

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

КОТОВ ІГОР АНАТОЛІЙОВИЧ

УДК 004.89:620.91

**АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ
АНТИКРИЗОВОГО ДИСПЕТЧЕРСЬКОГО КЕРУВАННЯ
ЕНЕРГОСИСТЕМАМИ ГІРНИЧО-МЕТАЛУРГІЙНОГО КОМПЛЕКСУ
НА ОСНОВІ ЕВОЛЮЦІЙНОЇ ІНКОРПОРАЦІЇ
ПРОФЕСІЙНИХ ОНТОЛОГІЙ**

05.13.07 – автоматизація процесів керування

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Кривий Ріг – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі автоматизації, комп'ютерних наук і технологій Криворізького національного університету Міністерства освіти і науки України, м. Кривий Ріг.

Науковий консультант: **Азарян Альберт Арамаїсович**
доктор технічних наук, професор
Криворізький національний університет,
професор кафедри моделювання та програмного
забезпечення, м. Кривий Ріг

Офіційні опоненти: **Максимов Максим Віталійович**
доктор технічних наук, професор
Державний університет «Одеська політехніка»
завідувач кафедри комп'ютерних технологій
автоматизації, м. Одеса

Алексєєв Михайло Олександрович
доктор технічних наук, професор
Національний технічний університет
«Дніпровська політехніка»,
декан факультету інформаційних технологій,
м. Дніпро

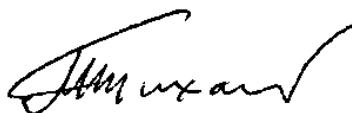
Кондратець Василь Олександрович
доктор технічних наук, професор
Центральноукраїнський національний
технічний університет,
професор кафедри автоматизації виробничих
процесів, м. Кропивницький

Захист відбудеться «22» грудня 2021 р. об 11:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 09.052.03 у Криворізькому національному університеті за адресою: Україна, 50027, Кривий Ріг, вул. Віталія Матусевича, 11, ауд. 345.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Криворізького національного університету за адресою: Україна, 50002, м. Кривий Ріг, вул. Пушкіна, 37.

Автореферат розісланий «19» листопада 2021 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



М. П. Тиханський

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. При подальшому ускладненні внутрішніх зв'язків, погіршенні параметрів режиму і зростанні нерівномірності в розвитку інфраструктури електроенергетичного комплексу в сучасних соціально-економічних умовах, коли наявне застаріле організаційно-технічне середовище фрагментарно впроваджуються новітні засоби керування, має місце науково-технічне протиріччя, яке полягає в тому, що керування енергосистемами потребує безперервної напруженої роботи оперативно-диспетчерського персоналу, проте протиаварійне керування передбачає надмірно жорсткі психофізіологічні вимоги до осіб, які приймають рішення, що вже не відповідають параметрам поточного стану енергосистеми.

Оціночні розрахунки впливу «людського фактора» в практиці диспетчерського керування енергосистемами гірничо-металургійного комплексу показали, що через рік безперервної роботи надійність диспетчерської зміни знижується до 45,01 % від початкової, сумарний збиток енергосистеми при аварійному зниженні частоти на 1 % становить 98,13 тис. грн, а сумарний збиток від роботи енергосистеми при аварійному зниженні напруги до 87 % від номінального сягає 232 млн грн на рік.

Найбільш раціональним напрямом автоматизації прийняття рішень при протиаварійному керуванні є використання інтелектуальних систем підтримки управлінської діяльності. Основним компонентом таких систем є системи підтримки прийняття рішень (СППР).

Однак наявні структурні та функціональні підходи до проєктування СППР для керування режимами енергосистем характеризуються вузькою спеціалізацією, тривалим періодом розробки і несумісністю з подібними системами на рівні баз знань і методів їх обробки. Тому сучасна ситуація нагально потребує впровадження універсальних і масштабованих систем підтримки рішень.

Отже, необхідно констатувати, що для автоматизації процесу інтелектуалізації керування режимами енергосистем необхідна уніфікація виробництва систем підтримки рішень. Така модель забезпечить динамічні переходи між різними формами подання знань у межах однієї експертної системи при динамічній зміні факторів, умов або вимог до керування технологічними процесами в кризових ситуаціях. Відтак автоматизація процесів диспетчерського антикризового керування енергосистемами гірничо-металургійного комплексу створенням інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень на основі моделей, методів і засобів еволюції інкорпорації професійних онтологій є **актуальною науковою проблемою**.

Для подолання цієї актуальної проблеми необхідно вирішити задачу автоматизації процесів антикризового диспетчерського керування енергосистемами гірничо-металургійного комплексу на основі еволюційної інкорпорації професійних онтологій. У зв'язку з цим автоматизація процесу керування режимами енергосистем шляхом розробки інтелектуальної системи на базі еволюції інкорпорації професійних онтологій є практично значущою і актуальною задачею, **що визначає актуальність роботи**.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Науковою базою дисертації стали результати, отримані в процесі виконання науково-дослідних робіт, що здійснювалися за планами наукових досліджень Криворізького національного університету в межах таких держбюджетних тем:

– «Розроблення енергозберігаючих заходів на підприємствах гірничодобувної промисловості» (номер ДР 0115U003180);

– «Ідентифікація нелінійних динамічних технологічних об'єктів збагачувального виробництва на основі ядерних операторів» (номер ДР 0116U001518);

– «Децентралізоване оптимальне керування взаємопов'язаними процесами гірничого виробництва на основі динамічної просторово-часової моделі» (номер ДР 0116U001519);

– «Методи і програмно-технічні комплекси контролю і управління якістю залізорудної сировини при видобутку і переробці» (номер ДР 0120U102310).

Результати дослідження, представлені в дисертації, отримані автором особисто.

Мета і завдання дослідження. Метою дисертації є розробка моделей, методів, інформаційного та програмного забезпечення інтелектуальних автоматизованих систем керування для аварійного регулювання режимів енергосистем гірничо-металургійного комплексу за рахунок забезпечення стійкої та безпечної роботи шляхом зміни структури об'єктів системи і параметрів функціонування технічних засобів.

Для досягнення поставленої мети необхідне вирішення таких **завдань**:

– на основі аналізу процесу диспетчерського керування енергосистемами гірничо-металургійного комплексу виявити методи, моделі та технічні засоби забезпечення оперативного диспетчерського керування нормальними і аварійними режимами енергосистем, обґрунтувати проблему комплексування різних форм представлення знань у межах єдиної онтологічної моделі;

– розробити математичні моделі та методи еволюції інкорпорації професійних онтологій оперативного керування режимами енергосистем;

– розробити математичні моделі та методи уніфікації професійних онтологій в умовах невизначеності;

– розробити імітаційну модель програмних контролерів і методи алгоритмізації функціонування комплексу системи підтримки прийняття рішень;

– розробити структурно-логічну тригерну реактивну модель, методи, інформаційне та програмне забезпечення ядра системи підтримки прийняття рішень і схему її впровадження в середовище автоматизованої системи диспетчерського керування;

– розробити методи оцінки технічної і економічної ефективності програмного забезпечення інтелектуальної автоматизованої системи антикризового диспетчерського керування енергосистемами гірничо-металургійного комплексу на основі інтеграції рівнів професійних онтологій.

Основна **ідея** роботи полягає в застосуванні концептуально нового підходу до автоматизації процесів антикризового диспетчерського керування енергосистемами гірничо-металургійного комплексу на основі використання нових математичних моделей, методів та алгоритмів еволюційної інкорпорації професійних онтологій.

Об'єктом дослідження є процес автоматизованого антикризового диспетчерського керування енергосистемами гірничо-металургійного комплексу на основі еволюційної інкорпорації онтологій професійних знань.

Предметом дослідження є математичні моделі, методи та програмні засоби еволюційної інкорпорації онтологій професійних знань антикризового диспетчерського керування режимами енергосистем гірничо-металургійного комплексу.

Методи дослідження. Для розробки математичних моделей і методів еволюції інкорпорації професійних онтологій оперативного керування режимами енергосистем використовувалися методи системного аналізу, наукового узагальнення та систематизації, теорії штучного інтелекту і експертних систем, формальних систем і формальних мов, теорії графів. Для розробки математичних моделей і методів уніфікації професійних онтологій в умовах невизначеності використовувалися методи теорії графів, теорії

імовірності, математичний апарат нечіткої логіки та нечітких множин. При розробці імітаційної моделі програмних контролерів і методів алгоритмізації реактивного функціонування комплексу системи підтримки прийняття рішень використовувалися методи теорії формальних систем і формальних мов, теорії штучного інтелекту і експертних систем, методи алгоритмізації, методи комп'ютерного моделювання. Для розробки структурно-логічної тригерної моделі, методів, інформаційного та програмного забезпечення ядра системи підтримки прийняття рішень і схеми її впровадження в середовище діючої автоматизованої системи диспетчерського керування використовувалися методи теорії автоматів, комп'ютерного моделювання, теорії реляційних і нереляційних баз даних, теорії електричних мереж. Для оцінки технічної і економічної ефективності програмного забезпечення інтелектуальної автоматизованої системи антикризового диспетчерського керування енергосистемами гірничо-металургійного комплексу на основі інтеграції рівнів професійних онтологій використовувалися методи теорії планування експерименту, математичної статистики, економічного аналізу, регресійного аналізу.

Наукова новизна одержаних результатів:

– **азнала подальшого розвитку** математична модель інкорпорації та обробки онтологій у професійній галузі подання знань і методів корекції параметрів режимів енергосистеми в програмному комплексі підтримки рішень для автоматизації процесів антикризового диспетчерського керування енергосистемою, **яка вирізняється тим, що**, на відміну від відомих моделей наявних баз знань, де онтології розглядаються незалежно одна від одної, реалізує взаємну відповідність еволюційного успадкування рівнів концептів і методів їх обробки, які забезпечують єдину теоретико-множинну модель знань для всіх онтологічних рівнів із дотриманням положень подібності, **що дає змогу** автоматизувати проєктування і застосування баз знань диспетчерського керування електротехнічним обладнанням і режимами його роботи в кризових ситуаціях;

– **уперше запропоновано метод** інтеграції онтологій у модель експлуатації експертної системи для підтримки рішень під час оперативних перемикачів у схемі мережі, керування видачею генеруючої потужності, регулювання напруги, коригування навантаження споживачів у процесі антикризового диспетчерського керування, **який полягає в тому, що** узагальнюється формальна система еволюційної теоретико-множинної моделі базових концептів і їх взаємозв'язків на всі рівні онтологій, формується еволюційний розвиток формально-лінгвістичних моделей рівнів онтологій, операції обробки знань виносяться за рамки інтелектуальної системи, **що дає змогу** будувати динамічні ланцюжки логічного висновку в інтелектуальних системах антикризового диспетчерського керування енергосистемою, чим автоматизувати прийняття рішень, які базуються на концептах лінгвістичного корпусу інструкцій щодо запобігання і ліквідації аварій;

– **уперше запропоновано метод** використання професійних концептів, які відповідають ієрархії онтологій диспетчерського керування режимами енергосистеми щодо контролю і корекції режиму енергосистеми та оперативних перемикачів з урахуванням невизначеності, **який полягає в тому, що** використовуються єдині формальні операції логічних висновків стосовно концептів усіх онтологічних рівнів бази знань, здійснюється урахування невизначеності структур знань у межах однієї автоматизованої інтелектуальної системи антикризового диспетчерського керування режимами енергосистеми, **що дає змогу** оперативно використовувати всі форми онтологій, автоматизувати врахування стану енергосистеми, здійснювати локалізацію та ліквідацію наслідків аварій у ній;

– **уперше запропоновано метод** інтегрування структури професійної інформації про ліквідацію аварій, оперативні перемикання, ведення переговорів, організацію ремонтів у дескриптори формальних мов рівнів еволюції онтологій подання знань, **який полягає в тому, що** дані контексту професійного лінгвістичного корпусу вводяться додатковим компонентом у формальні мови рівнів подання онтологій, контекстний корпус бере участь в еволюційному узагальненні рівнів бази знань, **що дає змогу** реалізувати кластеризацію тезауруса за ознаками технологічних порушень в енергосистемі та способів їх ліквідації, чим забезпечується автоматизація інтерпретації і застосування положень нормативної документації антикризового диспетчерського керування енергосистемою в межах контекстного кластера;

– **удосконалено метод** подання та використання інформації про антикризові диспетчерські заходи щодо контролю параметрів і корекції режиму енергосистеми, інваріантної по відношенню до специфіки завдань керування, **який вирізняється тим, що** базується на еволюційній ієрархії онтологій і метаправил та **дає змогу** реалізувати єдину спадкову структуру формальних систем знань і на цій основі будувати універсальні комплекси автоматизації антикризового диспетчерського керування енергосистемою, реалізувати автоматизований аналіз причин аварій і відмов у роботі електротехнічного обладнання;

– **уперше запропоновано метод** упровадження математичного та програмного забезпечення системи підтримки прийняття рішень у середовище автоматизованої системи диспетчерського керування (АСДК) енергосистемою гірничо-металургійного комплексу, **який полягає в тому, що** спирається на нову тригерну модель і методи ядра системи прийняття рішень, а також на безпосередній зв'язок з каналами передачі даних оперативного комплексу АСДК, не потребуючи формальної підготовки інформації, застосовує різні форми декларативних і функціональних диспетчерських знань, **що забезпечує** автоматизацію антикризового диспетчерського керування і дає змогу в нормальному режимі роботи знизити трудові та вартісні витрати диспетчерської зміни;

– **зазнала подальшого розвитку** модель інкорпорації в професійні онтології режимних характеристик чутливості до керування багатокомпонентних об'єктів енергосистеми, **яка вирізняється тим, що** комплекси числових коефіцієнтів регресійних і статистичних оцінок режимів енергосистеми і відповідних їм керуючих впливів додаються в базу знань як повноцінні лінгвістичні компоненти, **що дає можливість** автоматизувати індукційні висновки на основі реєстрації відхилень робочих струмів, напруг або частоти в системі, спрацьовування засобів релейного захисту і протиаварійної автоматики, чим підвищити ступінь автоматизації системи антикризового диспетчерського керування, яка забезпечує приріст надійності оперативно-диспетчерського персоналу при ліквідації аварії з урахуванням втоми;

– **зазнав подальшого розвитку** метод оцінки технічної та економічної ефективності системи підтримки рішень, **який вирізняється тим, що** вперше запропоновані показник оцінки абсолютної ефективності професійного онтологічного тезауруса як різниця з накопиченням між робочим лінгвістичним корпусом і загальним, або професійним тезаурусом, показник відносної ефективності як відношення показника оцінки абсолютної ефективності до об'єму робочого лінгвістичного корпусу, показник інтегральної ефективності як відношення кутів нахилу апроксимуючих регресій змін загального тезауруса і тезауруса професійних аббревіатур і сленгу; враховується ефективність дуального комплексу «оператор – програмна система»,

запропонований новий підхід до оцінки економічної ефективності, заснований на розрахунку відверненого збитку від упровадження в АСДК комплексу «оператор – програмна система» з урахуванням підвищення ступеня надійності функціонування диспетчерської зміни, **що дає можливість** інтегральної оцінки ефективності програмного забезпечення, професійної бази знань і диспетчерського персоналу.

Практичне значення одержаних результатів полягає у тому, що на підставі проведених теоретичних досліджень, розроблених математичних моделей і методів реалізована інтелектуальна система автоматизації процесів антикризового диспетчерського керування енергосистемами гірничо-металургійного комплексу. Отримані практичні результати дисертаційних досліджень використовуються ДП «ДПІ “Кривбаспроект”» для оцінки чутливості параметрів функціонування обладнання до керуючих впливів, формування професійних онтологій при керуванні режимами електроспоживання гірничорудних підприємств, оцінки надійності диспетчерського керування електричними системами гірничорудних підприємств (акт від 16.09.2020), ТОВ «НВК Криворіжелектромонтаж» для єдиної форми подання інформації про енергетичне обладнання, прогнозування аварійних ситуацій в енергооб’єктах, що дозволяє ідентифікувати параметри режимів електричних мереж та планувати протиаварійні дії диспетчерського персоналу (акт від 10.02.2021). Результати дисертації використовуються при викладанні лекцій, проведенні практичних і лабораторних робіт, підготовці курсових і дипломних робіт для студентів спеціальностей 151 – Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології, 121 – Інженерія програмного забезпечення, 122 – Комп’ютерні науки Криворізького національного університету (акти від 16.02.2021, від 22.09.2021).

Особистий внесок здобувача. Здобувач – єдиний автор усіх наукових ідей, що охоплюють теоретичні результати і наукові положення, винесені на захист. Основні положення і результати дисертації опубліковано в роботах [1–60].

У наукових працях, опублікованих у співавторстві, здобувачу належать такі результати. У роботах [1–5, 18, 45] розроблені математичні і структурно-логічні моделі інкорпорації професійних онтологій для інтелектуалізації процесу оперативного керування режимами енергосистем. У роботах [10, 16, 17, 19, 50] розглянуті форми подання знань про керування режимами електроенергетичних систем. У роботах [13, 59] викладені основні результати формування оцінки технічної та економічної ефективності інтелектуальної системи. У роботах [23, 28, 43, 44, 49] розглянуті підходи до проєктування інтелектуалізації засобів підтримки рішень для автоматизації керування системами електропостачання гірничо-металургійного комплексу в нормальних і надзвичайних ситуаціях. У роботі [25] розглянуто подання логічних моделей прийняття рішень при керуванні енергосистемою в кризових ситуаціях. У роботі [40] обґрунтовані методи викладання у ЗВО технологій штучного інтелекту на основі уніфікації знань. У роботі [42] розглянутий метод доступу до професійних даних особливої важливості. У роботі [48] запропоновані підходи до розвитку програмного забезпечення для керування енергосистемами гірничо-металургійних регіонів. У роботі [60] проведена оцінка ефективності тезауруса бази знань професійних онтологій.

Апробація результатів. Основні положення дисертації та результати досліджень доповідались на таких семінарах і конференціях: X науковій конференції «Моделювання електроенергетичних систем» (м. Каунас, 1991 р.), Науково-практичній конференції «Кризові ситуації в енергетиці: техніко-економічна оцінка і моделювання рішень по їх нейтралізації» (м. Київ, 1994 р.), I Міжнародній науково-технічній конференції «Математичне

модельовання в електротехніці і електроенергетиці» (м. Львів, 1995 р.), LXIV науково-практичній конференції науково-педагогічних працівників, аспірантів, студентів та структурних підрозділів університету (м. Київ, 2008 р.), Міжнародній науково-технічній конференції «Сталий розвиток гірничо-металургійної промисловості – 2008» (м. Кривий Ріг, 2008 р.), LXV науково-практичній конференції науково-педагогічних працівників, аспірантів, студентів та структурних підрозділів університету НТУ (м. Київ, 2009 р.), Міжнародному науково-практичному семінарі «Стратегії протидії зовнішнім та внутрішнім загрозам економічній безпеці: регіональний вимір» (м. Запоріжжя, 2010 р.), LXVI науково-практичній конференції науково-педагогічних працівників, аспірантів, студентів та структурних підрозділів університету НТУ (м. Київ, 2010 р.), LXVIII науковій конференції професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та працівників відокремлених структурних підрозділів університету НТУ (м. Київ, 2012 р.), LXIX науковій конференції професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та працівників відокремлених структурних підрозділів університету НТУ (м. Київ, 2013 р.), VII Всеукраїнській науково-методичній конференції «Комп'ютерне моделювання та інформаційні технології в освіті» (м. Кривий Ріг, 2016 р.), X Всеукраїнській науково-методичній конференції «Комп'ютерне моделювання та інформаційні технології в освіті» (м. Кривий Ріг, 2017 р.), Міжнародній науково-технічній конференції «Розвиток промисловості та суспільства – 2017» (м. Кривий Ріг, 2017 р.), Міжнародній науково-технічній конференції «Розвиток промисловості та суспільства – 2018» (м. Кривий Ріг, 2018 р.), XI Всеукраїнській науково-методичній конференції «Комп'ютерне моделювання та інформаційні технології в освіті» (м. Кривий Ріг, 2018 р.), Всеукраїнській науково-практичній конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених (м. Кропивницький, 2018 р.), Міжнародній науково-технічній конференції молодих учених «Проблеми енергозбереження і механізації в гірничо-металургійному комплексі» (м. Кривий Ріг, 2019 р.), Міжнародному науково-практичному форумі «Сучасні наукові дослідження на шляху до євроінтеграції» (м. Мелітополь, 2019 р.), XII Міжнародній науково-практичній конференції «Інформаційні технології і автоматизація – 2019» (м. Одеса, 2019 р.), *Second International Conference on Sustainable Futures: Environmental, Technological, Social and Economic Matters (ICSF 2021)* (м. Кривий Ріг, 2021 р.).

У повному обсязі дисертаційне дослідження доповідалося на регіональному науковому семінарі Придніпровського наукового центру НАН України секції «Сучасні проблеми управління та моделювання складних систем» Національної металургійної академії України (м. Дніпро, 25.11.2020), науковому семінарі кафедри автоматизації, комп'ютерних наук і технологій факультету інформаційних технологій Криворізького національного університету (м. Кривий Ріг, 07.10.2021).

Публікації. Основний зміст дисертації відображено в 60 друкованих працях, із них 1 монографія, 21 стаття в наукових фахових виданнях України та іншої держави (зокрема 4 статті у виданнях, які індексуються в міжнародних наукометричних базах Scopus і Web of Science), 1 стаття в закордонному науковому виданні, 24 публікації у збірниках тез наукових конференцій, 12 наукових праць, які додатково відображають наукові результати дослідження. Новизна основних положень дисертації підтверджена 1 патентом України на корисну модель.

Структура і обсяг роботи. Дисертація складається із вступу, 6 розділів, висновків, списку використаних джерел із 389 позицій, додатків. Загальний обсяг роботи – 449 с., основного тексту – 286 с. Робота містить 100 рисунків і 31 таблицю.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано цілі та завдання дослідження, зазначено наукову новизну і практичну цінність роботи, указано особистий внесок здобувача в отриманні результати, представлено дані про їх апробацію, відображено одержані оперативно-технічні та економічні результати, що виносяться на захист.

У **першому розділі** проведено аналіз організаційно-технічної структури електроенергетичного комплексу України. Природно, що такий складний технічний комплекс, як електроенергетичні системи (ЕЕС), потребує розвиненого оперативного диспетчерського керування (ОДК). Аналіз показав, що ОДК в сучасних складних соціально-економічних умовах потрібно глибокої модернізувати. Узагальнена схема диспетчерського керування енергосистемою представлена на рис. 1. Функціональна схема керування режимом ЕЕС наведена на рис. 2.



Рисунок 1 – Узагальнена ієрархічна структура диспетчерського управління енергосистемою

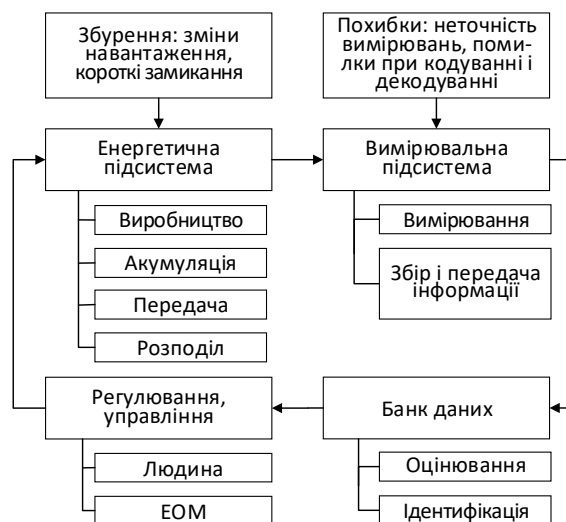


Рисунок 2 – Контур керування функціонуванням технічного комплексу силової і інформаційної підсистем ЕЕС

Очевидно, що поточне керування енергосистемами потребує безперервної напруженої роботи оперативно-диспетчерського персоналу, проте протиаварійне керування передбачає надмірно жорсткі психофізіологічні вимоги до осіб, які приймають рішення, що вже не відповідають параметрам поточного стану енергосистеми.

На основі порівняльного аналізу наявних науково-технічних рішень у галузі автоматизації систем протиаварійного керування (ПАК) можна зробити висновок про актуальність і необхідність розробки систем підтримки прийняття рішень і їх упровадження як частини АСДК енергосистем.

Прийняття рішень при управлінні електроенергетичними системами спирається на знання про процеси керування. Останні реалізуються у вигляді процесів регулювання параметрів роботи енергосистеми в нормальних і аварійних режимах. Режими роботи характеризуються значеннями їх параметрів як функціями величин збурень, які впливають. Тому слід говорити про малі збурення, що не приводять до

аварійних ситуацій, і про великі збурення, для яких повинні розглядатися організаційно-технічні заходи диспетчерського персоналу щодо стабілізації режиму з його подальшим поверненням до початкових параметрів. Інформація про типи і методи регулювання режимів енергосистем утворює основу бази знань (БЗ) системи підтримки рішень диспетчера. Ядро СППР має впроваджуватися в середовище системи управління шляхом підключення до каналів передачі даних і засобів накопичення та зберігання оперативної інформації.

Узагальнена структурна схема керування режимом ЕЕС наведена на рис. 3.

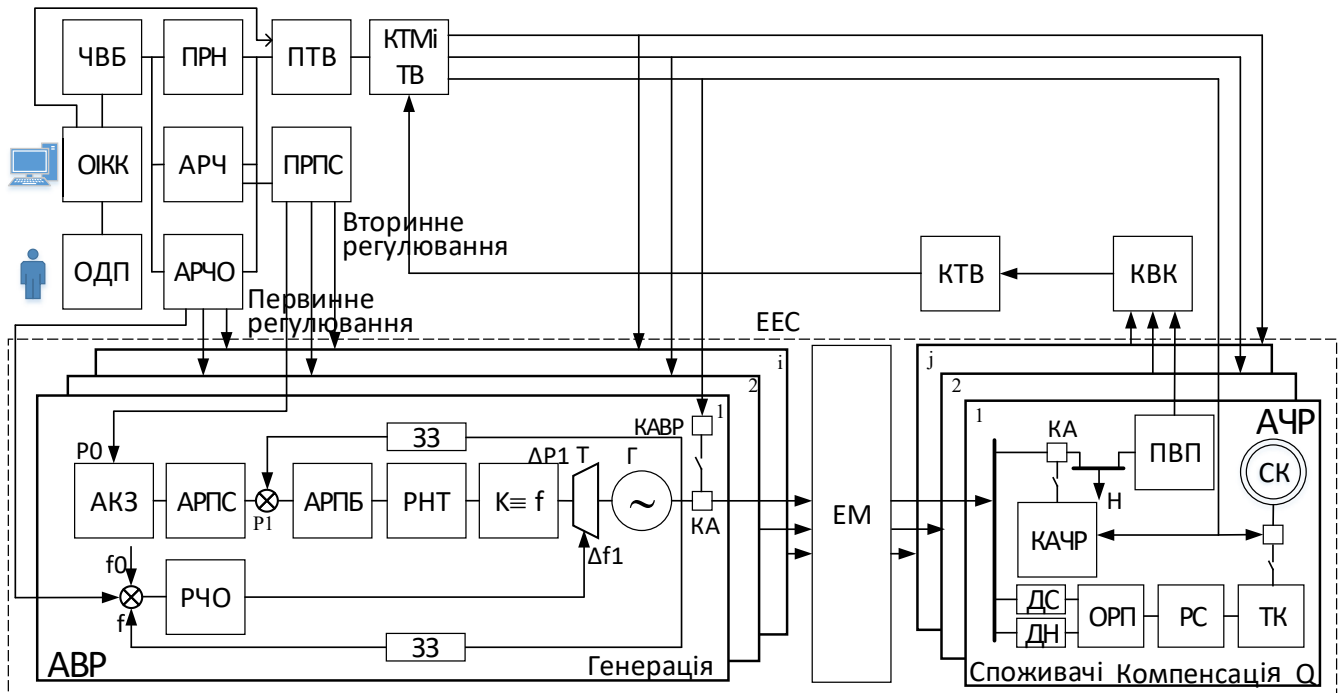


Рисунок 3 – Узагальнена структура системи оперативного керування ЕЕС

Передусім на рисунку 3 визначимо основні компоненти контуру керування – оперативно-диспетчерський персонал (блок ОДП) як суб'єкт управління (особа, яка приймає рішення) і енергосистему (блок ЕЕС) як об'єкт управління.

Основними контрольованими параметрами режиму є величини напруг у сенсорних точках мережі, перетоків потужності у відповідальних перетинах і частоти в системі. Чутливим показником стійкості роботи системи є частота. На схемі показані три методи управління режимом ЕЕС залежно від величини збурень – первинне регулювання частоти, вторинне регулювання частоти і протиаварійне управління в аварійних ситуаціях. Первинне регулювання частоти здійснюється регуляторами частоти обертання агрегату (на схемі – блок РЧО). Вторинне регулювання здійснюється ланцюжком блоків АКЗ, АРПС, АРПБ, РНТ шляхом регулювання рівня подачі енергоносія і включення додаткових генеруючих потужностей з «гарячого» резерву. При великих збуреннях, що призводять до аварійної ситуації, коли ресурси первинного і вторинного регулювання вичерпані, під керівництвом диспетчера реалізується процес частотного розвантаження системи відключенням черг споживачів.

У якості прототипу для проєктування нових моделей і методів функціонування інтелектуальних систем підтримки управлінської діяльності в галузі енергетики необхідно спиратися на результати досліджень учених та інженерів, які зробили істотний внесок у напрям розвитку теорії штучного інтелекту та систем підтримки

рішень у диспетчерському керуванні енергосистемами: М. М. Антонової, А. А. Башликова, В. М. Вагіна, В. А. Веникова, Д. І. Вороненко, В. А. Геловані, А. П. Єремєєва, Л. П. Єремєєва, Ю. Я. Купершмідта, О. М. Ларіна, Л. С. Лебедева, Ю. Я. Любарського, Л. В. Маселя, Д. А. Поспєлова, В. Д. Самойлова, С. Ю. Соловйова, Б. С. Стогнія, П. В. Терелянського, В. Ф. Хорошевського, А. Г. Чачко, М. Badami, J. Daniel, C. T. Ragsdale, F. S. Yao та інших.

Базовою платформою будь-якої системи штучного інтелекту (СШІ) є система подання експертних знань. Тому для масової розробки СППР спершу необхідно вирішити проблему масової та уніфікованої розробки баз знань. Ця проблема сьогодні практично не вирішена.

У зв'язку з цим розробка моделей, методів, інформаційного та програмного забезпечення інтелектуальних автоматизованих систем керування для аварійного регулювання режимів енергосистем гірничо-металургійного комплексу за рахунок забезпечення стійкої та безпечної роботи шляхом зміни структури об'єктів системи і параметрів функціонування технічних засобів є практично значущим та актуальним завданням.

Другий розділ присвячено розробці та дослідженню математичних структурно-логічних моделей і методів еволюції інкорпорації професійних онтологій рівнів подання знань оперативного керування режимами енергосистем.

При розробці математичних моделей і методів еволюції інкорпорації професійних онтологій були використані методи системного аналізу, наукового узагальнення та систематизації, теорії штучного інтелекту і експертних систем, формальних систем і формальних мов, теорії графів.

На основі проведеного аналізу поширених форм подання знань відібрані найбільш прийнятні для побудови структурно-логічних моделей інкорпорації онтологій: атомарні висловлювання, факти, семантичні мережі, продукційні мережі, метазнання (метаонтології). Розробимо структурно-лінгвістичну модель професійної онтології для рівня БЗ атомарних висловлювань – KB_S

$$O_{KB_S} = \langle X, R, F \rangle, \quad (1)$$

де X – кінцева множина концептів (понять, термінів) предметної області, яку представляє онтологія O ; R – кінцева множина відношень між концептами (поняттями, термінами) заданої предметної області; F – кінцева множина функцій інтерпретації, заданих на концептах і/або відношеннях онтології O .

Визначимо складові кортежу

$$X^{c_0} = S^{c_0} = \{s_k^{c_0} \mid k=1, n_s\}. \quad (2)$$

Оскільки для цього рівня відношення між висловлюваннями відсутні (тобто висловлювання використовуються ізольовано одне від одного), то $R = \emptyset$.

Для визначення множини функцій інтерпретації F приймемо, що частина висловлювань може використовуватися для інтерпретації інших висловлювань рівня.

Тоді

$$\exists (s_{1i}^{c_0} \in S_1^{c_0}, s_{21}^{c_0}, s_{22}^{c_0}, \dots, s_{2k}^{c_0} \in S_2^{c_0}) : s_{1i}^{c_0} = f(s_{21}^{c_0}, s_{22}^{c_0}, \dots, s_{2k}^{c_0}), f \in F. \quad (3)$$

Для реалізації функції інтерпретації на практиці використовується множина різних методик. У якості одного з варіантів приймемо

$$S_2^{c_0} = \{(s_{2j}^{c_0}, I_j) \mid j=1, n; n < N\}, \quad (4)$$

де I_j – індекс релевантності між підмножиною термінів $S_{2j}^{c_0}$ і концептом $s_{1j}^{c_0}$.

Тоді функція інтерпретації

$$f_j : Op(\{(s_{2j}^{c_0}, I_j)\}) \rightarrow (s_{1j}^{c_0}, I_j), \quad (5)$$

де Op – операція агрегації термінів, наприклад перерахування з упорядкуванням, конкатенація, вибір найбільш імовірного, вибір найбільш значимого, вибір найновішого, логічні зв'язки, логічне слідування і т. ін.

Отже, отримано формальну модель уніфікованої онтології для рівня атомарних концептів ієрархії професійних онтологій типу «активний словник» із такою узагальненою структурою:

$$O_{KB_s} = \langle \bigcup_{j=1}^N [S_{1j}^{c_0} \cup S_{2j}^{c_0}], \emptyset, \{F\} \rangle. \quad (6)$$

Уніфікація структурно-логічної моделі репрезентації фактів. У якості основи для репрезентації фактів будемо використовувати формальні моделі рівня атомарних концептів. Факт представимо кортежем

$$f_i^{c_j} = \langle S_{si}^{c_j}, S_{ri}^{c_j}, S_{ai}^{c_j} \rangle, \quad (7)$$

де S_{si} – атомарне висловлювання – джерело відношення; S_{ri} – атомарне висловлювання – відношення; S_{ai} – атомарне висловлювання – приймач відношення.

Графічно модель елементарного факту f_i для контексту c_j представимо як орграф (далі – граф) такого вигляду (рис. 4):

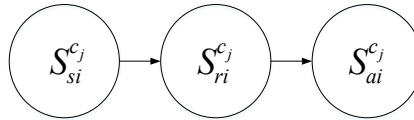


Рисунок 4 – Графічна модель факту f_i

У теоретико-множинній інтерпретації факт представляється так:

$$f_i^{c_j} = \{S_{si}^{c_j}, S_{ri}^{c_j}, S_{ai}^{c_j}\}. \quad (8)$$

Підмножина фактів F^{c_j} , які належать до контексту c_j , загальної множини фактів F буде представлена в такий спосіб:

$$f_i^{c_j} \in F^{c_j}, F^{c_j} \subseteq F. \quad (9)$$

Причому $f_i^{c_j} = \{S_{si}^{c_j}, S_{ri}^{c_j}, S_{ai}^{c_j}\}$, де $S_{si}^{c_j} \in S^0, S_{ri}^{c_j} \in S^0, S_{ai}^{c_j} \in S^0$.

Елементарний факт f_i представимо графом

$$G_i^f = \{V(G)_i^f, A(G)_i^f\}, \quad (10)$$

де $V(G)_i^f = f_i^{c_j}$ – множина атомарних висловлювань, що утворюють факт $f_i^{c_j} = \{S_{si}^{c_j}, S_{ri}^{c_j}, S_{ai}^{c_j}\}$, $|V(G)_i^f| = 3$; $A(G)_i^f$ – множина дуг (зв'язків) факту, $|A(G)_i^f| = 2$.

Введемо для факту окрему інтерпретацію проходження вершин, яка залежить від умов завдання і, в загальному випадку, може бути довільною

$$I^f = (P_s^f, P_e^f), \quad (11)$$

де P_s^f – інцидентор стартових висловлювань дуг фактів $P_s^f(S_{si}^{c_j}, S_{ri}^{c_j}) = S_{si}^{c_j}, P_s^f(S_{ri}^{c_j}, S_{ai}^{c_j}) = S_{ri}^{c_j}$; P_e^f – інцидентор кінцевих висловлювань дуг фактів $P_e^f(S_{si}^{c_j}, S_{ri}^{c_j}) = S_{ri}^{c_j}, P_e^f(S_{ri}^{c_j}, S_{ai}^{c_j}) = S_{ai}^{c_j}$.

Тепер можна дати загальну формальну модель графа елементарного факту

$$G_i^f = \{V(G)_i^f, A(G)_i^f, I^f\}, \quad (12)$$

$$G_i^f = \{V(G)_i^f, A(G)_i^f, P_s^f, P_e^f\}.$$

Оскільки для цього рівня БЗ відношення між фактами відсутні (тобто факти використовуються ізольовано один від одного), то $R = \emptyset$.

У цьому випадку факти можна розділити на ситуаційні групи – класи – підмножину інтерпретованих фактів (з індексом 1) і підмножину фактів, що інтерпретують (з індексом 2), як наведено у виразі (13):

$$F = \{\{F_1\}, \{F_2\}\}, \quad (13)$$

де $F_1 \cup F_2 = F$ уся множина фактів, $F_1 \cap F_2^0 = \emptyset$.

Тоді

$$\exists(f_{1i} \in F_1), \exists(f_{21}, f_{22}, \dots, f_{2k} \in F_2)(f_{1i}^{c_0} = f^f(f_{21}^{c_0}, f_{22}^{c_0}, \dots, f_{2k}^{c_0}), f^f \in F^f). \quad (14)$$

Функція інтерпретації матиме вигляд

$$f_j : Op(\{(f_{2j}, I_j)\}) \rightarrow (f_{1j}, I_j), \quad (15)$$

де Op – операція агрегації фактів, наприклад перерахування з упорядкуванням, вибір найбільш імовірного, вибір найбільш значимого, вибір найновішого, логічне зв'язування, логічне слідування і т. ін.

На основі розроблених теоретико-множинних моделей отримана формальна модель уніфікованої онтології фактів для професійних онтологій типу «активний словник» із такою узагальненою структурою:

$$O_{KB_F} = \langle \bigcup_{j=1}^N [F_{1j} \cup F_{2j}], \emptyset, \{F^f\} \rangle. \quad (16)$$

Уніфікація структурно-логічної моделі репрезентації семантичних мереж. Семантична мережа N_s – це орграф, вершинами якого є елементарні факти. Графічна ілюстрація запропонованої моделі семантичної мережі N_s наведена на рис. 5.

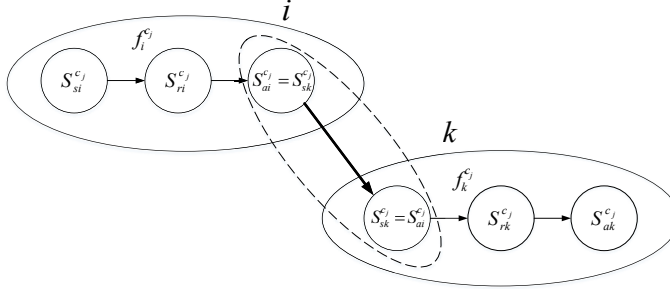


Рисунок 5 – Графічна ілюстрація мінімальної семантичної мережі N_s

Основний кінцевий термінальний алфавіт семантичної мережі в цій інтерпретації є множиною фактів рівня бази знань:

$$A_t = \{\varepsilon\} \cup F, \text{ де } f_i^{c_j} \in F^{c_j}, F^{c_j} \subseteq F. \quad (17)$$

Введемо нову інтерпретацію семантичної мережі N_s , засновану на формалізмі фактів, і врахуємо еволюцію онтологій в ієрархічній системі подання знань:

$$N_s = \langle F, I, G \rangle, \quad (18)$$

де $F = \{f_k^{c_j}, k=1, n_s\}$ – множина фактів (концептів) семантичної мережі, множина вузлів мережі; $I = \{i_l, l=1, n_l\}$ – множина зв'язків у мережі між фактами (концептами); $G = \{g_q, q=1, n_q\}$ – множина відображень інцидентності множини зв'язків на множину концептів.

Отже, синтез семантичної мережі в межах розробленої теоретико-множинної інтерпретації описується як процедура конкатенації множини фактів, що відповідають умові

$$\exists(f_k, f_{k+1})(f_k \cap f_{k+1} = s_s) \vee (f_k \cap f_{k+1} = s_a) \rightarrow (f_k, f_{k+1} \in N_s). \quad (19)$$

Після об'єднання фактів у загальних вершинах і утворення семантичної мережі остання буде являти собою оргграф фактів.

$$\begin{aligned} N_s &= G_s, \\ G_s &= \{V(G_s), A(G_s)\}, \end{aligned} \quad (20)$$

де $V(G_s)$ – множина фактів семантичної мережі, $V(G_s) = F = \{f_k^{c_j}, k=1, n_s\}$; $A(G_s)$ – множина дуг (зв'язків) між фактами.

Введемо для семантичної мережі N_s (як для оргграфа) окрему інтерпретацію проходження вершин, яка залежить від умов завдання і, в загальному випадку, може бути довільною:

$$I^s = (P_s^s, P_e^s),$$

де P_s^s – інцидентор початкових вузлів (фактів) дуг семантичної мережі $P_s^s(f_k^{c_j}, f_{k+1}^{c_j}) = s_i^{c_j}, s_i^{c_j} \in f_k^{c_j}$; P_e^s – інцидентор кінцевих висловлювань дуг фактів $P_e^s(f_k^{c_j}, f_{k+1}^{c_j}) = s_i^{c_j}, s_i^{c_j} \in f_{k+1}^{c_j}$.

Тепер загальна формальна модель графа семантичної мережі N_s така:

$$\begin{aligned} G^s &= \{V(G)^s, A(G)^s, I^s\}, \\ G^s &= \{V(G)^s, A(G)^s, P_s^s, P_e^s\}. \end{aligned} \quad (21)$$

Наведемо формальну мову моделі подання семантичної мережі в професійній області ієрархії онтологій. Врахуємо, що формальна мова семантичної мережі відноситься до деякого з класів семантичних мереж у поточному контексті

$$\forall N_k^{c_i}, k=1, n_s : \bigvee_{k=1}^{n_g} N_k^{c_i} \in N_{g_m^{c_i}}^{c_i}.$$

Узагальнимо мову контекстних семантичних підмереж на всі класи контекстів бази знань на семантичній мережі.

$$L(G)^s = \langle \Sigma^s, N^s, P^s, S^s \rangle, \quad (22)$$

де $\Sigma^s = \{n_{sk} | k=1, n_s\}$ – всі контекстні мережі рівня семантичної мережі БЗ; $N_s = \{\{N_{s1g_m^{c_0}}\}, \{N_{s2g_m^{c_0}}\}, \dots, \{N_{smg_m^{c_0}}\}, \dots, \{N_{sn_gg_m^{c_0}}\}\}$; $N_s = \{\text{підмережа, клас_підмереж, шар_мережі}\}$.

Множиною концептів онтології семантичної мережі є контекстні підмережі $N_{smg_m^{c_0}}$, які утворюють у загальному випадку множинні конкатенації між собою. Тоді для мережі будь-якого контексту матимемо

$$X^s = N^s = \{N_m^s | m=1, n_s\} = \{\{f_k | k=1, n_f\} | m=1, n_s\} = \{\{\{s_{sk}, s_{rk}, s_{ak}\} | k=1, n_f\} | m=1, n_s\}$$

або

$$X^s = \{\{f_k | k=1, n_f\} | m=1, n_s\} = \{\{\{s_{sk}, s_{rk}, s_{ak}\} | k=1, n_f\} | m=1, n_s\}. \quad (23)$$

Оскільки для цього рівня БЗ (KB_S) локальні контекстні підмережі мають зв'язки, то множина відносин між підмережами не порожня – $R^s \neq \emptyset$.

Підмережі можна розділити на ситуаційні групи – класи – підмножини інтерпретованих підмереж (з індексом 1) і підмереж, що інтерпретують (з індексом 2), як наведено у виразі

$$N^s = \{\{N_1^s\}, \{N_2^s\}\}, \quad (24)$$

де $N_1^s \cup N_2^s = N^s$ – уся множина семантичних підмереж рівня і $N_1^s \cap N_2^s = \emptyset$.
Тоді

$$\exists(N_{1i}^s \in N_1^s), \exists(N_{21}^s, N_{22}^s, \dots, N_{2k}^s \in N_2^s)(N_{1i}^{c_0} = f(N_{21}^{c_0}, N_{22}^{c_0}, \dots, N_{2k}^{c_0})). \quad (25)$$

Функція інтерпретації f_j у загальному вигляді буде такою:

$$f_j : Op(\{(N_{21}^{c_0}, N_{22}^{c_0}, \dots, N_{2k}^{c_0}, I_j)\}) \rightarrow (f_{1j}, I_j), \quad (26)$$

де Op – операція агрегації підмереж, наприклад вибір найбільш релевантної підмережі, перерахування з упорядкуванням, вибір найбільш значущої, вибір останньої доданої до бази знань, логічне зв'язування, логічне слідування і т. п.

На основі розроблених структурно-множинних моделей отримана формальна модель уніфікованої онтології семантичних мереж для рівня семантичних мереж ієрархії професійних онтологій типу «мережева структура із можливістю розширення», що виражається в такий спосіб:

$$O^S = \langle \bigcup_{j=1}^N [N_{1j}^S \cup N_{2j}^S], R^S, F^S \rangle. \quad (27)$$

Введемо формальне правило подання продукції в термінах цієї роботи: продукційне правило R – це множина кластерів

$$N_S^{Clust} = \{N_{Si}^{Clust}, i=1, n^{Clust}\}$$

семантичної мережі N_s , таких, що

$$\forall (N_{Si}^{Clust}) ((N_{Si}^{Clust} \in N_S^{Clust} \wedge N_S^{Clust} \subseteq N_s)$$

і пов'язаних між собою співвідношенням

$$R : \bigwedge_{i=1}^{n-1} N_{Si}^{Clust} \rightarrow N_{Sn}^{Clust}, \quad (28)$$

де Lop – логічні операції AND ($\wedge$) або OR ($\vee$), які стосуються перших $n-1$ кластерів семантичної мережі. Операція NOT ($\neg$) застосовується при $n=1$ і зазвичай у базах знань імплементується в смислову умовну компоненту (антецедент) продукції; $\rightarrow$ – логічна операція імплікації.

Вводячи логічні зв'язки кон'юнкції ($\wedge$) і диз'юнкції ($\vee$), можна записати для продукції типу «І»:

$$R : N_{S1}^{Clust} \wedge N_{S2}^{Clust} \wedge \dots \wedge N_{Sn-1}^{Clust} \rightarrow N_{Sn}^{Clust} \text{ або } R : \bigwedge_{i=1}^{n-1} N_{Si}^{Clust} \rightarrow N_{Sn}^{Clust}; \quad (29)$$

для продукції типу «АБО»:

$$R : N_{S1}^{Clust} \vee N_{S2}^{Clust} \vee \dots \vee N_{Sn-1}^{Clust} \rightarrow N_{Sn}^{Clust} \text{ або } R : \bigvee_{i=1}^{n-1} N_{Si}^{Clust} \rightarrow N_{Sn}^{Clust}. \quad (30)$$

Формалізуємо основну частину продукції – її ядро. Введемо інтерпретацію семантичної мережі продукції N_s як мережі кластерів, засновану на формалізмі семантичних мереж і таку, що враховує еволюцію онтологій в ієрархічній системі подання знань:

$$N_s = \langle N_S^{Clust}, I^{Clust}, G^{Clust} \rangle, \quad (31)$$

де $N_S^{Clust} = \{N_{Si}^{Clust}, i=1, n^{Clust}\}$ – множина кластерів (концептів), що утворюють семантичну мережу продукції; $I^{Clust} = \{i_l, l=1, n_l\}$ – множина зв'язків між кластерами N_{Si}^{Clust} (концептами); $G^{Clust} = \{g_q, q=1, n_q\}$ – множина відображень інцидентності множини зв'язків на множину кластерів (концептів).

Синтез продукції в межах розробленої теоретико-множинної інтерпретації описується як процедура конкатенації множин кластерів підмножин семантичної мережі БЗ, що відповідають такій умові:

$$\exists (N_{S1}^{Clust}, \dots, N_{Sn-1}^{Clust}, N_{Sn}^{Clust}) (\bigcap_{k=1}^{n-1} N_{Sk}^{Clust} = s_{sn}) \vee (\bigcap_{k=1}^{n-1} N_{Sk}^{Clust} = s_{an}) \rightarrow (N_{S1}^{Clust}, \dots, N_{Sn-1}^{Clust}, N_{Sn}^{Clust} \in R). \quad (32)$$

Мінімальна продукція може бути показана в такий спосіб (рис. 6).

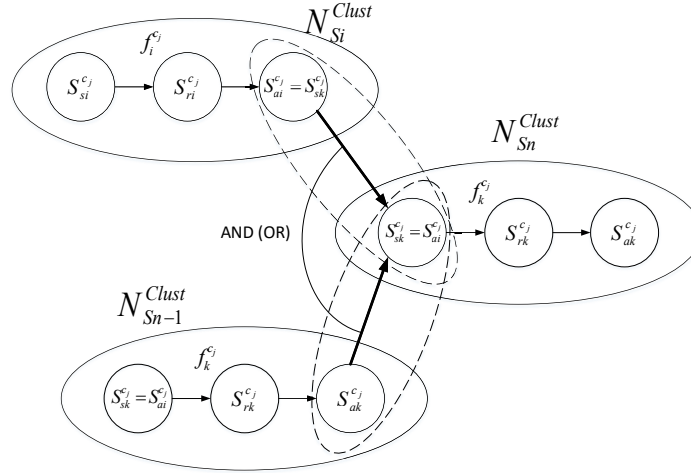


Рисунок 6 – Об'єднання кластерів семантичних мереж, що утворюють продукцію

Після об'єднання кластерів і створення продукції остання буде являти собою орграф виду

$$R = G_{Clust}; G_{Clust} = \{V(G_{Clust}), A(G_{Clust})\}, \quad (33)$$

де $V(G_{Clust})$ – множина кластерів семантичної мережі, $V(G_{Clust}) = N_S^{Clust} = \{N_{Sk}^{Clust}, k=1, n_{Clust}\}$; $A(G_{Clust})$ – множина зв'язків між кластерами.

Введемо для об'єднання кластерів G_{Clust} (як для орграфа продукції) окрему інтерпретацію проходження вершин, яка залежить від умов завдання і, в загальному випадку, може бути довільною:

$$I^{Clust} = (P_s^{Clust}, P_e^{Clust}),$$

де P_s^R – інцидентор початкових вузлів (кластерів) дуг продукції, $P_s^R(N_{Sk}^{Clust}, N_{Sk+1}^{Clust}) = S_i^{c_j}, S_i^{c_j} \in N_{Sk}^{Clust}$; P_e^R – інцидентор кінцевих вузлів (кластерів) дуг продукції, $P_e^R(N_{Sk}^{Clust}, N_{Sk+1}^{Clust}) = S_i^{c_j}, S_i^{c_j} \in N_{Sk}^{Clust}$.

Тепер загальна формальна модель графа продукції R :

$$G^R = \{V(G_{Clust}), A(G_{Clust}), I^R\} = \{V(G)_{Clust}, A(G)_{Clust}, P_s^R, P_e^R\}. \quad (34)$$

Врахуємо, що формальна мова продукцій буде належати до деякого з класів семантичних мереж у поточному контексті

$$\forall R_k^{c_i}, k=1, n_s \left(\bigvee_{k=1}^{n_g} R_k^{c_i} \in N_{g_m^{c_i}}^{c_i} \right).$$

Задамо правила грамматики P на продукційній мережі для мови $L(G)_{g_m^{c_i}}^{Rc_i}$

$$\begin{aligned} N^P &\rightarrow P_{g_m^{c_i}}^R \mid P_{g_m^{c_i}}^R [P_{g_m^{c_i}}^R], \\ P^R &\rightarrow N_{Ra}^{Clust} N_{Rc}^{Clust}, \\ N_{Ra}^{Clust} &\rightarrow N_{sa} \mid [N_{sa}], \\ N_{Rc}^{Clust} &\rightarrow N_{sc}, \end{aligned} \quad (35)$$

де $P_{g_m^{c_i}}^R$ – продукція. Якщо ознакою сегментації є контекстна ознака, $g_m^{c_i}$ то $N^{Pc_i} = N_{mg_m^{c_i}}^{Pc_i}$;

N_{Ra}^{Clust} , N_{Rc}^{Clust} – відповідно кластери семантичних мереж, задані як антецедент і консеквент продукції; N_{sa} – семантична мережа, віднесена до кластера мереж антецедента; N_{sc} – семантична мережа, віднесена до кластера мережі консеквента.

Концептами онтології X^P продукційної мережі є продукції, які утворюють у загальному випадку множинні конкатенації між собою. Тоді для мережі будь-якого контексту матимемо

$$X^P = N^P = \{P_m \mid m=1, n_P\} = \{\{N_{Rka}^{Clust} N_{Rc}^{Clust} \mid k=1, n_{Clust}\} \mid m=1, n_P\}$$

або

$$X^P = \{N_{Rka}^{Clust} N_{Rc}^{Clust} \mid k=1, n_{Clust}\} = \{\{N_m^S \mid m=1, n_s\}\}. \quad (36)$$

Оскільки для цього рівня БЗ (KB_P) локальні контекстні продукції мають зв'язки, то множина відношень між ними не порожня – $R^P \neq \emptyset$.

Підмережі продукції можна розділити на ситуаційні групи – класи – підмножини інтерпретованих продукцій (з індексом 1) і підмножини продукцій, що інтерпретують (з індексом 2), як наведено у виразі

$$N^R = \{\{N_1^R\}, \{N_2^R\}\}, \quad (37)$$

де $N_1^R \cup N_2^R = N^R$ – уся множина продукцій рівня, $N_1^R \cap N_2^R = \emptyset$.

$$\text{Тоді } \exists(R_{1i}^s \in N_1^R), \exists(R_{21}^s, R_{22}^s, \dots, R_{2k}^s \in N_2^R) (R_{1i}^{c_0} = f(R_{21}^{c_0}, R_{22}^{c_0}, \dots, R_{2k}^{c_0})) \quad (38)$$

Функція інтерпретації f_j в загальному випадку буде мати вигляд

$$f_j^R : Op(\{(R_{21}^{c_0}, R_{22}^{c_0}, \dots, R_{2k}^{c_0}, I_j)\}) \rightarrow (R_{1j}, I_j), \quad (39)$$

де Op – операція агрегації продукцій. Для продукційних мереж зазвичай такою операцією є операція логічного слідування продукцій, змістом якої є об'єднання вихідних і вхідних кластерів.

На основі розроблених структурно-множинних моделей отримана формальна модель уніфікованої онтології продукційних мереж для рівня 3 ієрархії професійних онтологій типу «мережева структура з можливістю розширення», що виражається в такий спосіб:

$$O^R = \langle \bigcup_{j=1}^N [N_{1j}^R \cup N_{2j}^R], R^R, F^R \rangle \quad (40)$$

Підсумком другого розділу можна вважати математичні моделі інкорпорації та обробки онтологій професійній галузі подання знань і методів корекції параметрів режимів енергосистеми в програмному комплексі підтримки рішень для автоматизації процесів антикризового диспетчерського керування енергосистемою. За основу прийнято загальну формальну модель онтології (1), в основу якої покладено запропоновану модель лінгвістичного концепту і моделей функцій його інтерпретації (3)–(5), що уможливило отримання базової формальної моделі онтології лінгвістичного концепту (6). При опорі на модель концепту розроблено формальні структурно-логічні моделі факту (8)–(12), семантичної мережі (17)–(21), продукцій (28)–(39). Отримані моделі сприяли побудові відповідних формальних моделей онтологій, які утворюють еволюційну архітектуру – онтологію елементарного концепту (6), онтологію факту (16), онтологію семантичної мережі (27), онтологію продукційних правил (40).

У відомих моделях наявних баз знань онтології розглядаються незалежно одна від одної, а запропонована модель реалізує взаємну відповідність еволюційного успадкування рівнів концептів і методів їх обробки, які забезпечують єдину

теоретико-множинну модель знань для всіх онтологічних рівнів із дотриманням положень подібності. Отримані моделі дають змогу автоматизувати проектування та застосування баз знань диспетчерського керування електротехнічним обладнанням і режимами його роботи в кризових ситуаціях.

Третій розділ присвячено розробці математичних моделей і методів уніфікації професійних онтологій диспетчерського керування в умовах невизначеності.

При розробці математичних моделей і методів уніфікації онтологій в умовах невизначеності використовувалися методи теорії графів, теорії штучного інтелекту, теорії ймовірності, математичний апарат нечіткої логіки та нечітких множин.

Для керування рівнями подання знань за допомогою метаправил пропонується розглядати структуру знань у вигляді моделі сигнального лінійного орграфа. З цих позицій розроблено математичні моделі інтерпретації ієрархії онтологій. Пропонується базова модель сигнального графа БЗ, наведена на рис. 7.

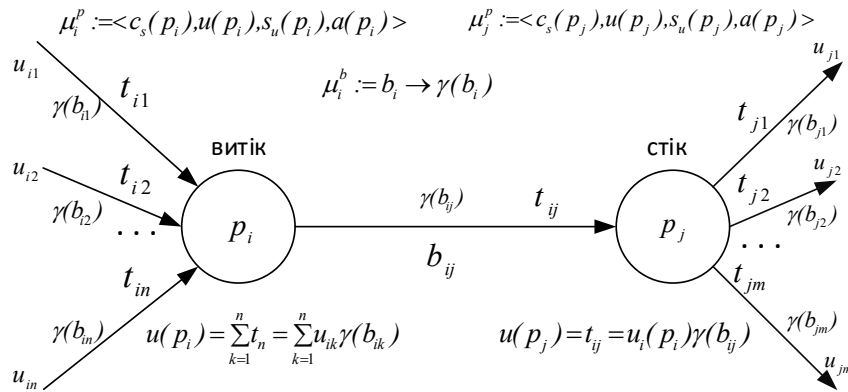


Рисунок 7 – Запропонована базова модель передачі сигналу в елементарному графі БЗ

Робота сигнального графа моделюється процедурами його маркування.

Маркування для довільного i -го вузла визначимо так:

$$\mu_i^p : p_i \rightarrow m_\mu(p_i) = \langle c_s(p_i), u(p_i), s_u(p_i), a(p_i) \rangle, \quad (41)$$

$$\mu_i^p \in M^p, \quad p_i \in P(G_s),$$

$$M^p : P(G_s) \rightarrow m_\mu(P),$$

$$u(p_i), s_u(p_i) \in \mathbb{R},$$

де μ_i^p – функція маркування i -го вузла p_i параметром $c(p_i)$; M^p – загальне маркування вузлів кластера (або всієї мережі), по відношенню до якого використовується модель метазнань; $P(G_s)$ – множина вузлів кластера (або всієї мережі), по відношенню до якого використовується модель метазнань; $\mathbb{R}$ – множина дійсних чисел.

Маркування для i -ї гілки визначимо так:

$$\mu_i^b : b_i \rightarrow \gamma(b_i), \quad (42)$$

$$\mu_i^b \in M^b, \quad b_i \in A(G_s),$$

$$M^b : A(G_s) \rightarrow \mathbb{R},$$

$$\gamma(b_i) \in \mathbb{R},$$

де μ_i^b – функція маркування i -ї гілки b_i числом t_i ; M^b – загальне маркування гілок кластера (або всієї мережі), по відношенню до якого використовується модель метазнань; $A(G_s)$ – множина спрямованих гілок графа кластера (або всієї мережі), по

відношенню до якого використовується модель метазнаний; $\mathbb{R}$ – множина дійсних чисел.

Введемо форму подання метаправил. Метаправило MR будемо представляти співвідношенням

$$MR : \bigwedge_{i=1}^n S_{MRi} \rightarrow O_{KBj}, \quad (43)$$

де Lop – логічна операція, зв'язка – AND ($\wedge$) або OR ($\vee$), що належить до умов метаправила. Операція NOT ($\neg$) застосовується при $n = 1$ і зазвичай імплементується в антецедент метаправила; S_{MRi} – поточна умова метаправила; O_{KBj} – одна з операцій маркування або структуризації БЗ, $O_{KBj} \in O_{KB}$; $\rightarrow$ – імплементация слідування, тут – застосування операції O_{KBj} .

Формальна ілюстрація розробленої моделі метаправила і його роботи по відношенню до рівнів онтологій наведена на рис. 8. Вхідні елементи метаправила $\{S_{MRi}\}$ являють собою сигнальні дані від зовнішнього середовища СППР. На рисунку праворуч показані еволюція онтологій і їх формальні моделі.

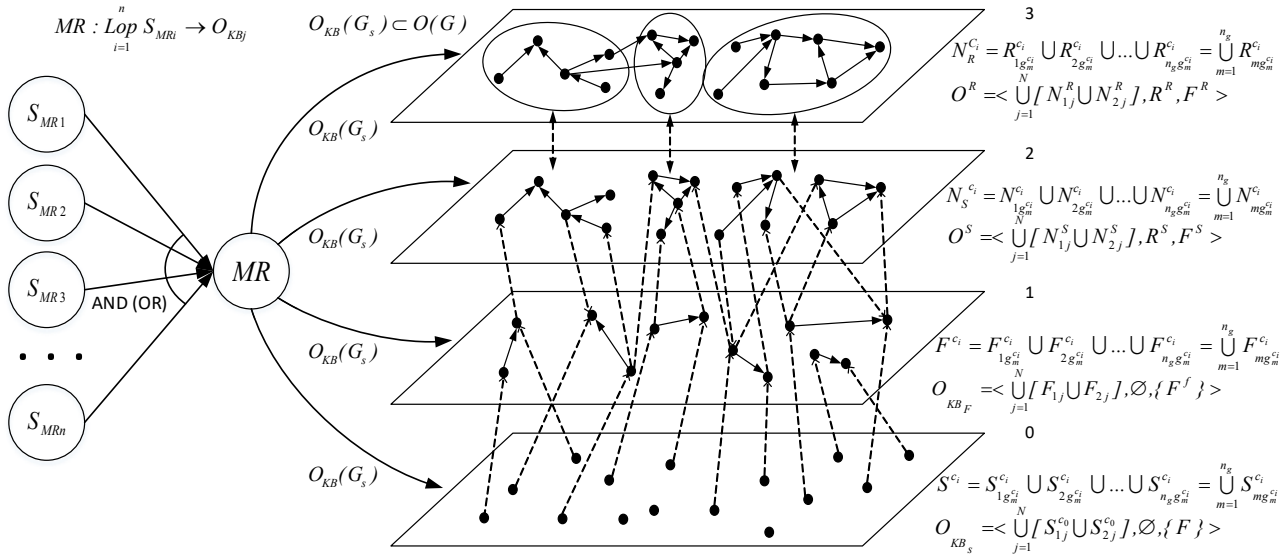


Рисунок 8 – Модель застосування метаправила по відношенню до еволюції онтологій

На основі розроблених структурно-множинних моделей отримана формальна модель уніфікованої онтології метаправил типу «Метаонтологія»:

$$O^{MR} = \langle \bigcup_{i=1}^{n_c} \{ \bigcup_{i=1}^{n_s} S_{MRk}^{c_i} \cup \bigcup_{k=1}^{n_o} F_k^{c_i} (P(G_s), A(G_s), M_\Sigma) \}, F(R(BЗ)), F^{MR} \rangle. \quad (44)$$

Розробка моделі фазифікації подання онтологій рівнів знань в умовах невизначеності. Будь-які подання знань здебільшого пов'язані з необхідністю урахування суб'єктивізму джерел знань.

Введемо загальний підхід до фазифікації концептів БЗ з урахуванням специфіки розроблених моделей онтологій. Будемо вважати множину всіх концептів (атомарних лексичних одиниць)

$$S = \{s_k \mid k=1, n_s\}$$

множиною-універсумом лінгвістичних змінних. Тобто

$$\forall (s_k \mid s_k \in S) : s_k = \langle \beta_k, T_k, X_k, G, M \rangle, \quad (45)$$

де β_k – найменування k -ї лінгвістичної змінної; T_k – терм-множина лінгвістичної змінної, що є множиною найменувань нечітких значень лінгвістичної змінної; X_k – область визначення (універсум) нечітких значень лінгвістичної змінної β_k ; G –

синтаксична процедура генерування в заданому контексті нових значень лінгвістичної змінної β ; M – семантична процедура формування нечіткої множини.

Тоді в термінах розробленої моделі знань лінгвістичну змінну пропонується представляти в такому вигляді:

$$\forall S^{C_i} \exists S_T^{C_i} (S^{C_i} \subset S, S_T^{C_i} \subset S, S^{C_i} \cap S_T^{C_i} = \emptyset) : \langle s_k^{C_i}, S_T^{C_i}, X_k, G, M \rangle, s_k^{C_i} \in S^{C_i}. \quad (46)$$

У практичній системі застосовується операція іменування (ідентифікації) нечітких змінних $O_{id} : s_{Tk}^{C_i} \rightarrow \alpha$. Якщо ж у якості імен нечітких змінних використовувати їх лексичні вирази, то

$$s_{Tk}^{C_i} = \langle s_{Tk}^{C_i}, X, \{x | \mu_A(x)\} \rangle. \quad (47)$$

Із прийнятої моделі фазифікації випливає, що в загальному випадку атомарні концепти є підмножиною нечітких змінних, які можуть бути узагальнені лінгвістичними змінними

$$s_{Tk}^{C_i} = \{s_{Tk1}^{C_i} | \mu_X(s_{T1}^{C_i}), s_{Tk2}^{C_i} | \mu_X(s_{T2}^{C_i}), \dots, s_{Tkn}^{C_i} | \mu_X(s_{Tn}^{C_i})\}, \quad (48)$$

$$s_{Tk}^{C_i} = \{(s_{Tjk}^{C_i} | \mu_X(s_{Tj}^{C_i})) | j=1, n\},$$

$$s_k^{C_i} = \langle O_{id}(s_k^{C_i}), S_T^{C_i}, X_k, G, M \rangle.$$

Універсум функції інтерпретації може бути представлений як бінарне відношення нечітких атомарних концептів, які інтерпретують, і інтерпретованих концептів

$$\tilde{F}^A : R \subseteq \{(s_{T2j}^{C_i} | \mu_X(s_{T2j}^{C_i})) | j=1, n\} \times \{(s_{T1k}^{C_i} | \mu_X(s_{T1k}^{C_i})) | k=1, m\}, \quad (49)$$

$$\tilde{F}^A : \tilde{S}_{T2}^{C_i} R \tilde{S}_{T1}^{C_i}.$$

Для конкретної k -ї функції інтерпретації атомарних концептів

$$\tilde{f}_k : Op(\{(\tilde{s}_{2j}^{C_i}, I_j)\}) \rightarrow (\tilde{s}_{1j}^{C_i}, I_j), \quad (50)$$

$$\tilde{f}_k : r^A \subseteq \{(\tilde{s}_{T2j}^{C_i} | \mu_X(s_{T2j}^{C_i})) | j=1, n\} \times (\tilde{s}_{T1}^{C_i} | \mu_X(s_{T1}^{C_i})),$$

$$\tilde{f}_k : \tilde{S}_{T2}^{C_i} r^A \tilde{S}_{T1}^{C_i}.$$

З урахуванням невизначеності формальна модель інкорпорації онтологій атомарних концептів еволюції знань матиме такий вигляд:

$$O_{KB_s} = \langle \bigcup_{j=1}^N \{(\tilde{s}_{T1j}^{C_i} | \mu_X(s_{T1j}^{C_i})) | j=1, n\} \cup \{(\tilde{s}_{T2k}^{C_i} | \mu_X(s_{T2k}^{C_i})) | k=1, m\}, \emptyset, \tilde{F}^A : \tilde{S}_{T2}^{C_i} R \tilde{S}_{T1}^{C_i} \rangle. \quad (51)$$

Виходячи з прийнятих моделей нечіткості тезауруса атомарних концептів, узагальнимо урахування невизначеності на всі рівні ієрархії подання знань.

Розробка моделі фазифікації подання онтологій рівня фактів в умовах невизначеності. Структура факту є триплетом атомарних концептів. Тому, формалізуючи структуру факту, необхідно враховувати нечіткість відношень між нечіткими концептами, як показано на рис. 9.

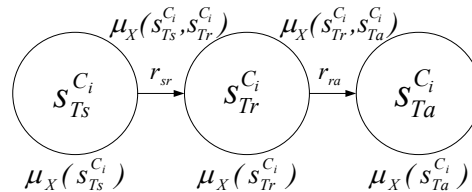


Рисунок 9 – Модель нечіткого факту $\tilde{f}^{C_i}$ як нечіткого графа

За визначенням графа $\tilde{G}^f : \tilde{V}(G)^f \rightarrow \tilde{A}(G)^f$. Тоді відобразимо схему факту бінарним відношенням $\tilde{R}_B^f$ графа Бержа з нечіткими концептами:

$$\tilde{R}_B^f = \tilde{V}(G)^f \times \tilde{V}(G)^f \rightarrow \tilde{A}(G)^f,$$

$$\tilde{R}_B^f = \{s_{Tks}^{C_i} | \mu_X(s_{Ts}^{C_i}), s_{Tkr}^{C_i} | \mu_X(s_{Tr}^{C_i}), s_{Tka}^{C_i} | \mu_X(s_{Ta}^{C_i})\} \times \{s_{Tks}^{C_i} | \mu_X(s_{Ts}^{C_i}), s_{Tkr}^{C_i} | \mu_X(s_{Tr}^{C_i}), s_{Tka}^{C_i} | \mu_X(s_{Ta}^{C_i})\}. \quad (52)$$

Інтерпретуємо факт як сигнальний граф. Сигнал у графі поширюється зліва направо через його структурні елементи. При цьому неточні провідності на сигнальному графі інтерпретуються як неточні відношення. Тепер можна відобразити факт структурною схемою, наведеною на рис. 10.

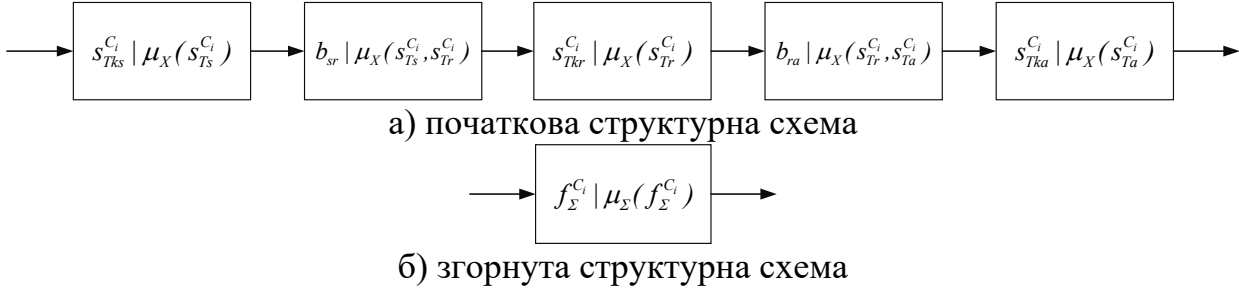


Рисунок 10 – Структурна схема факту в якості сигнального ланцюга

Зі сказаного випливає, що згортку схеми можна представити як функцію нечітких змінних з урахуванням правила Л. Заде:

$$f_{\Sigma}^{C_i} | \mu_{\Sigma}(f_{\Sigma}^{C_i}) = \bigcap_{1,5} (s_{Tks}^{C_i} | \mu_X(s_{Ts}^{C_i}), s_{Tkr}^{C_i} | \mu_X(s_{Tr}^{C_i}), s_{Tka}^{C_i} | \mu_X(s_{Ta}^{C_i}), b_{sr} | \mu_X(s_{Ts}^{C_i}, s_{Tr}^{C_i}), b_{ra} | \mu_X(s_{Tr}^{C_i}, s_{Ta}^{C_i})), \quad (53)$$

$$\mu_{\Sigma}(f_{\Sigma}^{C_i}) = \min_{1,5} (\mu_X(s_{Ts}^{C_i}), \mu_X(s_{Tr}^{C_i}), \mu_X(s_{Ta}^{C_i}), \mu_X(s_{Ts}^{C_i}, s_{Tr}^{C_i}), \mu_X(s_{Tr}^{C_i}, s_{Ta}^{C_i})).$$

Для конкретної k -ї функції інтерпретації рівня фактів

$$\tilde{f}_k : Op(\{(\tilde{f}_{2j}^{c_0}, I_j)\}) \rightarrow (\tilde{f}_{1j}^{c_0}, I_j),$$

$$\tilde{f}_k : r^f \subseteq \{(\tilde{f}_{2j}^{C_i} | \mu_X(\tilde{f}_{2j}^{C_i})) | j=1, n\} \times (\tilde{f}_{1j}^{C_i} | \mu_X(\tilde{f}_{1j}^{C_i})), \quad \tilde{f}_k : \tilde{F}_2^{C_i} r^f \tilde{f}_1^{C_i}. \quad (54)$$

З урахуванням невизначеності фактів формальна модель інкорпорації онтології рівня фактів еволюції знань матиме вигляд

$$O_{KB_F} = \langle \bigcup_{j=1}^N \{(\tilde{f}_{1j}^{C_i} | \mu_X(\tilde{f}_{1j}^{C_i})) | j=1, n\} \bigcup \{(\tilde{f}_{2k}^{C_i} | \mu_X(\tilde{f}_{2k}^{C_i})) | k=1, m\}, \emptyset, \tilde{F}^f : \tilde{F}_2^{C_i} R \tilde{F}_1^{C_i} \rangle. \quad (55)$$

Розробка моделі фазифікації подання онтологій рівня семантичних мереж в умовах невизначеності. При фазифікації контекстних кластерів семантичної мережі необхідно враховувати невизначеність фактів і схему їх з'єднання в межах кластера (рис. 11).

Результатом операцій є підмножина кластера мережі з конкретизацією вибірки. Тому дефазифікація результату залежить від його структури. У якості окремого прикладу можна вказати три варіанти вибірки (рис. 12).

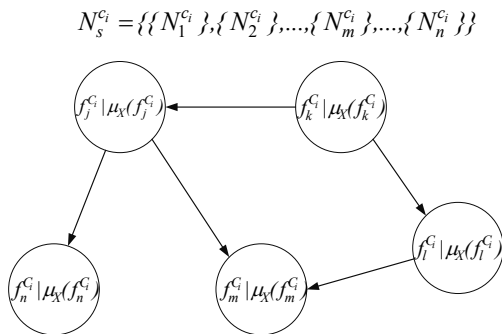


Рисунок 11 – Модель схеми кластера нечіткої семантичної мережі

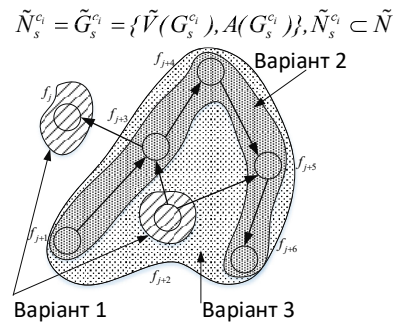


Рисунок 12 – Варіанти результатів вибірки на нечіткій семантичній мережі

Для нечітких фактів

$$\exists(\tilde{f}_k, \tilde{f}_{k+1})(\tilde{f}_k \cap \tilde{f}_{k+1} = \tilde{s}_s) \vee (\tilde{f}_k \cap \tilde{f}_{k+1} = \tilde{s}_a) \rightarrow (\tilde{f}_k, \tilde{f}_{k+1} \in \tilde{N}_s), \quad (56)$$

і контекстний граф нечіткої семантичної мережі визначиться так:

$$\tilde{N}_s^{C_i} = \tilde{G}_s^{C_i} = \{\tilde{V}(G_s^{C_i}), A(G_s^{C_i})\}, \tilde{N}_s^{C_i} \subset \tilde{N}. \quad (57)$$

На основі розробленої моделі фазифікації представимо форму онтології рівня семантичних мереж еволюції знань.

Для конкретної k -ї функції інтерпретації рівня кластерів семантичних мереж

$$\begin{aligned} \tilde{f}_k : Op(\{(\tilde{N}_{2j}^{C_0}, I_j)\}) &\rightarrow (\tilde{N}_{1j}^{C_0}, I_j), \\ \tilde{f}_k : r^N &\subseteq \{(\tilde{N}_{2j}^{C_i} | \mu_X(\tilde{N}_{2j}^{C_i})) | j=1, n\} \times (\tilde{N}_1^{C_i} | \mu_X(\tilde{N}_1^{C_i})), \\ \tilde{f}_k : \tilde{N}_2^{C_i} r^N \tilde{N}_1^{C_i}. \end{aligned} \quad (58)$$

З урахуванням невизначеності кластерів $\tilde{N}^{C_i}$ формальна модель інкорпорації онтології рівня семантичних мереж еволюції знань матиме такий вигляд:

$$O_{KB_N} = \langle \bigcup_{j=1}^N \{(\tilde{N}_{1j}^{C_i} | \mu_X(\tilde{N}_{1j}^{C_i})) | j=1, n\} \bigcup \{(\tilde{N}_{2k}^{C_i} | \mu_X(\tilde{N}_{2k}^{C_i})) | k=1, m\}\}, R_N, \tilde{F}^N : \tilde{N}_2^{C_i} R \tilde{N}_1^{C_i} \rangle. \quad (59)$$

Розробка моделі фазифікації подання онтологій рівня продукційних мереж в умовах невизначеності. У розробленій еволюції інкорпорації знань продукції агрегують семантичні мережі:

$$R : \bigwedge_{i=1}^{n-1} N_{Si}^{Clust} \rightarrow N_{Sn}^{Clust}, \quad R : \bigvee_{i=1}^{n-1} N_{Si}^{Clust} \rightarrow N_{Sn}^{Clust}.$$

Рис. 13 ілюструє викладені положення.

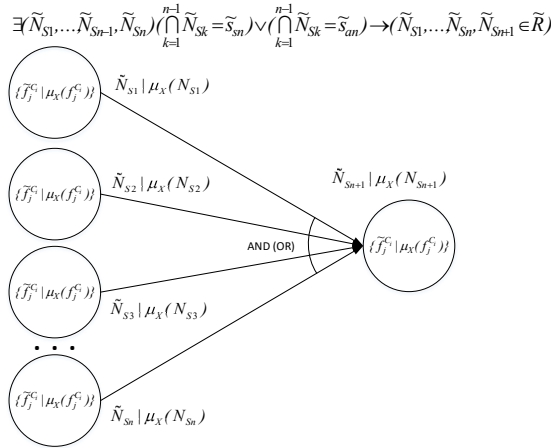


Рисунок 13 – Модель нечіткого продукційного правила

Логічний висновок можна формувати на основі найбільш поширених алгоритмів нечіткого виводу Мамдані, Ларсена, Сугено і т. ін.

Для конкретної k -ї функції інтерпретації рівня кластерів продукційних мереж

$$\begin{aligned} \tilde{f}_k : Op(\{(\tilde{N}_{2j}^{RC_0}, I_j)\}) &\rightarrow (\tilde{N}_{1j}^{RC_0}, I_j), \\ \tilde{f}_k : r^R &\subseteq \{(\tilde{N}_{2j}^{RC_i} | \mu_X(\tilde{N}_{2j}^{RC_i})) | j=1, n\} \times (\tilde{N}_1^{RC_i} | \mu_X(\tilde{N}_1^{RC_i})), \\ \tilde{f}_k : \tilde{N}_2^{RC_i} r^N \tilde{N}_1^{RC_i}. \end{aligned} \quad (60)$$

З урахуванням невизначеності кластерів $\tilde{N}^{RC_i}$ формальна модель інкорпорації

онтології рівня продукції еволюції знань матиме такий вигляд:

$$O_{KB_R} = \langle \bigcup_{j=1}^N \{ \{ \tilde{N}_{1j}^{RC_i} \mid \mu_X(N_{1j}^{RC_i}) \} \mid j=1, n \} \cup \{ \{ \tilde{N}_{2k}^{RC_i} \mid \mu_X(N_{2k}^{RC_i}) \} \mid k=1, m \} \}, R_R, \tilde{F}^R : \tilde{N}_2^{RC_i} R \tilde{N}_1^{RC_i} \rangle. \quad (61)$$

Розробка моделі фазифікації подання онтологій рівня метаправил в умовах невизначеності. Застосуємо модель І-нейрона для конструювання метаправила у вигляді модуля нечіткого керування. Введемо в модель функції належності. За основу візьмемо правило нечіткої імплікації Ларсена для продукції виду $A \rightarrow B$

$$\mu_{A \rightarrow B}(x, y) = \mu_R(x, y) = \mu_A(x) \mu_B(y), \quad R \subseteq X \times Y.$$

Якщо Т-норму представити добутком, то

$$\begin{aligned} \mu_B(y) &= \sup_{x_1, x_2, \dots, x_n \in X} \{ \mu_{A'}(x) \mu_{A \rightarrow B}(x, y) \}, \\ \mu_B(y) &= \sup_{x_1, x_2, \dots, x_n \in X} \{ \mu_{A'}(x) \mu_A(x) \mu_B(y) \}, \\ \mu_B(y) &= \sup_{x_1, x_2, \dots, x_n \in X} \{ \mu_{A'_1}(x_1) \dots \mu_{A'_n}(x_n) \mu_{A_1}(x_1) \dots \mu_{A_n}(x_n) \mu_B(y) \} \\ \mu_B(y) &= \sup_{x_1, x_2, \dots, x_n \in X} \{ \mu_B(y) \prod_{i=1}^n \mu_{A'_i}(x_i) \mu_{A_i}(x_i) \}. \end{aligned} \quad (62)$$

Супремум забезпечується в разі $\mu_{A'}(x) = 1$. Тоді

$$\mu_{\bar{B}}(y) = \mu_B(y) \prod_{i=1}^n \mu_{A'_i}(\bar{x}_i). \quad (63)$$

На основі отриманих формальних моделей розробимо функціональну модель метаправила як модуля нечіткого керування базою знань, наведену на рис. 14.

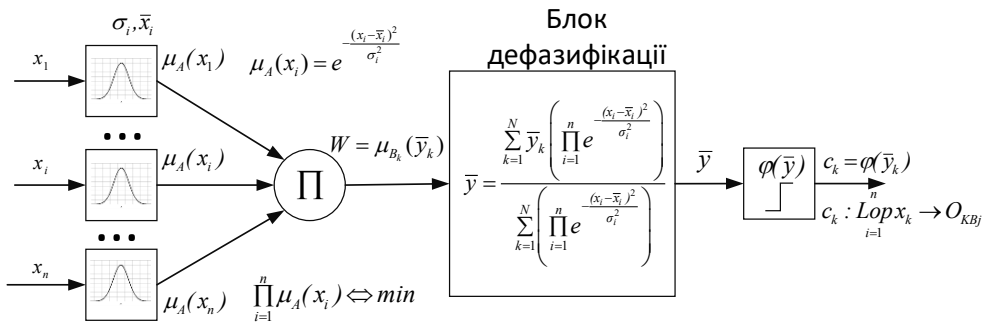


Рисунок 14 – Метаправило як модуль нечіткого керування базою знань

На основі розробленої моделі фазифікації представимо форму онтології рівня метаправил еволюції знань. Для k -ї функції інтерпретації рівня 4 метазнань

$$\begin{aligned} \tilde{f}_k^{MR} : Op(\tilde{R}_n^{MR} \circ \tilde{R}_{n-1}^{MR} \circ \dots \circ \tilde{R}_2^{MR} \circ \tilde{R}_1^{MR}, I_j) &\rightarrow (\tilde{R}_j^{MR}, I_j) \mid \tilde{f}_j^{MR} \in \tilde{F}^{MR}, \\ \tilde{f}_k^{MR} : r^{MR} &\subseteq \{ \bigcirc_{j=1}^n (\tilde{R}_{2j}^{MRC_i} \mid \mu_X(R_{2j}^{MRC_i})) \} \times (\tilde{R}_1^{MRC_i} \mid \mu_X(R_1^{MRC_i})), \\ \tilde{f}_k^{MR} : \tilde{R}_2^{MRC_i} r^{MR} \tilde{R}_1^{MRC_i}. \end{aligned} \quad (64)$$

З урахуванням невизначеності $\tilde{R}^{MRC_i}$ метаправил формальна модель інкорпорації онтології рівня метаправил еволюції знань матиме такий вигляд:

$$O_{KB_{MR}} = \langle \bigcup_{i=1}^{n_C} \bigcup_{k=1}^{n_S} \{ \tilde{S}_{MRk}^{c_i} \mid \mu_X(S_{MRk}^{c_i}) \} \cup \bigcup_{k=1}^{n_O} \{ F_k^{c_i}(\tilde{P}(G_s) \mid \mu_X(P(G_s)), \tilde{A}(G_s) \mid \mu_X(A(G_s)), M_s) \}, F(\tilde{R}(B3)), \tilde{F}^{MR} \rangle. \quad (65)$$

Отже, розроблено основні концепції і формально-лінгвістичні моделі фазифікації подання еволюції інкорпорації онтологій усіх рівнів в умовах невизначеності семантичних концептів. Усі отримані формально-лінгвістичні моделі

нечіткості концептів відповідають структурам форм репрезентації знань.

Підсумком третього розділу можна вважати розроблений метод інтеграції онтологій у модель експлуатації експертної системи для підтримки рішень під час оперативних перемикачів у схемі мережі, керування видачею генеруючої потужності, регулювання напруги, коригування навантаження споживачів у процесі антикризового диспетчерського керування. Формальна система еволюційної теоретико-множинної моделі базових концептів і їх взаємозв'язків узагальнюється на всі рівні онтологій на основі маркування сигнального графа структури знань (41), (42). Управління еволюційним розвитком формально-лінгвістичних моделей рівнів онтологій здійснюється механізмом метаправил (43), операції обробки знань виносяться за рамки інтелектуальної системи і формуються моделлю «Метаонтології» (44). На цій основі введено підхід до фазифікації концептів бази знань (45) і подання лінгвістичної змінної (46)–(48). Метод використання професійних концептів, відповідних ієрархії онтологій диспетчерського керування режимами енергосистеми, щодо контролю та корекції режиму енергосистеми і оперативних перемикачів з урахуванням невизначеності застосовує моделі функцій інтерпретації (49), (50) і разом з ними утворює модель інкорпорації онтології нечітких концептів (51). Метод передбачає узагальнення врахування невизначеності на всі рівні ієрархії подання знань – модель нечіткого факту (52)–(54) і його онтології (55), модель кластера нечіткої семантичної мережі (56)–(58) і її онтології (59), модель продукційного правила в умовах невизначеності (60) і онтології продукцій (61), модель подання онтологій рівня метаправил в умовах невизначеності (62)–(64) і їх онтології (65).

Розроблений метод дає змогу будувати динамічні ланцюжки логічного висновку в інтелектуальних системах антикризового диспетчерського керування енергосистемою в умовах невизначеності семантичних концептів, чим автоматизувати прийняття рішень, які базуються на концептах лінгвістичного корпусу інструкцій щодо запобігання і ліквідації аварій.

Розділ четвертий присвячено розробці імітаційної моделі програмних контролерів і методів алгоритмізації реактивного функціонування комплексу системи підтримки прийняття рішень.

При розробці моделей і методів реактивного функціонування комплексу системи підтримки прийняття рішень використовувалися методи теорії формальних систем і формальних мов, теорії штучного інтелекту і експертних систем, методи алгоритмізації, методи комп'ютерного моделювання, теорії електричних мереж.

Узагальнимо поняття міvara на модель онтології та уніфікуємо її. Представимо часткову онтологію як атомарний об'єкт, заданий координатами (параметрами, властивостями) в осях багатовимірної моделі МПП.

У класичному формулюванні мівар – це багатовимірний інформаційний адаптивний реальність, що варіюється. Мівар є елементом дискретного інформаційного простору і виражається через трійку

$$M = \langle V, S, O \rangle, \quad (66)$$

де $V = \{v_i | i = 1, m_v\}$ – множина об'єктів (чи їх ідентифікаторів); $S = \{s_i | i = 1, m_s\}$ – множина властивостей об'єктів; $O = \{o_i | i = 1, m_o\}$ – множина відношень (чи операцій), що пов'язують об'єкти.

Потужним засобом міварного простору є включення в якості відношень операцій обробки міvara (рис. 15). До таких операцій можна віднести функціонал SQL-запитів,

операції кластеризації, продукційного висновку. Для побудови функціональних моделей операцій у якості структурної моделі необхідно розглядати хмарну модель міварного онтологічного простору, наведену на рис. 16.

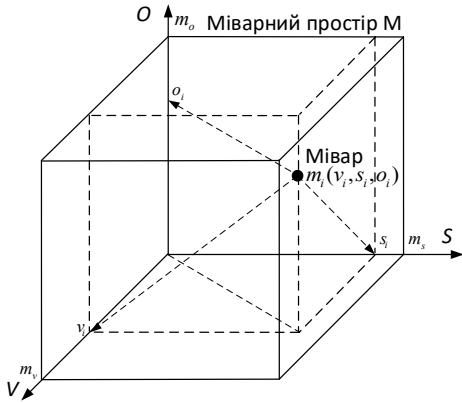


Рисунок 15 – Класична модель структури міварного багатовимірного інформаційного простору

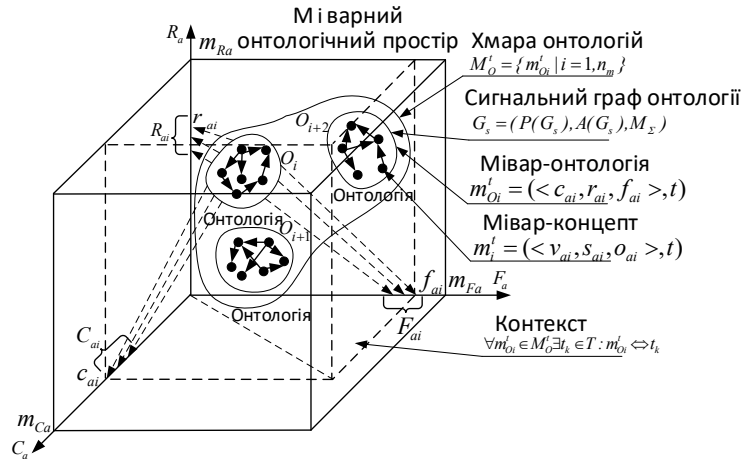


Рисунок 16 – Структурна модель контекстно-залежної хмари онтологій – міварного онтологічного простору

Представимо мівар-онтологію як сигнальний граф

$$\begin{aligned} M_{\Sigma} &= \langle M^P, M^B \rangle, \\ M^P &: P(G_s) \rightarrow m_{\mu}(P), \\ G_s &= (P(G_s), A(G_s), M_{\Sigma}), \\ M^B &: A(G_s) \rightarrow \mathbb{R}, \end{aligned}$$

і операцію на ньому як

$$O_{KBk}^{c_i} = F_k^{c_i}(P(G_s), A(G_s), M_{\Sigma}).$$

Тоді одиничний онтологічний мівар можна представити так:

$$\begin{aligned} m_{O_i}^t &= \langle G_{si}^t, O_i^t, F_i^t \rangle, \\ m_{O_i}^t &= \langle (P(G_s), A(G_s), M_{\Sigma})_i^t, O_{KBi}^t(G_s), F_i^t \rangle. \end{aligned} \quad (67)$$

Але кожна окрема онтологія в міварному просторі є відношенням

$$\begin{aligned} m_{O_i}^t &\subseteq G_{si}^t \times O_i^t \times F_i^t, \\ \text{або} \quad m_{O_i}^t &\subseteq (P(G_s), A(G_s), M_{\Sigma})_i^t \times O_i^t(G_s) \times F_i^t. \end{aligned} \quad (68)$$

Тоді множину проєкцій взаємозв'язаних концептів G_{si}^t на вісь C вважатимемо областю визначення онтологічного міvara $m_{O_i}^t - D_m$, де $D_m \subseteq G_{si}^t$. Множина операцій $O_i^t(G_s)$ і функцій інтерпретації F_i^t онтології відповідно інтерпретуватиметься як множина значень відношення $m_{O_i}^t$.

На основі прийнятої моделі міварного онтологічного простору введемо основні операції обробки онтологій, що реалізуються як функціонування програмних контролерів на сигнальних графах.

Операція додавання нового концепту до складу онтологічного міvara реалізується так:

$$P(G_s) \rightarrow P(G'_s),$$

$$\begin{aligned}
P(G'_s) &= P(G_s) + p_s, \\
P(G'_s) &= P(G_s) \cup \{p_s\}, p_s \notin P(G_s), \\
A(G'_s) &= A(G_s).
\end{aligned}$$

Після додавання нового концепту онтологічний мівар набуде вигляду

$$m'_{O_i} = (<(P(G'_s), A(G_s), <M^P \cup \mu_s^P, M^B>)_i^t, P(G_s) \cup \{p_s\}, F_i'', >, t). \quad (69)$$

Подібним чином моделюються інші елементарні операції по відношенню до онтологічного мівару. З урахуванням прийнятих положень може розглядатися реляційна інтерпретація відображення моделі зв'язків онтологій у міварний простір. Загальна характеристика пропонованої моделі відображення наведена на рис. 17.

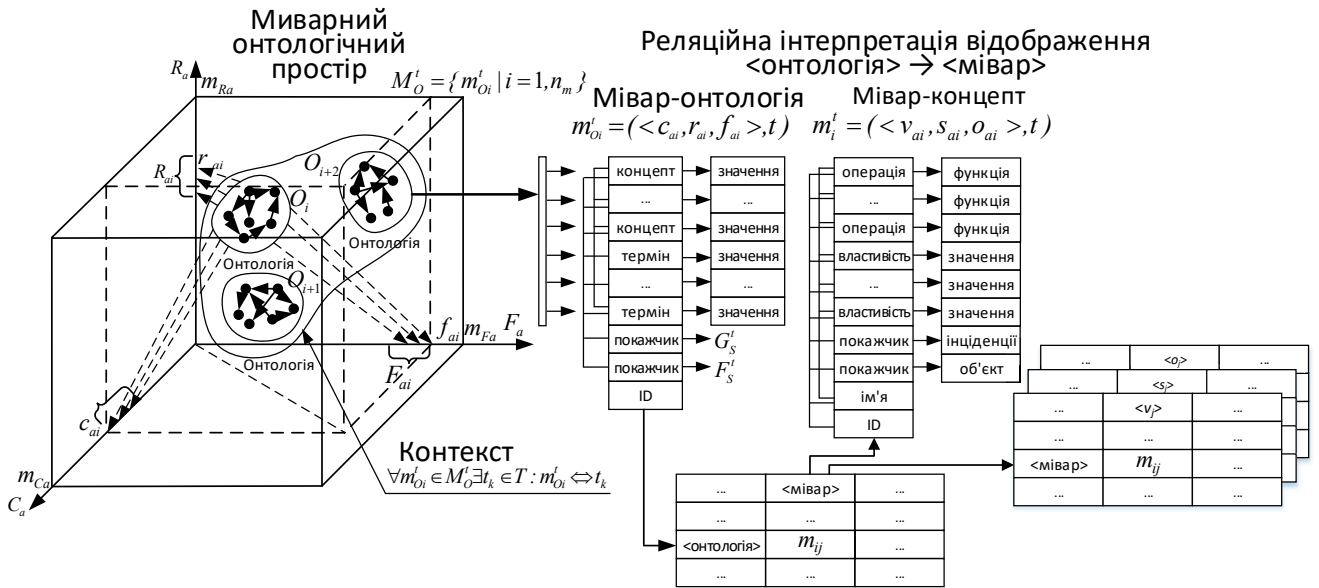


Рисунок 17 – Узагальнена модель реляційної інтерпретації відображення <онтологія>→<мівар> для концептів БЗ

Для забезпечення однозначної інтерпретації і мінімізації формально-лінгвістичних конструкцій пропонується використати λ -нотацію запису операцій програмних контролерів. Наприклад, λ -терм, що реалізовує операцію маркування концепту в сигнальному графі шляхом зазначення його активності, матиме вигляд

$$\begin{aligned}
&\lambda m_\mu(p_s) \cdot \mu_s^P, \\
&\lambda m_\mu(p_s) \cdot (p_s \rightarrow m_\mu(p_s)), \\
&\lambda <s_s, u, s_u, a> \cdot (p_s \rightarrow <s_s, u, s_u, a>), \\
&\lambda a \cdot a / 1, \\
&\lambda a \cdot 1
\end{aligned}$$

Аналогічно формуються інші операції керування концептами в сигнальному графі. λ -нотації адекватно відповідає синтаксис предикативної структури виразів операцій:

$$\lambda <par_1>, \dots, <par_n> \cdot P_j(<par_1 / con_1>, \dots, <par_n / con_n>), \quad (70)$$

де $<par_1> \dots <par_n>$ – параметри програмного контролера; $P_j \in L^Q$ – предикат (операція), що реалізовується програмним контролером, з множини предикатів, які утворюють мову програмних контролерів L^Q ; $<par_1 / con_1> \dots <par_n / con_n>$ – правило підстановки

констант $con_1, \dots, con_n$ у якості фактичних значень для параметрів $par_1, \dots, par_n$.

На основі міварного підходу розроблена модель реляційної інтерпретації відображення <онтологія-тригер> $\rightarrow$ <атомарний мівар> для концептів типу «тригер» БЗ.

Операція додавання тригера в БЗ

$$\lambda id_{MR}, id^t, N^{ant+}, N^{con+}. ADDMR(<id_{MR} / con_{IDMR}>, <id^t / con^t>, <N^{ant+} / con_{SE}^{ant}>, <N^{con+} / con_O^{con}>). \quad (71)$$

Параметрами операції є id_{MR} – ідентифікатор тригера, який додається в БЗ; id^t – ідентифікатор контексту; $N^{ant+} \in S_E$; $N^{con+} \in O_{KB}$.

Розроблена архітектура подання і обробки знань відображає типову композицію інтелектуальної системи, де одна частина схеми (подання) означає базу знань, а друга частина схеми (обробка) означає блок логічного висновку. Метаправила одночасно є частиною БЗ і тригерами подій, зовнішніх щодо бази знань.

Підсумком четвертого розділу можна вважати розроблений метод інтегрування структури професійної інформації про ліквідацію аварій, оперативні перемикання, ведення переговорів, організацію ремонтів на основі моделі міварного інформаційного простору (66) з урахуванням контексту професійного лінгвістичного корпусу. Розроблено модель одиничного онтологічного міvara (67)–(69). Удосконалено метод подання і використання інформації про антикризові диспетчерські заходи, інваріантної по відношенню до специфіки завдань керування, сформовано моделі формальних операцій керування онтологічними концептами (70) і наведено приклад операції (71).

Розроблений метод дає змогу реалізувати кластеризацію тезауруса за ознаками технологічних порушень в енергосистемі та способів їх ліквідації, алгоритмізацію процедур обробки онтологій бази знань, застосовувати єдину спадкову структуру операцій обробки знань і на цій основі будувати універсальні комплекси автоматизації антикризового диспетчерського керування енергосистемою, реалізувати автоматизований аналіз причин аварій і відмов у роботі електротехнічного обладнання.

Розділ п'ятий присвячено розробці структурно-логічної тригерної моделі, методів, інформаційного та програмного забезпечення ядра системи підтримки прийняття рішень і схеми її впровадження в середовище автоматизованої системи диспетчерського керування.

При розробці структурно-логічної тригерної моделі, методів, інформаційного та програмного забезпечення ядра системи підтримки прийняття рішень і схеми її впровадження в середовище АСДК використовувалися методи теорії автоматів, комп'ютерного моделювання, теорії реляційних і нереляційних баз даних, теорії електричних мереж.

Узявши за основу подієву модель станів функціонування СППР, формалізуємо алгоритмізацію її роботи. Очевидно, що поведінка СППР може бути описана моделлю кінцевого автомата з виходами. Під станом автоматної моделі СППР q будемо розуміти логічно виділений етап її функціонування, пов'язаний з реалізацією однієї конкретної транзакції. Під транзакцією p будемо розуміти обчислювальний блок, який реалізує послідовний набір команд, виразів, операцій і розглядається в межах поточної транзакції як один обчислювальний пакет. Кожна транзакція жорстко пов'язана з конкретним станом q . У кожному стані реалізується тільки одна транзакція. Транзакції можуть містити набори метаправил для керування БЗ і здійснення логічного висновку, пакети запитів для керування БД, оператори математичних обчислень, команди керування інтеракціями і поведінкою СППР і т. п.

Під тригером t будемо розуміти зовнішній апаратний або програмний об'єкт, що генерує коди, які розпізнаються СППР як вхідний алфавіт V і переводять її в один,

однозначно пов'язаний з цим тригером стан q .

Запропонована формальна модель операційного автомата програмного комплексу СППР, яка об'єднує стани і реалізований алгоритм обробки БЗ, може бути проілюстрована графом, представленим на рис. 18.

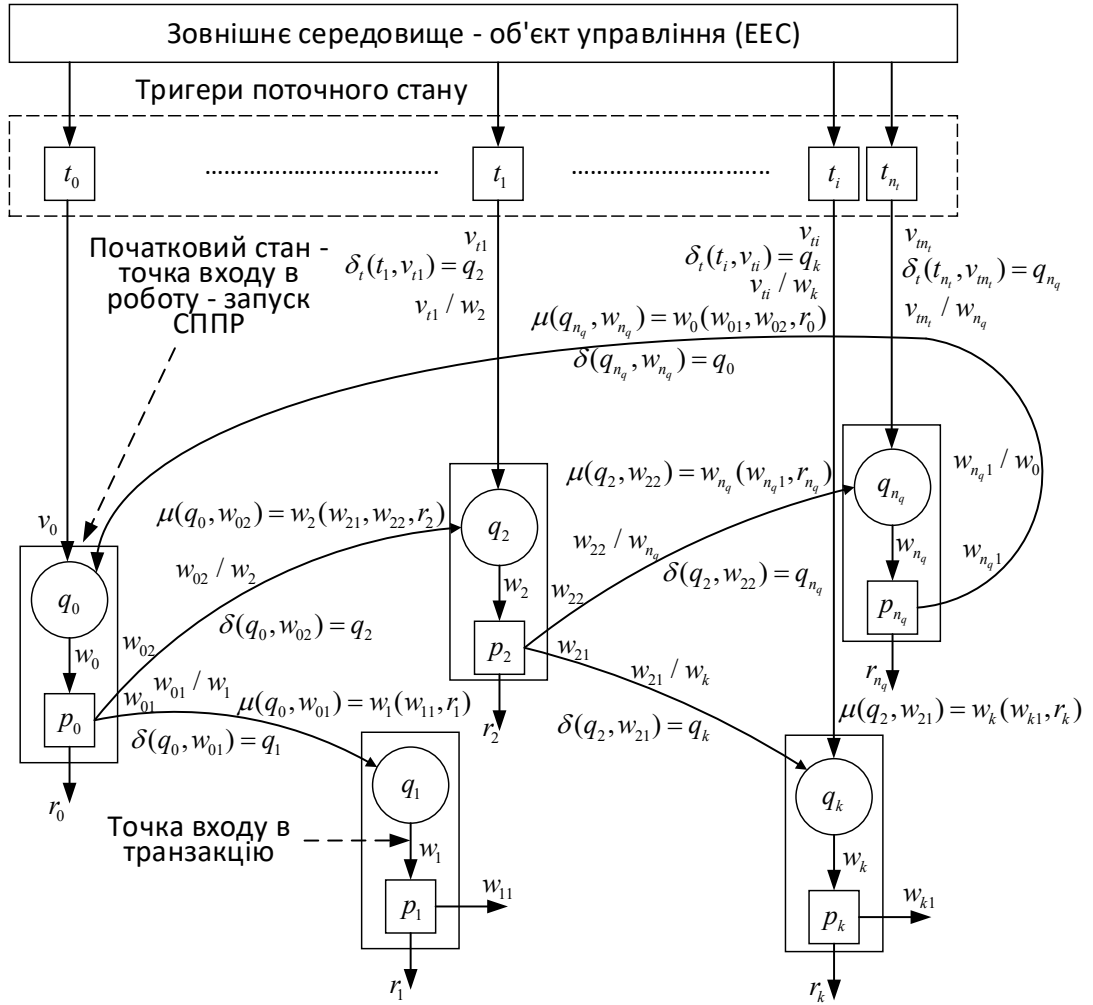


Рисунок 18 – Модель графа станів автоматної операційної моделі програмного комплексу СППР

Множина операційних позицій (станів) мережі

$$S = \langle Q, q_0, F, T, P \rangle, \quad (72)$$

$$S = \{s_i \mid s_i = \langle q_i, t_i, p_i \rangle, q_i \in Q \vee q_i \in F \vee q_i = q_0\},$$

де Q – кінцева множина станів СППР; q_0 – початковий стан автомата СППР; F – непорожня множина фінальних станів автомата СППР, $F \subseteq Q$; $T = \{t_i \mid i = 1, n\}$ – множина тригерів; $P = \{p_i \mid i = 1, n_p\}$, $\forall p_i \in P, \forall q_j \in Q, i = j : q_j \equiv (q_i, p_j)$ – множина транзакцій, де кожна транзакція однозначно пов'язана з одним конкретним станом.

Деталізуємо модель одного стану СППР, формалізувавши її. Стан s_i процесу функціонування системи визначається трійкою де t_i – тригер, $s_i = \langle q_i, t_i, p_i \rangle$, що запускає цей стан. Відповідно до визначення i -й тригер задамо кортежем

$$t_i = \langle ID_{ti}, SE_{ti}, ID_{qi}, v_{ti} \rangle, \quad (73)$$

де ID_{ti} – ідентифікатор тригера; SE_{ti} – сигнал (код) події зовнішнього середовища; ID_{qi} – ідентифікатор пов'язаного стану системи; v_{ti} – вихідний символ (код) тригера і вхідний символ (код) поточного стану.

Задамо правило спрацьовування тригера. Тригер отримує вхідний сигнал SE_{ti} від зовнішнього середовища і перевіряє його. Якщо v_{ti} сигнал відповідає коду активізації, то тригер спрацьовує і генерує вихідний код по відношенню до стану ID_{qi} . Код v_{ti} є вхідним для стану ID_{qi} .

З метою подолання зазначеної проблеми запропонована нова структурно-логічна архітектура ядра СППР і визначені методи її функціонування.

Транзакцію, пов'язану з i -м станом, задамо кортежем

$$p_i = \langle ID_{pi}, ID_{qi}, O_i, W_i, r_i \rangle, \quad (74)$$

де ID_{pi} – ідентифікатор поточної транзакції; ID_{qi} – ідентифікатор поточного стану; $O_i = \{o_{ik} \mid k=1, n_o\}$ – множина операцій i -ї транзакції. Транзакція реалізує послідовну секцію алгоритму. Множина O_i строго впорядкована, тобто

$$\forall o_{ik} \forall o_{ik+1} \forall k \mid o_{ik} \in O_i \wedge o_{ik+1} \in O_i \wedge k=1, 2, \dots, n_o : o_{ik} \prec o_{ik+1},$$

W_i – множина вихідних символів (кодів) транзакції; r_i – результат виконання транзакції.

Розроблений формальний апарат тригерної моделі подання роботи програмного комплексу дає можливість перейти до синтезу структури та опису методів функціонування системи підтримки рішень протиаварійного керування режимом енергосистеми. З огляду на специфіку професійної області задачі узагальнену структуру включення СППР у цикл протиаварійного керування ЕЕС відобразимо в такий спосіб (рис. 19).

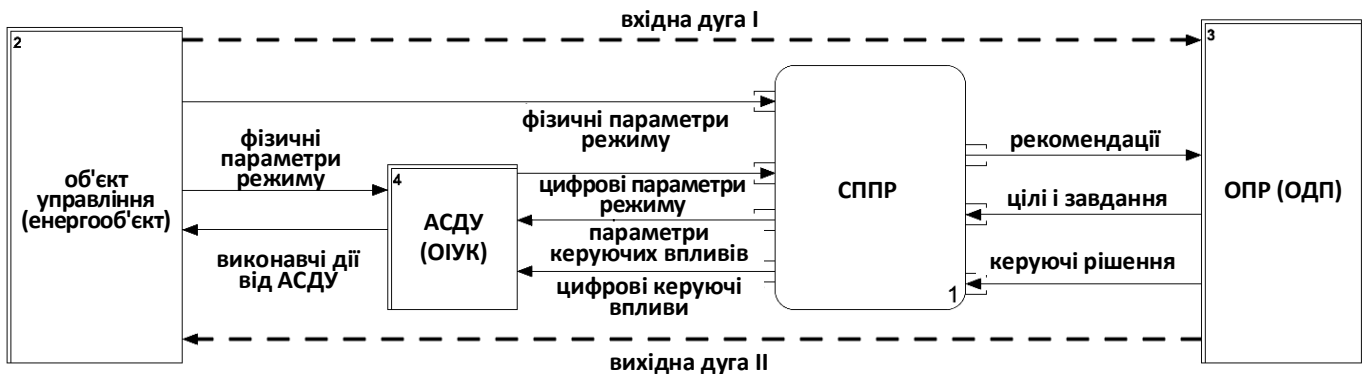


Рисунок 19 – Контекстна діаграма узагальненої структурної моделі включення СППР у цикл протиаварійного керування ЕЕС

У дисертації розроблено нову – трикомпонентну – модель ядра СППР. Розроблена операційна структура ядра СППР реалізує новий принцип обробки БЗ, який уможливує відмову від блоку логічного висновку і заміну його програмним процесором (інтерпретатором), що не залежить від форм знань, професійного середовища, операційної платформи. Інтерпретатор виконує потік байт-коду метаправил і здійснює операції з керування знаннями та логічного висновку. Цей підхід, своєю чергою, потребує розробки процедури трансляції пакетів метаправил у низькорівневий байт-код.

Для цієї мети була розроблена модель сканувального автомата лексичного кінцевого перетворювача. У результаті роботи лексичного сканера та кінцевого перетворювача можуть бути отримані набори токенів. З огляду на відносно просту структуру й відсутність ліворекурсивності реалізовано спадний синтаксичний аналізатор з лівим розбором і підбором альтернатив.

Результати синтаксичного розбору показали, що МП-аналізатор (з магазинною пам'яттю) на базі розробленої граматики обробляє вхідний ланцюжок і розпізнає його

правильно. Отриманий результат можна поширити на всю структуру програми. Синтаксичний аналіз повного лістингу програми проводиться аналогічно з використанням таблиці токенів.

Підсумком п'ятого розділу можна вважати розроблений метод функціонування тригерної моделі інформаційного та програмного забезпечення ядра системи підтримки прийняття рішень, упровадження математичного та програмного забезпечення системи підтримки прийняття рішень у середовище АСДК енергосистемою гірничо-металургійного комплексу. В основу тригерної моделі покладено автоматну операційну модель програмного комплексу СППР з множиною операційних станів (72). Введено формальні моделі тригеру СППР (73) і транзакції (74). Розроблено узагальнену структурну модель включення тригерної СППР у структуру протиаварійного керування енергосистемою.

Розроблений метод забезпечує подієве функціонування програмної системи і автоматизацію антикризового диспетчерського керування. Окрім того, метод дає можливість у нормальному режимі роботи знизити трудові та вартісні витрати диспетчерської зміни.

Розділ шостий присвячено розробці методів оцінки технічної і економічної ефективності програмного забезпечення інтелектуальної автоматизованої системи антикризового диспетчерського керування енергосистемами гірничо-металургійного комплексу на основі інтеграції рівнів професійних онтологій.

Для оцінки технічної і економічної ефективності програмного забезпечення інтелектуальної автоматизованої системи антикризового диспетчерського керування енергосистемами гірничо-металургійного комплексу на основі інтеграції рівнів професійних онтологій використовувалися методи теорії планування експерименту, математичної статистики, економічного аналізу, регресійного аналізу.

Найважливішим етапом побудови і впровадження інтелектуальної системи є створення і наповнення бази знань. З урахуванням даних електроспоживання Дніпропетровської області виявлені проблемні точки мережі по напрузі та завантаженню ліній і трансформаторів для нормальних і аварійних режимів, обрані сенсорні точки, контрольовані параметри і параметри розрахункового експерименту.

За розрахункову математичну модель електричної мережі енергосистеми прийнята система нелінійних рівнянь вузлових напруг у вигляді балансу потужностей. Вихідні умови розрахункового експерименту такі: планове виведення в ремонт ВЛ-150 кВ (Л-81) ПС Павлоградська-330 – ПдТЕС-330 (Придніпровська ТЕС); аварійне відключення ПЛ-330 кВ (Л-234) ПС Павлоградська-330 – ПдТЕС; аварійний режим характеризується зниженням напруги на СШ 150 кВ ПС Павлоградська-330 і перевантаженням по струму ПЛ-150 кВ (Л-82) ПС Павлоградська-330 – ПдТЕС-330; сезонна схема мережі – літо. У якості варіанта керування параметрами в сенсорних точках обрані лінії з найбільшими струмами в нормальному режимі Л-ДН-1 (200 А) і Л-ДН-2 (135 А). Навантаження цих ліній формується підстанціями: ПС Шахта Дніпровська, ПС Шахта Світ, ПС Західно-Донбаська.

У результаті розрахунків аварійного режиму отримані дані для побудови функцій впливу і коефіцієнтів матриці чутливості. У якості вузлів докладення керуючих впливів у схемі обрані вузли Л-ДН-1-150 кВ і Л-ДН-2-150 кВ.

Матриця чутливості являє собою матрицю похідних регресій матриці впливу

$$\frac{\partial U}{\partial P_{25}}, \frac{\partial U}{\partial Q_{25}}, \frac{\partial U}{\partial P_{29}}, \frac{\partial U}{\partial Q_{29}}, \frac{\partial I}{\partial P_{25}}, \frac{\partial I}{\partial Q_{25}}, \frac{\partial I}{\partial P_{29}}, \frac{\partial I}{\partial Q_{29}}.$$

На основі даних матриці чутливості побудовані лінеаризовані в першому наближенні рівняння регресії інтенсивностей керуючих впливів на параметри сенсорних точок, які проілюстровані на рис. 20.

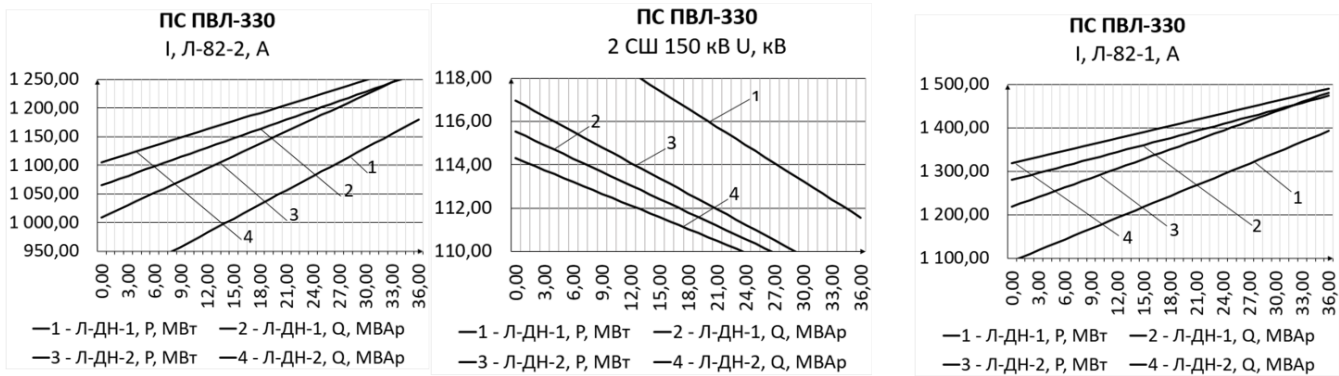


Рисунок 20 – Динаміка інтенсивностей керуючих впливів

При реалізації керуючих впливів інтерес становить розподіл контрольованих параметрів уздовж радіусів, що відходять від базисної точки з фіксованою напругою. Масиви таких параметрів можуть бути використані в якості знань про керування аварійним режимом електричної мережі. Ілюстрації епюр напруги уздовж характерних радіусів мережі показані на рис. 21.

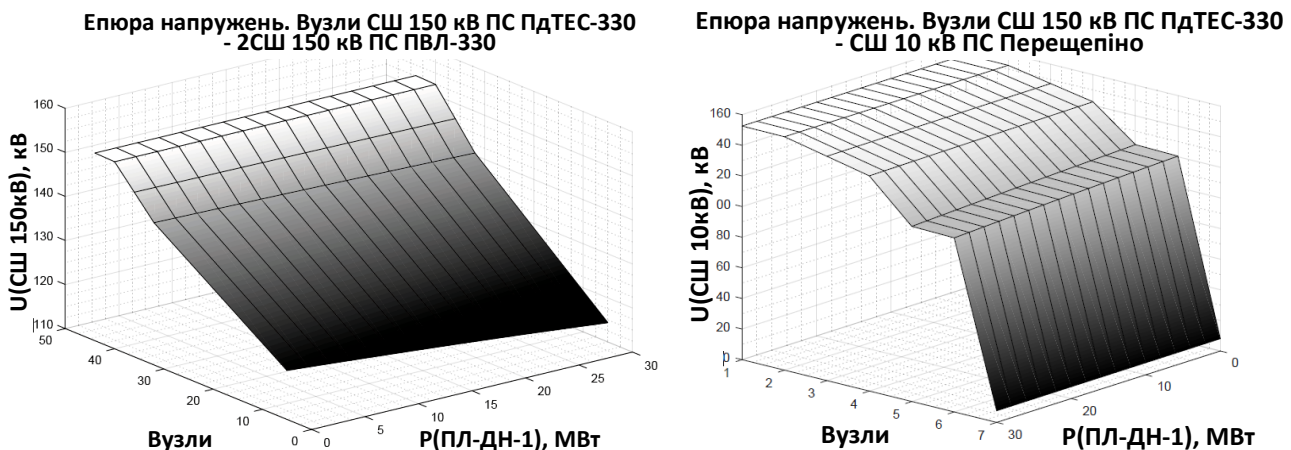


Рисунок 21 – Епюри напруг уздовж відповідальних радіусів електричної мережі при зміні керуючих факторів

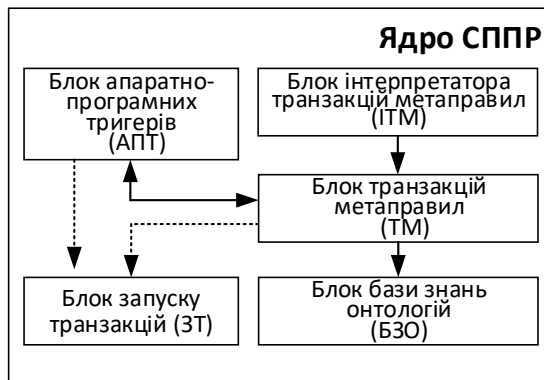


Рисунок 22 – Модуль ядра системи підтримки прийняття рішень

На основі отриманих знань про параметри керування режимом енергосистеми був реалізований програмний комплекс СППР з професійними онтологіями.

Основою програмного комплексу є ядро, схема якого наведена на рис. 22. Функціонування ядра спирається на роботу блоку інтерпретатора транзакцій метаправил. Запуск транзакції проводиться за кодами від оперативного інформаційно-керуючого комплексу АСДК.

З огляду на метод запуску і роботи інтелектуальної системи визначені точки впровадження СППР у середовище апаратно-програмних засобів автоматизованої системи диспетчерського керування. За основу прийнята схема, наведена на рис. 3. У якості точок підключення СППР прийняті канали телемеханіки і телевимірювань, модулі оперативного інформаційно-керуючого комплексу, система відображення інформації. Такий метод підключення дає можливість використовувати в системі підтримки рішень дані різних типів, що характеризують поточні параметри режиму енергосистеми. Нова схема керування режимами енергосистеми, у яку включена розроблена інтелектуальна система підтримки рішень, показана на рис. 23.

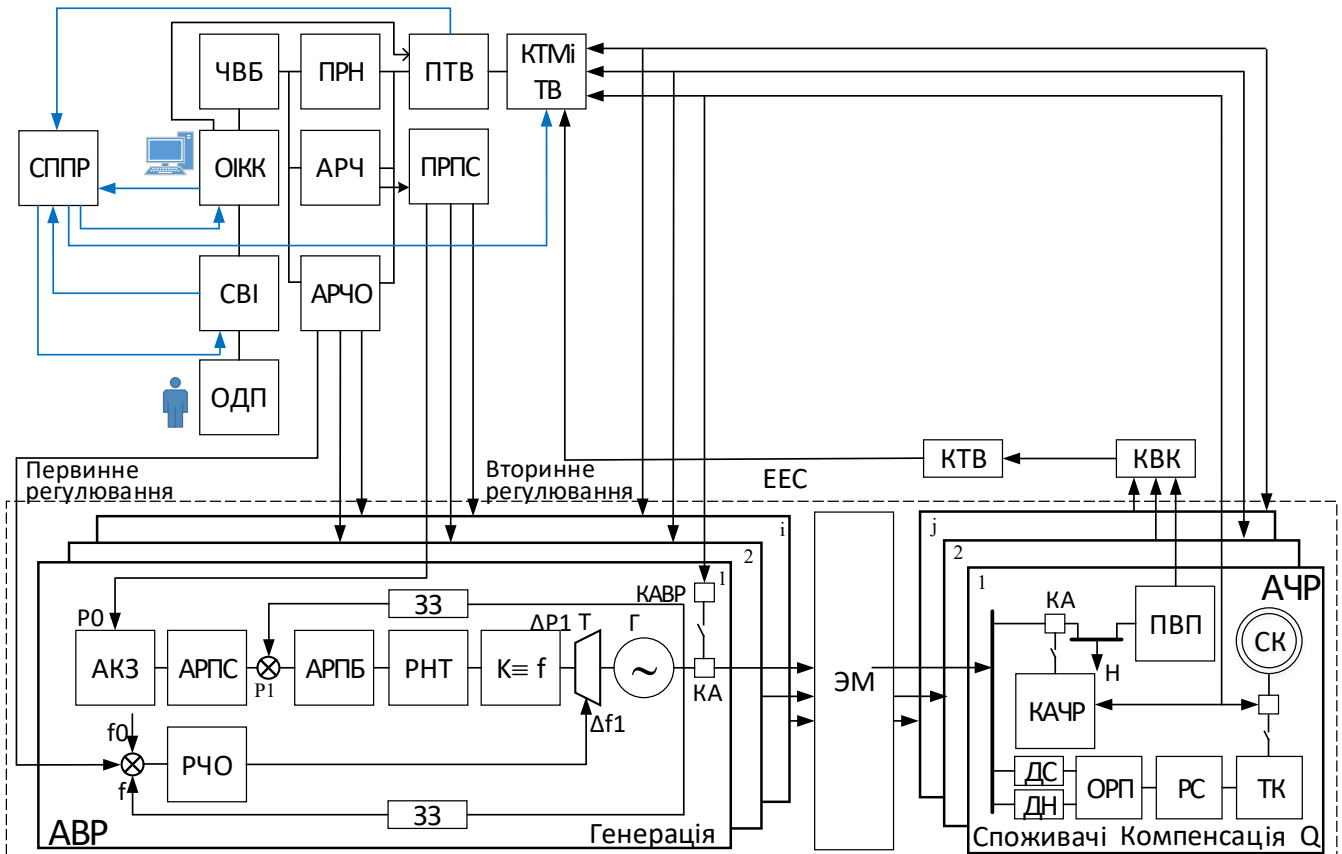


Рисунок 23 – Схема підключення системи підтримки прийняття рішень до узагальненої структури системи оперативного керування ЕЕС

Результатом циклу роботи СППР є нормативно-інструктивні матеріали диспетчерського керування, отримані з рівнів професійних онтологій БЗ, а також рекомендації керуючих коригувальних впливів, їх величин і напрямків зміни на основі розрахованих матриць чутливості.

Після впровадження СППР необхідно розглядати задачу оцінки оперативної ефективності інкорпорації онтологій бази знань. Були розроблені нові показники оцінки ефективності використання тезаурусів професійного лінгвістичного корпусу. Графічні ілюстрації оцінок наведені на рис. 24–26.

Показники відносної ефективності професійних тезаурусів є інформативними і характеризують семантичний і кількісний характер бази фактів лінгвістичного корпусу ліквідації аварій в енергосистемі.

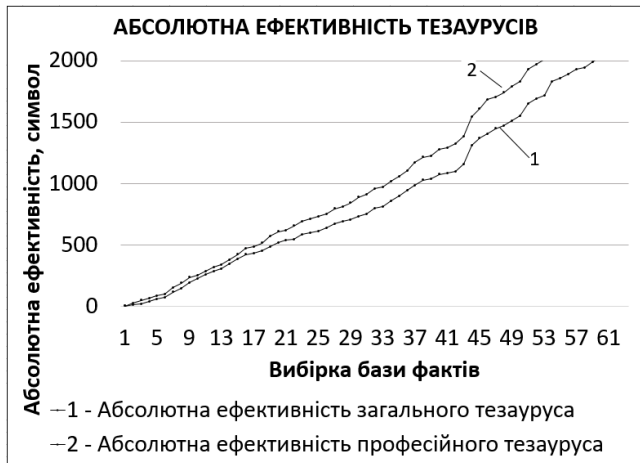


Рисунок 24 – Динаміка зростання абсолютної ефективності тезаурусів

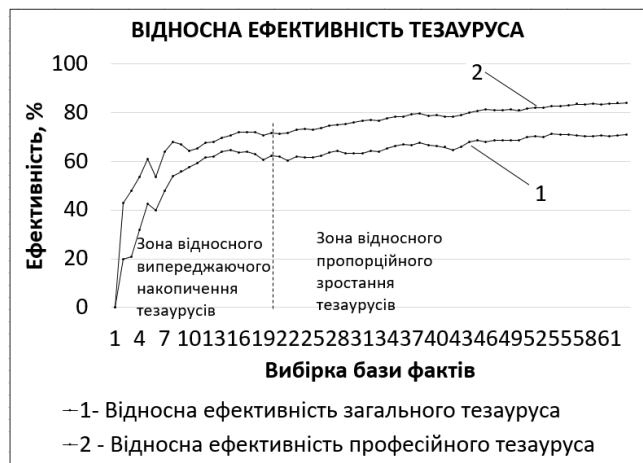


Рисунок 25 – Динаміка зростання відносної ефективності тезаурусів

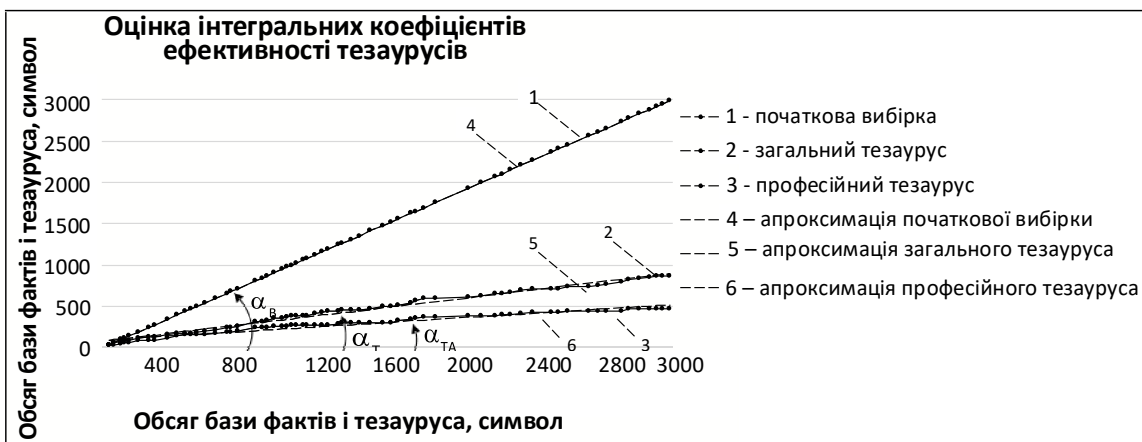


Рисунок 26 – Розрахунок інтегральних коефіцієнтів ефективності тезаурусів

Підстановка розрахункових значень дає такі результати:

$$K_{ET} = \left(1 - \frac{\arctg(0,2751)}{\arctg(1)}\right) * 100\% = 65,82\%, \quad K_{ETA} = \left(1 - \frac{\arctg(0,1439)}{\arctg(1)}\right) * 100\% = 81,81\%. \quad (75)$$

Ефективність загального тезауруса становить 65,82 %, а ефективність тезауруса аббревіатур і сленгу – 81,81 %. Отже, оперативна ефективність використання бази знань, побудованої на інкорпорації професійних онтологій, буде тим вища, чим більше спеціалізованою буде професійна область СППР.

Оцінка економічної ефективності автоматизації оперативного керування режимом ЕЕС на основі впровадження СППР з інкорпорацією професійних онтологій повинна здійснюватися для нормальних і аварійних режимів. Динаміка показників трудовитрат ОДП без упровадження і з використанням СППР у нормальних умовах роботи наведена на рис. 27.

Упровадження та експлуатація розробленої СППР у нормальному режимі роботи енергосистеми знижує трудові і вартісні витрати в розрахунку на 1 рік і на одну зміну ОДП в 1,8 рази, а також дає змогу домогтися абсолютного скорочення вартісних витрат на 116 000 грн на рік на одну зміну ОДП, скоротити час виконання типових операцій і підняти продуктивність праці майже у 2 рази. Програмна інновація характеризується коротким терміном окупності і високим коефіцієнтом ефективності – 0,64 при нормативному 0,1–0,33. Отже, можна говорити про економічну доцільність упровадження та експлуатації розробленої СППР в середовищі діючої АСДК енергосистем у нормальних режимах роботи ЕЕС.

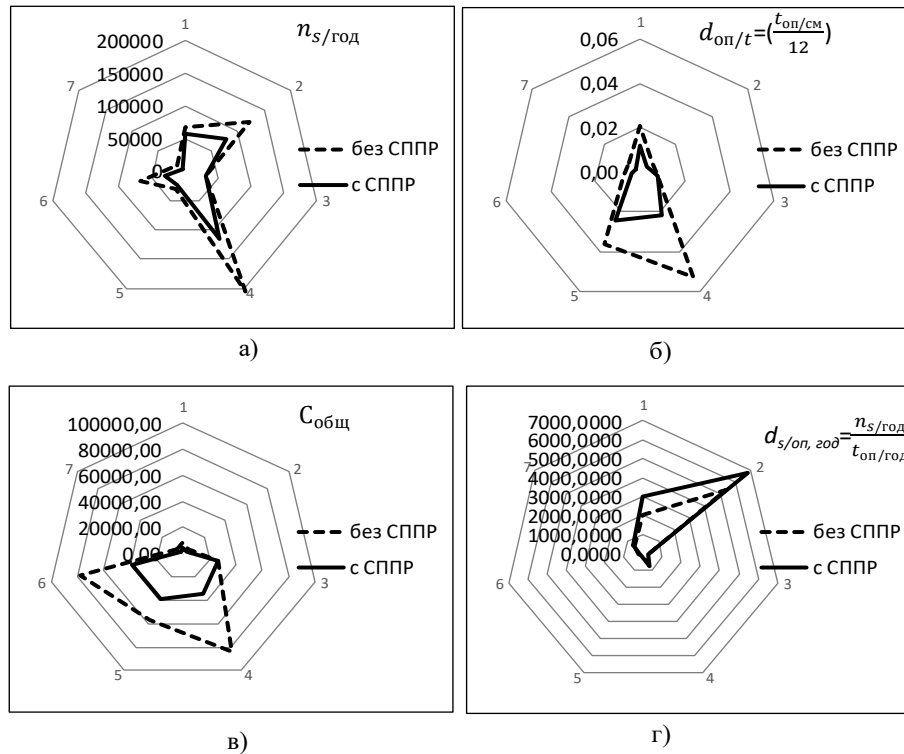


Рисунок 27 – Порівняльні діаграми динаміки показників трудовитрат ОДП без СППР і при використанні СППР у нормальних умовах роботи

У результаті розрахунків оцінки надійності диспетчерів при впровадженні та використанні СППР в аварійному режимі наведені на рис. 28.

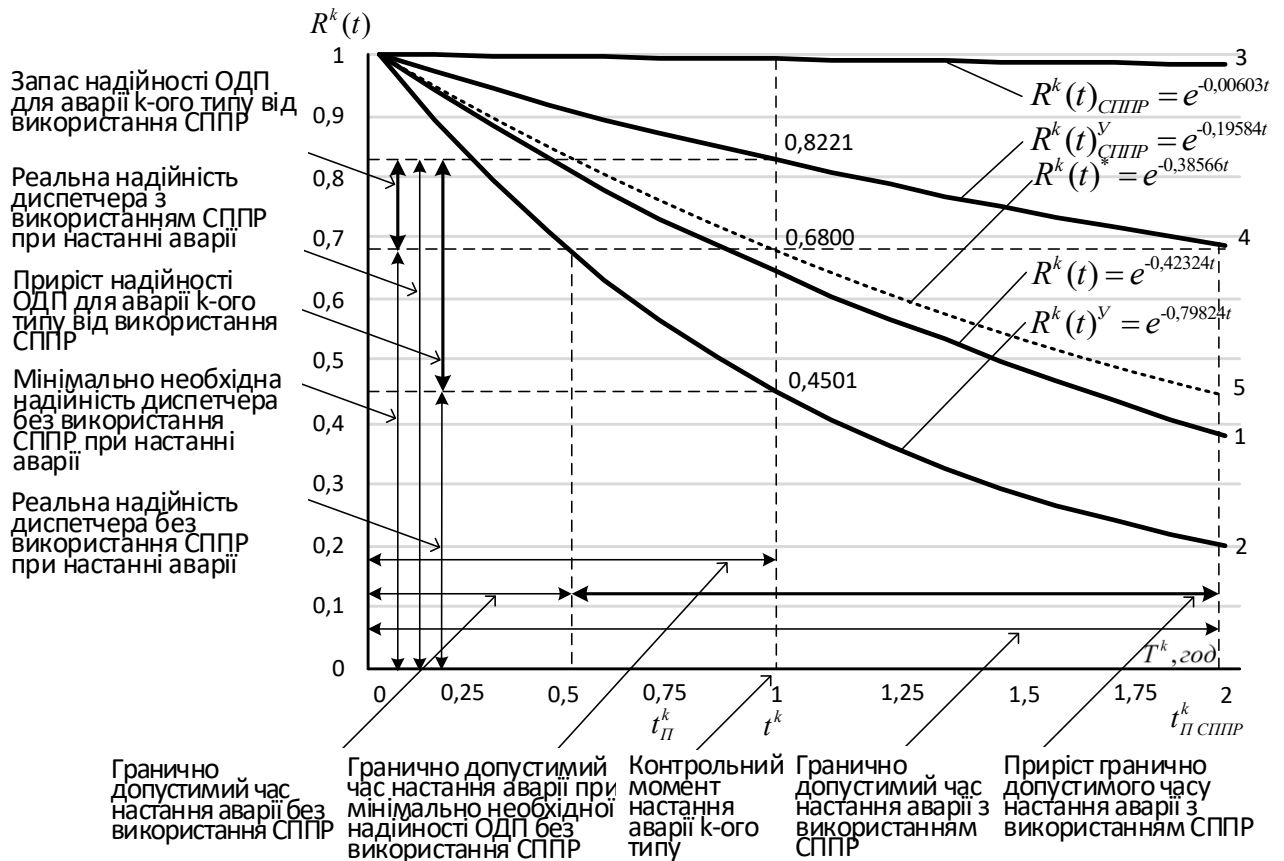


Рисунок 28 – Графічна інтерпретація розподілу значень функцій надійності ОДП для оцінки ефективності використання СППР

Оцінка економічної ефективності СППР в аварійних режимах експлуатації об'єкта керування здійснюється на основі оцінки відверненого збитку від використання СППР. Для чисельного моделювання та аналізу надійності дій ОДП розглянуті аварійна ситуація зниження частоти в енергосистемі та дії оперативного персоналу при зниженні частоти. Діяльність диспетчера може бути представлена як композиція типових дій (операцій), що характеризуються індивідуальною надійністю і часом виконання.

Як видно з графіків на рис. 28, для контрольного терміну тестування 12 місяців коефіцієнт готовності оперативного персоналу становить 0,6800. Практичні результати тестування ОДП дають результат 0,6549 (без використання СППР і без втоми, тобто без урахування випадкових відмов). При врахуванні чинника втоми (додатковому врахуванні впливу випадкових відмов ОДП) без використання СППР надійність знижується до 0,4501. Застосування СППР при ліквідації аварії підвищує надійність ОДП. У випадку з СППР без урахування втоми результуюча надійність становитиме 0,9940. При врахуванні втоми (випадкових відмов ОДП) результуюча надійність дорівнює 0,8221. Практичний приріст надійності ОДП від використання СППР при ліквідації аварії k -го типу виражається як різниця між надійністю ОДП з урахуванням втоми без використання СППР і надійністю ОДП з урахуванням втоми з використанням СППР і становить: $0,8221 - 0,4501 = 0,3720$ (тобто підвищується на 37,2 %).

В аварійних режимах застосування СППР забезпечує приріст гранично допустимого часу безперервної роботи ОДП при надійній ліквідації аварії тривалістю 1,5 року (18 міс.). Сумарний відвернений збиток від роботи енергосистеми підприємства «ДТЕК Дніпровські електромережі» при аварійному зниженні частоти на 1 % (49,5 Гц), приведений до періоду ліквідації аварії, становить 98,13 тис. грн. Сумарний відвернений збиток від роботи транзиту 110 кВ Київська ТЕЦ-6 – ПС Лукянівська Київської енергосистеми в періоди максимумів навантаження при аварійному зниженні напруги 87 % від номінального, приведений до одного року, становить 232 млн грн.

Отже, наявна економічна доцільність упровадження й експлуатації розробленої СППР у середовищі діючої АСДК в нормальних і аварійних режимах роботи ЕЕС.

Підсумком шостого розділу можна вважати удосконалені моделі інкорпорації в професійні онтології режимних характеристик чутливості до керування багатокомпонентних об'єктів енергосистеми гірничо-металургійного комплексу. Удосконалено метод оцінки технічної і економічної ефективності системи підтримки рішень, який використовує три показники ефективності професійного тезауруса – показник оцінки абсолютної ефективності професійного онтологічного тезауруса як різницю з накопиченням між робочим лінгвістичним корпусом і загальним, або професійним тезаурусом; показник відносної ефективності як відношення показника оцінки абсолютної ефективності до об'єму робочого лінгвістичного корпусу; показник інтегральної ефективності як відношення кутів нахилу апроксимуючих регресій змін загального тезауруса і тезауруса професійних аббревіатур і сленгу (75).

Розроблений метод дає можливість інтегральної оцінки ефективності програмного забезпечення СППР, професійної бази знань і диспетчерського персоналу.

ВИСНОВКИ

Дисертація містить отримані автором нові науково обґрунтовані результати, які полягають у створенні моделей, методів, інформаційного та програмного забезпечення інтелектуальних автоматизованих систем керування для аварійного регулювання режимів енергосистем гірничо-металургійного комплексу за рахунок забезпечення стійкої та безпечної роботи шляхом зміни структури об'єктів системи і параметрів функціонування технічних засобів, що забезпечило підвищення надійності диспетчерського персоналу і зниження збитків енергосистеми в кризовій ситуації.

Отримані наукові та практичні результати підводять до таких висновків.

1. Проведено аналіз процесу диспетчерського керування енергосистемами гірничо-металургійного комплексу, визначено методи, моделі та технічні засоби для забезпечення оперативного диспетчерського керування нормальними і аварійними режимами енергосистем. Обґрунтовано необхідність використання систем підтримки прийняття рішень диспетчерського персоналу і побудови баз знань на основі моделей, методів і засобів еволюції інкорпорації професійних онтологій.

2. Удосконалено математичну модель інкорпорації та обробки онтологій професійної галузі в програмному комплексі підтримки рішень для автоматизації процесів антикризового диспетчерського керування енергосистемою, яка реалізує взаємну відповідність еволюційного успадкування рівнів концептів і методів їх обробки, забезпечує єдину теоретико-множинну модель знань для всіх онтологічних рівнів із дотриманням положень подібності, що дає можливість автоматизувати проєктування і застосування баз знань диспетчерського керування електротехнічним обладнанням у кризових ситуаціях.

3. Розроблено метод інтеграції онтологій у модель експлуатації експертної системи для підтримки рішень під час оперативних перемикань у схемі мережі, керування видачею генеруючої потужності, регулювання напруги, коригування навантаження споживачів у процесі антикризового диспетчерського керування. Сутність методу: узагальнюється формальна система еволюційної теоретико-множинної моделі базових концептів і їх взаємозв'язків на всі рівні онтологій, що дає змогу будувати динамічні ланцюжки логічного висновку в інтелектуальних системах антикризового диспетчерського керування енергосистемою і автоматизувати прийняття рішень, які базуються на концептах лінгвістичного корпусу інструкцій щодо запобігання і ліквідації аварій.

4. Розроблено метод використання професійних концептів, які відповідають ієрархії онтологій диспетчерського керування режимами енергосистеми щодо контролю, корекції режиму енергосистеми і оперативних перемикань. У методі застосовуються єдині формальні операції логічних висновків по відношенню до концептів усіх онтологічних рівнів бази знань і враховуються невизначеності структур знань у межах однієї автоматизованої інтелектуальної системи антикризового диспетчерського керування режимами енергосистеми.

5. Розроблено метод інтегрування структури професійної інформації про ліквідацію аварій, оперативні перемикання, ведення переговорів, організацію ремонтів у дескриптори формальних мов рівнів еволюції онтологій подання знань. Метод забезпечує автоматизацію інтерпретації та застосування положень нормативної документації антикризового диспетчерського керування енергосистемою в межах контекстного кластера. Практична ефективність професійного інструктивного диспетчерського тезауруса становить 65,82 %, а тезауруса аббревіатур і сленгу – 81,81 %.

6. Удосконалено метод подання та використання інформації про антикризові диспетчерські заходи щодо контролю параметрів і корекції режиму енергосистеми, який дає змогу реалізувати єдину спадкову структуру формальних систем знань і на цій основі будувати універсальні комплекси автоматизації антикризового диспетчерського керування енергосистемою, реалізувати автоматизований аналіз причин аварій і відмов у роботі електротехнічного обладнання. Упровадження та експлуатація розробленої СППР енергосистеми сприяє зниженню трудових і вартісних витрат у розрахунку на одну зміну диспетчерського персоналу в 1,8 разу та абсолютному скороченню вартісних витрат на 116 тис. грн на одну зміну диспетчерів.

7. Розроблено метод упровадження математичного та програмного забезпечення системи підтримки прийняття рішень у середовищі діючої АСДК енергосистемою гірничо-металургійного комплексу, який спирається на безпосередній зв'язок із каналами передачі даних оперативного комплексу АСДК, не потребуючи формальної підготовки інформації, застосовує різні форми декларативних і функціональних диспетчерських знань, що забезпечує автоматизацію антикризового диспетчерського керування. Оперативні характеристики диспетчерського персоналу, що працює разом із СППР, підвищилися на 20,29 %, інтенсивність відмов диспетчерських змін скоротилася на 22,92 %.

8. Удосконалено модель інкорпорації в професійні онтології режимних характеристик чутливості до керування багатокомпонентних об'єктів енергосистеми, яка вирізняється тим, що оцінки керуючих впливів додаються в базу знань як повноцінні лінгвістичні компоненти. Це дає можливість автоматизувати індукційні висновки на основі реєстрації відхилень робочих струмів, напруг або частоти в системі, спрацьовування засобів релейного захисту і протиаварійної автоматики, чим підвищується ступінь автоматизації системи антикризового диспетчерського керування. При ліквідації кризових ситуацій практичний приріст надійності диспетчерського персоналу від використання СППР сягнув 37,2 %. Застосування СППР забезпечує приріст часу безперервної експлуатації зміни диспетчерів при надійній ліквідації аварії до 1,5 року.

9. Удосконалено моделі оцінки технічної та економічної ефективності системи підтримки рішень, які вирізняються тим, що вперше запропоновано показник оцінки абсолютної ефективності професійного онтологічного тезауруса як різницю з накопиченням між робочим лінгвістичним корпусом і загальним, або професійним тезаурусом; показник відносної ефективності як відношення показника оцінки абсолютної ефективності до об'єму робочого лінгвістичного корпусу; показник інтегральної ефективності як відношення кутів нахилу апроксимуючих регресій змін загального тезауруса і тезауруса професійних аббревіатур і сленгу. Запропоновано новий підхід до оцінки економічної ефективності, заснований на розрахунку відверненого збитку від упровадження в АСДК комплексу «оператор – програмна система СППР» з урахуванням підвищення ступеня надійності функціонування диспетчерської зміни. Умовний розрахунковий збиток від недовідпуску електроенергії скоротився на 67,14 %. Сумарний розрахунковий економічний ефект як відвернений збиток у кризовій ситуації, приведений до одного року, становить 232 млн грн.

10. Результати дисертації мають практичне значення і отримані при виконанні науково-дослідних робіт, що здійснювалися за планами наукових досліджень Криворізького національного університету в межах держбюджетних тем № 0115U003180, № 0116U001518, № 0116U001519, № 0120U102310, використовуються на промислових підприємствах (Державному підприємстві «Державний інститут по проектуванню

підприємств гірничо-рудної промисловості “Кривбаспроект”», ТОВ «НВК Криворіжелектромонтаж»), у навчальному процесі при читанні лекцій, проведенні практичних і лабораторних робіт, підготовці курсових і дипломних робіт для студентів спеціальностей 151 – Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології, 122 – Комп’ютерні науки кафедри автоматизації, комп’ютерних наук і технологій КНУ з таких дисциплін: «Системи підтримки прийняття управлінських рішень», «Автоматизовані системи організаційного управління», «Ідентифікація та моделювання об’єктів автоматизації», «Людино-машинні інтерфейси», «Проектування систем автоматизації», «Комп’ютеризовані системи управління», «Системи штучного інтелекту».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Монографія:

1. Моркун В. С., Котов І. А. Моделі інкорпорації професійних онтологій для інтелектуалізації управління режимами енергосистем : монографія. Кривий Ріг : Редакційно-видавничий відділ ДВНЗ «КНУ», 2020. 210 с.

Статті у виданнях, що включені до міжнародних наукометричних баз:

2. Kotov I. A., Suvorov O. I, Serdiuk O. Yu. Development of methods for structural and logical model unification of metaknowledge for ontologies evolution managing of intelligent systems // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Mathematics and cybernetics – applied aspects. 2019. Vol. 2/4(98). Pp. 38–47. МНБ: SCOPUS

3. Morkun V. S., Kotov I. A. Intellectualization of emergency control of power systems on the basis of incorporated ontologies of knowledge-bases // Acta mechanica et automatic. Poland : Białystok University of Technology. 2019. Vol. 13. No. 2(48). Pp. 86–94. МНБ: SCOPUS, Web of Science

4. Morkun V. S., Kotov I. A. Information technologies for power supply dispatch control based on linguistic corpus ontologies // Науковий вісник Національного гірничого університету : зб. наук. праць. Дніпро : НТУ «Дніпровська політехніка», 2019. № 6(174). Pp. 130–136. МНБ: SCOPUS

5. Morkun V. S., Kotov I. A. Knowledge base formation for automation of dispatch control over power systems of the mining and metallurgical complex // Науковий вісник Національного гірничого університету : зб. наук. праць. Dnipro, Ukraine. 2021. No 4. Pp. 103–109. МНБ: SCOPUS

Статті у наукових фахових виданнях:

6. Котов И. А. Проблема унификации представления знаний в системах поддержки решений при управлении технологическими процессами в кризисных ситуациях // Вісник Криворізького технічного університету : зб. наук. праць. Кривий Ріг, 2011. Вип. 29. С. 183–187.

7. Котов И. А. Моделирование надежности систем электроснабжения матричными уравнениями продукционных сетей Петри в интеллектуальных системах диспетчеризации // Наукові праці (серія: Комп’ютерні технології). Миколаїв: ЧДУ ім. Петра Могили. 2014. Вип. 225. Т. 237. С. 37–42.

8. Котов И. А. Реализация нечеткой логики в системе поддержки решений для автоматизации управления режимами энергосистем на основе инкорпорации

профессиональных онтологий // Качество минерального сырья : сб. науч. тр. / Акад. горных наук Украины, ГВУЗ «Криворожский нац. ун-т». Кривой Рог : Дионат, 2017. С. 206–213.

9. Котов І. А. Уніфікація онтології професійного тезауруса атомарних висловлювань для автоматизації підтримки рішень при керуванні енергооб'єктами // Качество минерального сырья : сб. науч. тр. / Акад. горных наук Украины, ГВУЗ «Криворожский нац. ун-т». Кривой Рог : Дионат, 2018. С. 228–239.

10. Азарян А. А., Котов І. А. Структурно-логічна модель фактів як засіб репрезентації характеристик компонентів електроенергетичних систем // Гірничий вісник : науково-технічний збірник. Кривий Ріг, 2018. Вип. 103. С. 137–142.

11. Котов І. А. Автоматна модель реактивної тригерної СППР для управління режимом енергосистеми гірничо-металургійного комплексу // Вісник Криворізького національного університету : зб. наук. праць. Кривий Ріг, 2019. Вип. 49. С. 36–42.

12. Котов І. А. Алгоритмізація мережі станів тригерної інтелектуальної підсистеми диспетчеризації енергосистеми гірничо-металургійного комплексу // Гірничий вісник : науково-технічний збірник. Кривий Ріг, 2019. Вип. 106. С. 24–30.

13. Моркун В. С., Котов І. А. Формування оцінки економічної ефективності інтелектуалізації оперативного управління нормальним режимом енергосистеми на основі інкорпорації професійних онтологій // Вісник Криворізького національного університету : зб. наук. праць. Кривий Ріг, 2020. Вип. 50. С. 3–9.

14. Котов І. А. Дослідження функцій надійності оперативно-диспетчерського персоналу енергосистеми для оцінки ефективності системи підтримки прийняття рішень при ліквідації аварійних ситуацій // Вісник Криворізького національного університету : зб. наук. праць. Кривий Ріг, 2020. Вип. 51. С. 46–51.

15. Котов І. А. Оцінка економічного ефекту як відверненого збитку від аварії в енергосистемі при впровадженні інтелектуальних засобів підтримки прийняття рішень // Гірничий вісник : науково-технічний збірник. Кривий Ріг, 2020. Вип. 108. С. 15–20.

16. Моркун В. С., Котов І. А., Сердюк О. Ю., Гапоненко І. А. Автоматизація керування енергетичними системами на основі процесу інтерпретації метаправил бази знань інтелектуальної системи // Вісник східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля: Серія «Технічні науки». Сєверодонецьк, 2021. № 2(266). С. 26–34.

17. Моркун В. С., Котов І. А., Сердюк О. Ю., Гапоненко І. А. Подання знань в інтелектуальних системах автоматизації керування енергосистемами гірничо-металургійного комплексу в умовах невизначеності // Вісник східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля: Серія «Технічні науки». Сєверодонецьк, 2021. № 4(268). С. 40–48.

18. Morkun V., Kotov I., Serdiuk O., Haponenko I. Production rule ontology of automatized smart emergency dispatching support of the power system // Herald of Advanced Information Technology, Odessa National Polytechnic University (ONPU). 2021. Vol. 4. No. 2. Pp. 168–184.

19. Моркун В. С., Котов І. А. Критерії оперативного моніторингу бази професійних концептів комплексу автоматизації керування енергосистеми // Вісник Черкаського державного технологічного університету. 2021. № 1. С. 59–69.

20. Котов І. А. Автоматизація протиаварійного керування енергосистемою на основі логіко-імовірнісного моделювання надійності продукційними мережами Петрі // Вісник Хмельницького національного університету. 2021. № 2(295). С. 71–77.

21. Котов І. А. Інтелектуальна підтримка автоматизації диспетчерського

керування енергосистемою з урахуванням імовірнісного характеру навантаження вузлів // Вісник Криворізького національного університету : зб. наук. праць. Кривий Ріг, 2021. Вип. 52. С. 95–104.

22. Котов І. А. Моделі диспетчерських компетенцій в інтелектуальних системах автоматизації протиаварійного керування енергосистемою // Гірничий вісник : науково-технічний збірник. Кривий Ріг, 2021. Вип. 109. С. 133–141.

Патент:

23. Моркун В. С., Котов І. А. Система підтримки прийняття рішень для управління режимами електропостачання в електроенергетичних системах : патент на корисну модель. Україна. № 144496 UA, МПК G05B 13/00 (2020.01) / Заявник і патенто-власник Криворізький національний університет – и 2020 01104 ; заявл. 20.02.2020 ; опубл. 12.10.2020, Бюл. №19. 7 с.

Статті в закордонних виданнях:

24. Котов І. А. Відбір структурно-логічних моделей подання знань для побудови інкорпорації професійних онтологій // World Science. Poland, Warsaw : RS Global Sp. z O.O. № 11(27). Vol. 1. November, 2017. С. 7–12.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

25. Сулейманов В. Н., Котов І. А. Формализация моделей принятия решений при управлении энергосистемой в кризисных ситуациях // Кризисные ситуации в энергетике: технико-экономическая оценка и моделирование решений по их нейтрализации : материалы научно-практической конференции. Киев : Об-во «Знание», 1994. С. 50–52.

26. Котов І. А. Моделювання прийняття рішень під час керування енергооб'єднанням // Математичне моделювання в електротехніці й електроенергетиці : матеріали І Міжнародної науково-технічної конференції. Львів, 1995. С. 46–47.

27. Котов І. А. Інтеграція форм представлення знань в експертних автотранспортних системах // Матеріали LXIV науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, аспірантів, студентів та структурних підрозділів університету. Київ : НТУ, 2008. С. 91.

28. Котов І. А., Константинов Г. В. Логические модели принятия решений в производственных экспертных системах на основе аппарата сетей Петри // Сталый розвиток гірничо-металургійної промисловості – 2008 : матеріали міжнародної науково-технічної конференції. Кривий Ріг, 2008. С. 35.

29. Котов І. А. Формалізація прийняття рішень при диспетчеризації автотранспортних систем // Матеріали LXV науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, аспірантів, студентів та структурних підрозділів університету. Київ : НТУ, 2009. С. 426.

30. Котов І. А. Модели диспетчеризации кризисных ситуаций в энергетике Украины // Стратегії протидії зовнішнім та внутрішнім загрозам економічній безпеці: регіональний вимір : матеріали міжнародного науково-практичного семінару. Запоріжжя, 2010. С. 218.

31. Котов І. А. Розвиток компонентних структур інтелектуальних транспортних систем // Матеріали LXVI науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, аспірантів, студентів та структурних підрозділів університету. Київ :

НТУ, 2010. С. 432.

32. Котов І. А. Синтез інтегральних інтелектуальних моделей енергетичної безпеки регіонів України // Проблеми соціально-економічного розвитку регіонів в умовах глобалізації : матеріали міжнародного науково-практичного семінару. Запоріжжя, 2011. С. 418.

33. Котов І. А. Задача уніфікації форм представлення знань в системах підтримки рішень комплексу АСУТП // Матеріали LXVIII Наукової конференції професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та працівників відокремлених структурних підрозділів університету. Київ : НТУ, 2012. С. 484.

34. Котов І. А. Методи впровадження інтегральної моделі подання знань у комплексі АСУТП промислових підприємств // Матеріали LXIX наукової конференції професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та працівників відокремлених структурних підрозділів університету. Київ : НТУ, 2013. С. 526.

35. Котов І. А. Інтелектуалізація моделей автоматизованих систем при підготовці фахівців оперативного управління // Новітні комп'ютерні технології. Кривий Ріг : Видавничий центр ДВНЗ «КНУ», 2016. Т. XIV. С. 52–53.

36. Котов І. А. Методи ієрархічної структуризації декларативних форм подання знань для керування підприємством у кризових ситуаціях // Матеріали LXIX наукової конференції професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та працівників відокремлених структурних підрозділів університету. Київ : НТУ, 2013. С. 526–527.

37. Котов І. А. Формалізація моделей онтологій у навчальних комплексах електроенергетичних спеціальностей // Новітні комп'ютерні технології. Кривий Ріг : Видавничий центр ДВНЗ «КНУ», 2017. Т. XV. С. 68–72.

38. Котов І. А. Програмний інструментарій мови подання знань для підтримки рішень в системах диспетчеризації режимів енергосистем // Розвиток промисловості та суспільства – 2017. Секція 12 «Комп'ютерні науки й інформаційні технології» : матеріали міжнародної науково-технічної конференції. Кривий Ріг, 2017. С. 373.

39. Котов І. А. Автоматизація побудови професійного тезауруса аварійних ситуацій промислових об'єктів // Розвиток промисловості та суспільства – 2018. Секція 12 «Комп'ютерні науки й інформаційні технології» : матеріали міжнародної науково-технічної конференції. Кривий Ріг. Т. 2. 2018. С. 146.

40. Котов І. А., Дудченко Д. М. Методологічне забезпечення викладання у ЗВО технологій штучного інтелекту на основі уніфікації знань // Новітні комп'ютерні технології. Кривий Ріг : Видавничий центр ДВНЗ «КНУ», 2018. Т. XVI. С. 36–40.

41. Котов І. А. Модель маркування сигнального графа мережі метаправил в онтологіях інтелектуальних систем // Комп'ютерна інженерія і кібербезпека: досягнення та інновації : матеріали всеукраїнської наук.-практ. конф. здобувачів вищої освіти й молодих учених (м. Кропивницькій, 27–29 листопада, 2018 р.) / Міністерство освіти і науки України ; Інститут модернізації змісту освіти ; Центральноукраїнський нац. техн. ун-т. Кропивницький : ЦНТУ, 2018. – С. 205–207.

42. Гуменок В. К., Котов І. А. Інтелектуальний веб-інтерфейс доступу до даних особливої важливості // Computer Science & Software Engineering : Proceedings of the 1st Student Workshop (CS&SE@SW 2018). Kryvyi Rih, Ukraine, November 30, 2018. Pp. 87–93 (CEUR Workshop Proceedings (CEUR-WS.org), Vol. 2292). (SCOPUS)

43. Ганістрат Д. О., Котов І. А. Автоматизована система оперативного розподілу ресурсів ліквідації комплексних надзвичайних ситуацій // Computer Science & Software

Engineering : Proceedings of the 1st Student Workshop (CS&SE@SW 2018). Kryvyi Rih, Ukraine, November 30, 2018. Pp. 94–102 (CEUR Workshop Proceedings (CEUR-WS.org), Vol. 2292). (SCOPUS)

44. Котов І. А., Шендерук М. Д. Проблема інтелектуалізації засобів автоматизації управління системами електропостачання // Проблеми енергозбереження і механізації в гірничо-металургійному комплексі : матеріали Міжнародної науково-технічної конференції молодих вчених і студентів. Кривий Ріг : Видавничий центр ДВНЗ «КНУ», 2019. С. 165–168.

45. Котов І. А., Керімов М. Т. Фазифікація атомарних концептів в онтологіях репрезентації систем енергопостачання гірничо-металургійного комплексу // Проблеми енергозбереження і механізації в гірничо-металургійному комплексі : матеріали Міжнародної науково-технічної конференції молодих вчених і студентів. Кривий Ріг : Видавничий центр ДВНЗ «КНУ», 2019. С. 169–172.

46. Котов І. А. Розвиток інформаційного забезпечення сучасних технологій штучного інтелекту для управління технологічними процесами в енергосистемі // Сучасні наукові дослідження на шляху до євроінтеграції : матеріали міжнародного науково-практичного форуму (21–22 червня, 2019 р.). Т. 2. Мелітополь : ТДАУ, 2019. С. 43–46.

47. Котов І. А. Фазифікація подання онтології семантичної мережі як компонента інкорпорації знань в умовах невизначеності // Інформаційні технології і автоматизація – 2019 : матеріали XII Міжнародної науково-практичної конференції (Одеса, 17–18 жовтня, 2019 р.). 2019. Ч. 2. С. 82–84.

48. Morkun V. S., Kotov I. A. Development of software control tools for power systems of mining and metallurgical regions // Second International Conference on Sustainable Futures: Environmental, Technological, Social and Economic Matters (ICSF 2021). Kryvyi Rih, Ukraine. 2021. Vol. 280. Pp. 1–9.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації

49. Сулейманов В. Н., Котов И. А. Оперативная экспертная система поддержки решений диспетчера энергообъединения // Энергетика и электрификация. 1994. № 3. С. 40–43.

50. Котов И. А., Константинов Г. В. Представление логических моделей принятия решений в производственных экспертных системах на основе аппарата сетей Петри // Разработка рудных месторождений : научн.-техн. сборник. Кривой Рог, 2008. Вып. 92. С. 189–193.

51. Котов І. А. Енергетична безпека як основа стабільності соціально-економічного розвитку регіонів України // Проблеми підвищення ефективності функціонування підприємств різних форм власності : сб. науч. тр. Донецк : ІЭП НАН Украины, 2010. Вып. 3. Т. 2. С. 338–345.

52. Котов І. А. Моделі диспетчеризації кризових ситуацій в електроенергетичному комплексі України // Проблеми підвищення ефективності функціонування підприємств різних форм власності : сб. науч. тр. Донецк : ІЭП НАН Украины, 2010. Вып. 3. Т. 3. С. 263–268.

53. Котов І. А. Семантичні мережі як компонент уніфікованої моделі подання знань в інтелектуальних системах // Технологічний аудит та резерви виробництва. 2012. № 5/2(7) : Наукова періодика слов'янських країн в умовах глобалізації : міжнар. наук. конф. Розділ «Інформаційні технології». С. 21–22.

54. Котов І. А. Логіко-імовірнісне моделювання надійності систем електропостачання в інтелектуальних системах керування // Технологічний аудит та резерви виробництва. 2013. № 6/4(14) : Наукові підсумки 2013 р. : міжнар. наук.-практ. конф. Розділ «Інформаційні технології та системи управління». С. 11–13.

55. Котов И. А. Построение интеллектуальных систем поддержки решений оперативного управления на основе логико-вероятностного моделирования надежности схем электроснабжения // Качество минерального сырья : сб. науч. тр. / Акад. горных наук Украины ; ГВУЗ «Криворожский нац. ун-т». Кривой Рог : Дионат, 2014. С. 321–328.

56. Котов І. А. Інтелектуалізація програмних систем для формування ефективних груп розробників програмного забезпечення // Гірничий вісник : наук.-техн. збірник. Вип. 99. Кривий Ріг. 2015. С. 154–159.

57. Котов І. А. Автоматизація інтелектуальних систем підтримки рішень оперативного керування шляхом інкорпорації професійних онтологій // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Серія: Інформатика та моделювання. Харків : НТУ «ХПІ», 2016. № 44(1216). С. 42–54.

58. Котов І. А. Формально-лінгвістичний підхід до евристичних методів управління режимами електроенергетичних систем // Вісник Криворізького національного університету : зб. наук. праць. Кривий Ріг, 2017. Вип. 45. С. 145–149.

59. Азарян А. А., Котов І. А. Оцінка ефективності тезауруса професійної лексики в онтологіях систем підтримки рішень для керування режимами енергосистем // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Серія: Інформатика та моделювання. Харків : НТУ «ХПІ», 2018. № 24(1300). С. 100–115.

60. Kotov I. A., Tron V. V., Serdiuk O. Yu., Pylypenko O. V. Efficiency of thesaurus of factual collocations of professional ontology of linguistic corpus of power system accidents // Computer science, information technology, automation (CSITA). Automation. Vol. 5, Issue 1. 2019. Pp. 24–34.

АНОТАЦІЯ

Котов І. А. Автоматизація процесів антикризового диспетчерського керування енергосистемами гірничо-металургійного комплексу на основі еволюційної інкорпорації професійних онтологій. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.07 – «Автоматизація процесів керування». Криворізький національний університет, Міністерство освіти і науки України, Кривий Ріг, 2021.

Дисертація присвячена актуальній науково-технічній проблемі теоретичної розробки і практичного впровадження моделей, методів і засобів уніфікованого еволюційного подання професійних онтологій у системах підтримки прийняття рішень для управління режимами електроенергетичних систем гірничо-металургійного комплексу.

У роботі досліджені структури електроенергетичного комплексу України і оперативно-диспетчерського управління в сучасних складних соціально-економічних умовах. Обґрунтована необхідність докорінної модернізації АСДК в напрямі інтелектуалізації диспетчерського управління.

Сформовано єдиний еволюційний підхід до інкорпорації та обробки професійних онтологій для побудови інтелектуальних систем і автоматизації управління складно структурованими об'єктами. Запропоновано єдину математичну модель інтеграції та

еволюційного успадкування професійних онтологій, що включає також модель когнітивної діяльності експертної системи в загальну ієрархію подання професійних знань. Формалізовано систему еволюційного узагальнення теоретико-множинної моделі базових концептів, систему онтологічного узагальнення еволюції знань і методів їх обробки, що дає змогу створювати універсальні алгоритми побудови знань і логічного висновку. Удосконалено формальний апарат подання і використання онтологій, інваріантний по відношенню до конкретних професійних галузей, що сприяє побудові універсальних систем підтримки прийняття рішень.

Розроблено програмний комплекс системи підтримки рішень для автоматизації диспетчерського оперативного управління нормальними і аварійними режимами енергосистеми. Запропоновано схему впровадження СППР в середовище діючої АСДК енергосистем.

Практична цінність розроблених онтологічних моделей знань, методів і засобів їх використання перевірені при вирішенні задач управління режимами енергосистеми в нормальних і аварійних умовах.

Проведено оцінку економічної ефективності СППР в нормальних і аварійних режимах експлуатації об'єкта управління.

Ключові слова: інкорпорація, концепт, лінгвістична змінна, метаправило, онтологія, продукція, семантична мережа, сигнальний граф, тезаурус, тригерна модель фазифікації, формальна мова, функція інтерпретації, функція приналежності.

ABSTRACT

Kotov I.A. Automation of emergency dispatch control processes for power systems of the mining and metallurgical complex on the basis of evolutionary incorporation of professional ontologies. – Manuscript.

Thesis for a Doctor of Engineering degree (Specialty 05.13.07 – “Automation of Control Processes”). – Kryvyi Rih National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kryvyi Rih, 2021.

The research deals with the topical scientific and technical problem of theoretical development and practical implementation of models, methods and means of unified evolutionary representation of professional ontologies in decision-support systems for controlling modes of electric power systems of the mining and metallurgical complex.

The work investigates into structures of Ukraine's power engineering complex and operational dispatch control in current complicated socioeconomic conditions. The necessity to make dispatch control 'smarter' and thus upgrade the automated dispatch control system is substantiated.

A single evolutionary approach to incorporating and processing professional ontologies to build smart systems and automatize control over complex-structured objects is formed. The author suggests a unified mathematical model based on integration and evolutionary inheritance of professional ontologies, which includes the cognitive activity model of the expert system incorporated into a general hierarchy of professional knowledge representation. The evolutionary generalization system of the set-theoretic model of basic concepts, ontological generalization of evolution of knowledge and methods of its processing are formalized to build universal algorithms for building knowledge and a logical inference. The formal apparatus for ontology representation and use, which is invariant for specific professional areas, is improved to build universal decision-support systems.

The software complex of the decision-support system applied to automatizing operational dispatch control of standard and emergency modes of the power system is developed. The scheme for implementing the decision support system in current automated control systems of power engineering is proposed.

The DSS cycle results in regulatory-instructional materials of dispatch control obtained from professional ontologies of the knowledgebase as well as recommendations of control corrective actions, their values and directions of change based on calculated sensitivity matrices. In addition, there is a possibility to use the knowledgebase as a database with sampling of necessary data for analysis.

Research includes developing diagrams of knowledgebase interpretation and the inductive inference block that functionally overlap, unlike the classical architecture of smart systems.

Practical significance of the developed ontological knowledge models, methods and means of their use is verified through solving problems of controlling the power system modes both under standard and emergency conditions.

Economic efficiency of the decision-support system under standard and emergency conditions of control objects operation is assessed.

Keywords: incorporation, concept, linguistic variable, meta-rule, ontology, production, semantic network, signal graph, thesaurus, trigger fuzzification model, formal language, interpretation function, membership function.

КОТОВ Ігор Анатолійович

**Автоматизація процесів антикризового диспетчерського керування
енергосистемами гірничо-металургійного комплексу
на основі еволюційної інкорпорації професійних онтологій**

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук
за спеціальністю 05.13.07 – автоматизація процесів керування

Підписано до друку 19.11.2021.

Формат 60×84/16. Ум. друк. арк. – 2,57. Авт. арк. – 1,90.

Тираж 100 пр.

Друкарня С. Г. Щербенка «Літерія»
вул. Рокоссовського, 5/3, м. Кривий Ріг, 50027.

Тел. 097-192-20-77

Свідоцтво суб'єкта видавничої діяльності ДК № 4561 від 13.06.2013.