

ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ПРОДУКЦІЙНИХ ФОРМ БАЗ ЗНАНЬ ДИСПЕТЧЕРИЗАЦІЇ РЕЖИМІВ ЕНЕРГОСИСТЕМ

Анотація. У роботі аналізуються підходи до інтелектуальних інформаційних комп'ютерних систем на основі баз знань для підтримки диспетчерського керування електричними системами в умовах дефіциту часу та ресурсів. Висвітлено специфіку застосування продукційної форми подання знань, що базується на реалізації кон'юнктивно-диз'юнктивних логічних операцій. Розглянуто завдання побудови виробничих експертних систем на теоретичній основі апарату мереж Петрі, що дозволяє генерувати несутеречливі логічні моделі прийняття рішень з урахуванням паралелізму. У роботі розглянуто завдання забезпечення якості нормальних та післяаварійних режимів електроенергетичної системи на основі використання евристичних методів ситуаційного управління та підтримки рішень диспетчера. Побудову бази знань запропоновано здійснювати на навчальних вибірках параметрів, отриманих відповідно до матриць планування факторних експериментів. У роботі запропоновано інтегральну модель представлення знань області диспетчерського управління на семантичних та продукційних мережах

Результати роботи можуть бути використані як на вищому рівні диспетчерського управління, так і в районних електричних мережах під час планування протиаварійних заходів.

Ключові слова: інтелектуальна система, продукція, евристика, диспетчеризація, паралелізм, база знань, експертна система, логічний висновок, формальна мова

Постановка проблеми. Стрімке зростання складності сучасних технологічних та соціально-економічних систем вимагає впровадження принципово нових підходів до прийняття управлінських рішень. Це зумовлено ієрархічною заплутаністю та складною логікою взаємодії компонентів об'єктів управління. Відтак, критичного значення набуває розробка формалізму, який би поєднував у собі адекватність моделювання, наочність та теоретичну глибину. Традиційні чисельні методи моделювання сьогодні втрачають актуальність через свою статичність та високу трудомісткість розробки. Зокрема, створення великих моделей може тривати роками, а будь-яка зміна структури об'єкта потребує повного перепроєктування ПЗ. Альтернативним шляхом є розбудова інтелектуальних баз знань для експертних систем, які здатні функціонувати в темпі реального часу та адаптуватися до паралельних ланцюгів подій без критичних витрат на перепроєктування. Проблема моделювання адекватного формалізму для прийняття рішень загострюється через ускладнення структурної ієрархії сучасних систем. Висока парамет-

рична розмірність та необхідність реагування в реальному часі роблять застосування класичних обчислювальних методів малоефективним. На противагу статичним чисельним моделям, розробка яких потребує значних інтелектуальних та часових ресурсів (3–5 люд./років), пропонується перехід до побудови гнучких баз знань. Такий підхід забезпечує необхідну повноту та несуперечливість опису процесів, враховуючи при цьому динаміку та одночасність багатьох подій у системі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сучасних умовах різкого зростання збитків від помилкових управлінських рішень ці обставини стають критичними. Проведений аналіз показує, з одного боку, великий інтерес до проблеми побудови та використання баз знань, а, з іншого боку, – відсутність єдиних підходів і стійких детермінованих методик її вирішення. Видається, що таке рішення може бути знайдено на шляху об'єднання алгоритмічних підходів і відпрацьованих евристик. У даній ситуації ставиться завдання розробки та впровадження принципово нових підходів до опису та управління складними системами. Одним із можливих рішень є розробка евристичних підходів до представлення складних об'єктів та моделювання процесів прийняття управлінських рішень [1-3]. Основою таких підходів є застосування різних мов представлення знань у складі систем логічної обробки інформації, систем штучного інтелекту та, зокрема, експертних систем [1, 2]. Останні надають потужні засоби обробки експертної інформації та забезпечують можливість детального аналізу ситуації при значній економії обчислювальних ресурсів. Аналіз показує, що найбільш повними можливостями для представлення динаміки та логіки складних структур володіють продукційні системи представлення знань в експертних системах [4, 5]. Багато інших способів представлення знань мають обмеження, є складними для сприйняття та важкими в інструментальній реалізації. До таких методів можна віднести обчислення предикатів, динамічні спискові структури, триплети, семантичні мережі. Логіка предикатів, наприклад, не забезпечує моделювання розвинених структур даних. Спискові структури складні в програмній реалізації. На сьогоднішній день відсутній єдиний підхід до реалізації універсального засобу представлення експертних знань для різних професійних середовищ. Отже, потрібна розробка такого формального апарату представлення продукційних знань, який, спираючись на глибоку теоретичну базу, забезпечить ефективність рішень і простоту програмної реалізації. У статті розглянуто формальний апарат мереж Петрі, який відповідає вимогам представлення продукційних форм знань для їх програмної реалізації [6-9]. У роботах [10, 11] детально розглянуто прикладні аспекти моделювання та реалізації програмних моделей на основі формалізмів мереж Петрі.

Виклад основного матеріалу. Продукційні системи є найбільш раціональним засобом представлення знань у предметних областях, що характеризуються значною складністю та динамічністю функціонування об'єктів. Програмний комплекс для реалізації математичних моделей продукційних баз знань у задачах диспетчеризації енергосистем базується на багаторівневій архітектурі. Вона інтегрує підсистему збору даних (SCADA), базу продукційних правил, механізм логічного виведення в реальному часі та модуль пояснення прийнятих рішень. Математично цей процес описується як

відображення множини станів системи у множину керуючих дій, де виведення є послідовною активацією правил залежно від поточних параметрів мережі. Продукційний підхід забезпечує високу прозорість логіки, можливість інтерпретації результатів та легкість корекції бази знань. Слід зазначити, що більшість існуючих підходів до реалізації баз знань або є складними та незручними для сприйняття через особливості застосованого математичного апарату, або є складними для програмної реалізації.

Для відстеження спрацьовування правил та фіксації ланцюжків міркувань визначають мову мережі продукцій. Теорія формальних мов для аналізу рядків, що породжуються формальними системами, і, зокрема, мережами Петрі, широко використовується при моделюванні ситуаційного управління.

У роботі розглянуто реалізацію представлення продукційної частини бази знань на основі математичного апарату теорії мереж Петрі. Основні принципи побудови елементарних продукцій у термінах теорії мереж Петрі полягають у наступному.

Перш за все, з метою отримання необхідного змісту, що формується моделлю, вводяться дві умови:

жодна позиція продукції не може одночасно бути входом і виходом одного й того самого переходу, $I(t_j) \cap O(t_j) = \emptyset$;

у продукціях фішки мають значення сигналу, тобто принципово важливим є сам факт наявності або відсутності фішок у позиціях.

Оскільки кількість фішок у вхідних позиціях продукцій не перевищує кількості продукцій, підключених до їхніх входів, то кількість фішок буде обмеженою. Отже, для будь-якого стану нереклексивної мережі продукцій

$$\forall(\mu' | \mu' \leq n) : \mu' \in R(P, \mu), \quad (1)$$

де n – кількість продукцій мережі; μ' – деяке поточне маркування; R – множина продукцій на мережі Петрі; P – множина позицій продукційної мережі Петрі; μ – множина можливих маркувань мережі.

Така мережа, як відомо, має властивість n -безпеки.

З огляду на наведені вище умови, запропоновано таку модель елементарної продукції в термінах теорії мереж Петрі:

$$r = \langle P_r, T_r, I_r, O_r \rangle, \quad (2)$$

де $P_r = \{P^I, P^O, P^J\}$ – кінцева множина позицій продукції; $P^I = \{p_i^I | i=1, N^I\}$ – кінцева множина вхідних позицій продукції, N^I – кількість вхідних позицій продукції, $P^O = \{p_j^O | j=1, N^O\}$ – кінцева множина вихідних позицій продукції; N^O – кількість вихідних позицій продукції; $P^J = \{p', p''\}$ – множина додаткових позицій продукції; $T_r = \{t_k | k=1, N^T\}$ – кінцева множина переходів продукції, N^T – кількість переходів продукції; I_r – вхідна функція продукції, що відображає множину переходів продукції у множину її вхідних позицій, $I_r: T_r \rightarrow P^I$; O_r – вихідна функція продукції, що відображає множину переходів продукції у множину її вихідних позицій, $O_r: T_r \rightarrow P^O$.

В продукції введені додаткові позиції p' і p'' , які призначені для керування

спрацьовуванням продукції в одиничному циклі роботи мережі правил. Для забезпечення спрацьовування продукції в її додаткову позицію p' повинна бути розміщена фішка.

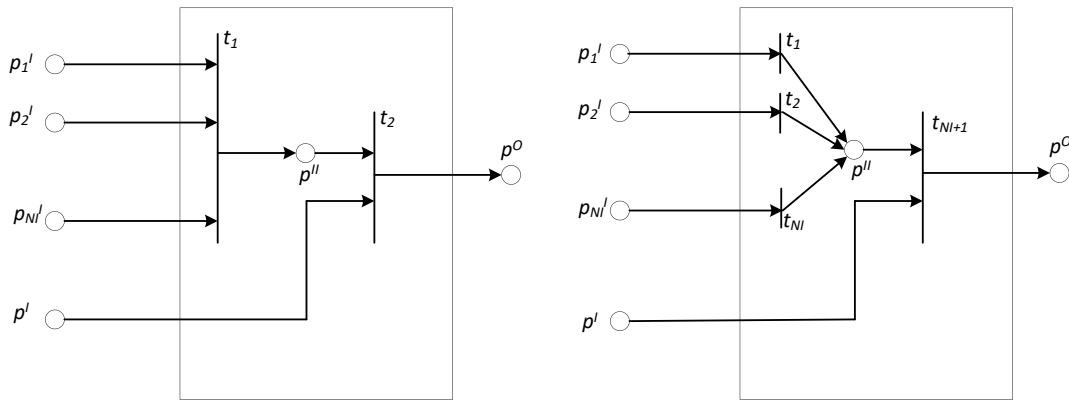


Рисунок 1 – Мережі Петрі, що відповідають таким продукціям:

а) продукція типу «AND», б) продукція типу «OR»

У логічній системі, що створюється, не розглядаються продукції типу «НЕ». Введення останньої до продукційної мережі призвело б до необхідності суворого дотримання порядку правил у базі знань, що суперечить принципу декларативності. Тому дія заперечення закладена в смисловий зміст інформації «AND» та «OR» продукцій.

Розширені вхідні та вихідні функції, наприклад, типу «AND», мають вигляд:

$$\begin{aligned} I(t_1) &= \{p_1', \dots, p_{N'}'\}, \\ I(t_2) &= \{p', p''\}, \\ O(t_1) &= \{p''\}, \\ O(t_2) &= \{p^o\}. \end{aligned} \quad (3)$$

Виконання продукції здійснюється відповідно до правил функціонування мереж Петрі.

Нехай $M^k = \{\mu_k^i\}$ – вектор усіх можливих позначень вхідних позицій правила, $M^k \subset R(C, \mu)$, $k=1, N^k$; N^k – загальна кількість можливих маркувань; $\mu_k^i = \{\mu(p_k^i)\}$, $\mu(p_k^i)$ – маркування i -ої вхідної позиції правила, включаючи й позицію p' , $i = 1, N^k + 1$. Тоді умова спрацьовування k -ої продукції типу «AND» буде виглядати наступним чином:

$$\forall (r_k) \exists (\mu_k^i) (r_k \in R_C, \mu_k^i \in M^k) : \sum_{i=1}^{N^k} \mu(p_{ki}^i) + \mu(p_k') \geq N^k + 1, p_{ki}^i \in P_k^i, \quad (4)$$

де n_k – k -я продукція; μ_k^i – маркування вхідних позицій k -ої продукції; R_C – множина продукцій; M^k – вектор усіх можливих позначень вхідних позицій k -ої продукції; $\mu(p_k')$ – маркування додаткової позиції k -ої продукції; P_k^i – множина всіх вхідних позицій k -ої продукції, $p_{ki}^i \in P_k^i$.

Функція наступного стану, застосована до k-ої продукції «AND»-типа, відобразить маркування μ_k^I в μ_k^I :

$$\mu_k^{II} = \delta(\mu_k^I, r). \quad (5)$$

Якщо у вихідних позиціях продукції було по одній фішці, то в результаті вектор μ_k^I отримає всі нульові значення, а вектор μ_k^O матиме вигляд $\mu_k^O = \{\mu_{kj}^O\}$, де $\forall \mu_{kj}^O: \mu_{kj}^O = 1, j = 1, N^O$.

Введемо оціночні характеристики фішок у вихідних позиціях продукції типу «AND». Позначимо вагу кожної фішки у вихідних позиціях p_i^O через m_p^O . Тоді ця вага визначається через ваги фішок у вхідних позиціях m_p^I таким чином:

$$m_p^O = \prod_{i=1}^{N^I} m_{pi}^I. \quad (6)$$

Розглянемо мережу Петрі, що відповідає продукціям типу «OR». Умова спрацьовування k-ої продукції типу «OR» має вигляд:

$$\forall (r_k) \exists (\mu_k^I) (r_k \in R_C, \mu_k^I \in M_k^I): \sum_{i=1}^{N^I} \mu(p_{ki}^I) + \mu(p_k^I) \geq 2, p_{ki}^I \in P_k^I, \quad (7)$$

Розширені вхідна та вихідна функції в даному випадку мають вигляд:

$$\begin{aligned} I(t_1) &= \{p_1^I\}, \\ I(t_2) &= \{p_2^I\}, \\ &\dots\dots\dots \\ I(t_N) &= \{p_N^I\}, \\ I(t_{N+1}) &= \{p', p''\}, \\ O(t_1) &= O(t_2) = \dots = O(t_{N'}) = \{p''\}, \\ O(t_{N'+1}) &= \{p^O\}. \end{aligned} \quad (8)$$

Функція наступного стану, застосована до правила «OR», також відобразить вектори маркерів вхідних і вихідних позицій у нових станах:

$$\begin{aligned} \mu^I &= \delta(\mu^I, r), \\ \mu^O &= \delta(\mu^O, r), \\ \mu^I &= \{\mu'(p_i^I)\}, \mu'(p_i^I) = 0, i = 1, N^I, \\ \mu^O &= \{\mu'(p_j^O)\}, \mu'(p_j^O) = 1, j = 1, N^O. \end{aligned} \quad (9)$$

Останні вирази ілюструють умови функціонування «OR»-продукції. Остання вважається спрацьованою, якщо спрацював принаймні один із її дозволених переходів. Введемо для правила типу «OR» оціночні характеристики фішок у вихідних позиціях. Зберігаючи прийняті позначення, отримаємо:

$$m_p^O = 1 - \prod_{i=1}^{N^I} (1 - m_{pi}^I). \quad (10)$$

Зазначимо, що застосований підхід до визначення ваг фішок у вихідних позиціях продукцій відображає імовірнісні властивості сигналів, що проходять через модельовану мережу. Отже, при асоціюванні фішок у позиціях мережі з певними обсягами інформації реалізується можливість відображення недетермінованості експертних знань. Формування мережі продукцій ґрунтується на принципах поєднання вихідних позицій одних продукцій із вхідними позиціями інших. Нехай $P_a = \{p_{a1}, \dots, p_{an}\}$ и $P_b = \{p_{b1}, \dots, p_{bm}\}$ – дві об'єднані множини позицій. Кожна позиція з P_a копіюється m раз, а кожна позиція з P_b – n раз. Позиції копіюються разом із їхнім маркуванням та інцидентними дугами. Потім кожна пара позицій (p_{ai}, p_{bj}) замінюється новою позицією $p = p_{ai} \cup p_{bj}$ з маркуванням $\mu(p) = \mu(p_{ai}) + \mu(p_{bj})$ і відповідними інцидентними дугами. Наведено приклад застосування описаного прийому на рис. 2.

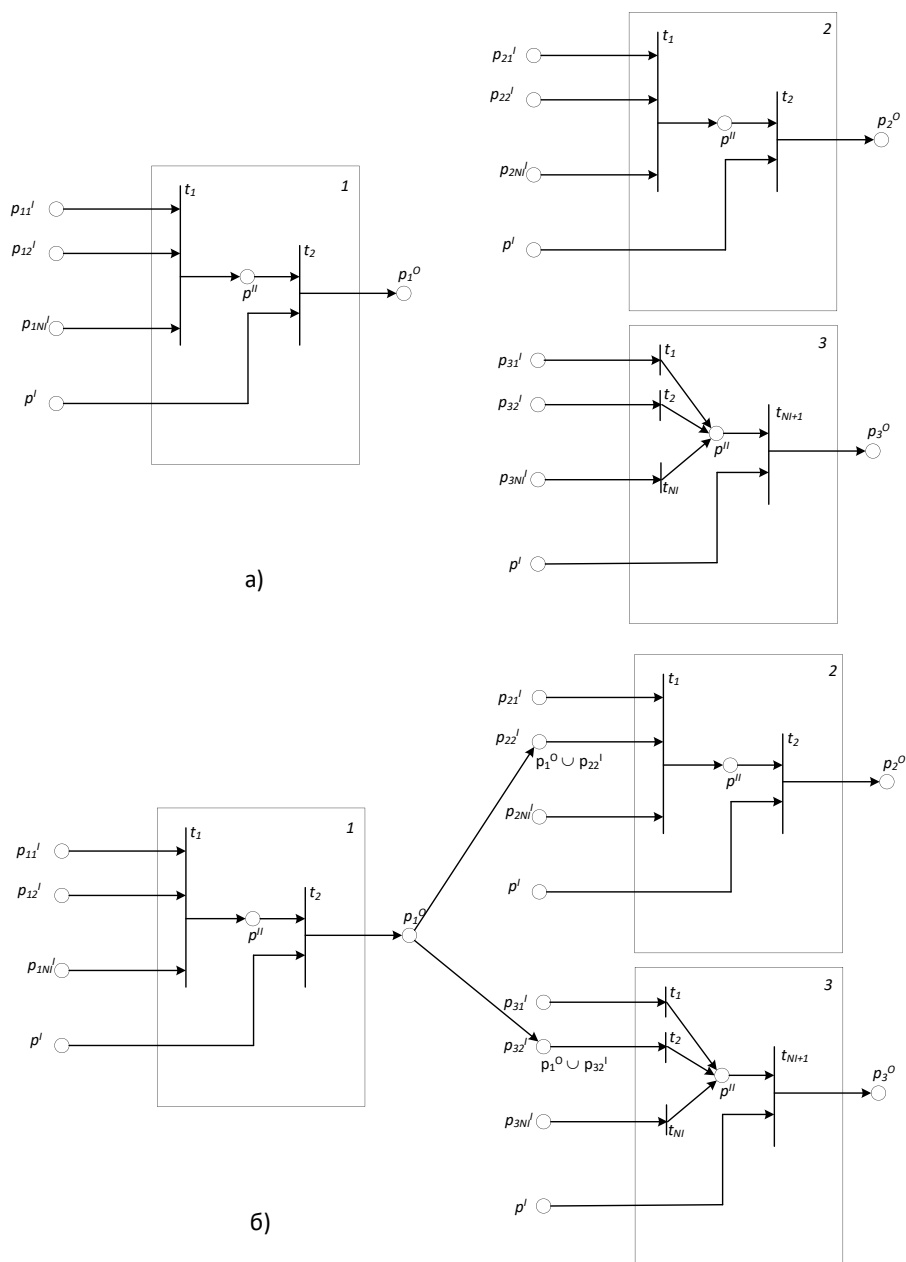


Рисунок 2 – Злиття позицій правил мережі

Зазначимо, що прийняте тлумачення значення та ролі додаткових позицій продукцій виділяє їх із процесу злиття. Перед початком нового циклу роботи системи у всі додаткові позиції p' розміщується по одній фішці. У разі необхідності повторної ініціалізації одного або групи правил заново ініціюються їхні вхідні позиції. У мережі, що складається з таких продукцій, спрацьовують усі правила, які можуть спрацювати, чим забезпечується паралелізм функціонування продукцій та їхня адекватність модельованим процесам. Злиття позицій продукцій відповідає операції конкатенації в мережі Петрі. Кожна продукція, у загальному випадку, є мережею Петрі зі своєю мовою, отже, мова мережі продукцій

$$L_1 \dots L_N = \{X_1, \dots, X_N / X_1 \in L_1, \dots, X_N \in L_N\}, \quad (11)$$

що є конкатенацією мов $L_1 \dots L_N$, також є мовою мережі Петрі.

Узагальнюючи сказане, можна формально визначити мережу продукцій, побудовану на основі мережі Петрі. Під мережею продукцій у контексті даної роботи мається на увазі така модель:

$$R_C = \langle R, I_r, O_r \rangle, \quad (12)$$

де $R_C = \{r_1, \dots, r_N\}$ – кінцева множина продукцій мережі; $I_r: R \rightarrow P_C^I$ – вхідна функція, що відображає множину продукцій у множину вхідних позицій; $O_r: R \rightarrow P_C^O$ – вихідна функція, що відображає множину продукцій у множину вихідних позицій.

Очевидно, що під множинами вхідних і вихідних позицій тут слід розуміти

$$P_C^I = \bigcup_{i=1}^{N_r} p_i^I, \quad (13)$$

$$P_C^O = \bigcup_{j=1}^{N_r} p_j^O,$$

де P_C^I, P_C^O – відповідно до множини вхідних і вихідних позицій продукцій, об'єднаних у мережу.

Для мережі продукцій виконується умова

$$\forall(r)(P_r^I \cap P_c^I \neq \emptyset \vee P_r^O \cap P_c^O \neq \emptyset), \quad (14)$$

що визначає зв'язність мережі.

Розглянемо, наприклад, мережу правил, зображену на рис. 2. У цьому випадку виконуються співвідношення:

$$R = \{r_1, r_2, r_3\},$$

$$I(r_1) = (p_{11}^I, p_{12}^I), O(r_1) = (p_{22}^I, p_{31}^I),$$

$$I(r_2) = (p_{21}^I, p_{22}^I), O(r_2) = (p_2^O),$$

$$I(r_3) = (p_{31}^I, p_{32}^I), O(r_3) = (p_3^O), \quad (15)$$

$$P_C^I = \{p_{11}^I, p_{12}^I, p_{21}^I, p_{22}^I, p_{31}^I, p_{32}^I\},$$

$$P_C^O = \{p_{22}^I, p_{31}^I, p_2^O, p_3^O\}.$$

Таким чином, модель мережі, побудована на запропонованих принципах, може відображати процеси, що характеризуються високим ступенем паралелізму. Остання

обставина є вкрай необхідною під час машинного аналізу бази знань диспетчера, прийняття рішень яким пов'язане з оцінкою значної кількості одночасних, рівнозначних і взаємопов'язаних факторів. Для подібних процесів можливе встановлення відносин паралелізму та послідовності:

$$\begin{aligned} XcoY &\Leftrightarrow (\neg(X < Y) \wedge \neg(Y < X)) \vee (X = Y), \\ XliY &\Leftrightarrow ((X < Y) \vee (Y < X)) \vee (X = Y), \end{aligned} \quad (16)$$

де co і li – відповідно, відносини паралелізму та наслідування; X, Y – елементи процесу (продукції та зміни маркування позицій); $<$ – відношення передування; $=$ – відношення одночасності. Відношення co не накладає обмежень на порядок розташування елементів і не встановлює причинно-наслідкових зв'язків між ними.

Як зазначалося вище, кількість фішок у вхідних позиціях продукцій обмежена кількістю продукцій, приєднаних до них зліва, кількість яких не перевищує певної величини n . Кількість фішок у позиції p'' продукції «OR»-типа може накопичуватися і досягати максимального значення

$$n_{max} = n_c(n_p - 1), \quad (17)$$

де n_p - загальна кількість вхідних позицій «OR»-продукції; n – кількість циклів запуску даної продукції. У загальному випадку величина n є скінченною, і справедливо

$$\forall(p_i | p_i \in P_c): \mu(p_i) \leq n_{max}, \quad (18)$$

т.е. мережа має властивість n_{max} - обмеженості і, отже,, n_{max} - безпеки.

Задача досяжності для всіх вихідних позицій зводиться до з'ясування питання спрацьовування правил і зумовлена структурою мережі правил та їхнім поточним маркуванням.

Результати та обговорення. З розглянутих властивостей побудованих математичних моделей продукцій впливає, що мережі Петрі є потужним засобом для представлення знань про продукцію. Апарат мереж Петрі дозволяє адекватно відобразити паралелізм ланцюгів подій, характерний для сфери диспетчерського управління енергооб'єднанням. Розроблені моделі не накладають обмежень на вихідну форму представлення диспетчерської інформації. Введені принципи інтерпретації маркувань позицій дозволяють вирішувати проблеми конфлікту продукцій і проводити чисельну оцінку достовірності отриманих логічних рішень. Визначення мови мережі продукцій дає можливість трасування та аналізу ланцюжків міркувань, а також полегшує процес створення та верифікації бази знань з метою ліквідації внутрішньої суперечливості.

На основі запропонованих підходів і моделей розроблено експертну систему оцінки параметрів компонентів електроенергетичної системи. На рис. 3 наведено фрагмент форми програмного комплексу з диспетчерськими рекомендаціями щодо автоматизації процесу диспетчеризації режимів енергосистем та ліквідації аварійних станів.

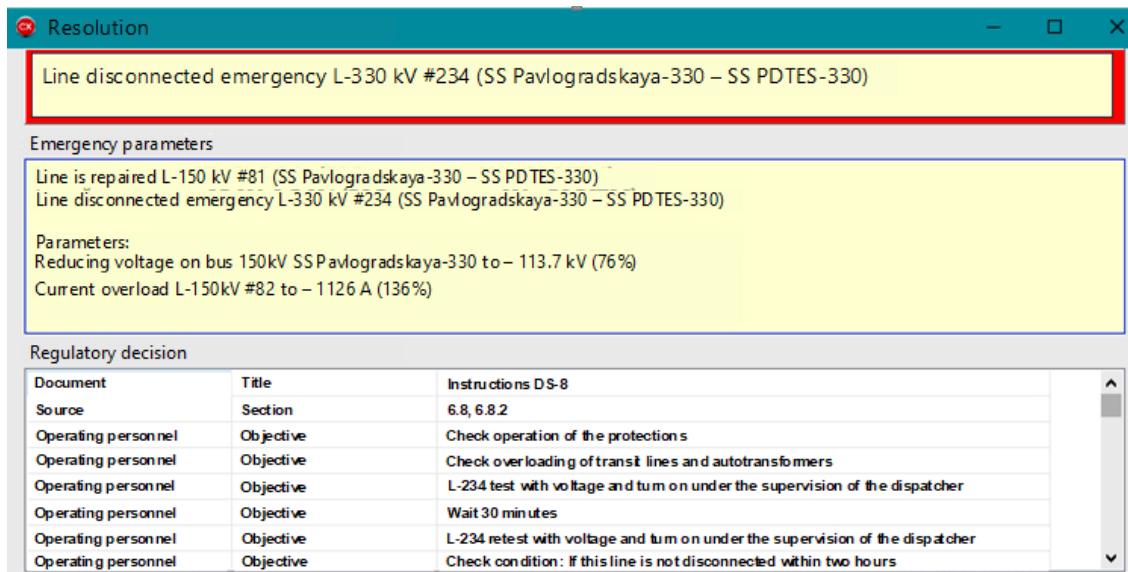


Рисунок 3 – Експертні рекомендації щодо диспетчерського врегулювання аварійної ситуації в енергосистемі

Архітектура програмної реалізації продукційних моделей для диспетчерського управління охоплює рівні збору інформації, зберігання знань та оперативного виведення рішень з можливістю їх пояснення. Формалізація правил як відображень стану системи на керуючі впливи дозволяє реалізувати динамічний процес прийняття рішень у реальному часі.

Висновки. Результати роботи демонструють, що мережі Петрі є ефективним засобом програмної реалізації ситуаційних моделей. Розглянутий підхід до синтезу правил не потребує попередньої формалізації знань, що значно спрощує роботу з експертною інформацією. Наявність потужної теоретичної бази дозволяє здійснювати глибинний аналіз множини станів системи. Дослідження можливостей побудови продукційних мереж на основі математичного апарату мереж Петрі та їх програмної реалізації підтверджує, що цей підхід є універсальним інструментом для моделювання ситуаційних задач. В статті обґрунтовано роль інтелектуальних комп'ютерних систем у підвищенні ефективності управлінських процесів та скороченні циклу прийняття рішень. Модель продукцій на базі мереж Петрі дає можливість повторного використання розроблених компонентів значно пришвидшує створення нових додатків. Практичне впровадження результатів дослідження в контур управління енергооб'єктів дозволить забезпечити високу якість прийняття рішень та мінімізувати негативні наслідки виробничих аварій. Використання продукційного формалізму забезпечує адаптивність бази знань до змін у конфігурації енергосистеми та високу зрозумілість логіки управління для оперативного персоналу. Запропонований метод синтезу структури правил дозволяє використовувати експертну інформацію в її вихідному вигляді без необхідності попередньої складної формалізації. Подальші розвідки будуть спрямовані на апробацію цих моделей у різних предметних областях з урахуванням специфічних експлуатаційних обмежень.

ЛІТЕРАТУРА

1. Sai T. K., Reddy K. A. New Rules Generation From Measurement Data Using an Expert System in a Power Station. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2015. Vol. 30, no. 1. P. 167–173. DOI: 10.1109/tpwr.2014.2355595
2. Santos, J. K. S. d., Siqueira, L. S., Faria, E. M. B., Bispo, K. A., Silva, G. J. F. d., & Soares, M. S. Methodological Advances in Expert Systems with Artificial Intelligence. *Simpósio Brasileiro de Sistemas de Informação, Brasil*. 2025. P. 703–712. DOI: 10.5753/sbsi.2025.246618
3. Elsharif Karrar A.E. A Proposed Model for Improving the Performance of Knowledge Bases in Real-World Applications by Extracting Semantic Information. (*IJACSA*) *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*. 2022. Vol. 13, No. 2. P. 116-123. DOI: 10.14569/IJACSA.2022.0130214
4. Anamitra Kanjilal. Knowledge Representation in Artificial Intelligence. *International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering*. 2024. Vol. 12, No. 4. P. 2227–2238. URL: <https://www.ijisae.org/index.php/IJISAE/article/view/6577>
5. Jiang H., Gai J., Zhao S., Chaudhry P. E., Chaudhry S. S. Applications and development of artificial intelligence system from the perspective of system science: A bibliometric review. *Systems Research and Behavioral Science*. 2022. DOI: 10.1002/sres.2865
6. Cardoso J., Valette R. Petri nets. 2024. 197 p. DOI: 10.34849/t30e-ax86
7. Kumbhar V.B., Chavan M.S. A Review of Petri Net Tools and Recommendations. *Advances in Computer Science Research*. Dordrecht, 2023. P. 710–721. DOI: 10.2991/978-94-6463-136-4_61
8. Bernardinello L., Petrucci L. *Application and Theory of Petri Nets and Concurrency*. Cham: Springer International Publishing, 2022. DOI: 10.1007/978-3-031-06653-5.
9. Truong V.-D., Brace W., Benzoni G., Cammi A., Kuosmanen P. A probabilistic-driven approach for early design quality risk and crux identification using non-Markovian stochastic Petri nets. *Research in Engineering Design*. 2025. Vol. 37, no. 1. DOI: 10.1007/s00163-025-00466-w
10. Reckell T., Sterner B., Jevtić P. The Basic Reproduction Number for Petri Net Models: A Next-Generation Matrix Approach. *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15, no. 23. P. 12827. DOI: 10.3390/app152312827
11. Hammedi S., Elmelliani J., Nabli L., Namoun A., Alanazi M. H., Aljohani N., Shili M., Alshmrany S. Optimizing Production in Reconfigurable Manufacturing Systems with Artificial Intelligence and Petri Nets. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*. 2024. Vol. 15, no. 10. DOI: 10.14569/ijacsa.2024.0151044

REFERENCES

1. Sai, T. K., & Reddy, K. A. (2015). New Rules Generation From Measurement Data Using an Expert System in a Power Station. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 30(1), 167–173. DOI: 10.1109/tpwr.2014.2355595
2. Santos, J. K. S. d., Siqueira, L. S., Faria, E. M. B., Bispo, K. A., Silva, G. J. F. d., & Soares, M. S. (2025). Methodological Advances in Expert Systems with Artificial Intelligence. In

Simpósio Brasileiro de Sistemas de Informação, 703–712. DOI: 10.5753/sbsi.2025.246618

3. Elsharif Karrar A.E. (2022). A Proposed Model for Improving the Performance of Knowledge Bases in Real-World Applications by Extracting Semantic Information. (IJACSA) International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 13(2), 116-123. DOI: 10.14569/IJACSA.2022.0130214

4. Anamitra Kanjilal. (2024). Knowledge Representation in Artificial Intelligence. International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering, 12(4), 2227–2238. URL: <https://www.ijisae.org/index.php/IJISAE/article/view/6577>

5. Jiang, H., Gai, J., Zhao, S., Chaudhry, P. E., & Chaudhry, S. S. (2022). Applications and development of artificial intelligence system from the perspective of system science: A bibliometric review. Systems Research and Behavioral Science, 39(3), 361-378. DOI: 10.1002/sres.2865

6. Cardoso J., & Valette, R. (2024) Petri nets. 197 p. DOI: 10.34849/t30e-ax86

7. Kumbhar, V. B., & Chavan, M. S. (2023). A Review of Petri Net Tools and Recommendations. In Advances in Computer Science Research, Atlantis Press International BV. 710–721. DOI: 10.2991/978-94-6463-136-4_61

8. Bernardinello, L., & Petrucci, L. (2022). Application and Theory of Petri Nets and Concurrency. Springer International Publishing. DOI: 10.1007/978-3-031-06653-5

9. Truong, V.-D., Brace, W., Benzoni, G., Cammi, A., & Kuosmanen, P. (2025). A probabilistic-driven approach for early design quality risk and crux identification using non-Markovian stochastic Petri nets. Research in Engineering Design, 37(1). DOI: 10.1007/s00163-025-00466-w

10. Reckell, T., Sterner, B., & Jevtić, P. (2025). The Basic Reproduction Number for Petri Net Models: A Next-Generation Matrix Approach. Applied Sciences, 15(23), 12827. DOI: 10.3390/app152312827

11. Hammedi, S., Elmelliani, J., Nabli, L., Namoun, A., Alanazi, M. H., Aljohani, N., Shili, M., & Alshmrany, S. (2024). Optimizing Production in Reconfigurable Manufacturing Systems with Artificial Intelligence and Petri Nets. International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 15(10). DOI: 10.14569/ijacsa.2024.0151044

Received 23.04.2026.

Accepted 27.04.2026.

Published 30.04.2026

Software implementation of mathematical models

for production-rule knowledge bases in power system dispatch control

This paper analyzes approaches to knowledge-base-driven intelligent information computer systems designed to support the dispatch control of electric power systems under time and resource constraints. Significant results were obtained through concepts of situational management, simulation modeling, and heuristic analysis, as well as the application of pattern recognition methods. The core idea for solving the problem of ensuring power system mode quality is that the bulk of the initial topology and state data is pre-processed, while the direct control actions are determined using relatively simple algorithms based on data concerning the previous normal state and the vector of disturbance parameters.

Success in solving power system mode control tasks is largely determined by the representativeness of the mode-quality characteristic parameters.

Thus, the search for optimal control actions entails solving the following tasks: recognition and classification of emergency situations; determination of the locations and types of control actions depending on the specific emergency context; and determination of the dosage of dispatch control actions.

The study highlights the specific application of the production-rule form of knowledge representation, which is based on the implementation of conjunctive-disjunctive logical operations. The task of building production-rule expert systems is considered on the theoretical basis of Petri nets, which enables the generation of consistent logical decision-making models while accounting for parallelism. The paper examines the task of ensuring the quality of the electric power system in both normal and post-emergency modes by utilizing heuristic methods for situational management and dispatcher decision support. It is proposed to construct the knowledge base using parameter training sets generated according to factorial design matrices. The study proposes an integrated knowledge representation model for the dispatch control domain based on semantic and production networks.

The research results can be utilized both at the higher level of dispatch control and in regional power grids during the planning of emergency control measures.

Keywords: intelligent system, production rule, heuristics, dispatch control, parallelism, knowledge base, expert system, logical inference, formal language.

Котов Ігор Анатолійович - доктор технічних наук, доцент, професор кафедри моделювання та програмного забезпечення, Криворізький національний університет.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2445-6259>

Швец Дмитро Валерійович - кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри моделювання та програмного забезпечення, Криворізький національний університет.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5126-6405>

Карабут Надія Олександрівна - старший викладач кафедри моделювання та програмного забезпечення, Криворізький національний університет.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2327-4595>

Kotov Ihor Anatoliyovych - Doctor of Sciences, Professor of the Modeling and Software Department, Kryvyi Rih National University.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2445-6259>

Shvets Dmytro Valeriyovych - Ph.D., Associate Professor of the Modeling and Software Department, Kryvyi Rih National University.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5126-6405>

Karabut Nadiya Oleksandrivna - Senior Lecturer, Modeling and Software Department, Kryvyi Rih National University.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2327-4595>.