

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

**ДЬЯКОВ СЕРГІЙ ОЛЕКСАНДРОВИЧ**



УДК 621.865.8

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

05.13.07 – Автоматизація процесів керування

**Автореферат**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Київ - 2017

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі технічної кібернетики Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”.

**Науковий керівник:** кандидат технічних наук, професор  
**Ямпольський Леонід Стефанович,**  
Національний технічний університет України  
“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”,  
професор кафедри технічної кібернетики

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, старший науковий співробітник  
**Ланкін Юрій Миколайович,**  
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України,  
завідувач відділу автоматичного регулювання процесів  
зварювання і нанесення покриттів

кандидат технічних наук, доцент  
**Поліщук Михайло Миколайович,**  
Київське спеціальне конструкторське  
бюро “СКБ-Перспектива”,  
головний конструктор

Захист відбудеться «13» березня 2017 р. о 14<sup>00</sup> год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.04 Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м.Київ-56, проспект Перемоги, 37, корп. 18, ауд. 438.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ-56, проспект Перемоги, 37.

Автореферат розісланий «03» лютого 2017 р.

В. о. вченого секретаря  
спеціалізованої вченої ради  
Д 26.002.04



В.М. Томашевський

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**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) СОУ*.

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.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота тісно пов'язана з планами 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 / механотроніці країн ЄС – країн партнерів" №517138-TEMPUS-1-2011-1-CZ-TEMP-JPCR.

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

Для досягнення поставленої мети в роботі розв'язуються наступні 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.

*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.

**Методи дослідження.** Для розв'язання поставлених в дисертаційній роботі задач використано наступні 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 в наступному:

1. 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;

2. Вперше розроблено мультиагентний підхід до автоматизації процесу вибору значень показників системи оперативного управління гнучкою виробничою системою на основі нечіткої метайдентифікації;

3. 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.** Визначається спрямованістю дисертаційної роботи на вирішення актуальної задачі – зменшення трудомісткості та підвищення якості рішень, що приймаються при виборі основних показників системи оперативного управління, які безпосередньо впливають на керування в реальному часі в умовах невизначеності.

Практичні результати роботи:

1. Синтезовано концептуальну модель та запропоновано класифікатор основних показників динамічного оперативного керування ГВС, що можуть застосовуватися як інформаційне забезпечення розв'язання задачі автоматизації процесу знаходження значень даних показників;

2. Розроблено мультиагентний підхід до автоматизації процесу вибору значень показників динамічного оперативного керування, що може бути використаний як

методичне забезпечення для розробки програмних продуктів автоматизованих систем керування ГВС.

3. Створено алгоритмічне та програмне забезпечення системи підтримки прийняття рішень для автоматизації процесу вибору значень показників динамічного оперативного керування ГВС.

**Особистий внесок здобувача.** Усі результати, що складають основний зміст дисертаційної роботи, отримані автором самостійно.

У спільних роботах автору належить: аналіз топології нейромереж, що можуть бути використані для розв'язання задачі навігації транспортних модулів гнучкої виробничої системи та обґрунтування доцільності використання нейро-фазі систем [1]; синтез моделі гнучкої виробничої системи на основі мультиагентного середовища та реалізація процедур спілкування між агентами за протоколом CNet [2]; аналіз та оцінка основних існуючих підходів до здійснення динамічного планування у системі оперативного управління гнучкою виробничою системою [3]; синтез узагальненої концептуальної моделі системи динамічного керування, як складової системи оперативного управління гнучкою виробничою системою [5]; обґрунтування та реалізація мультиагентного підходу до автоматизації процесу налаштування системи динамічного керування ГВС [6].

**Апробація результатів роботи.** Основні результати роботи 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 нейро-фазі системи", 16-20.09.2013р., м. Київ; ХХІ міжнародна конференція з автоматичного управління "Автоматика 2014", з темою "Мультиагентна система диспетчеризації автономних транспортних модулів", 23-27.09.2014, м. Київ; ІІІ 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.** Основні положення та результати дисертаційної роботи викладено в 10 наукових працях, 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 РІНЦ; 1 – WorldCat, Ulrich's Periodicals Directory, Google scholar та РІНЦ; 4 – WorldCat, Google scholar та РІНЦ), 4 тези доповідей в збірниках матеріалів конференцій, в тому числі міжнародних.

**Структура й обсяг роботи.** Дисертація складається зі вступу, 5 розділів, списку використаних джерел (197 найменувань) та 4 додатки. Загальний обсяг роботи 186 сторінок. Основна частина дисертації займає 155 сторінок, в тому числі 44 рисунки.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність теми дисертаційної роботи, сформована мета, ідея і задачі дослідження, наукова новизна й практичне значення отриманих результатів, наведені наукові положення, що виносяться на захист, наукове та практичне значення роботи, дані про публікації, апробацію та впровадження розробок і результатів дослідження.

У першому розділі було проведено аналіз сучасного стану проблеми оперативного керування у ГВС в умовах невизначеності, наведені результати інформаційного пошуку за темою дослідження, аналіз існуючих підходів до налаштування та реалізації процесу оперативного керування ГВС, наводиться постановка наукової проблеми та задачі дослідження.

Показано провідну роль системи оперативного управління (СОУ) у здійсненні процесу керування ГВС в умовах невизначеності, враховуючи значну кількість невизначених подій на оперативному рівні функціонування виробництва та їх вплив на його хід та продуктивність.

Визначення 1. Динамічне оперативне керування (ДОК) ГВС – це процес налаштування на етапах проектування та функціонування виробничої системи таких значень вирішальних динамічних показників, що здатні задовольнити поточні вимоги та обмеження ГВС (ВО ГВС).

Визначення 2. Вирішальні динамічні показники (ВДП) СОУ – показники СОУ ГВС, що безпосередньо впливають на здійснення процесу оперативного управління виробництвом в реальному часі в умовах невизначеності.

Проведено структурно-функціональний аналіз СОУ, як об'єкта динамічного оперативного керування. У ході аналізу визначено, що загальна функція  $\Phi_{\text{СОУ}}$  процесу оперативного управління в умовах невизначеності полягає у розв'язанні задачі просторового та часового упорядкування необхідного обсягу запланованих робіт та може бути подана у вигляді множини функцій необхідних операцій:

$$\Phi_{\text{СОУ}} \rightarrow \{\Phi_{\text{ОП}}, \Phi_{\text{ОКОН}}, \Phi_{\text{ОКОР}}, \Phi_{\text{ОД}}\}, \quad (1)$$

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.

Кожна з множини виділених функцій реалізується відповідним структурно-функціональним модулем СОУ ГВС:

$$\{\Phi_{\text{ОП}} \rightarrow F^{\text{ОП}}, \Phi_{\text{ОКОН}} \rightarrow F^{\text{ОКОН}}, \Phi_{\text{ОКОР}} \rightarrow F^{\text{ОКОР}}, \Phi_{\text{ОД}} \rightarrow F^{\text{ОД}}\}, \quad (2)$$

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.

На основі структурно-функціонального аналізу СОУ визначено набір узагальнюючих вирішальних динамічних показників  $P_{\text{ВДП}}$ , що мають основний вплив на функціонування системи в умовах невизначеності:

$$P_{\text{ВДП}} = \{P_{\text{ОП}}, P_{\text{ОКОН}}, P_{\text{ОКОР}}, P_{\text{ОД}}\}, \quad (3)$$

де:  $P_{\text{ОП}}$  – показник оперативного планування;  $P_{\text{ОКОН}}$  – показник оперативного

контролю;  $P_{\text{ОКор}}$  – показник оперативної корекції;  $P_{\text{Од}}$  – показник оперативної диспетчеризації.

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

$$D: p = P_{\text{СОУ}_i} : \{ \Phi_{\text{Оп}} \vee \Phi_{\text{ОКон}} \vee \Phi_{\text{ОКор}} \vee \Phi_{\text{Од}} \} \times L \times U \quad (4)$$

Обґрунтовано необхідність *автоматизації процесу динамічного оперативного керування*, що визначається як автоматизація та інтелектуалізація процедури відбору таких значень вирішальних динамічних показників, з якими буде досягнуто оптимального функціонування СОУ відповідно до заданих критеріїв та з урахуваннями обмежень та невизначеностей, властивих ГВС. Даний процес може бути реалізований за рахунок розробки нових технічних рішень з використанням сучасних методів, технологій штучного інтелекту та 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. Структура та зв'язки СДОК відображені на рис. 1, 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;
РШ	– робот штабелер;
АТМ	– автономний транспортний модуль;
ГВМ	– гнучкий виробничий модуль;
СППР	– система підтримки прийняття рішень;
БЗ	– база знань.

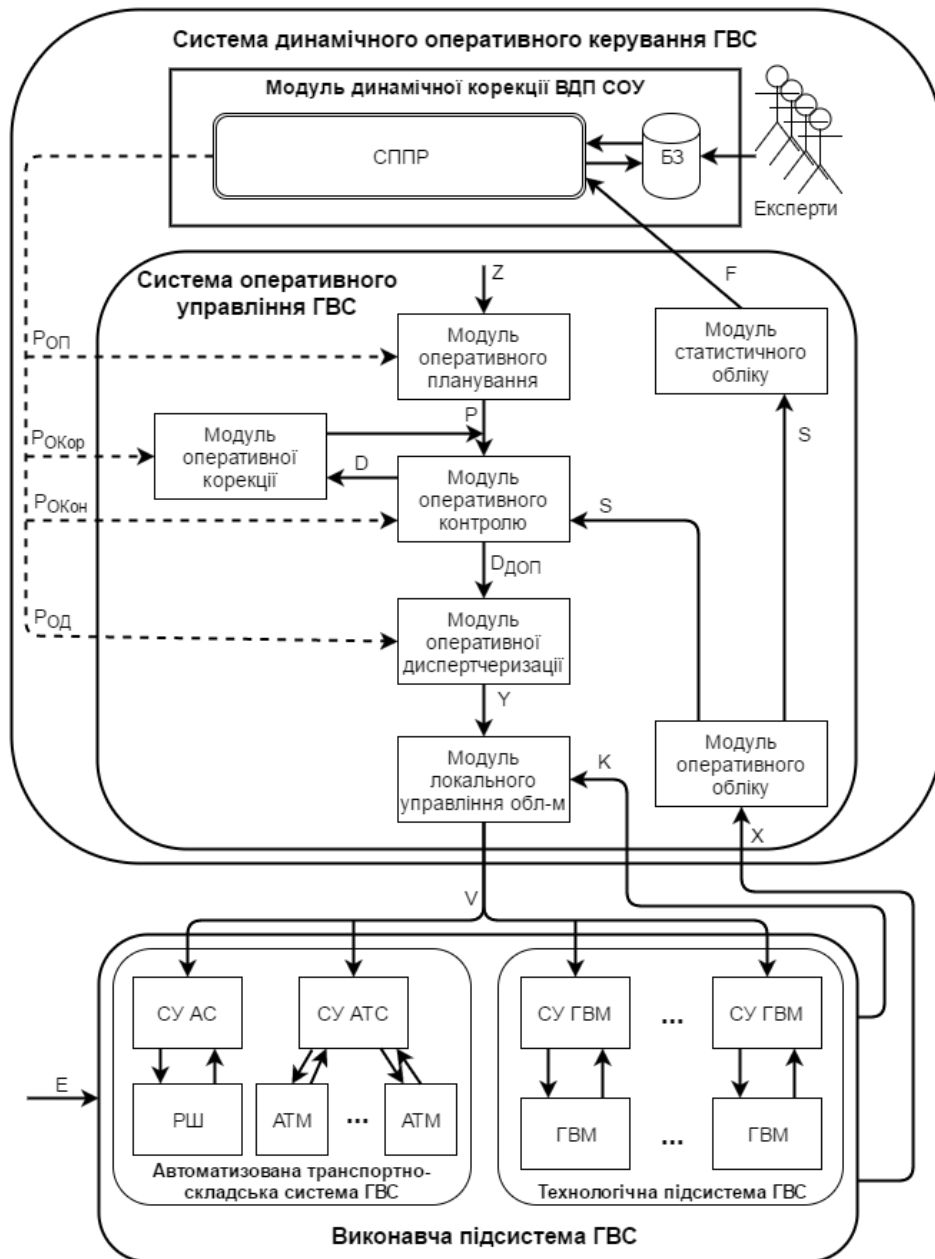


Рисунок 1. – Структура системи динамічного оперативного керування ГВС

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

- Доопрацювати існуючі класифікації показників оперативного керування, що являють собою інформаційне забезпечення процесу вирішення даної задачі.
- Розробити конкретний підхід до автоматизації процесу ДОК та здійснити його практичну реалізацію.

З урахуванням багатоетапності та складності процесу вибору значень ВДП 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, зокрема, експертних даних, статистичних даних та результатів прогнозування.

На базі аналізу проблеми та проведених досліджень сформовані відповідні мета і задачі роботи.



Другий розділ присвячено розробці, на основі синтезованої формалізованої моделі ДОК, інформаційного забезпечення розв’язання задачі автоматизації ДОК, що являє собою *класифікатор вирішальних динамічних показників та логічну послідовність налаштування їх значень*.

Було створено класифікатор вирішальних динамічних показників СОУ, що дає змогу здійснювати послідовне обґрунтування вибору відповідностей між їх значеннями та ГВС з властивими їй умовами й обмеженнями.

На основі здійсненого аналітичного огляду результатів численних досліджень у джерелах, що присвячені проблемі оперативного управління, для всіх показників із визначеного раніше набору узагальнених динамічних показників роботи СОУ  $P_{ВДП} = \{P_{ОП}, P_{ОКОН}, P_{ОКОР}, P_{ОД}\}$ , було обрано та включено до класифікатора наступні конкретні величини та відповідні набори їх значень (рис. 2).

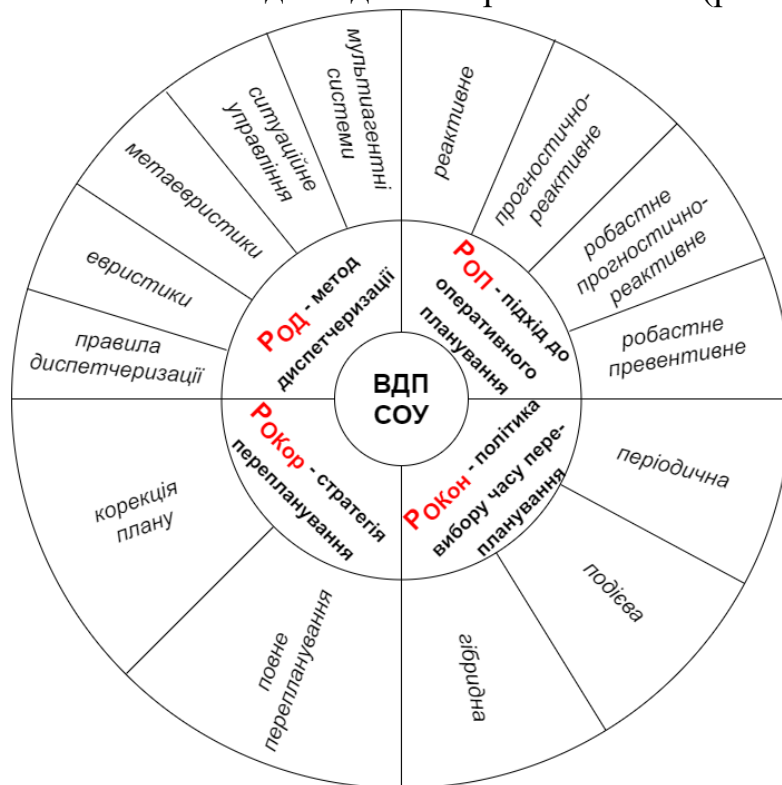


Рисунок 2. Класифікатор ВДП СОУ

- показник оперативного планування  $P_{ОП}$  – *підхід до оперативного планування* (реактивне, прогностично-реактивне, робастне прогностично-реактивне, робастне превентивне);
- показник оперативного контролю  $P_{ОКОН}$  – *політика вибору часу перепланування* (періодична, подієва, гібридна);
- показник оперативної корекції  $P_{ОКОР}$  – *стратегія перепланування* (повне перепланування, корекція плану);
- показник оперативної диспетчеризації  $P_{ОД}$  – *метод диспетчеризації* (правила диспетчеризації, евристики, метаевристики, ситуаційне управління, мультиагентні системи).

Також було проаналізовано основні вимоги та обмеження з боку ГВС, що впливають на процес ДОК, а саме:

- типи невизначеностей у ГВС:

- **пов'язані з ресурсами** (несправність машини, помилка оператора, відсутність або несправність інструмента, ліміти завантаження, затримки у доставці матеріалів, дефектність матеріалу);
- **пов'язані з операціями** (термінові операції, відміна операцій, зміни терміну виконання, невчасне надходження операцій, зміна пріоритету операцій, зміна тривалості виконання операцій).

- обчислювальна потужність апаратного забезпечення СОУ: *висока, середня, низька.*

- структури транспортних систем ГВС: *фронтальна, поперечна, дипольна, кутова, кругова, комбінована.*

Визначено логічну послідовність налаштування вирішальних динамічних показників (ЛПН ВДП) згідно із створеним класифікатором, що дозволяє, здійснюючи ДОК у вигляді ітераційної процедури, обрати вектор значень ВДП, що буде здатний обслуговувати задані ВО ГВС (рис. 3).



Рисунок 3. Логічна послідовність налаштування вирішальних динамічних показників СОУ

На основі набору ітераційних процедур, що забезпечуються складом і послідовністю етапів вибору раціональних значень ВДП, синтезовано *узагальнену концептуальну модель СОУ* як об'єкта динамічного оперативного керування. Синтезована модель СОУ узагальнює в собі всі характеристики системи, спроможні обслуговувати у повному обсязі ВО ГВС в умовах невизначеності.

Оскільки ДОК ГВС є частиною виробничого процесу, доцільно було застосувати для формалізації елементів СОУ характерні для ГВС методи функціонального

аналізу, зокрема метод  $\Phi$ -функції. Згідно із обраним підходом на узагальненому верхньому рівні абстрагування, функція СОУ ( $\Phi_{\text{СОУ-функція}}$ ) як об'єкта динамічного оперативного керування подається декартовим добутком множин:

$$\Phi_{\text{СОУ}} \subset \text{ВН} \times \text{П}_{\text{ДОК}} \times \text{С}_{\text{ДОК}} \times \text{ПЧ}_{\text{ДОК}} \times \text{М}_{\text{ДОК}}, \quad (5)$$

де  $\text{ВН}$  – вид невизначеності;  $\text{П}_{\text{ДОК}}$  – підхід до оперативного планування;  $\text{С}_{\text{ДОК}}$  – стратегія перепланування;  $\text{ПЧ}_{\text{ДОК}}$  – політика вибору часу перепланування;  $\text{М}_{\text{ДОК}}$  – метод диспетчеризації.

Враховуючи наведене подання загальної  $\Phi_{\text{СОУ-функції}}$  на вищому ієрархічному рівні абстрагування, можна стверджувати, що сукупність підфункцій складових процесів ( $\Phi_{\text{склад-процеси}}$ ) перебирання на другому рівні абстрагування має вигляд:  $\Phi_{\text{ВН}}$ ,  $\Phi_{\text{ПДОК}}$ ,  $\Phi_{\text{СДОК}}$ ,  $\Phi_{\text{ПЧДОК}}$ ,  $\Phi_{\text{МДОК}}$ . Дана сукупність підфункцій призначена для варіативного формування траєкторій  $tr$  руху в межах змінних кожної з наведених складових до кінцевої мети – умовно-оптимального шляху  $tr_{\text{opt}}$ . Іншими словами, варіативний перетин всіх підфункцій в процесі реалізації ЛПН ВДП являє собою багатоваріантну ієрархічну ітераційно-пошукову оптимізаційну задачу щодо послідовного перебирання значень показників СОУ, що задовольняють ГВС:

$$\begin{aligned} \Phi_{\text{ВН}} &\subset \text{П}_{\text{ДОК}} \times \text{С}_{\text{ДОК}} \times \text{ПЧ}_{\text{ДОК}} \times \text{М}_{\text{ДОК}} \\ \Phi_{\text{ПДОК}} &\subset \text{ВН} \times \text{С}_{\text{ДОК}} \times \text{ПЧ}_{\text{ДОК}} \times \text{М}_{\text{ДОК}} \\ \Phi_{\text{СДОК}} &\subset \text{ВН} \times \text{П}_{\text{ДОК}} \times \text{ПЧ}_{\text{ДОК}} \times \text{М}_{\text{ДОК}} \\ \Phi_{\text{ПЧДОК}} &\subset \text{ВН} \times \text{П}_{\text{ДОК}} \times \text{С}_{\text{ДОК}} \times \text{М}_{\text{ДОК}} \\ \Phi_{\text{МДОК}} &\subset \text{ВН} \times \text{П}_{\text{ДОК}} \times \text{С}_{\text{ДОК}} \times \text{ПЧ}_{\text{ДОК}} \end{aligned} \quad (6)$$

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

На подальших рівнях абстрагування відповідно до визначених моделей і залежностей реалізується ітеративне перебирання можливих варіацій моделей СОУ при відповідних фіксованих (за кращими результатами попереднього ієрархічного рівня) сполученнях складових:

$$\begin{aligned} \Phi(\text{ВН}) &\subset \text{П}_{\text{ДОК}} \times \text{С}_{\text{ДОК}} \times \text{ПЧ}_{\text{ДОК}} \times \text{М}_{\text{ДОК}} \\ \Phi(\text{ВН}, \text{П}_{\text{ДОК}}) &\subset \text{С}_{\text{ДОК}} \times \text{ПЧ}_{\text{ДОК}} \times \text{М}_{\text{ДОК}} \\ &\dots \\ \Phi(\text{ВН}, \text{П}_{\text{ДОК}}, \text{С}_{\text{ДОК}}) &\subset \text{ПЧ}_{\text{ДОК}} \times \text{М}_{\text{ДОК}} \\ \Phi(\text{ВН}, \text{П}_{\text{ДОК}}, \text{ПЧ}_{\text{ДОК}}) &\subset \text{С}_{\text{ДОК}} \times \text{М}_{\text{ДОК}} \\ &\dots \\ \Phi(\text{ВН}, \text{П}_{\text{ДОК}}, \text{С}_{\text{ДОК}}, \text{ПЧ}_{\text{ДОК}}) &\subset \text{М}_{\text{ДОК}} \end{aligned} \quad (7)$$

Виходячи з функції  $\Phi_{\text{СОУ}}$ , послідовність її реалізацій може бути представлена оргграфом (рис. 4), що являє собою нижній ієрархічний рівень подання функцій ОК.

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  $\Phi_{\text{склад-процесів}}$  ( $\Phi_{\text{ВН}}$ ,  $\Phi_{\text{ПДОК}}$ ,  $\Phi_{\text{СДОК}}$ ,  $\Phi_{\text{ПЧДОК}}$ ,  $\Phi_{\text{МДОК}}$ ) є необхідними і достатніми для розв'язання прикладних задач побудови системи автоматизованого вибору показників СОУ.

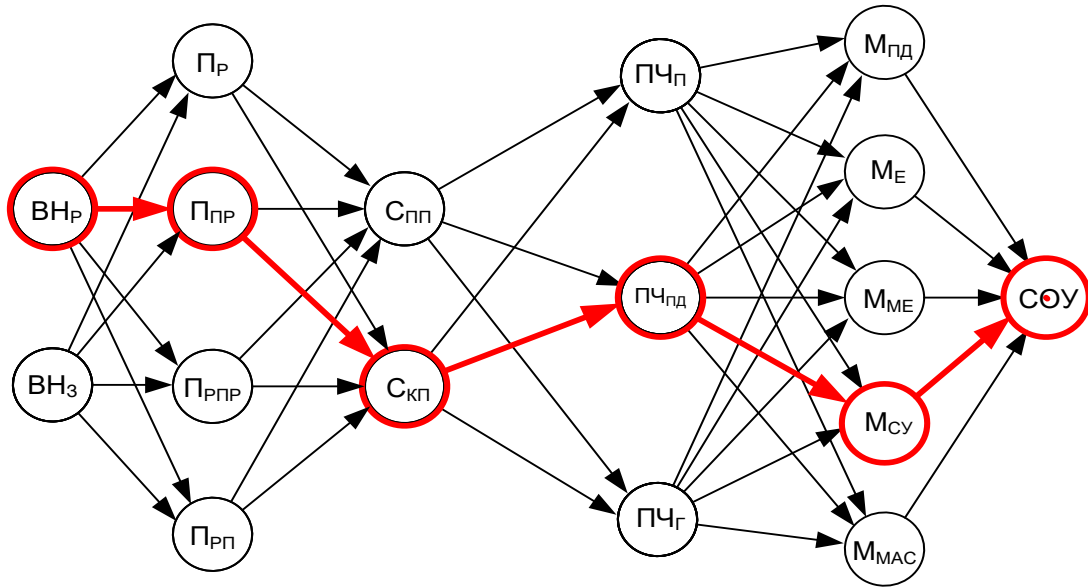


Рисунок 4. Повний функціональний орграф процесу вибору показників СОУ

На рис. 4 використано, відповідно, наступні скорочення: ВН – види невизначеностей (ВН<sub>р</sub> – пов’язані з ресурсами, ВН<sub>з</sub> – з задачами); П – підходи до перепланування (П<sub>р</sub> – реактивний, П<sub>пр</sub> – прогностично-реактивний, П<sub>рпр</sub> – робастний прогностично-реактивний, П<sub>рп</sub> – робастний превентивний); С – стратегія перепланування (С<sub>пп</sub> – повне перепланування, С<sub>кп</sub> – корекція плану); ПЧ – політика вбору часу перепланування (ПЧ<sub>п</sub> – періодична, ПЧ<sub>пд</sub> – подієва, ПЧ<sub>г</sub> – гібридна); М – метод перепланування (М<sub>пд</sub> – правила диспетчеризації, М<sub>е</sub> – евристики, М<sub>ме</sub> – метаевристики, М<sub>су</sub> – ситуаційне управління, М<sub>мас</sub> – мультиагентні системи).

Серед траєкторій  $tr$  процедурного руху за орграфом, наведеним на рис. 4, що відбиває реалізацію залежностей нижнього ієрархічного рівня, є й умовно оптимальні  $tr_{\text{опт}}$  за умов відповідності до конкретних ВО ГВС.

Зокрема, на рис. 4 виділений слід умовно оптимальної траєкторії  $tr_{\text{опт. ум.}}$ , яка в результаті багатоітераційного перебирання визначає складові умовної бажаної моделі СОУ:

$$\text{СОУ} \rightarrow tr_{\text{опт. ум}} \subset \text{ВН}_p \times \text{П}_{\text{пр}} \times \text{С}_{\text{кп}} \times \text{ПЧ}_{\text{пд}} \times \text{М}_{\text{су}} \quad (8)$$

У третьому розділі розроблено підхід до визначення складових умовної бажаної моделі СОУ на основі багатоітераційного перебирання згідно із визначеною ЛПН всіх можливих варіантів поєднань відповідних значень ВДП з ВО ГВС.

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. 5).

*Друга складність* полягає у кількісному визначенні вагомості реляційних зв'язків вирішальних динамічних показників СОУ між собою та з вимогами і обмеженнями з боку ГВС. Кількісне визначення даних величин реалізується експертним рейтинговим оцінюванням альтернативних варіантів з використанням методів ранжування і попарних порівнянь або на основі опрацювання статистичних даних.

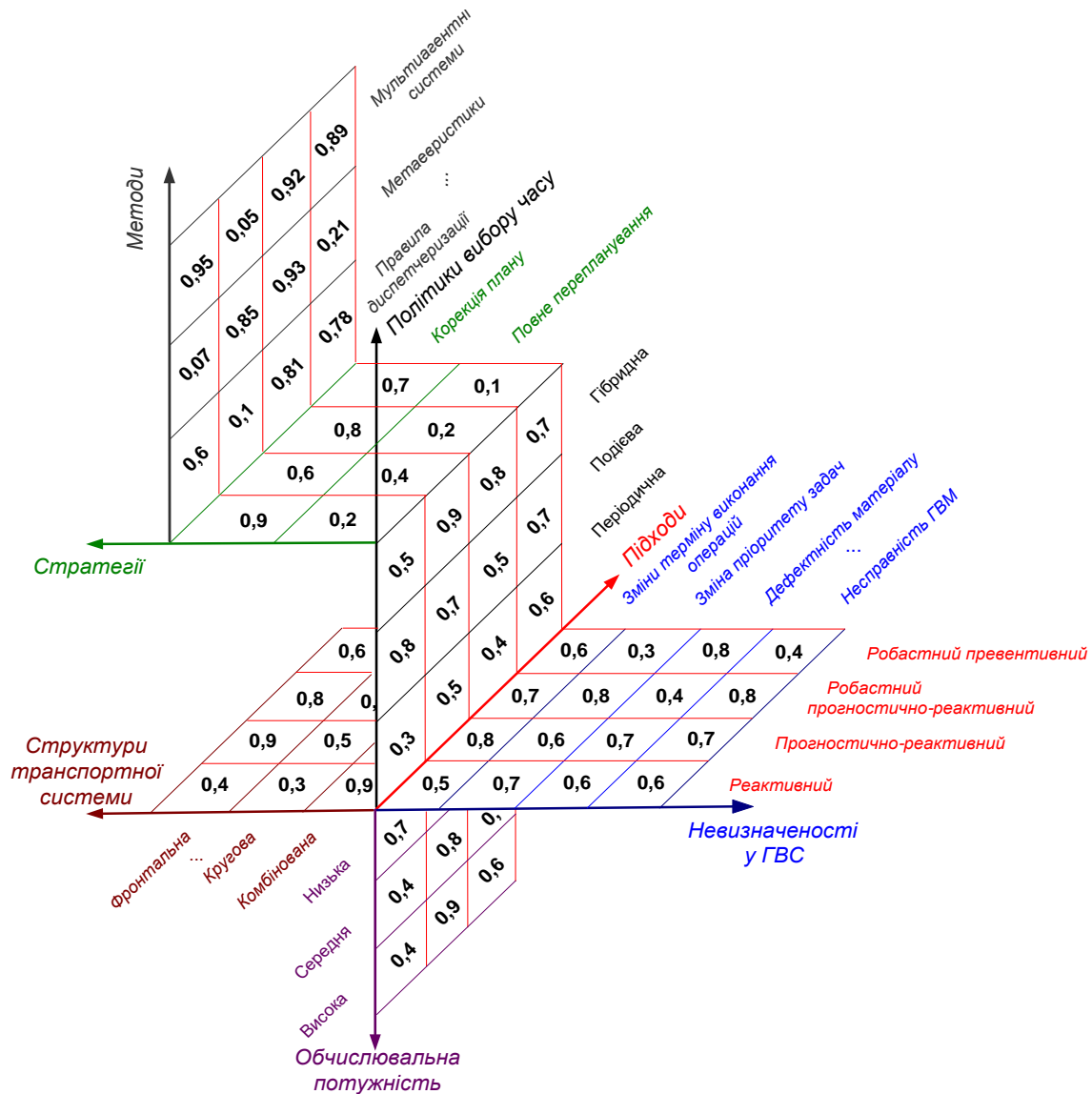


Рисунок 5. Узагальнена модель вибору значень ВДП СОУ

У даній роботі розглядається варіант із залученням експертів, при якому було проведено опитування щодо оцінок ефективності поєднання ВДП СОУ експертними методами (ранжування та парних порівнянь). Також, після отримання результатів оцінювання було проведено аналіз на узгодженість експертів у даній області (коректність відповідей щодо відповідності значень СДП) і було отримано наступний результат: ступінь узгодженості методом ранжування –  $\omega = 0,85$ , ступінь узгодженості методом парних порівнянь –  $\gamma = 0,78$ . Оскільки ступені узгодженості отримані двома методами не менше 0,5, то вони були прийняті і записані до таблиць порівняння ефективності поєднання показників.

Відповідні дослідження вимагають глибоких і ретельних опрацювань щодо однозначності вирішення цієї частини задачі ДОК. На рис. 5 наведені умовні кількісні результати попередніх обробок даних від джерел, що не претендують на строгість експертного оцінювання. Ці дані можна розглядати в якості прикладу узагальненої методики при вирішенні задачі ДОК.

Далі було розроблено підхід до автоматизації вибору значень показників шляхом здійснення послідовності ітераційних процедур перебору їх можливих варіантів з метою пошуку  $tr_{opt}$ , що дозволить налаштувати СОУ, здатну задовольнити ВОГВС.

Аналіз особливостей інформаційного забезпечення задачі автоматизації ДОК вказує на її багатоваріантність, слабку формалізованість зв'язків між окремими складовими та нечіткий характер інформації через лінгвістичне подання ряду ознак. Це дозволяє класифікувати проблему як *задачу прийняття рішень в умовах невизначеності*.

Аналіз існуючих підходів до прийняття рішень в умовах невизначеності показує, 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.

Одним з варіантів вирішення цієї проблеми є застосування *агентно-орієнтованого методу* для автоматизації процесів проектування і розробки. Відмінною 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.

Розроблений підхід до автоматизації ДОК засновано на процедурі метайдентифікації.

*Визначення 3. Метайдентифікація ВДП* – це ітераційна процедура вибору таких значень вирішальних динамічних показників, за яких СОУ виявиться спроможною найкращим чином задовольняти умови обслуговуваної ГВС. При цьому завдання нечіткої метайдентифікації полягає в динамічному побудуванні з існуючих функціонально-спеціалізованих інтелектуалізованих агентів (ФСІА) таких гнучких інтелектуалізованих мультиагентних конфігурацій (ГІМАК) агентно-орієнтованих підсистем (АОП), які найкращим чином задовольняють умови обслуговуваної ГВС.

Формалізовано одну з абстрактних моделей інтелектуалізованого агента (ІА) зі станом, структура якого наведена на рис. 6.



Рисунок 6. Модель агента зі станом

У цьому випадку агент розглядається як набір:

$$AG = (S, A, env, I, refine, action), \text{ де:} \quad (9)$$

- $S$  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 заданій агентом дії непорожню множину можливих наступних станів зовнішнього середовища.

•  $I$  є непорожня скінченна множина внутрішніх станів агента;

•  $refine: I \times S \rightarrow I$  є функція оновлення стану, що зіставляє попередньому 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.

*Визначення 4. Функціонально-спеціалізований інтелектуалізований агент – це ІА з функціями метайдентифікації в просторі ВДП СОУ.*

*Визначення 5. Агентно-орієнтована підсистема – це складна підсистема ГІМАК, в якій функціонують два або більше ФСІА, орієнтованих на розв’язання задач ідентифікації за певним вирішальним динамічним показником і утворюючих агентно-орієнтоване середовище.*

*Визначення 6. Гнучка інтелектуалізована мультиагентна конфігурація – така мультиагентна конфігурація, яка: містить агенти  $A^{(M)}$  з функціями метайдентифікації, що 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, що задовольняє поточний набір умов на вході. Структура ГІМАК наведена на рис. 7.*

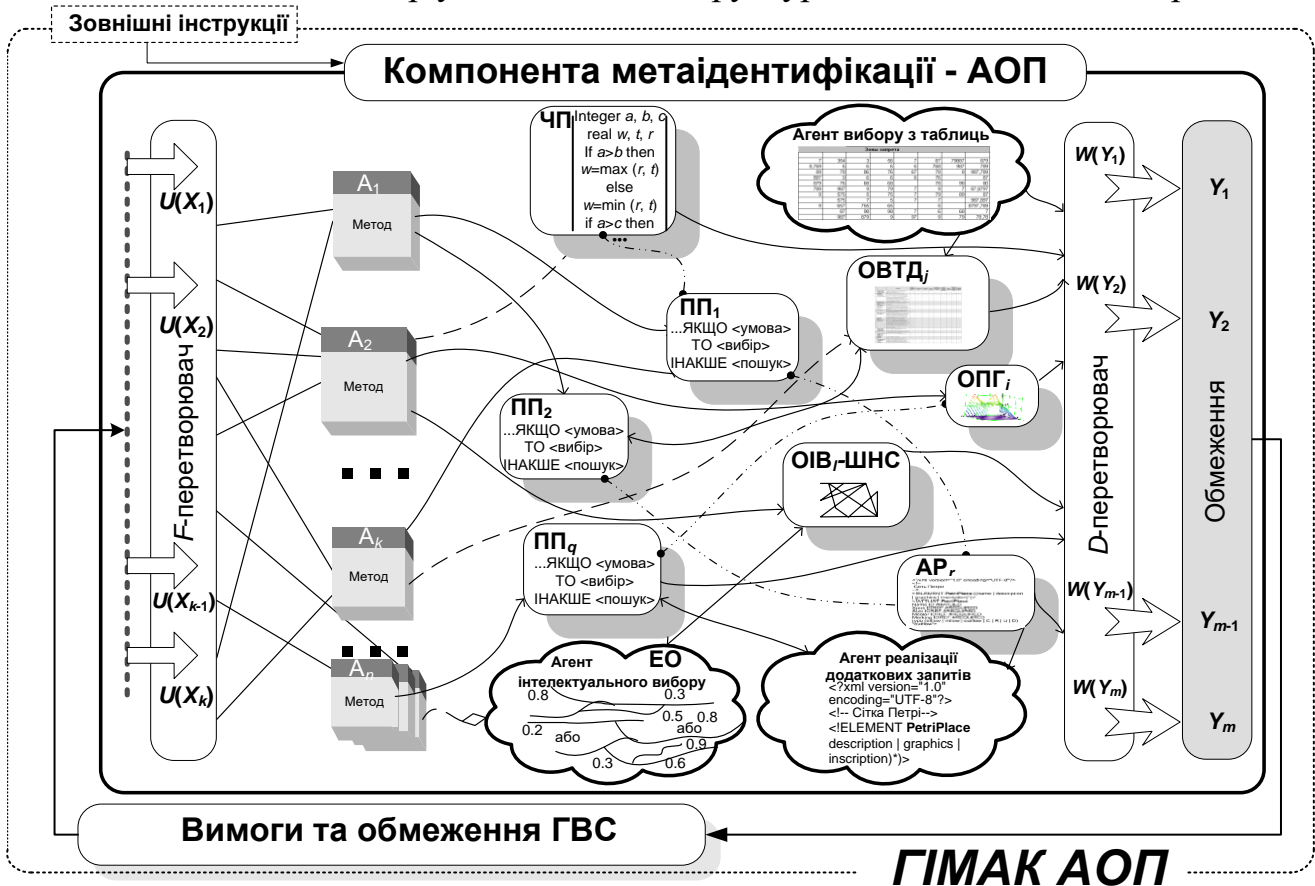


Рисунок 7. Структура ГІМАК АОП

Реалізація вищезначеної ідеї можлива за допомогою побудови ГІМАК з такими особливостями: використання об'єктно-орієнтованих ФСІА різних типів, що реалізують складові класифікатора ВДП; високий ступінь паралелізму; децентралізована структурна і параметрична метайдентифікація в АОП.

Мультиагентна структура ГІМАК АОП 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 обслуговуваності властивостей 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  $Y = \{Y_1, \dots, Y_m\}$  запропонованої ГІМАК АОП моделі СОУ із заданим на вході набором вимог ГВС.

*Визначення 7. Гнучка інтелектуалізована мультиагентна система* – це сукупність ГІМАК АОП, в якій реалізується *послідовність налаштування ВДП СОУ*, яка, будучи виконувана користувачем і/або внутрішнім ініціюючим джерелом, відтворює принципи агентно-орієнтованого підходу та дозволяє виокремити модель/моделі СОУ, здатні задовольнити критерії обслуговування властивостей ГВС.

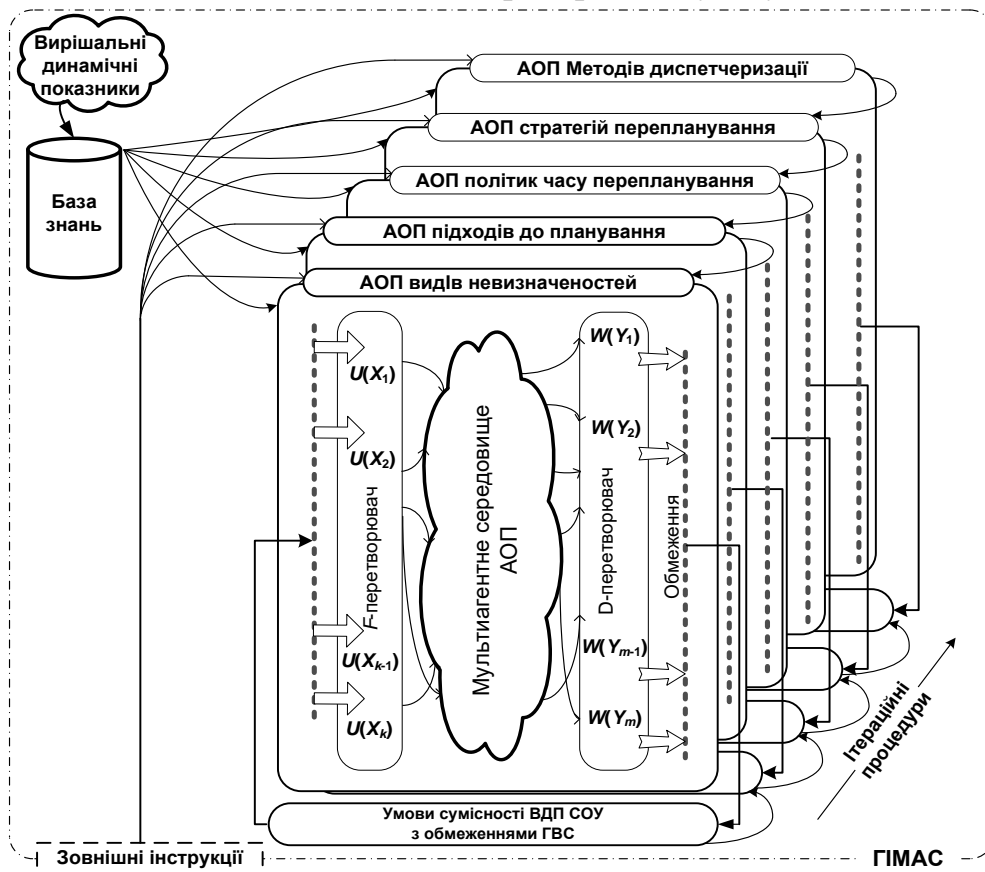


Рисунок 8. Узагальнена модель ГІМАС налаштування ВДП СОУ



Наведена на рис. 8 узагальнена модель *гнучкої інтелектуалізованої мультиагентної системи* (ГІМАС) об'єднує *необхідну* для формування алгоритму вибору значень ВДП і *достатню* для задоволення вимог з боку обслуговуваної ГВС сукупність цільових компонент метаідентифікації: АОП<sub>ВН</sub>, АОП<sub>П</sub>, АОП<sub>С</sub>, АОП<sub>ПЧ</sub>, АОП<sub>М</sub> – видів невизначеності, підходів до планування, політики часу перепланування, стратегії перепланування, методу диспетчеризації.

Заключна процедура ДОК в 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 вибору значень ВДП СОУ виконання умов задоволення певною компонентою АОП вимог/обмежень поставленої задачі 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*.

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 ДОК надходять з бази знань (БЗ), а після узгодження з умовами задачі нові значення реалізації поповнюють ці БЗ, розширюючи таким чином коло вимог ГВС, для яких є вже готові розв'язки.

**У четвертому розділі** було здійснено практичну реалізацію розробленого підходу до автоматизації ДОК для використання у модулі корекції ВДП СОУ, що було включено до складу СДОК. Розроблений підхід було реалізовано у вигляді програмно-інструментального середовища для розв'язання задач проектування та налагодження складових системи управління ГВС, що потребують прийняття рішення проєктувальником чи оператором. Такі системи автоматизації прийняття рішень та управлінської діяльності організаційно представляються у вигляді *систем підтримки прийняття рішень* (СППР).

Було створено *СППР для автоматизації ДОК* у вигляді автоматизованої інтерактивної комп'ютерної системи, що поєднує методичне, алгоритмічне і програмне забезпечення у єдине програмно-інформаційне середовище та функціонує з метою підвищення якості та зменшення трудомісткості рішень, що приймаються з її використанням.

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

- автоматизація процесу синтезу структури ГІМАС 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;
- збір, обробка та використання експертних знань, в тому числі у нечіткій формі із забезпеченням механізмів фазифікації, дефазифікації та нечіткого виведення;

- можливість додавання модулів для розширення функціональності системи;
- забезпечення зручного та наочного відображення інформації кінцевому користувачу у вигляді графічного інтерфейсу.

Для забезпечення виконання поставлених задач була розроблена СППР зі структурою, що визначена на рис. 9.

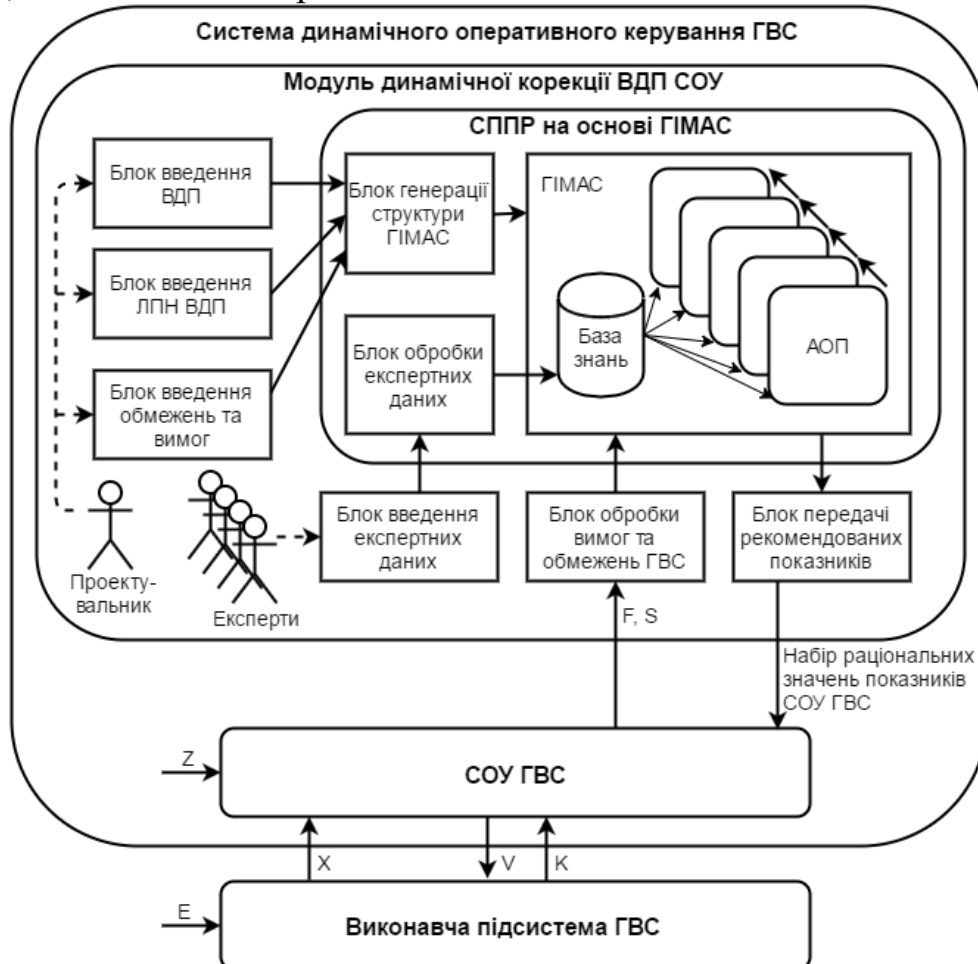


Рисунок 9. Структурна схема СППР на основі ГІМАС

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 показників:

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.
4. Передача знайдених значень показників до відповідних модулів СОУ.

Для розробки програмного продукту було обрано мову програмування C#, відповідно, платформу .NET, інтегроване середовище розробки Microsoft Visual Studio 2015 та патерн MVVM (Model – View – Viewmodel), що дозволяє відокремити складову візуалізації даних від розрахункової.

Головне вікно програмної реалізації СППР зображено на рис. 10.

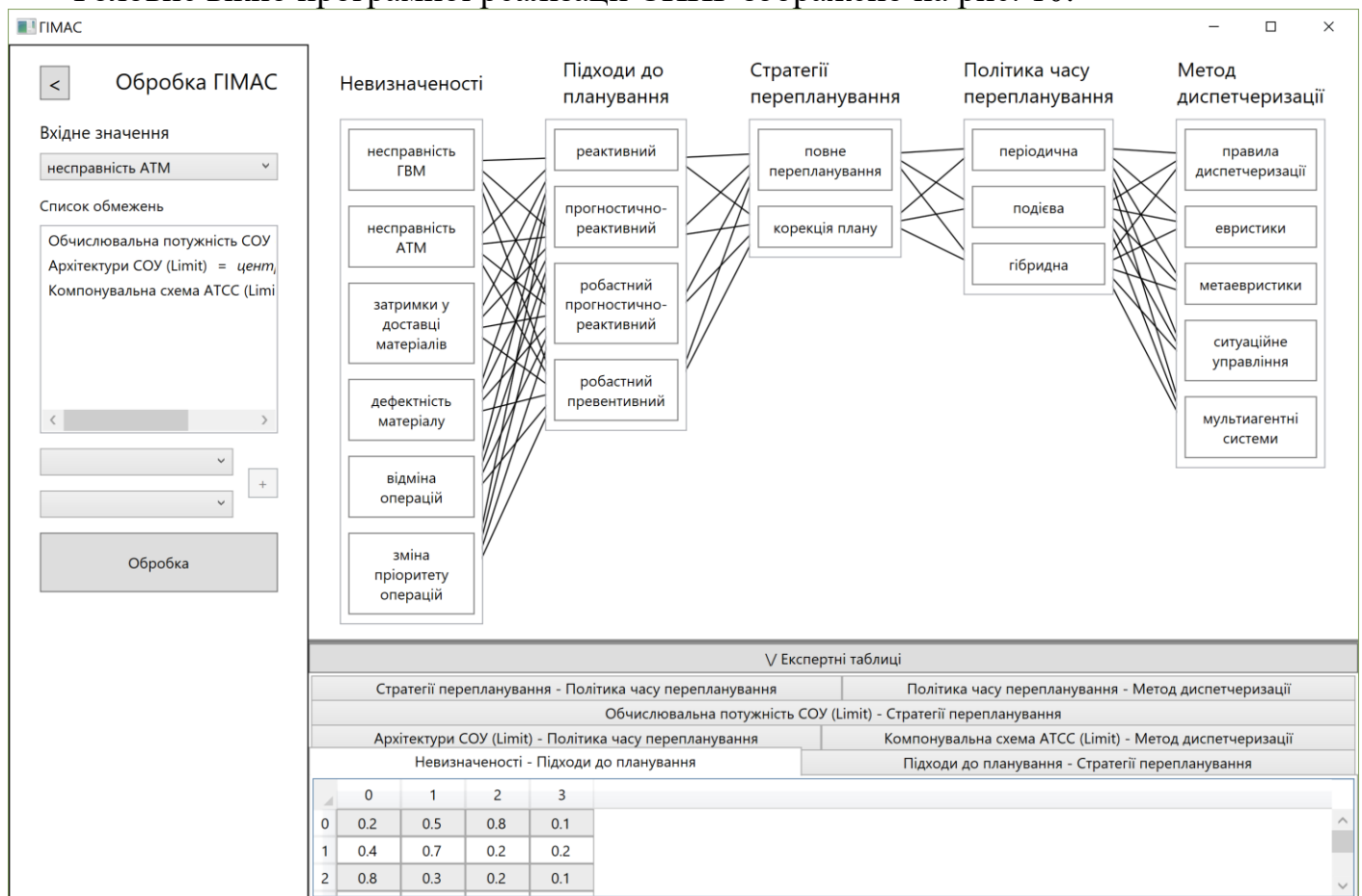


Рисунок 10. Головне вікно СППР "ГІМАС"

Форма головного вікна може бути поділена на 3 основні частини:

- панель керування (зліва);
- основна інформаційна панель (справа зверху);
- панель відображення експертних таблиць (справа знизу).

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

- Конструктор ГІМАС;
- Запуск ГІМАС.

У п'ятому розділі для перевірки працездатності розробленої СДОК було сплановано та проведено експериментальні дослідження, що дало змогу зібрати та інтерпретувати експериментальні дані.

Сформовано багатоетапну методику експериментального дослідження, що покликана дозволяти з мінімальною витратою ресурсів отримати значущі результати для аналізу:

1. Задані властивості тестових ГВС, що містять структурно-компонувальні схеми, матриці часу переміщень АТМ та характерні для кожної ГВС типи невизначеностей.

2. Ініціалізовано СППР, що є основою СДОК, та налаштовано усі необхідні внутрішні компоненти ГІМАС. Зокрема, сформовано експертні таблиці, що містять кількісне визначення вагомості реляційних зв'язків між ВДП СОУ та ВО ГВС.

3. Визначено раціональні значення СДП СОУ для обраних тестових ГВС за допомогою налаштованої СППР:

- підхід до динамічного планування: *прогностично-реактивний*;
- стратегія динамічного перепланування: *корекція плану*;
- політика вибору часу перепланування: *подієва*;
- метод диспетчеризації: *метод на основі мультиагентних систем*.
- синтезовано модель ГВС, що містить СОУ з визначеними показниками, зокрема, з методом диспетчеризації на основі МАС.

До складу МАС включено необхідну для моделювання роботи ГВС кількість агентів та метаагентів (агент, що складаються з інших агентів):

$$MAS_{ГВС} = \{ag_M \times ag_{АТМ}^* \times ag_{ГВМ}^* \times ag_3^*, S, env\}, \quad (10)$$

де:  $ag_M$  – агент-менеджер;  $ag_{АТМ}^*$  – метаагент системи АТМ;  $ag_{ГВМ}^*$  – метаагент системи ГВМ;  $ag_3^*$  – метаагент системи замовлення.

Розподілена архітектура МАС зображена на рис. 11.

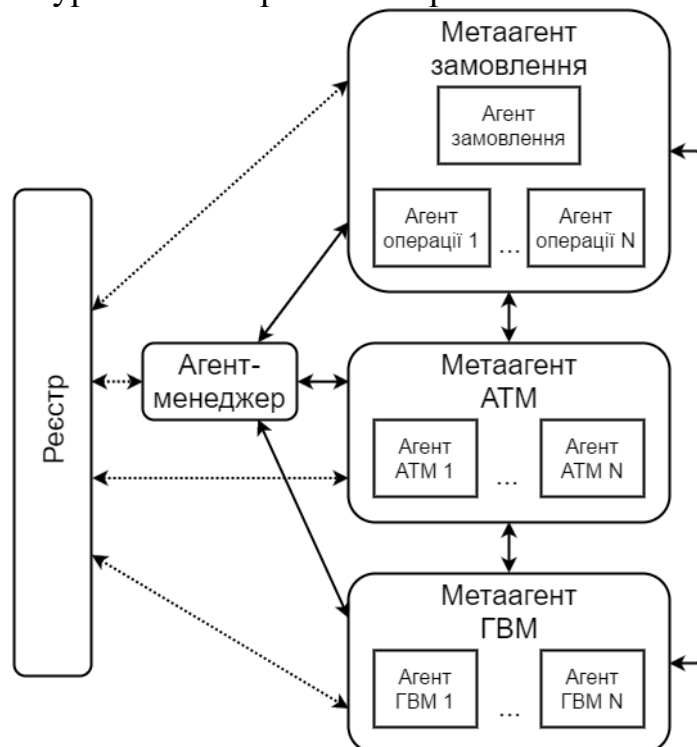


Рисунок 11. Архітектура МАС диспетчеризації

У виробничій системі кожен АТМ відображено двома окремими типами агентів:  $ag_{ДАТМ}$  – агент диспетчеризації АТМ (АДАТМ) та  $ag_{РАТМ}$  – агент ресурсів АТМ (АРАТМ), що формують метаагент АТМ ( $ag^*_{АТМ}$ ).

Кожен ГВМ також відображається двома окремими типами агентів, що утворюють метаагент ГВМ ( $ag^*_{ГВМ}$ ):  $ag_{ДГВМ}$  – агент диспетчеризації ГВМ (АДГВМ);  $ag_{РГВМ}$  – агент ресурсів ГВМ (АРГВМ).

Метаагент замовлення  $ag^*_z$  складається з множини агентів  $ag_z$  (агент замовлення), кожен з яких в свою чергу створює множину агентів  $ag_o$  (агент операції, що входить до складу замовлення).

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

Щоб забезпечити зменшення часу переговорів агентів при використанні мультиагентної системи, запропоновано підхід, при якому кожен АДАТМ використовує систему нечіткого виведення (СНВ) для здійснення 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. У СНВ використовується три змінні як вхідні (*Відстань*, *Час очікування* і *Частота запитів*), і одна в якості вихідної (*Пріоритет*).

Було розв'язано експериментальні задачі на основі наборів технологічних операцій, що виконуються на тестових ГВС та здійснена інтерпретація отриманих результатів з використанням обраних критеріїв ефективності функціонування ГВС:

1. Аналіз ефективності роботи ГВС із СОУ, що налаштована обраними за допомогою СППР значеннями показників у порівнянні з ГВС, для якої змінено метод диспетчеризації – замість *Методу на основі МАС* застосовано *Метод на основі правил диспетчеризації*, зокрема, варіанти з кількома широко відомими правилами диспетчеризації (MFCFS, STD, STT).

У якості критерію ефективності роботи ГВС було обрано *період обробки ГВС*.

Таблиця 1.

Періоди обробки ГВС з різними методами диспетчеризації

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

З таблиці 1 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 MAC.

2. Аналіз ефективності роботи ГВС, що містить СОУ з методом диспетчеризації на основі MAC із застосуванням механізму нечіткого виведення, у порівнянні з відповідними результатами MAC на основі CNET та з використанням правила диспетчеризації *First Come First Served (FCFS)*.

У якості критерію ефективності роботи ГВС було обрано середній час простою ATM.

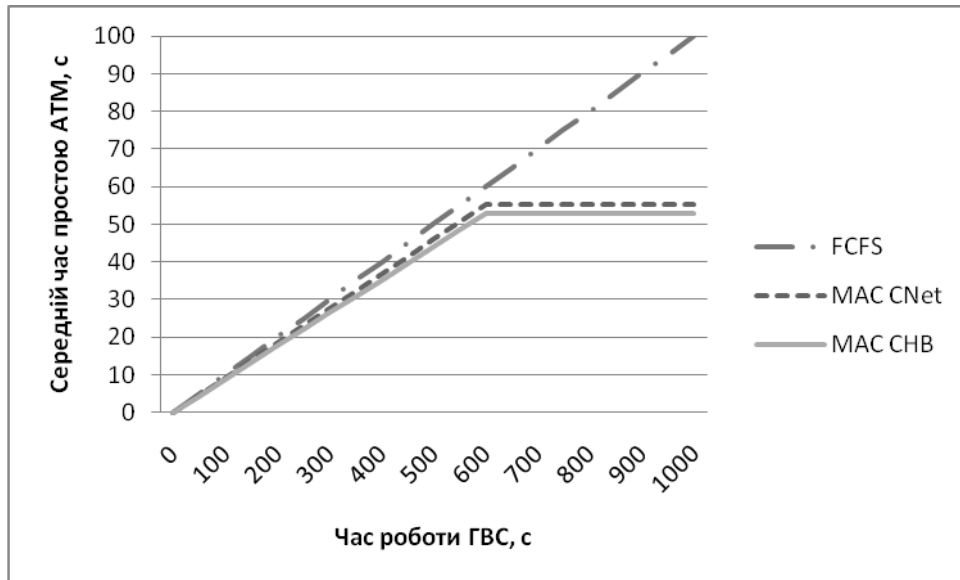


Рисунок 12. Графік залежності середнього часу очікування ATM

На рис. 12 зображено графік залежності середнього часу простою ATM від часу роботи ГВС для трьох наведених методів. Як видно з графіку, метод на основі MAC з CHB переважає за продуктивністю обидва інші методи: MAC з CNET – на 8%, правило *FCFS* – на 12%.

При використанні Методу FCFS може виникнути скупчення ATM біля одного оброблювального ресурсу, що найдовше чекає на виконання транспортної операції. При використанні CNET сам процес переговорів займає багато часу, оскільки АДГВМ повинен чекати відповіді від кожного агента АДАТМ, які можуть надійти не одразу. Ці недоліки було враховано при розробці системи нечіткого виведення.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі на основі проведених досліджень вирішено актуальне наукове завдання: розроблено підхід до динамічного оперативного керування ГВС. У ході роботи отримано такі основні теоретичні та практичні результати:

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 орграфа 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. 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 переспрямування 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.

## ОСНОВНІ ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ РОБОТИ

1. Дьяков С.О. Обгрунтування вибору топології нейромережі в задачах навігації рухомих об'єктів / С.О. Дьяков, Л.С. Ямпольський. – Адаптивні системи автоматичного управління, 1 (22) 2013. (*Міжнародні наукометричні бази: WorldCat, Google scholar та РІНЦ*) – Автором проаналізовано топології нейромереж, що можуть бути використані для розв'язання задачі навігації транспортних модулів гнучкої виробничої системи та обгрунтовано доцільність використання нейро-фаззі систем.

2. Дьяков С.О. Мультиагентне середовище моделювання задач диспетчеризації автономних транспортних модулів / С.О. Дьяков, Л.С. Ямпольський. – Адаптивні системи автоматичного управління, № 2 (23) 2013. (*Міжнародні наукометричні бази: WorldCat, Google scholar та РІНЦ*) – Автором синтезовано модель гнучкої виробничої системи на основі мультиагентного середовища та запропоновано реалізації процедур спілкування між агентами за протоколом CNet.

3. Дьяков С.О. Динамічне планування у виробничих системах в умовах невизначеності / С.О. Дьяков, Л.С. Ямпольський. – Технологічні комплекси № 2 (10), 2014. (*Міжнародні наукометричні бази: Index Copernicus, Ulrich's Periodicals Directory, Google scholar та РІНЦ*) – Автором проаналізовано та оцінено за певними критеріями основні існуючі підходи до здійснення динамічного планування у системі оперативного управління гнучкою виробничою системою.



4. Дьяков С.О. Мультиагентна система диспетчеризації автономних транспортних модулів на основі нечіткої логіки / С.О. Дьяков. – Адаптивні системи автоматичного управління, № 1 (26) 2015. (*Міжнародні наукометричні бази: WorldCat, Google scholar та PIIIC*)

5. Дьяков С.О. Узагальнена концептуальна модель системи динамічного керування в гнучких виробничих системах / С.О. Дьяков. – Вісник ЖДТУ, 1(72) 2015. (*Міжнародні наукометричні бази: WorldCat, Ulrich's Periodicals Directory, Google scholar та PIIIC*) – Автором синтезовано узагальнену концептуальну модель системи динамічного керування гнучкою виробничою системою, як складової системи оперативного управління.

6. Дьяков С.О. Мультиагентне середовище поетапного синтезу системи динамічного керування у гнучкій виробничій системі / С.О. Дьяков, Л.С. Ямпольський. – Адаптивні системи автоматичного управління, №1 (28) 2016. (*Міжнародні наукометричні бази: WorldCat, Google scholar та PIIIC*) – Автором запропоновано та обгрунтовано мультиагентний підхід до автоматизації процесу налаштування системи динамічного керування гнучкою виробничою системою.

7. Дьяков С.О. Інтелектуальне керування рухом промислового робота в умовах невизначеності на основі гібридної нейрофаззі системи / С.О. Дьяков, Л.С. Ямпольський. – Матеріали науково-технічної конференції “Автоматизація: проблеми, ідеї, рішення 2013”, 16-20.09.2013р. м. Київ – Автором обгрунтовано доцільність використання нейрон-фаззі систем для розв’язання задачі навігації автономних транспортних модулів гнучкої виробничої системи.

8. Дьяков С.О. Мультиагентна система диспетчеризації автономних транспортних модулів / С.О. Дьяков, Л.С. Ямпольський. – Матеріали ХХІ міжнародної конференції з автоматичного управління «Автоматика 2014», 23-27.09.2014 м. Київ. – Автором синтезовано мультиагентну модель та розроблено архітектуру гнучкої виробничої системи.

9. Дьяков С.О. Мультиагентна система диспетчеризації автономних транспортних модулів на основі нечіткої логіки / С.О. Дьяков. – Матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні управляючі системи та технології» (ІУСТ-ОДЕСА-2014), 23-25.09.2014 м. Одеса.

10. Дьяков С.О. Узагальнена концептуальна модель системи динамічного керування у гнучкій виробничій системі / С.О. Дьяков. – Всеукраїнська науково-практична конференція «Електронні та мехатронні системи: теорія, інновації, практика», 05.11.2015 м. Полтава.

## АНОТАЦІЯ

**Дьяков С. О. Динамічне оперативне керування гнучкою виробничою системою в умовах невизначеності.** – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.07 – автоматизація процесів керування. – Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” МОН України, Київ, 2017.

Дисертаційна робота присвячена актуальному питанню підвищення

ефективності роботи гнучкої виробничої системи (ГВС), зокрема шляхом збільшення рівня автоматизації системи оперативного управління (СОУ). Визначено поняття динамічного оперативного керування (ДОК) як налаштування таких значень вирішальних динамічних показників (ВДП) роботи СОУ в умовах невизначеності, що здатні задовольнити поточні вимоги ГВС. Запропоновано структуру системи динамічного оперативного керування (СДОК) для автоматизації ДОК.

Створено інформаційне забезпечення вирішення задачі автоматизації ДОК у вигляді класифікатора ВДП СОУ та логічної послідовності налаштування їх значень. На їх основі побудовано узагальнену концептуальну модель СОУ.

Розроблено мультиагентний підхід до автоматизованого здійснення ДОК, що дозволяє з використанням експертних знань та системи нечіткого виведення ітераційно ДОК ГВС.

Створено алгоритмічне та програмне забезпечення СДОК у вигляді СППР, що можна використати при розв'язанні задач проектування або переналагодження СОУ ГВС.

Моделювання показало ефективність роботи ГВС, вирішальні динамічні показники СОУ якої були налаштовані за допомогою СДОК.

Ключові слова: гнучка виробнича система, система оперативного управління, динамічне оперативне керування, експертні методи, система нечіткого виведення, інтелектуалізований агент, мультиагентна система.

## АННОТАЦИЯ

**Дьяков С. А. Динамическое оперативное управление гибкой производственной системой в условиях неопределенности.** – На правах рукописи.

*Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.07 – автоматизация процессов управления. – Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского" МОН Украины, Киев, 2017.*

Диссертационная работа посвящена актуальному вопросу повышения эффективности работы гибкой производственной системы (ГПС), в частности путем увеличения уровня автоматизации процессов настройки и функционирования составляющих системы оперативного управления (СОУ). Определено понятие динамического оперативного управления (ДОУ) как осуществление на этапах проектирования и функционирования производственной системы настройки таких значений решающих динамических показателей работы СОУ в условиях неопределенности, которые способны удовлетворить текущие требования и ограничения ГПС.

Предложена структура системы динамического оперативного управления (СДОУ) для осуществления автоматизации процесса ДОУ. Основные функции динамического управления в структуре СДОК выполняет разработанный модуль динамической коррекции решающих динамических показателей СОУ. Указанный модуль принимает оперативную и статистическую информацию о ходе производственного процесса, осуществляет поиск рациональных значений решающих динамических показателей и передает их соответствующим

структурными модулям СОУ.

Создано информационное обеспечение решения задачи автоматизации ДООУ в виде классификатора решающих динамических показателей СОУ и логической последовательности настройки их значений. Так в качестве решающих динамических показателей СОУ были выбраны следующие величины и их значения (приведены в скобках): показатель оперативного планирования - подход к оперативному планированию (реактивное, прогнозно-реактивное, робастное, прогнозно-реактивное, робастное превентивное); показатель оперативного контроля - политика выбора времени перепланировки (периодическая, событийная, гибридная); показатель оперативной коррекции - стратегия перепланировки (полная перепланировка, коррекция плана); показатель оперативной диспетчеризации - метод диспетчеризации (правила диспетчеризации, эвристики, метаэвристики, ситуационное управление, мультиагентные системы).

На основе логической последовательности настройки решающих динамических показателей построена обобщенная концептуальная модель СОУ как объекта управления, позволяющая определять состав и закономерности организации отдельных компонентов в единую систему при осуществлении ДООУ.

Была построена обобщенная модель выбора значений решающих классификационных показателей на основе реляционных связей между компонентами концептуальной модели СОУ. Количественное определение указанных реляционных связей реализуется экспертным рейтинговым оцениванием альтернативных вариантов с использованием методов ранжирования и парных сравнений либо же на основе обработки статистических данных.

Разработан мультиагентный подход к автоматизации процесса ДООУ на основе метайдентификации. Метайдентификация решающих динамических показателей - это итерационная процедура выбора таких их значений, при которых СОУ окажется способной наилучшим образом удовлетворять условиям обслуживаемой ГПС. При этом задача нечеткой метайдентификации заключается в динамическом построении из существующих функционально-специализированных интеллектуализированных агентов (ФСИА) таких гибких интеллектуализированных мультиагентных конфигураций (ГИМАК) агентно-ориентированных подсистем (АОП), которые наилучшим образом удовлетворяют условия обслуживаемой ГПС.

Создано алгоритмическое и программное обеспечение СДООУ в виде системы поддержки принятия решений (СППР), которая может быть использована при решении задач проектирования или переналадки СОУ ГПС в процессе функционирования. Данный программный комплекс, в отличие от существующих, позволяет в удобной форме сочетать использование мультиагентных систем и нечеткой логики и дает возможность практического использования в качестве СППР с возможностью перенаправления управляющих воздействий в соответствующие модули объекта управления.

Моделирование показало эффективность работы ГПС, решающие динамические показатели СОУ которой были настроены с помощью СДООУ.

Предложенный в работе подход к динамическому оперативному управлению носит обобщающий характер и может быть применен для динамической

корректировки показателей оперативного управления объектами различной природы. Для реализации этого подхода должны быть выполнены этапы, подробно изложены в работе, в частности: определение набора решающих динамических показателей объекта управления, создание классификатора решающих динамических показателей и логической последовательности настройки их значений, определение требований и ограничений относительно объекта управления и среды его функционирования, построение обобщенной модели объекта управления, определение количественных значений реляционных связей между показателями и ограничениями ОК (например, на основе экспертных методов), применение разработанных алгоритмов для синтеза и непосредственного использования гибкой интеллектуализированной мультиагентной среды для выбора рациональных значений решающих динамических показателей.

Ключевые слова: гибкая производственная система, система оперативного управления, динамическое оперативное управление, экспертные методы, система нечеткого вывода, интеллектуализированный агент, мультиагентная система.

## ABSTRACT

**Sergii Diakov. Dynamic operational control of flexible manufacturing systems in conditions of uncertainty.** – Manuscript.

*Thesis for a candidate of technical science degree by specialty 05.13.07 – control processes automation National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kiev Polytechnic Institute” MES of Ukraine, Kyiv, 2017.*

The dissertation is devoted to a topical issue of raising the efficiency of the flexible manufacturing system (FMS), in particular by increasing the level of automation of processes of setting and functioning of operational control system (OCS). Dynamic operative control (DOC) is defined as the process of setting such values of the crucial dynamic indexes of OCS in the face of uncertainty, which are able to meet current requirements of FMS. The structure of the dynamic operational control system (DOCS) for automation DOC process was designed.

The classifier of the crucial dynamic indexes of OCS and the logical sequence of setting values were created. On this basis, we have constructed a generalized conceptual model of the OCS.

A multi-agent approach to automated DOC, allowing to use experts' knowledge and fuzzy inference system for iterative implementation of DOC.

The algorithms and software implementation of DOCS as DSS were developed. DSS can be used in solving design problems or readjustment during the operation of OCS.

The simulation showed the effectiveness of the FMS, which has OCS with the dynamic indexes, which have been set up by the by SDOC.

Keywords: flexible manufacturing system, a system of operative management, dynamic operational control, expert methods, fuzzy inference system, intelligent agent, multi-agent system.