



Andrzej OZIEMSKI, Roman SIKORA

# KOMPUTEROWO WSPOMAGANA RACJONALIZACJA GOSPODARKI REMONTOWEJ BLOKÓW ENERGETYCZNYCH

### *Streszczenie*

*W referacie przedstawiono opracowany przez autorów program komputerowy do wszechstronnej analizy danych statystycznych dotyczących zdarzeń eksploatacyjnych krajowych bloków energetycznych i wyznaczania ich podstawowych wskaźników niezawodnościowych w oparciu o metodę empirycznej funkcji gęstości prawdopodobieństwa (histogramu) o założonej liczbie realizacji w klasach. W oparciu o ten program przeprowadzono badania niezawodnościowe bloków 370 MW zainstalowanych w PGE GiEK S.A. Oddział Elektrownia Bełchatów.*

### WSTĘP

Analiza niezawodności bloków energetycznych różni się w istotny sposób od analizy prowadzonej dla pozostałych elementów wchodzących w skład systemu elektroenergetycznego. Różnica ta wynika przede wszystkim z faktu stanowienia przez zasadnicze elementy bloku złożonych urządzeń ciepłno-mechanicznych, podlegających przy tym intensywnym procesom zużycia i zmęczenia materiału. Powyższe czynniki powodują, że elektrownie są najbardziej zawodnymi elementami każdego systemu elektroenergetycznego. Konieczność utrzymania wysokiego stopnia niezawodności wytwarzania energii elektrycznej zmusza jej producentów do poszukiwania optymalnych narzędzi do wiarygodnego prognozowania zdarzeń eksploatacyjnych bloków. Bez znajomości przyczyn i częstości zakłóceń w pracy poszczególnych urządzeń wytwórczych, nie jest bowiem możliwe prognozowanie optymalnych terminów modernizacji i remontów bloków, ani też udzielanie rzetelnych gwarancji, co do niezawodności dostaw energii.

Zasadniczym celem podjętych przez autorów badań było określenie wiarygodnych wartości podstawowych wskaźników niezawodnościowych (tj. oczekiwanego czasu pracy bezawaryjnej, oczekiwanego intensywności awarii, oczekiwanego średniego czasu wyłączenia oraz oczekiwanego łącznego czasu wyłączeń w ciągu roku) dla głównych urządzeń wytwórczych bloków 370 MW na węgiel brunatny zainstalowanych w PGE GiEK S.A. Oddział Elektrownia Bełchatów. Dokonano tego w wyniku estymacji parametrów uprzednio zidentyfikowanych empirycznych rozkładów prawdopodobieństwa występowania czasów pracy i czasów awarii, uzyskanych przy wykorzystaniu metody empirycznej funkcji gęstości prawdopodobieństwa (histogramu) o założonej liczbie realizacji w klasach. Posługując się koncepcją bloku reprezentatywnego (modelowego) wyznaczono rozkłady prawdopodobieństwa występowania czasów pracy i czasów awarii dla głównych urządzeń bloku 370 MW oraz ich najbardziej zawodnych elementów – zwłaszcza w odniesieniu

do powierzchni ogrzewalnych kotła BB-1150 (tj. podgrzewacza wody, parownika, rur wieszakowych wewnętrznych P1A, przegrzewacza konwekcyjnego P1B, przegrzewacza wylotowego P4, przegrzewacza wtórnego wlotowego M1, przegrzewacza wtórnego wylotowego M2 oraz dla wszystkich przegrzewaczy traktowanych łącznie).

W celu porównania zgodności uzyskanych rozkładów empirycznych z grupą wytypowanych rozkładów teoretycznych (tzn. wykładniczym, Weibulla, normalnym i logarytmo-normalnym) wykorzystano statystyczne testy zgodności Pearsona i Kołmogorowa, przy czym obliczenia wykonywane były na poziomie istotności  $\alpha = 0,05$ . Szczególną uwagę skupiono przy tym na wnikliwej weryfikacji zgromadzonych danych statystycznych, prowadzonej zarówno pod kątem eliminacji ze zbiorów przypadków nie mających cech losowych (tzn. podlegających aktywnemu oddziaływaniu personelu ruchu i obsługi), jak i uwzględnienia tzw. „przekwalifikowań” części faktycznie zaistniałych awarii na remonty planowe lub postoje w rezerwie. Sytuacja ta sprokurowana jest przede wszystkim utrzymującą się od dłuższego czasu nadwyżką mocy zainstalowanej w Krajowym Systemie Elektroenergetycznym (KSE) i powszechnie praktykowana przez wszystkie elektrownie. Nieuwzględnienie powyższych faktów sprawia, że wyznaczone w ten sposób wskaźniki niezawodnościowe (m.in. dla potrzeb Agencji Rynku Energii S.A. w Warszawie) nie dają właściwego obrazu trwałości eksploatowanych w kraju urządzeń wytwórczych, na tle podobnych konstrukcyjnie bloków energetycznych pracujących na świecie.

## **1. OPIS ZBUDOWANEGO PROGRAMU DO OCENY WSKAŹNIKÓW NIEZAWODNOŚCIOWYCH URZĄDZEŃ BLOKÓW**

Elektrownia „Bełchatów”, wchodząca od 2007 r. w skład największej polskiej firmy energetycznej – PGE Polska Grupa Energetyczna S.A., pracuje dla potrzeb KSE od 1982 r., kiedy to przekazano do eksploatacji pierwszy z dwunastu bloków energetycznych o mocy 370 MW na węgiel brunatny. Zgromadzone przez ten okres dane statystyczne dotyczące zaistniałych stanów eksploatacyjnych bloków 370 MW, przechowywane są w specjalnie w tym celu utworzonej relacyjnej bazie danych MS Access, co zapewnia odpowiedni poziom redukcji redundancji danych oraz ich integralność i bezpieczeństwo. Ponieważ największe zagrożenie uszkodzenia, a nawet całkowitej utraty przechowywanych danych występuje podczas wykonywania żądanych obliczeń niezawodnościowych (wymagane operacje wykonywane są wówczas bezpośrednio na tych danych, z możliwością ich ewentualnej modyfikacji łącznie), zdecydowano się na opracowanie dwóch niezależnych aplikacji. Pierwsza z nich przeznaczona jest wyłącznie do zarządzania zarchiwizowanymi zbiorami danych (rys. 1 i 2), natomiast druga, służy do realizacji zadanych obliczeń niezawodnościowych (rys. 3, 4 i 5).

Omawiany program został wyposażony w rozbudowany, intuicyjny interfejs graficzny, zapewniający użytkownikowi wysoki komfort pracy oraz wydatnie ograniczający możliwość błędnego wprowadzenia danych lub wykonania niepoprawnych operacji. Czas wykonywania żądanych obliczeń zależy bezpośrednio od zadanego przedziału czasowego i liczby wyselekcjonowanych rekordów, a ponadto od mocy obliczeniowej użytego komputera. Istotne przyspieszenie procesu obliczeń, przy jednoczesnej minimalizacji ryzyka związanego z możliwością „zawieszenia się” programu, uzyskano przez zastosowanie aplikacji wielowątkowej – w pierwszym wątku uruchamiany jest interfejs użytkownika, natomiast w drugim realizowane są żądane obliczenia.

Realizacja wymaganych obliczeń może odbywać się w wielu wariantach (np. dla dowolnie wybranego bloku, dla wszystkich 12 bloków 370 MW elektrowni lub dowolnie wybranej grupy tych bloków) i w dowolnie określonych przedziałach czasowych (np. za dowolnie wybrany rok lub okres kolejnych lat). Takie postępowanie umożliwia wyznaczenie zarówno bieżących wartości podstawowych wskaźników niezawodnościowych

dla bloków i ich rozpatrywanych urządzeń, jak i prześledzenie ich zmienności w kolejnych latach eksploatacji. Powinno to stanowić podstawę do określania programów modernizacji urządzeń oraz racjonalizacji gospodarki remontowej i materiałowej elektrowni. Uzyskane wyniki obliczeń prezentowane są zbiorczo na jednym formularzu (rys. 5).

Program: Pomoc

Elektrownia: Berchatów S.A. [Wyczyść pola]

Blok: Blok numer 1 [Dodaj nowy rekord]

Miejsce: K Kocioł i przynależne [Kocioł i przynależne mu urządzenia]

Przyczyna: U Trwałe uszkodzenie [Trwałe uszkodzenie]

Skutek: W Wyłączenie [Wyłączenie]

Element Główny: 2 Urządzenia traktu pa [Urządzenia traktu parowego]

Element 1: 122 Przegrzewacz kor [Przegrzewacz konwekcji P1B]

Element 2: 126 Przegrzewacz wło [Przegrzewacz wlotowy na parze wtórnej M1]

Element 3: [ ]

Element 4: [ ]

Data odstawienia: Rok 2007 [Wybierz rok] Godzina [gg:mm:ss] 07:30:00

Data uruchomienia: Rok 2007 [Wybierz rok] Godzina [gg:mm:ss] 23:20:00

Ważność danych: Data początkowa Rok 2001 Miesiąc Styczeń

Data końcowa Rok [ ] Miesiąc [ ]

Ważność danych: Data początkowa Rok [ ] Miesiąc [ ]

Ważność danych: Data początkowa Rok [ ] Miesiąc [ ]

Element 1: Rury wieszaków wewnętrzne P1A

Element 2: Przegrzewacz wlotowy na parze wtórnej M1

Element 3: [ ]

Element 4: [ ]

Kod bloku	Data odstawienia	Data uruchomienia	Miejsce	Przyczyna	Skutek	Element1	Element2	Element3	Element4
Blok numer 1	2001-05-19 23:47:00	2001-05-20 22:03:00	K	U	W	126	910	910	910
Blok numer 1	2001-06-05 14:45:00	2001-06-10 15:12:00	K	U	W	244	910	910	910
Blok numer 1	2001-07-07 00:50:00	2001-07-07 23:59:00	K	U	W	121	910	910	910
Blok numer 1	2001-07-13 23:42:00	2001-07-15 18:01:00	K	U	W	121	126	910	910
Blok numer 1	2001-07-21 23:58:00	2001-07-22 21:58:00	K	U	W	126	910	910	910

Rekord 13 z 56

Rys. 1. Wygląd formularza przeznaczony do wprowadzania danych

Przeglądanie danych

Program Pomoc

Elektrownia: Bęchatów S.A. Wyczyść pola Zamknij

Blok: Blok numer 8

Miejsce: Pokaż szczegóły

Przyczyna:
 

- U.Twara uszkodzenie
- UZ.uszkodzenia w zabezp.
- BZ błędne działanie zabezp
- L błędy personelu
- I pozostałe przyczyny
- zaznacz wszystkie

Data początkowa: Rok 2003, Miesiąc Marzec

Data końcowa: Rok, Miesiąc

Zawęż dane do okresu Cofnij zawężanie

Kod bloku	Data odstawienia	Data uruchomienia	Miejsce	Przyczyna	Skutek	Element1	Element2	Element3	Element4
Blok numer 8	2003-05-11 00:15:00	2003-05-12 05:10:00	K	U	W	113	111	910	910
Blok numer 8	2003-05-29 21:51:00	2003-06-02 05:01:00	K	U	W	111	910	910	910
Blok numer 8	2003-07-04 00:12:00	2003-07-07 04:41:00	K	U	W	111	910	910	910
Blok numer 8	2004-01-01 00:15:00	2004-01-02 08:24:00	K	U	W	114	910	910	910
Blok numer 8	2004-03-10 09:48:00	2004-03-12 18:45:00	K	U	W	114	127	910	910
Blok numer 8	2004-03-20 23:12:00	2004-03-22 05:06:00	K	U	W	114	910	910	910
Blok numer 8	2004-04-18 00:09:00	2004-04-19 01:12:00	K	U	W	114	910	910	910
Blok numer 8	2004-05-08 12:43:00	2004-05-09 10:15:00	K	U	W	111	910	910	910
Blok numer 8	2004-08-22 05:45:00	2004-08-24 04:12:00	K	U	W	114	910	910	910
Blok numer 8	2005-06-23 08:16:00	2005-06-23 09:04:00	G	L	W	523	910	910	910
Blok numer 8	2005-07-21 20:39:00	2005-07-23 06:12:00	K	U	W	122	910	910	910

Rekord 1 z 19

Element 1: Wodooddzielacz

Element 2: Podgrzewacz wody ECO

Element 3: Ukryj szczegóły

Rys. 2. Widok formularza służącego do przeglądania danych

Probabilistyka

Wyniki obliczeń Wczytanie danych z pliku Opcje Pomoc Program do edycji bazy

Elektrownia: Bęchatów S.A. Za okres Za rok Za lata Obliczenia dla bloku modelowego

Bloki od:  Blok numer 1 do: Blok numer 12

Wybrane bloki:  Obliczenia dla wszystkich elementów bloku

Obliczenia dla wszystkich elementów wchodzących w skład urządzenia

Miejsce: Kocioł i przynależne mu urządzenia

Węzeł: Element 1: Element 2: Element 3: Element 4:

Oblicz

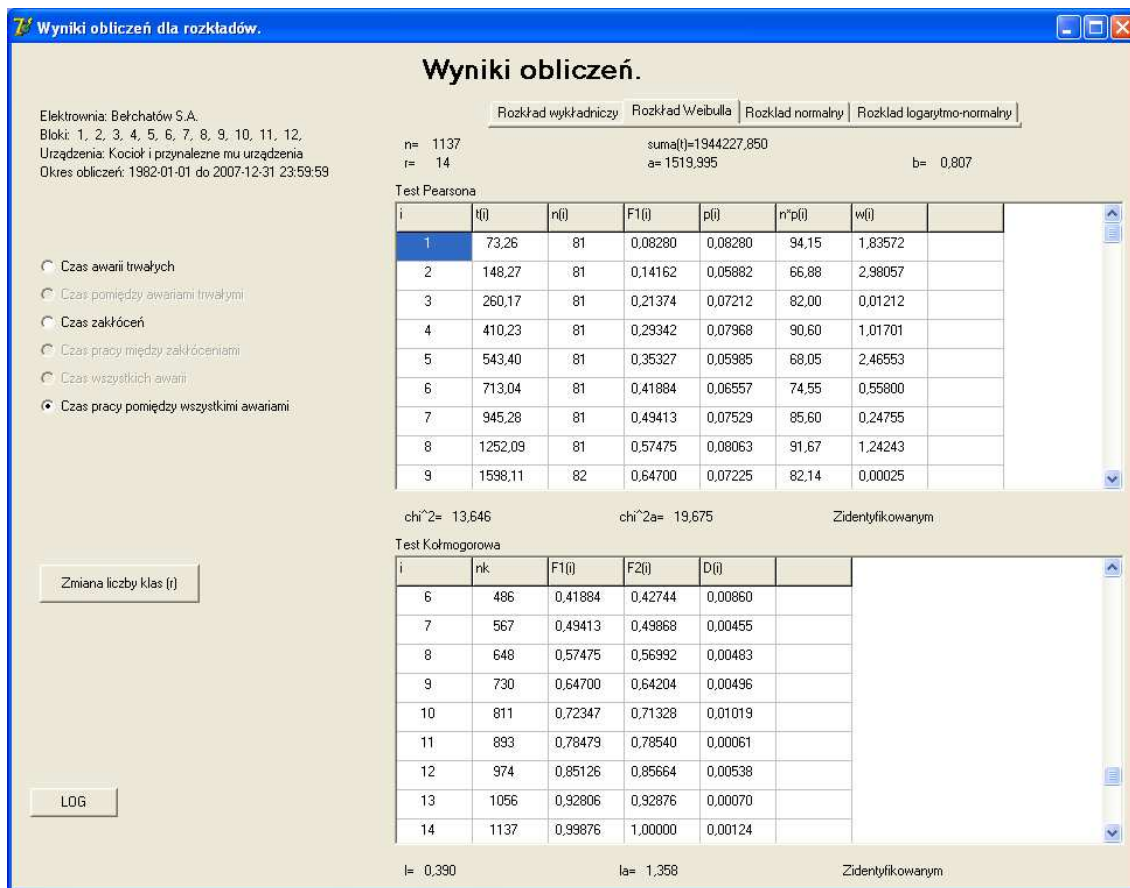
Zakończ

LOG

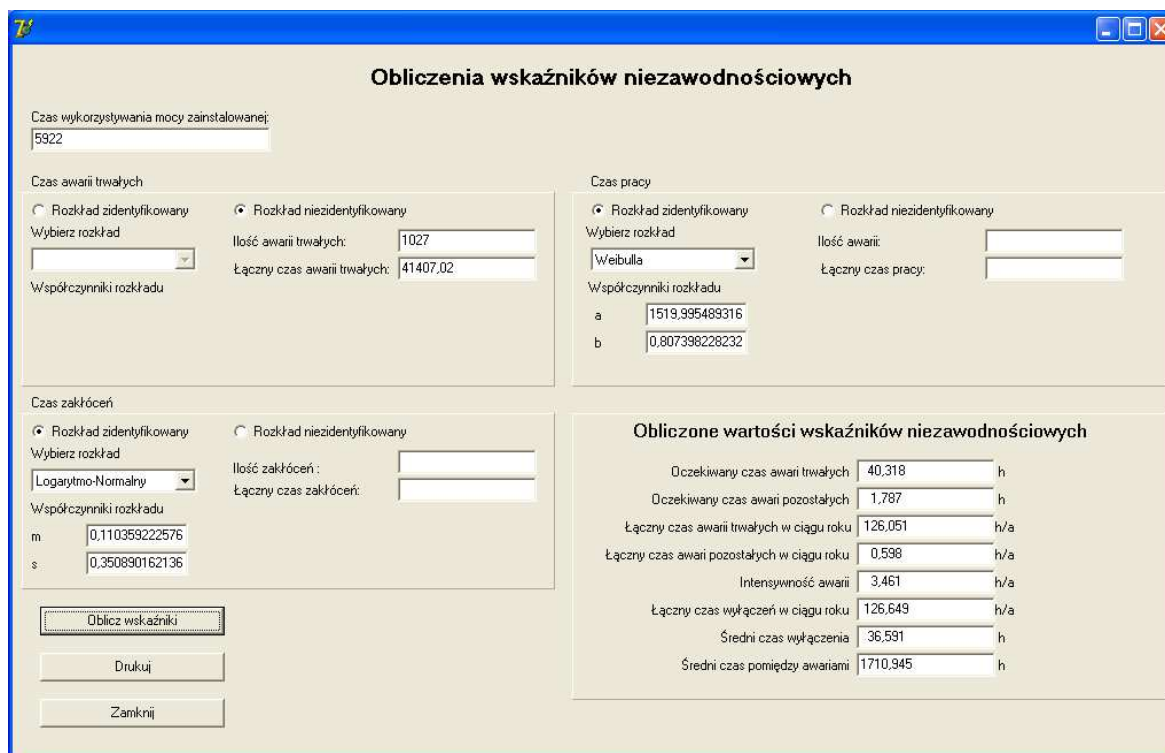
100%

Procentowe zakończenie: 100% Błędy: 0 Obliczenia dla urządzeń

Rys. 3. Widok formularza do wprowadzania żądanych kryteriów obliczeń



Rys. 4. Widok formularza do prezentacji wyników statystycznych testów zgodności Pearsona i Kołmogorowa wykorzystywanych do identyfikacji badanych histogramów czasów pracy i czasów awarii



Rys. 5. Widok formularza do wyznaczania wskaźników niezawodnościowych

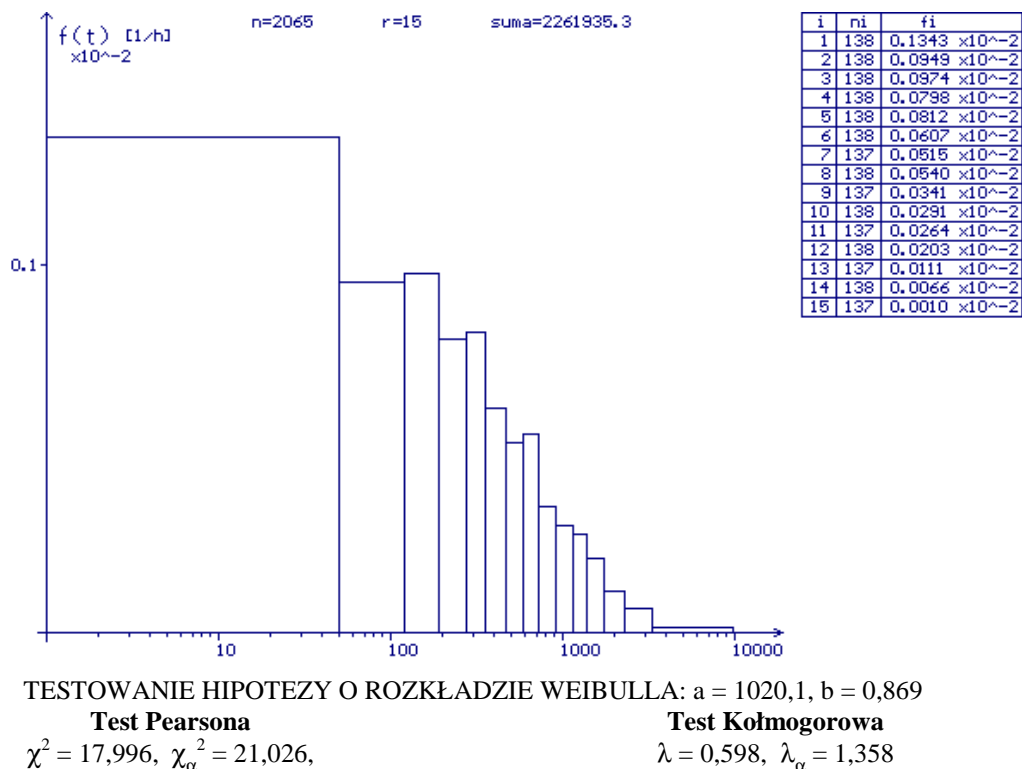
## 2. OCENA WSKAŹNIKÓW NIEZAWODNOŚCIOWYCH URZĄDZEŃ BLOKÓW 370 MW ELEKTROWNI BEŁCHATÓW

Bloki energetyczne 370 MW zainstalowane w PGE GiEK S.A. Oddział Elektrownia Bełchatów są jednorodne konstrukcyjnie i pracują w zbliżonych warunkach obciążeń. Uzasadnia to przyjęcie koncepcji reprezentatywnego bloku 370 MW i zbadanie dla tego przypadku rozkładów prawdopodobieństwa wystąpienia czasów pracy i czasów awarii. Przyjęcie koncepcji bloku reprezentatywnego pozwala ustalić odpowiednio liczne populacje przypadków awaryjnych nie tylko dla bloku, ale także jego zasadniczych urządzeń: kotła, turbiny, generatora itd. Postępując w myśl powyższej zasady wyznaczono (wykorzystując zbiory zaistniałych przypadków awaryjnych na wszystkich dwunastu blokach elektrowni) populacje generalne badanych cech czasów pracy i czasów awarii dla reprezentatywnego bloku 370 MW i jego urządzeń.

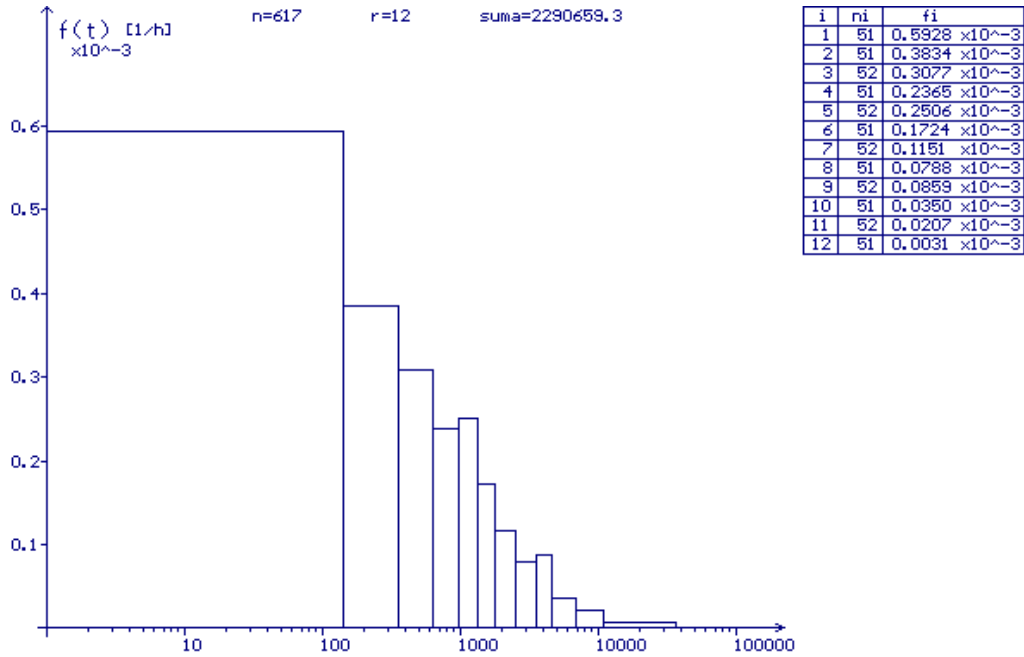
Przy ustalaniu populacji nie zostały uwzględnione przypadki dotyczące awarii bloków w początkowym okresie ich eksploatacji (tzn. pominięto pierwsze trzy lata pracy bloku nr 1, pierwsze dwa lata pracy bloku nr 2 oraz pierwszy rok pracy każdego z pozostałych bloków) gdyż uznano, że dane z tego okresu mogą zniekształcać wyniki analizy, ponieważ wynikały one w głównej mierze z uchybień projektowych i konstrukcyjnych oraz błędów montażowych urządzeń. W zgromadzonej statystyce awaryjności bloków 370 MW uwzględniono natomiast przypadki tych remontów, co do których można było mieć pewność, że skutkują natychmiastowym odstawieniem bloku, a nie zostały odnotowane jako wyłączenia awaryjne tylko dlatego, że w momencie ich zaistnienia system elektroenergetyczny pracował z odpowiednią rezerwą mocy.

Badane rozkłady czasów pracy i czasów awarii zidentyfikowano odpowiednio jako rozkłady Weibulla (rys. 6) i rozkłady logarytmno-normalne (rys. 7).

a)



b)



TESTOWANIE HIPOTEZY O ROZKŁADZIE WEIBULLA:  $a = 3237,3$ ,  $b = 0,795$

**Test Pearsona**

$$\chi^2 = 13,388, \chi_{\alpha}^2 = 16,919,$$

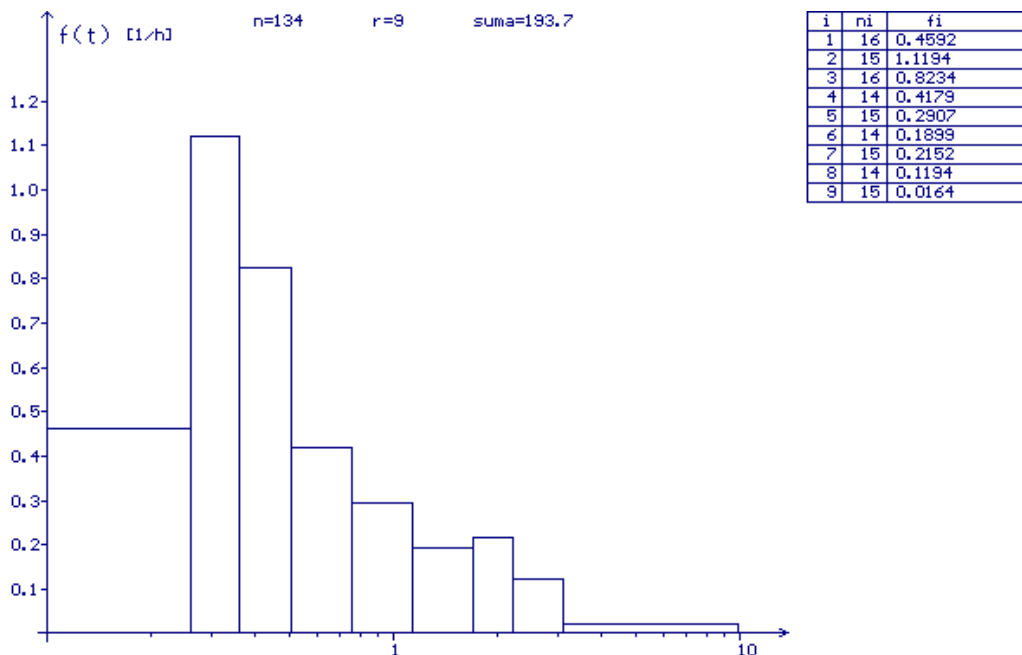
**Test Kołmogorowa**

$$\lambda = 0,849, \lambda_{\alpha} = 1,358$$

**Rys. 6.** Histogramy czasów pracy zidentyfikowane jako rozkłady Weibulla: a) blok energetyczny 370 MW, b) rury ekranowe parownika.

*Objaśnienia:*  $i$  – wskaźnik iteracji,  $n$  – liczność próbki,  $r$  – liczba klas,  $\text{suma}$  – sumaryczna wartość wszystkich realizacji w próbce,  $n_i$  – liczba realizacji w  $i$ -tej klasie,  $f_i$  – wartość empirycznej funkcji gęstości prawdopodobieństwa dla  $i$ -tej klasy,  $\chi^2$  – wartość statystyki Pearsona,  $\chi_{\alpha}^2$  – krytyczna wartość statystyki Pearsona dla poziomu istotności  $\alpha = 0,05$ ,  $\lambda$  – wartość statystyki Kołmogorowa,  $\lambda_{\alpha}$  – krytyczna wartość statystyki Kołmogorowa dla poziomu istotności  $\alpha = 0,05$ .

a)



TESTOWANIE HIPOTEZY O ROZKŁADZIE LOGARYTMO-NORMALNYM:  $m = -0,045$ ,  $\sigma = 0,433$

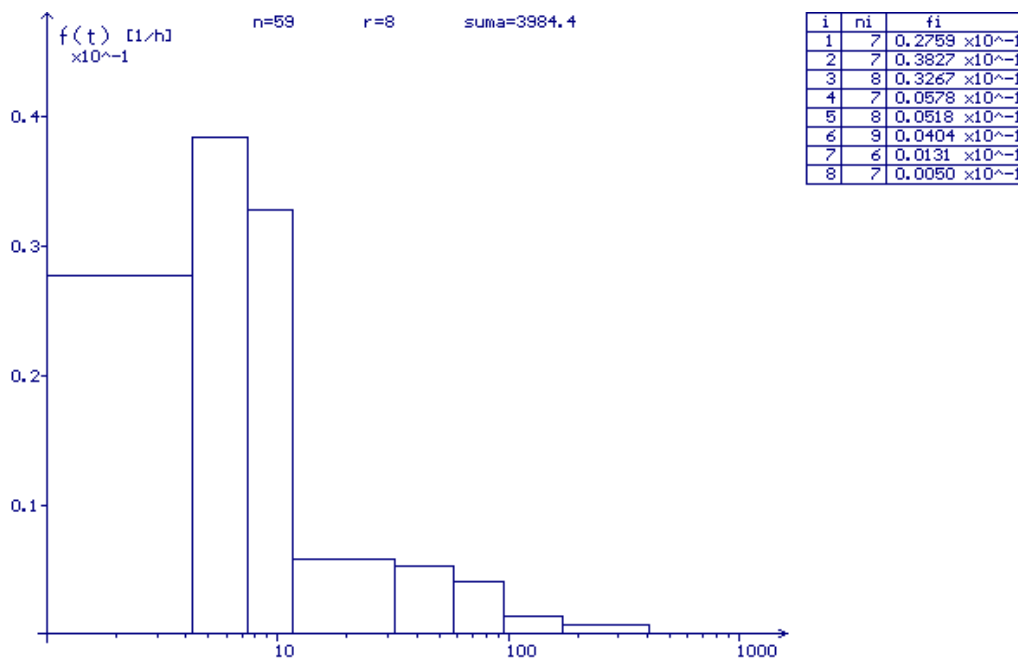
**Test Pearsona**

**Test Kołmogorowa**

$$\chi^2 = 12,059, \chi_{\alpha}^2 = 12,592,$$

$$\lambda = 0,817, \lambda_{\alpha} = 1,358$$

b)



TESTOWANIE HIPOTEZY O ROZKŁADZIE LOGARYTMO-NORMALNYM:  $m = 1,446, \sigma = 0,626$

**Test Pearsona**

$$\chi^2 = 8,837, \chi_{\alpha}^2 = 11,070$$

**Test Kołmogorowa**

$$\lambda = 0,791, \lambda_{\alpha} = 1,358$$

**Rys. 7.** Histogramy czasów awarii zidentyfikowane jako rozkłady logarytmu-normalne: a) generator GTHW-370 (czas awarii pozostałych) b) generator GTHW-370 (czas awarii trwałych)

W tabeli 1 zestawiono uzyskane wyniki obliczeń wskaźników niezawodnościowych dla podstawowych urządzeń reprezentatywnego bloku 370 MW, natomiast w tabeli 2 dla rozpatrywanych powierzchni ogrzewalnych kotła BB-1150.

Ustalono, że najbardziej awaryjnym elementem w układzie technologicznym bloku 370 MW jest parownik. Średni czas trwania awarii wynosi dla niego 39,7 h, co przy przewidywanej liczbie awarii w ciągu roku 1,43 daje łączny czas trwania wyłączeń awaryjnych 56,6 h. Przewidywany czas międzyawaryjny jest dla parownika najkrótszy ze wszystkich badanych elementów kotła i wynosi ok. 4150 h.

**Tab. 1.** Wartości oczekiwane wskaźników niezawodnościowych dla podstawowych urządzeń bloku 370 MW

Miejsce awarii	Oczekiwana intensywność awarii, [1/a]	Średni czas wyłączenia, [h]	Łączny czas wyłączeń w ciągu roku, [h/a]	Średni czas pomiędzy awariami, [h]
K	3,46	36,6	126,6	1710
T	0,91	14,0	12,8	6490
G	0,62	27,6	17,0	9630
PWZ	0,35	14,1	4,9	17180
W	0,18	5,3	0,95	32880
I	0,27	9,6	2,5	22320
BLOK	5,05	28,7	144,9	1170

**Objaśnienia:** K – kocioł i przynależne mu urządzenia pomocnicze, T – turbina i przynależne jej urządzenia pomocnicze, G – generator i przynależne mu urządzenia pomocnicze, PWZ – układ pomp wody zasilającej, W – układ pomp wody chłodzącej i pomp wody ruchowej, I – inne (w tym awarie urządzeń elektrycznych).



**Tab. 2.** Wartości oczekiwane wskaźników niezawodnościowych dla najbardziej zawodnych elementów kotła BB-1150

Miejsce awarii	Oczekiwana intensywność awarii, [1/a]	Średni czas wyłączenia, [h]	Łączny czas wyłączeń w ciągu roku, [h/a]	Średni czas pomiędzy awariami, [h]
Podgrzewacz wody	0,35	38,2	13,2	17170
Parownik	1,43	39,7	56,6	4150
Rury wieszakowe wewnętrzne P1A	0,36	40,6	14,7	16320
Przegrzewacz konwekcyjny P1B	0,59	44,6	26,1	10110
Przegrzewacz wylotowy PIV	0,22	51,5	11,0	27690
Przegrzewacz wtórny wlotowy M1	0,34	39,8	13,6	17390
Przegrzewacz wtórny wylotowy M2	0,17	45,0	7,8	34280
Przegrzewacze (łącznie)	1,34	43,3	58,0	4420

## PODSUMOWANIE

Podstawowym zadaniem każdego systemu elektroenergetycznego jest zapewnienie odbiorcom ciągłości dostaw energii elektrycznej o odpowiedniej jakości i możliwie najniższych kosztach jej wytwarzania. O stopniu bezpieczeństwa systemu decydują jego słabe elementy, w tym przede wszystkim bloki energetyczne zawodowych elektrowni ciepłych.

Obserwacje stanów eksploatacyjnych urządzeń wytwórczych bloków 370 MW potwierdzają panującą powszechnie wśród energetyków opinię, że decydujący wpływ na dyspozycyjność czasową elektrowni opalanych węglem ma awaryjność kotłów, powodowana najczęściej nieszczelnościami ich poszczególnych powierzchni ogrzewalnych. Rurowe wymienniki ciepła poddawane są bowiem w wysokiej temperaturze naprężeniom mechanicznym, a także chemicznym i fizycznym oddziaływaniom spalin, pary i wody.

Celowym jest zatem, aby w obrębie kotła poszukiwać możliwości ograniczenia liczby wyłączeń awaryjnych, przede wszystkim poprzez odpowiednie sterowanie gospodarką remontową oraz prowadzenie niezbędnych prac modernizacyjnych i specjalistycznych badań profilaktycznych.

## COMPUTER AIDED SYSTEM FOR ESTIMATION OF POWER UNIT RELIABILITY

### *Abstract*

*The paper presents a computer program which enables storage and comprehensive analysis of statistical data referring to operational states of power units. Program allows to get basic reliability measures like mean time between failures, expected failure rate, mean time of a shut-down by the method of histogram with a set number of observations in each class and with application of standardized unit concept. A comprehensive reliability research of 370 MW lignite power units installed in Bełchatów Power Station has been done with the use of the program.*

## BIBLIOGRAFIA

1. Buchta J., Oziemski A.: *Reliability of large power units in probabilistic approach*. 9th International Conference „Electrical Power Quality and Utilisation”. Barcelona, październik 2007, CD proceedings, paper 295.
2. Oziemski A., Sikora R.: *Modelowanie niezawodności bloków 370 MW zainstalowanych w BOT Elektrownia Bełchatów*. Wiadomości Elektrotechniczne 2006, nr 12, s. 34-38.
3. Oziemski A.: *Ocena niezawodności kotłów BB-1150 w ujęciu probabilistycznym*. Materiały IV Międzynarodowego Kongresu „Górnictwo węgla brunatnego”. Bełchatów, czerwiec 2005, s. 555-563.
4. Buchta J., Oziemski A., Pawlik M.: *Estimation of reliability measures of 370 MW lignite fueled power units operating in Poland*. 6th International Scientific and Technical Conference „Efficiency and Power Quality of Electrical Supply of Industrial Enterprises”. Mariupol, Ukraine, maj 2008, s. 295-298.

"Projekt został sfinansowany ze środków Narodowego Centrum Nauki".

### *Autorzy:*

**dr inż. Andrzej OZIEMSKI** – Politechnika Łódzka, Instytut Elektroenergetyki

**dr inż. Roman SIKORA** – Politechnika Łódzka, Instytut Elektroenergetyki