

АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОТИАВАРІЙНОГО КЕРУВАННЯ ЕНЕРГОСИСТЕМОЮ НА ОСНОВІ ЛОГІКО-ІМОВІРНІСНОГО МОДЕЛЮВАННЯ НАДІЙНОСТІ ПРОДУКЦІЙНИМИ МЕРЕЖАМИ ПЕТРІ

В роботі наведено результати досліджень методів побудови баз знань систем підтримки рішень диспетчерського керування системами електропостачання в кризових ситуаціях. Запропоновані моделі продукцій на основі мереж Петрі для оцінки параметрів надійності систем електропостачання. Реалізований алгоритм розрахунку параметрів надійності електричної мережі з використанням аналітичних матричних рівнянь мереж Петрі.

На основі отриманих моделей здійснена побудова інтелектуального програмного комплексу диспетчеризації з урахуванням показників надійності компонентів систем електропостачання. Застосований продукційний підхід подання знань як механізм формалізації ланцюгів відмов в схемах електропостачання, який реалізує кон'юнктивно-диз'юнктивні зв'язки висловлювань, асоційованих з відмовами.

Викладений підхід є однаковою і інваріантним по відношенню до предметних областей, що дозволяє будувати ефективні системи підтримки рішень в області оперативного протиаварійного керування енергетичною системою.

Ключові слова: продукція, надійність, автоматизація, ймовірність, відмова, схема, база знань.

IHOR KOTOV

Kryvyi Rih National University

AUTOMATION OF EMERGENCY CONTROL OF THE POWER SYSTEM ON THE BASIS OF LOGICAL-PROBABILISTIC SIMULATION OF RELIABILITY BY PRODUCTION PETRI NETS

The paper presents the results of research on methods for constructing knowledge bases of decision support systems for dispatch control of power supply systems in crisis situations. Models of products based on Petri nets are proposed for assessing the parameters of reliability of power supply systems. An algorithm for calculating the reliability parameters of the electrical network using analytical matrix equations of Petri nets has been implemented.

The work is devoted to the topical problem of intellectualization of power supply systems and means of automation of control of large power systems. The relevance of research in the field of building intelligent power systems is grounded. The basic requirements for the reliability of modern power supply systems are formulated. The concept of intellectualization of power systems and management of their reliability is a stable trend in the development of large energy systems and automated dispatch control systems. The solution to the problem lies in the implementation of intelligent decision support systems.

The main task of the work is to model the reliability of the power supply system in order to build an effective knowledge base about the parameters of the reliability of the power supply system. For this purpose, we use a probabilistic approach to assessing reliability. This approach is based on the concepts of the probability of failure-free operation and the probability of failure, which are expressed in terms of the failure rate.

On the basis of the obtained models, the construction of intelligent software systems for dispatching can be carried out taking into account the reliability indicators of the components of power supply systems. As a mechanism for formalizing failure circuits in power supply circuits, the production approach of knowledge representation is applied, which implements conjunctive-disjunctive connections of statements associated with failures.

The outlined approach is invariant in relation to subject areas, which makes it possible to build effective decision support systems in the field of operational emergency control of the energy system.

Keywords: production rule, reliability, automation, probability, failure, diagram, knowledge base.

Вступ

В сучасних умовах розвитку та інтеграції компонентів промислово-господарського комплексу значно зростають вимоги до якісного оперативного управління технологічними процесами. Неухильно зростаюча складність внутрішніх функціональних взаємозв'язків виробничих систем приводить до ускладнення процесів їх диспетчеризації. При цьому ростуть ризики та збитки від аварійних ситуацій, спричинених обставинами як екзогенного, так і внутрішнього характеру. К останнім відноситься так званий «людський фактор». Для зниження впливу цього фактора використовуються різні методики професійної та психофізіологічної підготовки диспетчерського персоналу. Однак, існують фізичні межі швидкості реакцій, стійкості до стресу, можливості логічного висновку та обробки даних, управління персоналом в аварійних і кризисних ситуаціях. Подібні явища набувають особливого значення в системо-утворюючих галузях господарства, таких як енергетика, системи електропостачання [1–3].

Отже, слід вирішувати в комплексі два завдання: оперативна оцінка параметрів надійності компонентів систем електропостачання та інтелектуальна підтримка процесу прийняття диспетчерських рішень у кризових ситуаціях. Під кризовою ситуацією слід розуміти сукупність негативних факторів, що впливають на об'єкт керування протягом короткого часу, коли належна управлінська реакція персоналу практично неможлива. Рішення вказаних завдань вимагає вдосконалення математичного та апаратно-програмного забезпечення, пропорційного складності об'єктів керування, очікуваним фінансовим, екологічним та соціальним ризикам. При цьому, актуальним є питання про перенесення центру ваги на

завдання генерації стратегічних управлінських рішень. Такі завдання необхідно вирішувати на основі оперативної оцінки надійності компонентів промислових комплексів, яка базується на використанні баз знань (БЗ). Базы знань повинні бути побудовані на єдиному ідеологічному підході та забезпечувати уніфікацію подання та використання накопичених та структурованих семантичних характеристик промислових об'єктів.

Постановка проблеми

Для постановки проблеми була проведена порівняльна оцінка методів аналізу надійності систем електропостачання [4–6]. Аналіз надійності системи електропостачання може застосовувати статистичні методи на основі збору та обробки даних випробувань на надійність. Статистичні дані щодо функціонування обладнання є результатами фіксації фактів відмов при робочій експлуатації або в процесі запланованих цілеспрямованих випробувань (активних факторних експериментів). За результатами експериментів здійснюється оцінка показників надійності та перевірка гіпотез щодо їх законів розподілу. У окремій групі можна виділити логіко-ймовірнісні методи аналізу, що відрізняються наочністю, доступним аналітичним апаратом та гнучкістю по відношенню до типу схематичних рішень електропостачання. Для оптимізації надійності зазвичай використовуються економіко-математичні моделі. Оптимальність електропостачання за надійністю в економічному сенсі означає досягнення заданого економічного ефекту з мінімальними затратами виробничих ресурсів.

Проблема роботи вимагає організації логічної моделі надійності електропостачання з розглядом взаємозв'язків відмов. Такий підхід забезпечує можливість застосування логічних моделей подання знань для аналізу мереж відмов. Тому є необхідним розроблення таких баз знань, які адекватно представляються логіко-ймовірною моделлю надійності. У якості теоретичної бази для реалізації логіки розповсюдження відмов в електричних мережах прийнятно апарат мереж Петрі. Для досягнення алгоритмічної ефективності у роботі необхідно реалізувати матричне подання мереж Петрі для аналізу надійності. Після формування матричних рівнянь їх можна обробляти методами матричних обчислень. При цьому, природно, слід враховувати значну розрідженість матриць вхідних та вихідних функцій мережі Петрі. На базі сформованого математичного апарату слід реалізувати безліч різноманітних моделей надійності для різних схем електропостачання. На основі отриманих результатів має бути сформована база знань. У критичних ситуаціях при дефіциті часу будуть використовуватися готові оцінки параметрів надійності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Оперативна оцінка надійності компонентів системи електропостачання базується на глибокій та опрацьованій математичній базі. Тут слід аналізувати як чисто теоретичні та строгі підходи, так і методики, засновані на практичному досвіді експлуатації та управління [7–10]. Спираючись на методологію теорії надійності для електроенергетичних систем, створені потужні програмні комплекси оцінки показників надійності [11]. З використанням такого розробленого програмного забезпечення можлива побудова практичних баз знань для їх подальшого використання в системах підтримки прийняття рішень (СППР) стосовно до аварійних станів систем електропостачання. Аналіз показує, що оперативна оцінка надійності може вироблятися на основі логіко-ймовірних моделей дерева відмов [12, 13]. При цьому ієрархія відмов реалізує системний пошук на графі дерева, в якому події об'єднані логічними зв'язками («І», «АБО»). Тоді реалізація подій відмов може бути виражена через кон'юнктивні та диз'юнктивні зв'язки формальних висловлювань. Враховуючи таку модель, представляється можливим моделювання взаємозв'язків відмов (і надійності) обладнання продукційними мережами відповідно типів «І» та «АБО». Функціонування продукції відрізняється високим ступенем паралелізму, тому є корисним застосування апарату мереж Петрі для моделювання потоків подій у продукційних мережах [14–16]. Матричний підхід до аналізу мереж Петрі має деякі обмеження, однак детермінованість та однаковість цього підходу забезпечує його надійну алгоритмізацію та програмну реалізацію.

Метою роботи є розробка математичних моделей оцінки надійності схем електричних мереж на основі апарату мереж Петрі для побудови програмних засобів автоматизації протиаварійного управління режимами енергосистем.

Виклад основного матеріалу

Основною задачею роботи є моделювання продукційною мережею надійності системи електропостачання. Для цього використовується імовірнісний підхід до оцінки надійності. В основі цього підходу лежать поняття ймовірності безвідмовної роботи (1) та ймовірності відмови (2), які подаються через інтенсивність відмов (3) [12]. Якщо для спрощення прийнято, що інтенсивність відмов обладнання не змінюється протягом часу при віддаленні від початкового періоду роботи, то можна прийняти

$$p(t) = e^{-\lambda t}, \quad (1)$$

$$q(t) = 1 - p(t) = 1 - e^{-\lambda t}, \quad (2)$$

$$\lambda(t) = \lambda = \text{const}. \quad (3)$$

Вирази характеризують найпростіший потік відмов і експонентний закон розподілу напрацювання до відмови $F(t)$:

$$F(t) = q(t). \quad (4)$$

У цьому випадку інтенсивність відмов обладнання визначається наступним чином:

$$\lambda(t) = \frac{F'(t)}{1 - F(t)}. \tag{5}$$

Для моделювання відмов установок необхідно враховувати в них послідовне і паралельне з'єднання одиниць обладнання. При послідовному з'єднанні елементів обладнання ймовірність безвідмовної роботи установки визначається ймовірністю безвідмовної роботи всіх елементів обладнання за період t :

$$p(t) = \prod_{i=1}^n p_i(t). \tag{6}$$

При паралельному з'єднанні елементів обладнання ймовірність безвідмовної роботи установки визначається співвідношенням резервних і елементів що відмовили [12]:

$$p(t) = \sum_{k=r}^n C_n^k P^k(t) q^{n-k}(t) \tag{7}$$

де

$$C_n^k = \frac{n!}{(n-k)!k!};$$

n – загальна кількість одиниць обладнання;

k – поточний номер одиниці обладнання;

r – кількість обов'язкових для роботи одиниць обладнання.

Маючи в своєму розпорядженні математичну базу імовірнісного методу розрахунку надійності електропостачання, можна переходити до опису системи відмов логіко-імовірнісними моделями. Одним з наочних представлень таких моделей є дерево відмов. Природно, що побудова дерева відмов є розумним при порівняно невеликій кількості аналізованих відмов. У найбільш загальному вигляді умова виникнення відмови обладнання може бути сформульована в наступному вигляді

$$\bar{Y} = \bigcup_{k=1}^N S_k, \tag{8}$$

$$S_k = \bigcap_{i \in I_k} \bar{y}_i \bigcap_{j \in J_k} \bar{y}_j,$$

де S_k – мінімальний перетин подій, що приводять до відмови k -го виду;

\bar{y}_i – непрацездатний стан i -го елемента, що приводить до k -ї відмови;

\bar{y}_j – непрацездатний j -й стан системи, при відмові k -ого виду.

Комбінація подій у формулі (8) оцінюється шляхом аналізу структури системи електропостачання та її проектних характеристик. На основі встановлення причинно-наслідкових зв'язків подій і станів системи і їх об'єднання за допомогою логічних операцій можна отримати структуру дерева відмов. При розгляді події відмови (або стану) як висловлювання дерева відмов можна висловити складним кон'юнктивно-диз'юнктивним висловлюванням. При цьому для спрощення приймають можливість не враховувати кон'юнкції високих порядків.

Дерево відмов, яке моделює ланцюги подій і розвиток відмов, можна розглядати як продукційну мережу, реалізовану на імплікації висловлювань. У такій мережі антецеденти продукцій є кон'юнкції або диз'юнкції висловлювань відмов і станів, а консеквенти – результуючі одиничні висловлювання. При цьому ймовірності відмов і подій (станів) в системі визначаються за виразами (6) і (7).

В роботі [14] показано, що для моделювання і наступних програмних реалізацій продукційних мереж в інтелектуальних системах підтримки рішень є раціональним застосування апарату мереж Петрі. Даний формалізм забезпечує наочність моделі і доступність для алгоритмізації обчислювальних процесів [15, 16]. Основною перевагою цієї формальної системи, безсумнівно, є моделювання паралелізму і врахування кількісних характеристик сигналів, що проходять по мережі. Для аналізу мережі Петрі скористаємося їх матричним представленням [16, 17]. Матричний підхід до аналізу мереж Петрі забезпечує компактну запис, наочність, однаковість і дозволяє ефективніше вирішувати ряд завдань, наприклад, завдання досяжності. Матричний підхід заснований на визначенні двох матриць – D^- і D^+ , які представляють собою відповідно вхідну і вихідну функції мережі. Тоді матрична форма подання мережі Петрі буде описуватися наступним чином

$$C = (P, T, D^-, D^+) \tag{9}$$

$$D^-[j, i] = \#(p_i, I(t_j))$$

$$D^+[j, i] = \#(p_i, O(t_j))$$

де $\#(p_i, I(t_j))$ – кратність вхідний позиції p_i для переходу t_j .

$$\delta(\mu, t_j) = \mu + e[j] \cdot D$$

Результат запуску переходу t_j при маркуванні μ визначиться виразом (10)

$$D = D^+ - D^- \tag{10}$$

де $e[j]$ – вектор-рядок з ненульовою j -ї компонентою;
 D – загальна матриця змін.

При спрацьовуванні послідовності переходів $t_{j_1}t_{j_2}...t_{j_k}$ вираз (10) набуде вигляду (11)

$$\delta(\mu, \sigma) = \mu + f(\sigma) \cdot D \tag{11}$$

де $\sigma = t_{j_1} t_{j_2} \dots t_{j_k}$ – послідовність запусків переходів;
 $f(\sigma)$ – відображення Паріха, вектор запусків послідовності $t_{j_1} t_{j_2} \dots t_{j_k}$;
 μ – початкове маркування продукційної мережі.

Мета моделювання продукційної мережі мережею Петрі полягає в отриманні результуючого маркування мережі $\mu' = \delta(\mu, \sigma)$ на основі вихідного – μ . При цьому повинна забезпечуватися умова досяжності результуючого маркування. Якщо маркування μ' досягне з маркування μ , то це означає існування послідовності переходів, яка реалізує відображення $\mu \rightarrow \mu'$. Таку послідовність переходів необхідно знайти. Іншими словами вектор невідомих визначається як $x=f(\sigma)$, і матричне рівняння, яке потребує вирішення, має наступний вигляд

$$\mu' = \mu + x \cdot D \tag{12}$$

Розглянемо практичне застосування запропонованого підходу до моделювання та оцінки надійності системи електропостачання для автоматизації протиаварійного керування енергосистемою. Як приклад використовуємо фрагмент схеми живлення шин власних потреб електростанції для побудови бази знань інтелектуальної системи диспетчеризації. Схема наведена на рис. 1. Для опису прикладу розглянемо частину дерева відмов, пов'язану з оцінкою надійності живлення шин СШ2 в залежності від аварійних станів шин СШ1. Дерево відмов наведено на рис. 2.

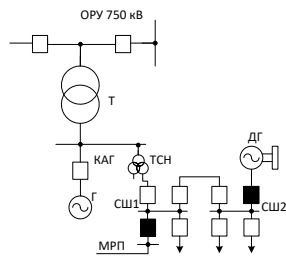


Рис. 1. Фрагмент схеми живлення власних потреб електростанції

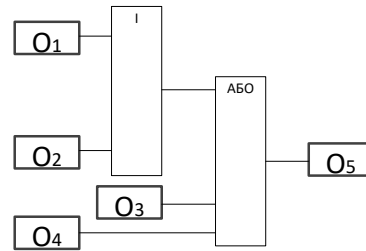


Рис. 2. Фрагмент дерева відмов для оцінки надійності живлення шин СШ2

На рис. 2 показані типи правил об'єднання відмов – «І», «АБО», – а також такі види відмов: O1 – пошкодження приєднань секції СШ1, O2 – відмова повторного включення живлення шин СШ1, O3 – пошкодження збірних шин власних потреб СШ1, O4 – відмова секційного вимикача збірних шин власних потреб СШ1, O5 – відключення живлення секції СШ2.

Отримане дерево відмов є продукційна мережа і може моделюватися мережею Петрі. Сформуємо мережу Петрі, для фрагмента дерева відмов, наведеного на рис. 2. Отримана мережа Петрі показана на рис. 3. У цій мережі позиції p3 і p8 є вирішальними і застосовуються в подальшому при алгоритмізації та програмної реалізації.

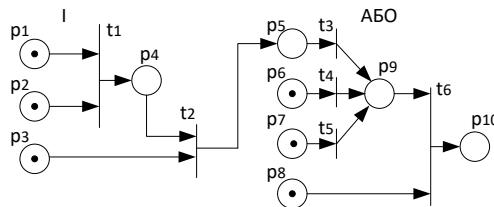


Рис. 3. Мережа Петрі фрагмента дерева відмов

Позиції p1, p2, p6, p7 характеризують події відмов, які можуть наступити одночасно. Таким чином моделюється можлива паралельність у відмовах елементів обладнання.

Реалізуємо алгоритм спрацьовування мережі, використовуючи матричний підхід до аналізу мереж Петрі. В якості стартового маркування приймемо маркування, показане на рис. 3: $\mu^0=(1,1,1,0,0,1,1,1,0,0)$.

Вихідні матриці вхідних і вихідних функцій мережі відповідно мають вигляд:

$$D^- = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad D^+ = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Вихідна матриця:

$$D = D^+ - D^- = \begin{bmatrix} -1 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 1 \end{bmatrix}$$

Послідовність переходів:

$$f(\sigma)^0 = (1,0,0,0,0,0)$$

Нове маркування:

$$\begin{aligned} \mu^1 = \mu^0 + f(\sigma)^0 &= (1,1,1,0,0,1,1,1,0,0) + (1,0,0,0,0,0,0,0,0,0) = \\ &= (1,1,1,0,0,1,1,1,0,0) + (-1,-1,0,1,0,0,0,0,0,0) = (0,0,1,1,0,1,1,1,0,0) \end{aligned}$$

Отримане маркування μ^1 не є термінальним і повинне розглядатися в якості стартового для наступної ітерації. Аналогічним чином були проведені наступні ітераційні кроки за формулою (12)

$$\mu^{i+1} = \mu^i + x^i \cdot D^i$$

З урахуванням одинарних кратностей переходів термінальне маркування має вигляд

$$\mu^4 = (0,0,0,0,0,0,0,0,0,1)$$

На основі векторів послідовностей переходів і показників надійності елементів системи електропостачання визначимо ймовірність відключення живлення секції СШ2. Для розрахунку скористаємося показниками ймовірностей відмов з [12]:

$$q_{o1} = 0.0296, q_{o2} = 0.0020, q_{o3} = 0.0296, q_{o4} = 0.022.$$

Врахуємо, що в продукційній мережі є кон'юнктивні і диз'юнктивні поєднання подій відмов. Тоді, відповідно до порядку спрацьовування переходів продукційної мережі, ймовірність відключення живлення секції СШ2 визначиться наступним чином.

При спрацьовуванні першої продукції отримуємо:

$$q_1 = q_{o1}q_{o2} = 0.0296 \cdot 0.0020 = 0.0000592$$

Спрацьовування другої продукції дає наступний результат:

$$q_2 = q_{o5} = 1 - (1 - q_1)(1 - q_3)(1 - q_4) = 1 - 0.96821 = 0.03179.$$

Таким чином, ймовірність відмови відключення живлення секції дорівнює 0,03179, а ймовірність безвідмовної роботи відповідно

$$p_2 = 1 - q_2 = 1 - 0.03179 = 0.96821.$$

На основі отриманих моделей надійності схем електричної мережі була побудована база знань для оцінки і ліквідації аварійних ситуацій. Дана база знань є основним компонентом інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень диспетчера енергосистеми. На рис. 4 наведена головна форма розробленого програмного комплексу.

Результатом циклу роботи СППР є нормативно-інструктивні матеріали протиаварійного диспетчерського керування, отримані з рівнів професійних онтологій БЗ, а також величини і напрямки керуючих коригувальних впливів. На основі аналізу результатів тестування розробленого програмного комплексу СППР можна зробити висновок про те, що СППР відповідає всім вимогам, сформульованим у роботі, функціонує відповідно до розроблених структурно-логічних моделей і підтверджує їх практичну працездатність в промислових умовах.

Розроблена СППР, яка побудована на основі моделей надійності продукційних мереж Петрі, передбачає її використання в якості інтелектуальної комп'ютерної системи підтримки прийняття рішень в складі автоматизованих систем контролю і управління електроенергетичних комплексів і може застосовуватися для автоматизації процесу прийняття рішень під час оперативних перемикань схем, регулювання рівнів напруги і перетоків потужності в електроенергетичних системах в нормальних і аварійних режимах.

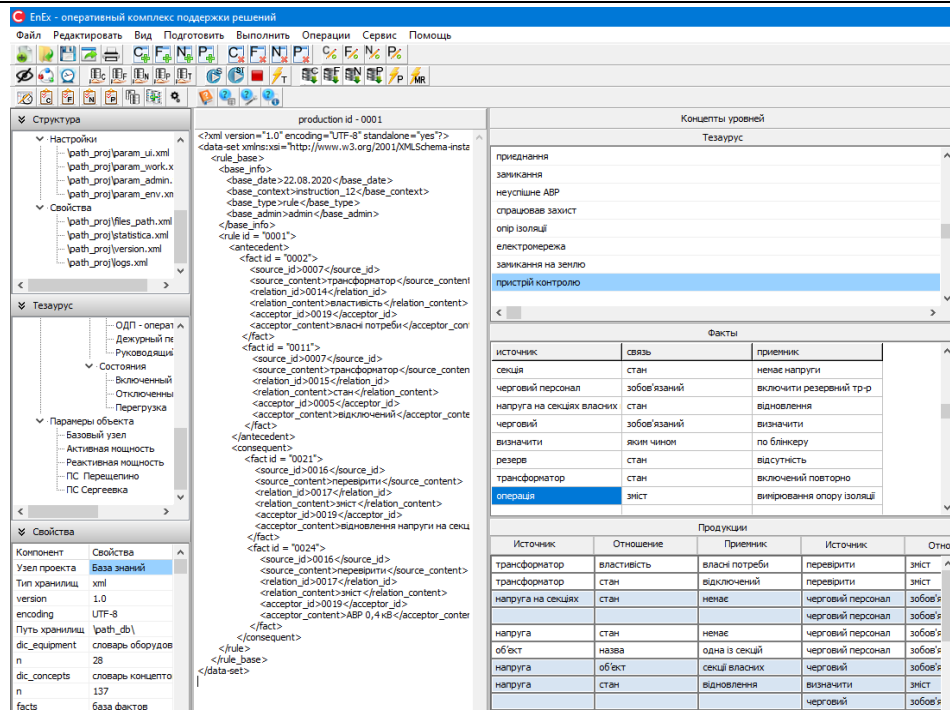


Рис. 4. Головна форма програмного комплексу автоматизації противарійного керування енергооб'єктом

Висновки

В роботі розглянуто задачу побудови інтелектуальних програмних комплексів диспетчеризації з урахуванням показників надійності компонентів систем електропостачання. Як механізм формалізації ланцюгів відмов в схемах електропостачання застосований продукційний підхід представлення знань, який реалізує кон'юнктивні-диз'юнктивні зв'язки висловлювань, асоційованих з відмовами. Моделювання продукцій здійснено на мережах Петрі. При цьому розглянута можливість аналізу мереж Петрі на базі матричного подання. Основною позитивною якістю розглянутого підходу є його однаковість і інваріантність по відношенню до предметних областей, що дозволяє будувати ефективні системи підтримки рішень в області керування енергетичними комплексами. В якості основних напрямків подальших досліджень можуть розглядатися методи уніфікації подання знань області диспетчеризації електроенергетичних систем і побудова єдиного ядра програмної системи підтримки диспетчерських рішень.

Література

1. Фокин Ю.А. Энергосберегающая технология электроснабжения народного хозяйства : в 5 кн. : практ. пособие / под ред. В.А. Веникова. Кн. 3. Надежность и эффективность сетей электрических систем // Ю.А. Фокин. – М. : Высш. шк., 1989. – 151 с.
2. Калентионюк Е.В. Оперативное управление в энергосистемах : учеб. пособие / под общ. ред. В.Т. Федина. – Минск : Выш. шк., 2007. – 351 с.
3. Дьяков А.И. Диспетчерское управление мощными энергообъединениями / Дьяков А.И., Окин А.А., Семенов В.Л. – М. : Издательский дом МЭИ, 1996. – 296 с.
4. Осак А.Б. Методы мониторинга состояния ЭЭС и оценки режимной надежности по критерию управляемости ЭЭС / Осак А.Б., Шалагинов А.И., Панасецкий Д.А., Бузина Е.Я. // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Вып. 65. Надежность либерализованных систем энергетики / отв. ред. Н.И. Воропай. – Иркутск : ИСЭМ СО РАН, 2015. – С. 337–346.
5. Курбацкий В.Г. Мониторинг и оценка режимной надежности ЭЭС на базе алгоритмов машинного обучения / Курбацкий В.Г., Томин Н.В. // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Вып. 65. Надежность либерализованных систем энергетики / отв. ред. Н.И. Воропай. – Иркутск : ИСЭМ СО РАН, 2015. – С. 535–544.
6. Воропай Н.И. Энергетическая безопасность – надежность систем энергетики – надежность энергоснабжения: соотношение понятий и аспектов исследования / Воропай Н.И., Кривоуцкий Л.Д., Пяткова Н.И. и др. // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики – Мурманск, 1996. – Вып. 48: Актуальные проблемы надежности систем энергетики в новых условиях – С. 74–80.
7. Манов Н.А. Методы и модели исследования надежности электроэнергетических систем / Манов Н.А., Хохлов М.В. – Сыктывкар, 2010. – 292 с.
8. Биллингтон Р. Оценка надежности электроэнергетических систем / Биллингтон Р., Аллан Р. ; пер. с англ. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 288 с.

9. Надежность систем энергетики и их оборудования : справочник / под ред. Ю.Н. Руденко. Том. 1. Общие модели анализа и синтеза надежности систем энергетики. – М. : Энергоатомиздат, 1994. – 480 с.
10. Фокин Ю.А. Оценка надежности систем электроснабжения / Фокин Ю.А., Туфанов В.А. – М. : Энергоиздат, 1981. – 224 с.
11. Строганов А. Обзор программных комплексов по расчету надежности сложных технических систем / Строганов А., Жаднов В., Полесский С. // Компоненты и технологии. – 2007. – № 5. – С. 183–190.
12. Гук Ю.Б. Теория надежности в электроэнергетике : учеб. пособие для ВУЗов / Гук Ю.Б. – Л. : Энергоатомиздат. Ленингр. Отд-ие, 1990. – 208 с.
13. Fault tree-analysis (FTA) IEC 1025: 1990. Стандарт МЭК Анализ дерева неполадок. СИФ НТЦ ПБ-707. ГОСТ Р 51901.13-2005 (МЭК 61025:1990). Менеджмент риска. Анализ дерева неисправностей, 1990.
14. Котов И.А., Константинов Г.В. Представление логических моделей принятия решений в производственных экспертных системах на основе аппарата сетей / Петри Котов И.А., Константинов Г.В. // Разработка рудных месторождений : научно-технический сборник. – Кривой Рог : КТУ, 2008. – Вып. 92. – С. 189–193.
15. Представление знаний в экспертных системах / сост. В.А. Морозова, В.И. Паутов. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2017. – 120 с.
16. Питерсон Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем / Питерсон Дж. ; пер. с англ. – М. : Мир, 1984. – 264 с.
17. Murata T. Petri Nets, Marked Graphs and Circuit-System Theory. IEEE Circuits and Systems Society Newsletter, 11. No. 3. 1977, p. 2–12.

References

1. Fokin YU.A. Ehnergoberegayushchaya tekhnologiya ehlektrosnabzheniya narodnogo khozyajstva : v 5 kn. : prakt. posobie / pod red. V.A. Venikova. Kn. 3. Nadezhnost' i ehffektivnost' setej ehlektricheskikh sistem // YU.A. Fokin. M. : Vyssh. shk., 1989. – 151 s.
2. Kalentionok E.V. Operativnoe upravlenie v ehnergosistemakh : ucheb. posobie / pod obshch. red. V.T. Fedina. – Minsk : Vysh. shk., 2007. – 351 s.
3. D'yakov A.I. Dispetcherskoe upravlenie moshchnymi ehnergoob"edineniyami / D'yakov A.I., Okin A.A., Semenov V.L. – M. : Izdatel'skij dom MEHI, 1996. – 296 s.
4. Osak A.B. Metody monitoringa sostoyaniya EHEHS i ocnki rezhimnoj nadezhnosti po kriteriyu upravlyaemosti EHEHS / Osak A.B., Shalaginov A.I., Panaseckij D.A., Buzina E.YA. // Metodicheskie voprosy issledovaniya nadezhnosti bol'shikh sistem ehnergetiki. Vyp. 65. Nadezhnost' liberalizovannykh sistem ehnergetiki / otv. red. N.I. Voropaj. – Irkutsk : ISEHM SO RAN, 2015. – S. 337–346.
5. Kurbackij V.G. Monitoring i ocenka rezhimnoj nadezhnosti EHEHS na baze algoritmov mashinnogo obucheniya / Kurbackij V.G., Tomin N.V. // Metodicheskie voprosy issledovaniya nadezhnosti bol'shikh sistem ehnergetiki. Vyp. 65. Nadezhnost' liberalizovannykh sistem ehnergetiki / otv. red. N.I. Voropaj. – Irkutsk : ISEHM SO RAN, 2015. – S. 535–544.
6. Voropaj N.I. Ehnergeticheskaya bezopasnost' – nadezhnost' sistem ehnergetiki – nadezhnost' ehnergosnabzheniya: sootnoshenie ponyatij i aspektov issledovaniya / Voropaj N.I., Krivoruckij L.D., Pyatkova N.I. i dr. // Metodicheskie voprosy issledovaniya nadezhnosti bol'shikh sistem ehnergetiki – Murmansk, 1996. – Vyp. 48: Aktual'nye problemy nadezhnosti sistem ehnergetiki v novykh usloviyakh – S. 74–80.
7. Manov N.A. Metody i modeli issledovaniya nadezhnosti ehlektroehnergeticheskikh sistem / Manov N.A., Khokhlov M.V. – Syktyvkar, 2010. – 292 s.
8. Billinton R. Ocenka nadezhnosti ehlektroehnergeticheskikh sistem / Billinton R., Allan R. ; per. s angl. – M. : Ehnergoatomizdat, 1988. – 288 s.
9. Nadezhnost' sistem ehnergetiki i ikh oborudovaniya : spravochnik / pod red. YU.N. Rudenko. Tom. 1. Obshchie modeli analiza i sinteza nadezhnosti sistem ehnergetiki. – M. : Ehnergoatomizdat, 1994. – 480 s.
10. Fokin YU.A. Ocenka nadezhnosti sistem ehlektrosnabzheniya / Fokin YU.A., Tufanov V.A. – M. : Ehnergoizdat, 1981. – 224 s.
11. Stroganov A. Obzor programnykh kompleksov po raschetu nadezhnosti slozhnykh tekhnicheskikh sistem / Stroganov A., Zhadnov V., Polesskij S. // Komponenty i tekhnologii. – 2007. – № 5. – S. 183–190.
12. Guk YU.B. Teoriya nadezhnosti v ehlektroehnergetike : ucheb. posobie dlya VUZov / Guk YU.B. L. : Ehnergoatomizdat. Leningr. Otd-ie, 1990. 208 s.
13. Fault tree-analysis (FTA) IEC 1025: 1990. Standart MEHK Analiz dereva nepoladok. SIF NTC PB-707. ГОСТ R 51901.13-2005 (MEHK 61025:1990). Menedzhment riska. Analiz dereva nespravnostej, 1990.
14. Kotov I.A., Konstantinov G.V. Predstavlenie logicheskikh modelej prinyatiya reshenij v produkcionnykh ehkspertnykh sistemakh na osnove apparata setej / Petri Kotov I.A., Konstantinov G.V. // Razrabotka rudnykh mestorozhdenij : nauchno-tekhnicheskij sbornik. – Kri-voj Rog : KТУ, 2008. – Вып. 92. – S. 189–193.
15. Predstavlenie znaniy v ehkspertnykh sistemakh / sost. V.A. Morozova, V.I. Pautov. – Ekaterinburg : Izd-vo Ural. un-ta, 2017. – 120 s.
16. Piterson Dzh. Teoriya setej Petri i modelirovanie sistem / Piterson Dzh. ; per. s angl. □ M. : Mir, 1984. – 264 s.
17. Murata T. Petri Nets, Marked Graphs and Circuit-System Theory. IEEE Circuits and Systems Society Newsletter, 11. No. 3. 1977, p. 2–12.

I.A. KOTOV

ORCID: 0000-0003-2445-6259

E-mail: rioexito@gmail.com

Надійшла/Paper received : 26.04.2021 р. Надрукована/Printed : 02.06.2021 р.