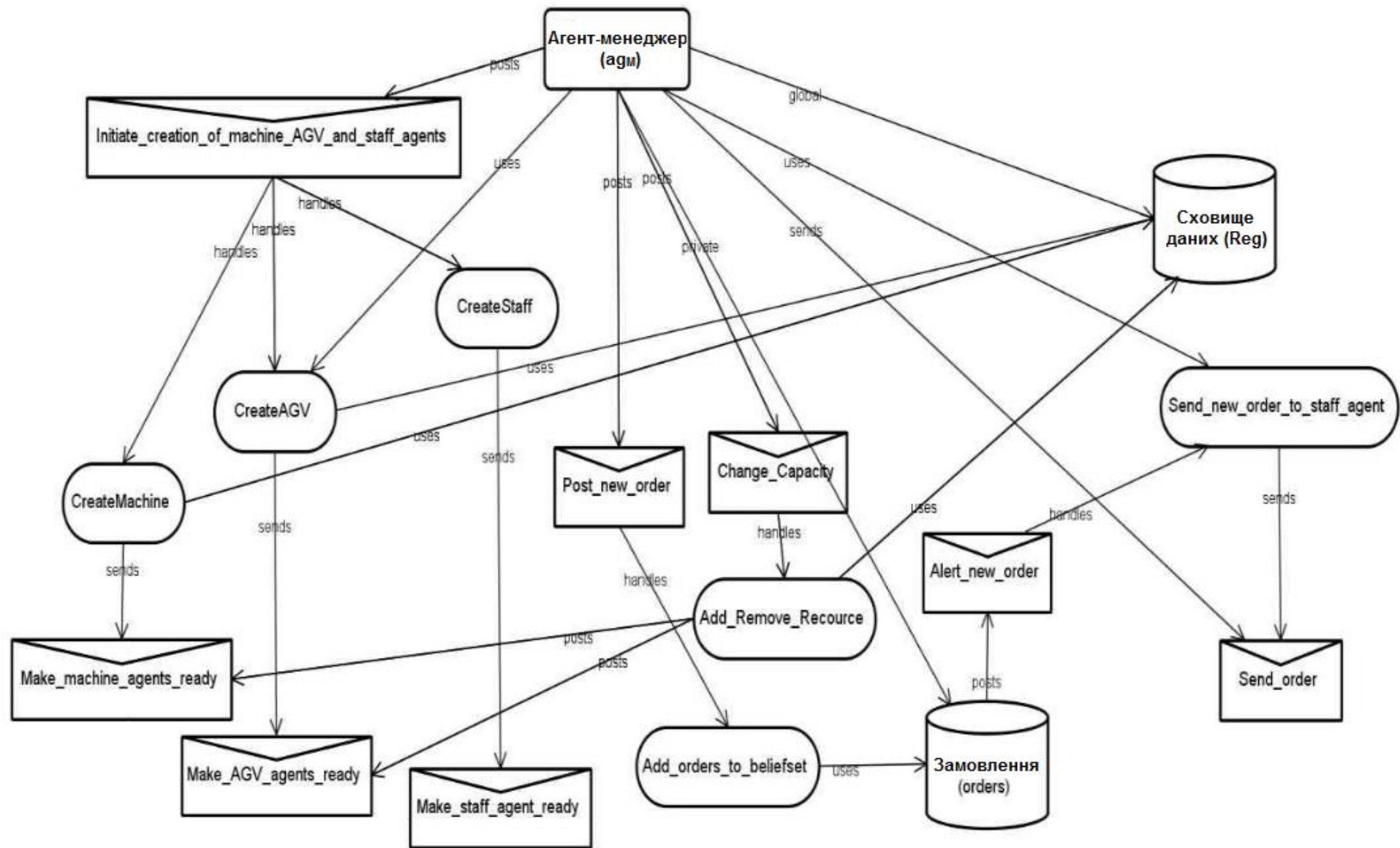
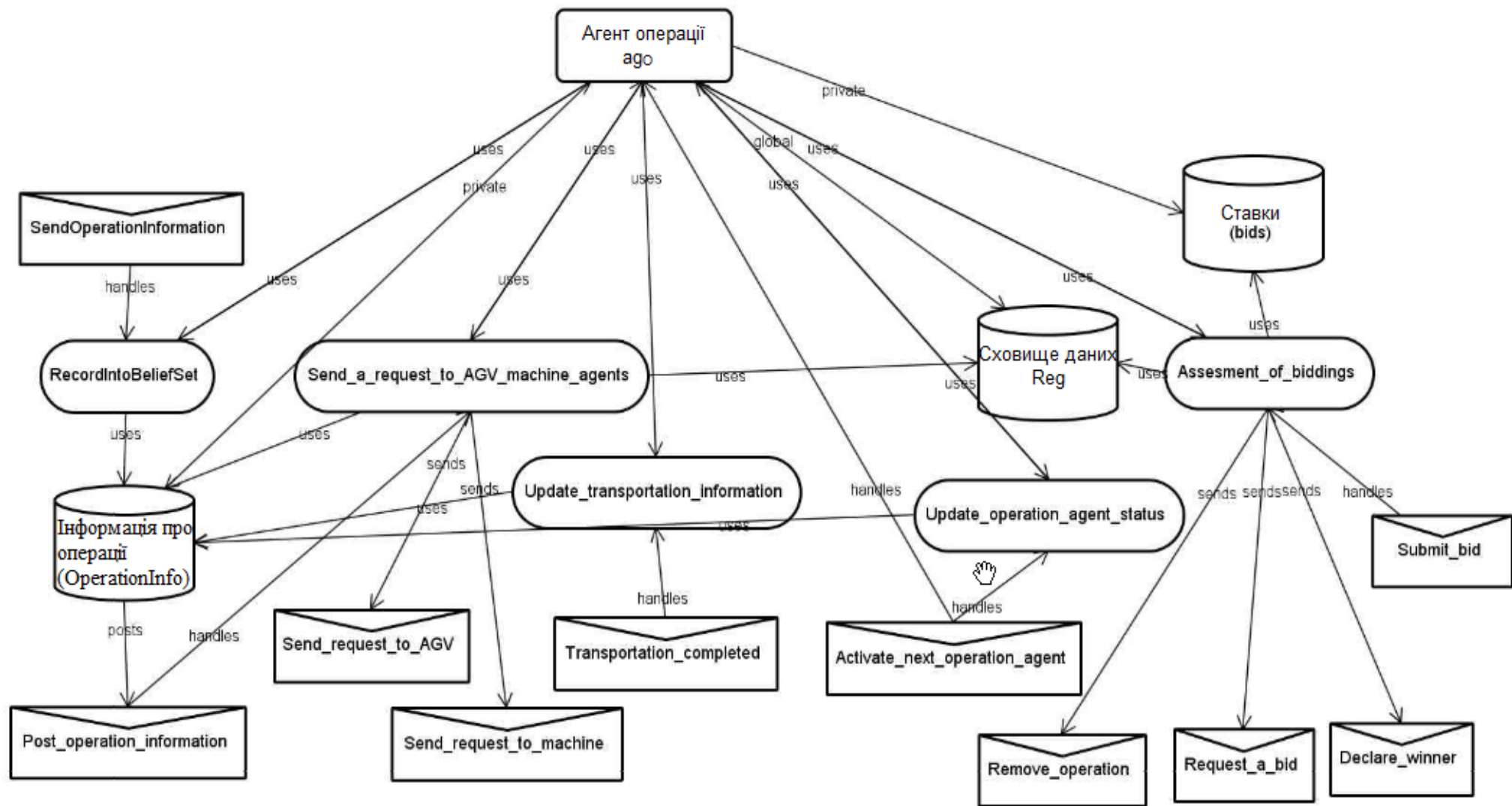


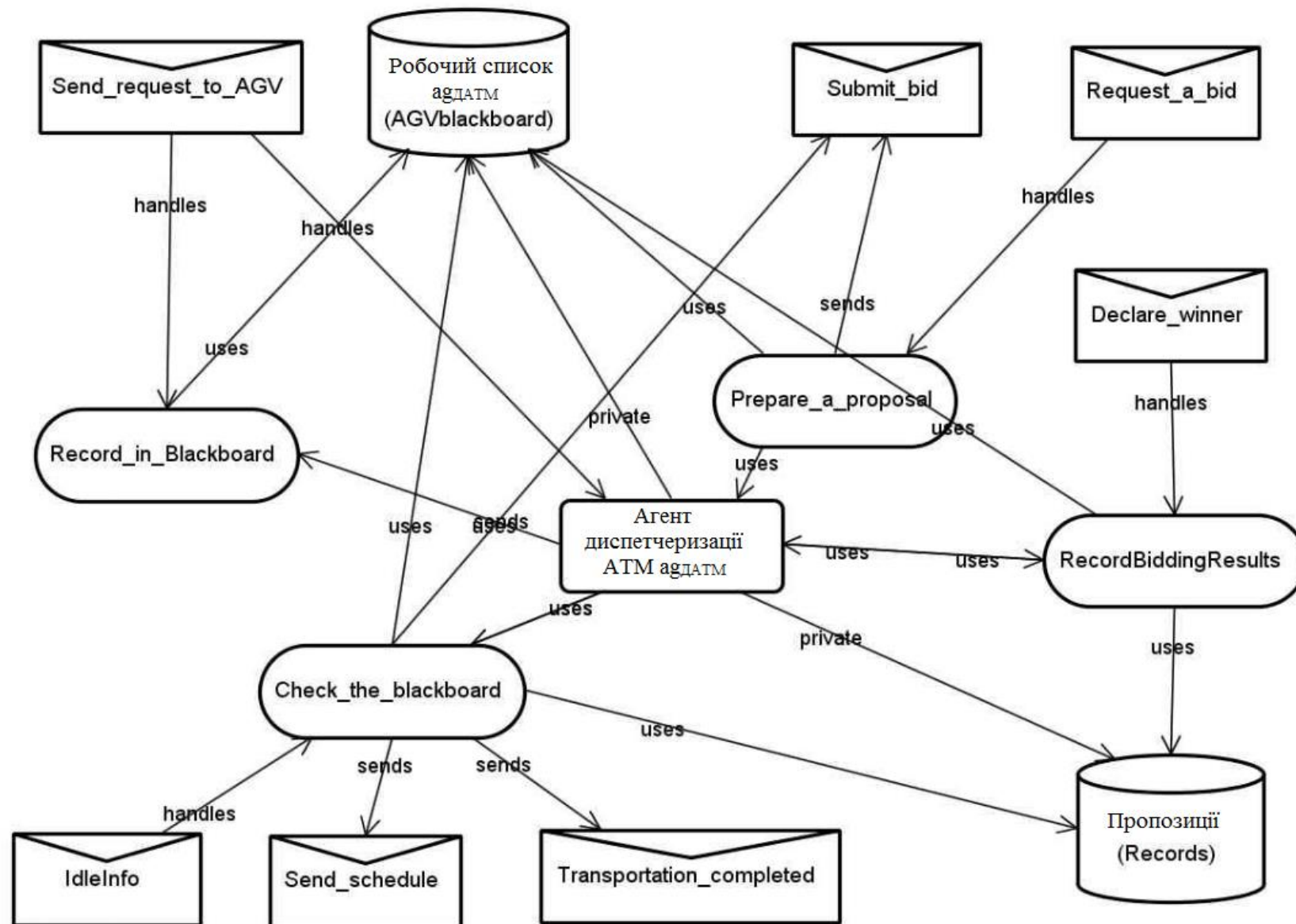
Рисунок В1. Діаграма залежності класів СППР на основі FIMAS

ДОДАТОК Г

Рисунок Г1. Архітектура агента замовлення *ag3*

Рисунок Г2. Архітектура агента-менеджера *agm*

Рисунок Г3. Архітектура агента операції *ago*

Рисунок Г4. Архітектура агента диспетчеризації $ATM ag_{ATM}$

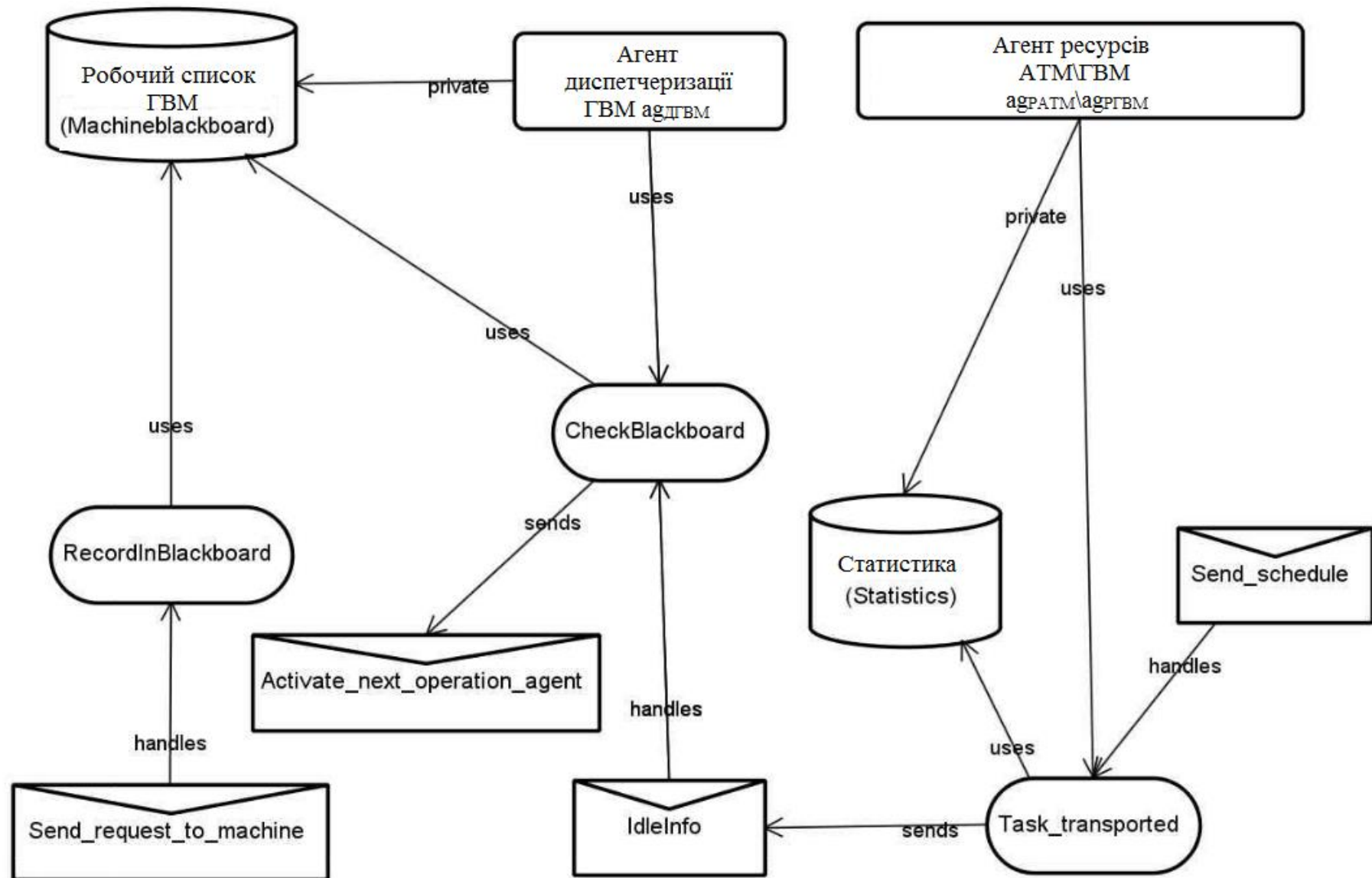


Рисунок Г5. Архітектура агента диспетчеризації GBM $ag_{ДГВМ}$ та агентів ресурсів

ЗАТВЕРДЖУЮ

Декан Факультету інформатики та
обчислювальної техніки
Національного технічного
університету України "Київський
політехнічний інститут імені Ігоря
Сікорського"
д.т.н., проф. Павлов О.А.
2016р.

АКТ

впровадження результатів кандидатської дисертації Дьякова Сергія Олександровича на тему «Динамічне оперативне керування гнучкою виробничою системою в умовах невизначеності».

Ми, що нижче підписалися, в.о. завідуючого кафедрою технічної кібернетики (ТК), кандидат технічних наук, доцент Ткач Михайло Мартинович, кандидат технічних наук, доцент Лісовиченко Олег Іванович та кандидат технічних наук, доцент Остапченко Костянтин Борисович, склали цей акт, який засвідчує, що результати дисертації Дьякова С.О. були використані при розробці "Мультимедійного комплексу комп'ютерно-інтегрованих засобів дистанційно-віртуального навчання з використанням інтернет-технологій" авторів проф. Ямпольський Л.С., доц. Лісовиченко О.І., проф. Мельничук П.П., ст. викл. Олійник В.В., доц. Остапченко К.Б., доц. Поліщук М.М., проф. Ткач Б.П., доц. Ткач М.М., що був висунутий на здобуття Державної премії України в галузі освіти в номінації "вища освіта".

Мультимедійні підручники із комплексу передані для впровадження у навчальний процес у Технічний університет Софії (Болгарія), Саратовський державний технічний університет та Новосибірський державний технічний університет (Росія), які є учасниками спільного з КПІ ім. Ігоря Сікорського проекту TEMPUS (Подвійний магістерський диплом з автоматизації/мехатроніки країн ЄС - країн партнерів: номер проекту 517138-TEMPUS-1-2011-1-CZ-TEMPUS-JPCR).

Також, результати дослідження Дьякова С.О., що використані у книгах 5-7 зазначеного мультимедійного комплексу та при розробці лабораторно-дослідних стендів до нього, застосовуються при проведенні лекційних та практичних занять з дисциплін "Нейро-технології та нейрокомп'ютерні системи", "Системи штучного інтелекту" на кафедрі технічної кібернетики КПІ ім. Ігоря Сікорського (напрямок 6.050201 "Системна інженерія").

В.о. зав. кафедрою ТК

Доцент кафедри ТК

Доцент кафедри ТК

Ткач М.М.

Лісовиченко О.І.

Остапченко К.Б.