

Baza danych oraz drzewo uszkodzeń elektrowni jako elementy technologii RCM

Database of faults and fault Tree of Power plants devices as Elements of RCM Maintenance Technology

Artykuł nawiązuje do wcześniejszej publikacji [1]. Prezentuje on pracę, stanowiącą kontynuację i uszczegółowienie badań związanych z wdrażaniem w elektrowniach technologii RCM (Reliability-Centered Maintenance) remontów ukierunkowanych niezawodnościowo, dla potrzeb optymalizacji remontów elektrowni.

Teoretyczne założenia metodologii optymalizacji remontów elektrowni, jak również oryginalna symulacyjno-heurystyczna metoda tej optymalizacji zostały przedstawione przez Autora w monografii [2].

Metodologia ta w pełni i od początku bazowała na teorii niezawodności i odnowy [3], czyli na teoretycznych podstawach technologii RCM, jakkolwiek formalnie nie odnosząc się do niej. W związku jednak z upowszechnieniem w świecie standardu RCM zachodzi potrzeba formalnego włączenia tego standardu do badań.

Technologia RCM powinna zostać zaimplementowana jako system komputerowy, obejmujący rozbudowaną bazę danych. Taki system może być autonomiczny, jednak kompatybilny i współpracujący ze zintegrowanym informatycznym systemem zarządzania, a zwłaszcza z jego modułem remontowym. Takie zintegrowane informatyczne systemy zarządzania działają już w wielu elektrowniach krajowych [4]. Idąc za potrzebą informatyzacji badań, Autor podjął pracę nad programem komputerowym o roboczej nazwie OPTREMEL 2.0 (Optymalizacja Remontów Elektrowni).

Niniejszy artykuł prezentuje napisane i uruchomione moduły tego programu, a więc bazę danych urządzeń elektrowni, bazę danych uszkodzeń urządzeń oraz bazę danych elementów drzew uszkodzeń, a także moduły obliczeń i wizualizacji drzew uszkodzeń.

Charakterystyka technologii RCM

Technologia RCM została szczegółowo opisana przez Autora w [1]. Tu przypomnijmy, że RCM jest to technologia ukierunkowanego niezawodnościowo planowania remontów urządzeń technicznych. Jest to technologia uniwersalna, przystosowana do wszystkich branż przemysłu, w tym w szczególności do elektrowni.

Z definicji [5] RCM sprowadza się do identyfikacji (a później zaplanowania i realizacji) zapobiegawczych (ang. *preventive*) i naprawczych (ang. *corrective*) operacji remontowych (ang. *maintenance tasks*) dla zapewnienia odpowiedniego poziomu niezawodności urządzeń, przy minimalnym zużyciu środków (ludzkich, materiałowych i finansowych), a także pod warunkiem zapewnienia wymaganego bezpieczeństwa pracy urządzeń, personelu i pod warunkiem spełnienia wymogów ochrony środowiska. W praktyce elektrownianej, technologia RCM sprowadza się do planowania odstawień remontowych bloku energetycznego dopiero wówczas, gdy wymusza to niezawodnościowy stan urządzeń bloku, a konkretnie stan procesów uszkodzeń urządzeń bloku.

Kluczowym pojęciem technologii jest zatem uszkodzenie urządzenia. Rozróżnia się tu dwa pojęcia: ang. *fault* i *failure*. *Fault* jest rozumiane jako niekorzystna zmiana właściwości i charakterystyk fizycznych, chemicznych, elektrycznych i/lub cieplnych urządzenia. Jest to jednak taka zmiana, lub w takim stopniu, że niekoniecznie powoduje (jeszcze) stan niezdatności urządzenia do pełnienia założonych funkcji. Pod tym samym pojęciem (*fault*) rozumie się także np. zakłócenie, rozregulowanie i/lub błąd personelu ruchowego lub remontowego. *Failure* jest natomiast rozumiane jako stan utraty przez urządzenie zdolności do pełnienia założonych funkcji. Uznaje się uszkodzenie *fault* jako bezpośrednią przyczynę uszkodzenia *failure*.

Generalną zasadą technologii RCM jest obejmowanie analizą uszkodzeń nie tylko urządzeń głównych, lecz również pomocniczych, w tym: elektrycznych, zabezpieczeń, sterowania, sygnalizacji, łączności, informatyki itp.

Standardowymi elementami i narzędziami technologii RCM są:

- katalogi urządzeń i ich uszkodzeń typu *failure*;
- modele statystyczne uszkodzeń oparte na funkcjach gęstości rozkładów czasu poprawnej pracy i napraw, metody Monte-Carlo;
- modele stochastyczne stanów pracy, awarii i napraw urządzeń i całych podukładów (łańcuchy Markowa, modele semimarkowskie itp.);
- drzewa uszkodzeń (ang. *fault tree*);
- drzewa zdarzeń (ang. *event tree*);
- analiza ryzyka.

Ważnymi, choć niewymienianymi w standardach RCM narzędziami identyfikacji i prognozowania uszkodzeń, stosowanymi zwłaszcza w elektroenergetyce, są ponadto:

- modele ekstrapolacji trendu parametru kryterialnego,
- modele fizykochemiczne uszkodzeń,
- systemy eksperckie (por. [6]).

ZAŁOŻENIA METODOLOGII OPTYMALIZACJI REMONTÓW

W [1] podkreślono, że elektrownia jest szczególnie złożonym systemem techniczno-społecznym. Do optymalizacji procesu eksploatacji elektrowni, w tym optymalizacji planowania remontów urządzeń, powinno się odpowiednio stosować metody modelowania, w tym wypadku uszkodzeń i remontów, zgodnie z technologią RCM. Przestrzeżono przed prostymi, a tym samym prymitywnymi, metodami analitycznymi, które usiłują za pomocą kilku równań modelować cały system elektrowni, a także przed metodami i modelami operującymi skumulowaną, na arbitralnie przyjętym poziomie, niezawodnością urządzeń.

Metodologia optymalizacji remontów elektrowni powinna:

- bazować nie na kryterium technicznym, lecz ekonomiczno-finansowym; w tym celu należy wykorzystać komputerowy, symulacyjny model decyzyjny systemu ekonomiczno-finansowego elektrowni (tego typu model, sporządzony przez Autora dla El. Rybnik, opisano w [7]); metodologia powinna umożliwiać identyfikację optymalnego strumienia odstawięć remontowych bloków i zakresów operacji remontowych w ramach tych odstawięć, według kryterium maksimum zysku elektrowni jako przedsięwzięcia;
- z modelem systemu ekonomiczno-finansowego elektrowni jw. powinien współpracować komputerowy, symulacyjny model decyzyjny planowania remontów, implementujący m.in. standardy technologii RCM;
- model jw. decyzyjny planowania remontów powinien bazować na szczegółowych katalogach uszkodzeń typu fault urządzeń;
- model jw. powinien m.in. identyfikować i prognozować, z pomocą drzew uszkodzeń, ubytki mocy dyspozycyjnej i pogorszenie sprawności bloków energetycznych, spowodowane częściowymi, jeszcze nie na poziomie granicznym, uszkodzeniami;
- model jw. powinien uwzględniać synergę uszkodzeń;
- z modelem decyzyjnym planowania remontów powinien współpracować komputerowy model decyzyjny optymalizacji wykonawstwa remontów (bazujący na metodzie PERT; tego typu model Autora opisano w [8]);
- wszystkie wyżej wymienione modele decyzyjne powinny współpracować z zintegrowanym informatycznym systemem zarządzania, a zwłaszcza z jego modułem remontowym.

Bazy danych urządzeń oraz uszkodzeń urządzeń elektrowni

Pierwszym krokiem technologii RCM jest skatalogowanie urządzeń, a następnie uszkodzeń tych urządzeń. Ze względu na konieczną komputeryzację technologii, katalogi te powinny przybrać postać komputerowych baz danych. Bazy takie, tzw.

relacyjne, składają się z poszczególnych tabel, tabele z rekordów, a rekordy z pól. Istnieje wiele systemów relacyjnych baz danych. Zgodnie z teorią programowania baz danych muszą one spełniać wymogi tzw. pięciu postaci normalnych. Konsekwencją tego wymogu jest znaczna liczba niezależnych tabel baz danych (por. poniżej). Prezentowany w niniejszym artykule program komputerowy OPTREMEL 2.0, napisany w języku programowania Delphi, korzysta z systemu bazy danych Paradox za pośrednictwem technologii bazodanowej BDE (Borland Database Engine).

Przyjęto następującą strukturę bazy danych urządzeń elektrowni, odzwierciedlającą hierarchiczną strukturę urządzeń elektrowni:

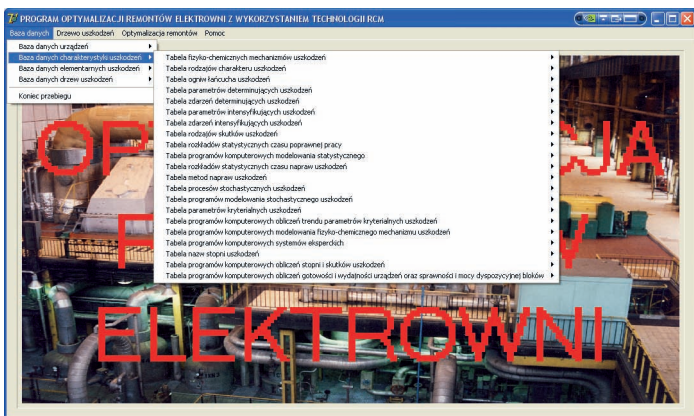
- tabela bloków energetycznych/układów potrzeb własnych ogólnych,
- tabela urządzeń głównych,
- tabela instalacji,
- tabela zespołów,
- tabela urządzeń.

Przykładem takiej struktury może być tu np. ciąg hierarchiczny: blok - kocioł - instalacja młynowa - zespół młynowy - silnik elektryczny napędu młyna. Struktura nie jest już zagęszczona niżej – do poziomów podzespołów i części zamiennych urządzeń.

Na poziomie hierarchicznym urządzeń specyfikuje się teraz elementarne uszkodzenia urządzeń (typu *fault*), a także stany niesprawności ruchowej (typu *failure*) całych urządzeń, zespołów, instalacji, urządzeń głównych i bloków. Uwzględnia się tu stany pełnej, lecz również i częściowej niesprawności powyższych elementów, polegające na zmniejszeniu ich wydajności/mocy, a w konsekwencji na zmniejszeniu mocy dyspozycyjnej bloku, jak również na pogorszeniu sprawności netto bloku, z winy elementarnych uszkodzeń urządzeń.

Kolejną bazą danych jest baza danych charakterystyki uszkodzeń. Ma ona poniższą strukturę:

- tabela fizykochemicznych mechanizmów uszkodzeń,
- tabela rodzajów charakteru uszkodzeń,
- tabela ogniw łańcucha uszkodzeń,
- tabela parametrów determinujących uszkodzeń,
- tabela zdarzeń determinujących uszkodzeń,
- tabela parametrów intensyfikujących uszkodzeń,
- tabela zdarzeń intensyfikujących uszkodzeń,
- tabela rodzajów skutków uszkodzeń,
- tabela rozkładów statystycznych czasu poprawnej pracy,
- tabela rozkładów statystycznych czasu napraw,
- tabela programów komputerowych modelowania statystycznego,
- tabela metod napraw urządzeń,
- tabela procesów stochastycznych uszkodzeń,
- tabela programów komputerowych modelowania stochastycznego,
- tabela parametrów kryterialnych uszkodzeń,
- tabela programów komputerowych obliczeń trendu parametrów kryterialnych,
- tabela programów komputerowych modelowania fizykochemicznych mechanizmów uszkodzeń,
- tabela programów komputerowych systemów eksperckich,
- tabela nazw stopni uszkodzeń,
- tabela programów komputerowych obliczeń stopni i skutków uszkodzeń,



Rys. 1. Zrzut ekranowy formularza tytułowego programu OPTREMEŁ 2.0.

- tabela programów komputerowych obliczeń gotowości i wydajności urządzeń oraz sprawności i mocy dyspozycyjnej bloków.

Tabele obsługiwane są przez menu główne programu OPTREMEŁ 2.0, co prezentuje rysunek 1.

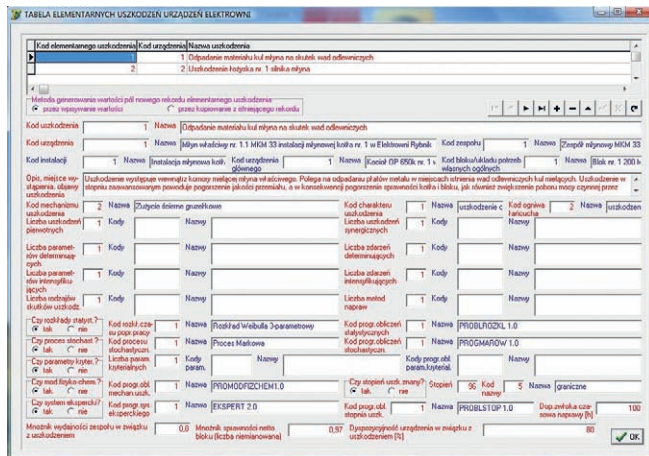
Kolejną bazą danych jest baza danych elementarnych uszkodzeń urządzeń. Jest to komputerowa implementacja katalogu elementarnych uszkodzeń urządzeń (typu *fault*). Baza ta ma poniższą strukturę:

- tabela elementarnych uszkodzeń urządzeń,
- tabela parametrów determinujących elementarne uszkodzenie,
- tabela zdarzeń determinujących elementarne uszkodzenie,
- tabela parametrów intensyfikujących elementarne uszkodzenie,
- tabela zdarzeń intensyfikujących elementarne uszkodzenie,
- tabela synergicznych uszkodzeń w stosunku do elementarnego uszkodzenia,
- tabela rodzajów skutków elementarnego uszkodzenia,
- tabela metod napraw elementarnego uszkodzenia,
- tabela parametrów kryterialnych elementarnego uszkodzenia.

Ilustracją struktury tabeli elementarnych uszkodzeń urządzeń jest rysunek 2.

Baza danych oraz algorytm obliczeń drzew uszkodzeń urządzeń elektrowni

Drzewo uszkodzeń (ang. *fault tree*) opisuje się w literaturze jako strukturę modelującą, zwykle w postaci graficznej, złożone wyrażenie logiczne na uszkodzeniach urządzeń układu, traktowanych jako zmienne logiczne w logice dwuwartościowej (tzw. boole'owskiej). Odpowiednio, do obliczeń drzewa wykorzystuje się algebrę Boole'a. Wejściem drzewa są zwykle uszkodzenia typu *fault*, natomiast wyjściem są zwykle uszkodzenia typu *failure*. Drzewo uszkodzeń skonstruowane jest z bramek logicznych typu AND (dla iloczynu logicznego uszkodzeń) lub OR (dla sumy logicznej uszkodzeń).



Rys. 2. Zrzut ekranowy formularza tabeli elementarnych uszkodzeń urządzeń, programu OPTREMEŁ 2.0.

Powyższe założenia, w odniesieniu do urządzeń elektrownianych, wymagają rewizji. Po pierwsze, graficzna postać drzewa ma znaczenie ilustratywne, jednak jest nieprzydatna do obliczeń w programie komputerowym. Po drugie, w stosunku do urządzeń elektrownianych powinniśmy stosować logikę nie dwuwartościową, lecz czwórwartościową, to znaczy, obok wartości logicznych TRUE i FALSE, uwzględnić ponadto wartość UNKNOWN oraz PART (neologizm wprowadzony przez Autora). Wartość UNKNOWN zostanie nadana wówczas, gdy stan pewnych uszkodzeń urządzeń będzie nieznanymi i niemożliwymi w danych warunkach do określenia, co często zdarza się w praktyce elektrownianej. Wartość PART zostanie nadana w przypadku częściowej niesprawności powodującej zmniejszenie wydajności, mocy lub sprawności. Odpowiednio też i klasyczna algebra Boole'a, w odniesieniu do powyższej logiki czwórwartościowej, będzie nieprzydatna.

W odniesieniu do urządzeń elektrownianych, Autor wprowadził ponadto, obok AND i OR, nowy typ bramki logicznej, o nazwie MZN. Bramka ta służy do zamodelowania uszkodzeń typu *failure* instalacji, złożonej z równolegle pracujących zespołów, gdzie zainstalowanych jest N zespołów, natomiast dla pracy bloku z pełną mocą (osiągalną) wystarczy praca jedynie M zespołów (przykładowo, w instalacji młynowej bloku 200 MW w *El. Rybnik* zainstalowanych jest 6 zespołów, jednak dla pracy bloku z mocą osiągalną 215 MW, przy węglu gwarancyjnym, wystarcza praca czterech zespołów młynowych [9]). Dla zamodelowania niesprawności tego typu instalacji mogłyby wystarczyć tylko bramki AND i/lub OR, jednak bardzo komplikowałoby to strukturę drzewa, gdyż konieczne byłoby uwzględnienie wszystkich kombinacji stanów zespołów.

Przy okazji warto zauważyć, że drzewo uszkodzeń może służyć do symulacji uszkodzeń, a następnie do obliczeń ich skutków oraz do optymalizacji remontów, lecz również do szacowania prawdopodobieństw awarii. W tym drugim przypadku, uszkodzeniom przypisuje się prawdopodobieństwa, a następnie w przypadku bramki AND prawdopodobieństwa się mnoży, a w przypadku bramki OR (z pewnymi uproszczeniami) – sumuje. W przypadku nowej bramki MZN, prawdopodobieństwa określałoby się wzorem Bernoulli'ego.

W miejsce algebry Boole'a, do obliczeń drzewa uszkodzeń Autor zastosował własny, oryginalny algorytm obliczeń, oparty na teorii grafów. W tym ujęciu, wejścia i wyjścia oraz bramki AND, OR

i MZN drzewa stają się węzłami grafu. Odpowiednio węzły określa się jako typu START, AND, OR, MZN lub STOP. Uszkodzenia typu *fault* i *failure* stają się gałęziami grafu. Gałęziom tym przypisuje się wartość logiczną TRUE, FALSE, PART lub UNKNOWN. Jeśli dana gałąź reprezentuje elementarne uszkodzenie urządzenia (*fault*), to wartość TRUE nadaje się gałęzi wówczas, gdy uszkodzenie to osiągnęło poziom graniczny. Jeśli stan uszkodzenia jest zerowy, to gałęzi nadaje się wartość FALSE, a gdy uszkodzenie jest częściowe – to PART. W podobny sposób, gdy dana gałąź reprezentuje stan urządzenia, zespołu, instalacji, urządzenia głównego lub bloku, wartości FALSE, TRUE i PART nadaje się takiej gałęzi w przypadku, odpowiednio, pełnej sprawności, pełnej niesprawności ruchowej (*failure*) lub niesprawności częściowej. Algorytm przedstawiono w formie schematu blokowego na rysunku 3.

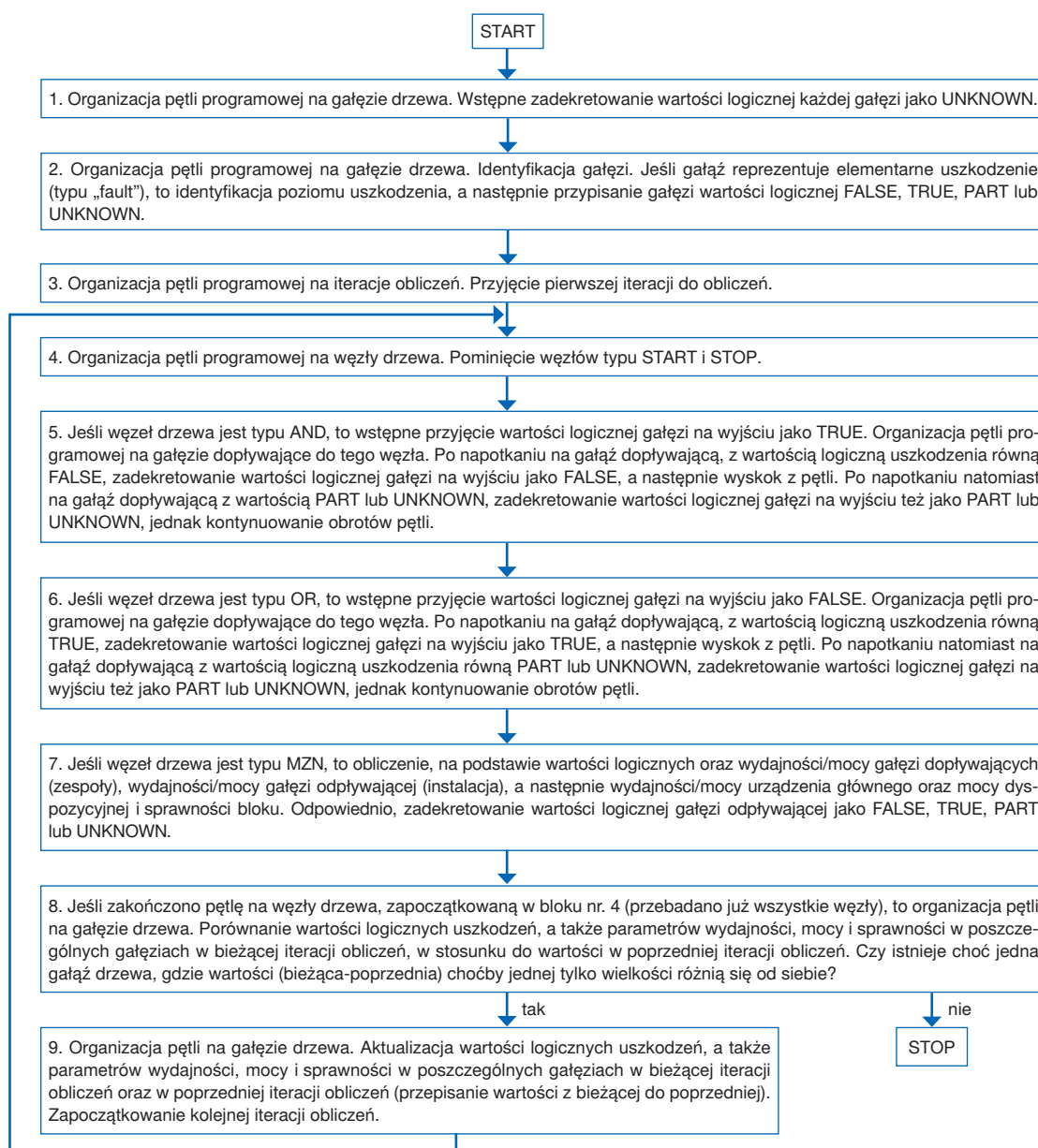
Uszkodzeń urządzeń w elektrowni jest tak wiele, że nierealna byłaby próba objęcia ich jednym tylko drzewem uszkodzeń. Z tego względu, w programie OPTREMEL 2.0. przewidziano możliwość

wygenerowania dowolnej liczby niezależnych drzew uszkodzeń urządzeń elektrowni. Parametry drzew są przechowywane w bazie danych drzew uszkodzeń. Baza ma poniższą strukturę:

- tabela drzew uszkodzeń,
- tabela węzłów drzew uszkodzeń,
- tabela gałęzi drzew uszkodzeń.

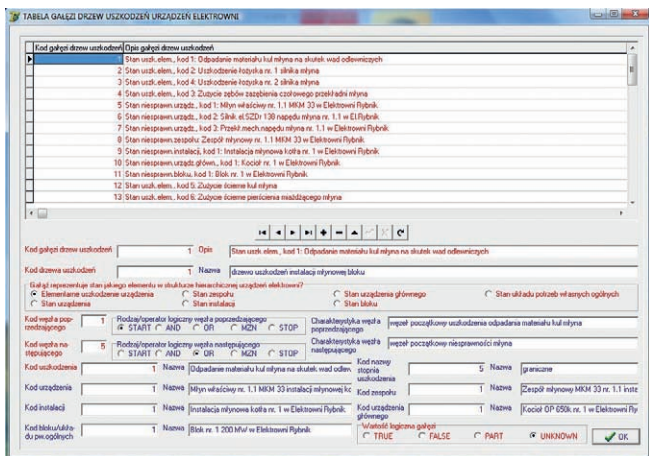
Ilustracją struktury głównej tabeli powyższej bazy, tj. tabeli gałęzi drzew uszkodzeń, jest rysunek 4 – zrzut ekranowy formularza tabeli programu. Struktura drzewa jest, z pomocą tej tabeli, jednoznacznie modelowana poprzez kod węzła poprzedzającego i następującego każdej gałęzi.

Wynikami obliczeń drzew uszkodzeń są stany ruchowe poszczególnych urządzeń, zespołów, instalacji, urządzeń głównych i bloków lub układów potrzeb własnych ogólnych elektrowni. Na wyjściu drzew obliczana jest ponadto, w odniesieniu do zespołów i instalacji, wydajność i moc, a w odniesieniu do bloku, moc dyspozycyjna oraz sprawność netto. Do wizualizacji

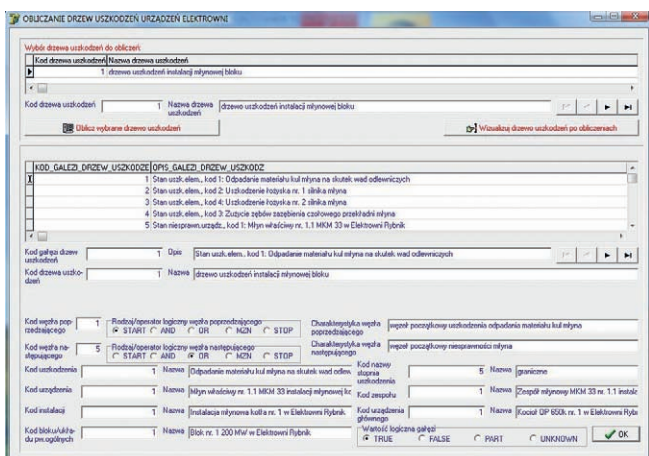


Rys. 3. Schemat blokowy obliczenia drzewa uszkodzeń

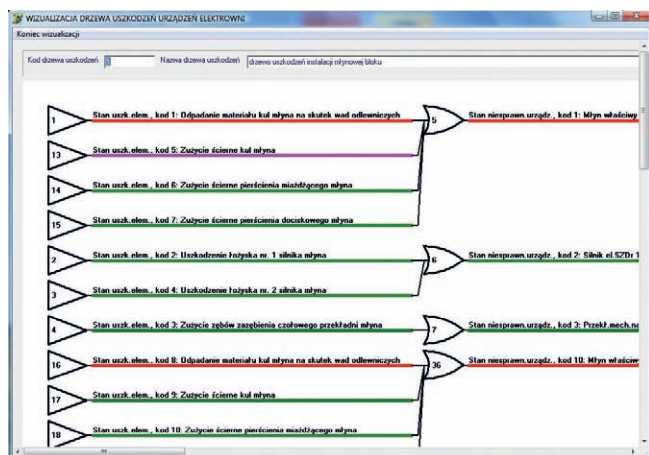
wyników obliczeń pojedynczego drzewa uszkodzeń służy w programie OPTREMEŁ 2.0. odrębny formularz. Zrzut ekranowy tego formularza pokazano na rysunku 5.



Rys. 4. Zrzut ekranowy formularza tabeli gałęzi drzew uszkodzeń, programu OPTREMEŁ 2.0.



Rys. 5. Zrzut ekranowy formularza wyników obliczeń drzewa uszkodzeń, programu OPTREMEŁ 2.0.



Rys. 6. Zrzut ekranowy formularza graficznej wizualizacji drzewa uszkodzeń po obliczeniu drzewa, programu OPTREMEŁ 2.0; objaśnienie kolorów: gałąź o wartości logicznej FALSE (zerowy stan uszkodzenia lub pełna sprawność) – zielony, TRUE (stan graniczny uszkodzenia lub pełna niesprawność) – czerwony, PART (pośredni stopień uszkodzenia lub częściowa niesprawność) – fioletowy, UNKNOWN (stan niezany) – niebieski; objaśnienie węzłów: węzły o kodach 1, 13, 14 ... – typu START, węzły o kodach 5, 6, 7, 36 – typu OR

W program wbudowany jest również moduł graficznej wizualizacji drzewa uszkodzeń. Rysunek drzewa wyprowadzany jest w sposób automatyczny na podstawie struktury zamodelowanej w tabeli gałęzi drzewa uszkodzeń. Stany poszczególnych gałęzi są na tym rysunku wyróżnione kolorami. Zrzut ekranowy formularza graficznej wizualizacji drzewa pokazano na rysunku 6.

Podsumowanie

Zaprezentowana metodologia może wydawać się nadmierne skomplikowana. Istotnie, technologia RCM wymaga wielu danych, jednak korzyści, w postaci wydłużenia cykli międzyremontowych bloków, są tu ewidentne. Już samo skatalogowanie uszkodzeń urządzeń oraz identyfikacja przyczyn i mechanizmów tych uszkodzeń ma ogromne znaczenie poznawcze.

Główne zadanie, w przygotowywaniu danych do technologii RCM, powinno spoczywać na barkach personelu inżyniersko-technicznego elektrowni, lecz także i personelu wytwórców urządzeń. Jeśli chodzi o kadre naukowo-badawczą, to należy tu podkreślić ogromną ważność badań w zakresie modelowania fizykochemicznych mechanizmów elementarnych uszkodzeń urządzeń elektrowni.

LITERATURA

- [1] Brzozowski W.: Technologia RCM remontów w zastosowaniu do elektrowni. Konferencja naukowo-techniczna pt. „Projektowanie, innowacje remontowe i modernizacje w energetyce”. *Energetyka* 2010, z. XXI, s. 18 - 22
- [2] Brzozowski W.: Modelowanie i optymalizacja procesu eksploatacji elektrowni Ciepłej. Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej. Seria *Monografie* nr 35, Częstochowa 1995 (rozprawa habilitacyjna)
- [3] Bojarski W.W.: Wprowadzenie do oceny niezawodności działania układów Technicznych. PWN, Warszawa 1967
- [4] Brzozowski W., Kowalczyk K., Tomaszewski M.: Zintegrowane systemy zarządzania. Skrypt nr 244, Politechnika Opolska, Opole 2002
- [5] Reliability-Centered Maintenance (RCM) for Command, Control, Communications, Computer, Intelligence, Surveillance and Reconnaissance (C4ISR) Facilities, Technical Manual, TM 5-698-2, Headquarters. Department of the Army, Washington 2006
- [6] Brzozowski W.: Expert Systems of the Technical Diagnostics in Power Plants. *Przegląd Elektrotechniczny* 2009, nr 3, s. 124-129
- [7] Brzozowski W.: Symulacyjny mikrokomputerowy model decyzyjny ekonomiczno-finansowego systemu przedsiębiorstwa na przykładzie elektrowni. Konferencja pt. „Komputerowe systemy i metody wspomagające podejmowanie decyzji”. IBS PAN - PTBOiS, Warszawa 1987
- [8] Brzozowski W.: Program komputerowy PERT'2002 optymalizacji wykonawstwa remontów elektrowni. IX Konferencja Naukowo-Techniczna „Projektowanie i innowacje w remontach energetycznych – PIRE 2007”. *Energetyka* 2007, z. XIV, s. 15-18
- [9] Instrukcja eksploatacji kotła OP-650k. *Elektrownia Rybnik*, Rybnik 1975