

Janusz SKIERSKI, Andrzej OZIEMSKI  
Instytut Elektroenergetyki, Politechnika Łódzka

## ROZKŁADY STATYSTYCZNE NIEZAWODNOŚCI I REMONTÓW BIEŻĄCYCH KOTŁÓW BB-1150 W ELEKTROWNI BEŁCHATÓW

**Streszczenie.** Przedstawiono syntetyczną analizę rodzajów, przyczyn i skutków awarii kotłów BB-1150 bloków energetycznych 360 MW na węgiel brunatny, prowadzoną od początku eksploatacji w Elektrowni Bełchatów. Zidentyfikowano niektóre rozkłady prawdopodobieństw występowania czasów pracy  $\tau_d$ , awarii  $\tau_a$ , remontów bieżących  $\tau_{RB}$  oraz czasów międzyremontowych  $\tau_{RB}$  kotłów i ich najbardziej zawodnych elementów: podgrzewaczy wody, rur ekranowych parowników, przegrzewaczy pary, rusztów i odzūżlaczy.

### STATISTICAL DISTRIBUTIONS OF THE RELIABILITY AND ROUTINE REPAIRS OF BB-1150 BOILERS IN THE BEŁCHATÓW POWER STATION

**Summary.** A synthetic analysis of kind, causes and results of failures of the BB-1150 boilers of the power units of 360 MW for brown coal carried out from the beginning of the operation of the Bełchatów Power Station has been presented. Some probability distributions of the occurrence of service life  $\tau_d$ , failure  $\tau_a$ , routine repairs  $\tau_{RB}$ , and inter-repair life  $\tau_{RB}$  of the boilers and their most defective elements: feedheaters, radiant tubes of boilers proper, superheaters, grates and slag traps have been identified.

### STATISTISCHE ANALYSE DER VERFÜGBARKEIT UND LAUFENDER REPARATUREN VON BB-1150 KESSEL IM KRAFTWERK BEŁCHATÓW

**Zusammenfassung.** Man hat synthetische Analyse der Arten, Ursachen und Havariefolgen der Kessel BB-1150 der Kraftwerksblöcke 360 MW für Braunkohle dargestellt, die vom Anfang des Betriebes im Kraftwerk Bełchatów durchgeführt wird. Man hat manche Wahrscheinlichkeitsverteilungen des Vorkommens der Arbeitszeiten  $\tau_d$ , der Havarie  $\tau_a$ , der laufenden Reparaturen  $\tau_{RB}$  und der

Zwischenreparaturzeiten  $\tau_{RB}$  der Kessel und ihrer unsichersten Elemente identifiziert: Wasservorwärmer, Kühlschirmrohren, Dämpfer, Überhitzer Roste und Schlackenfänge.

## 1. WSTĘP

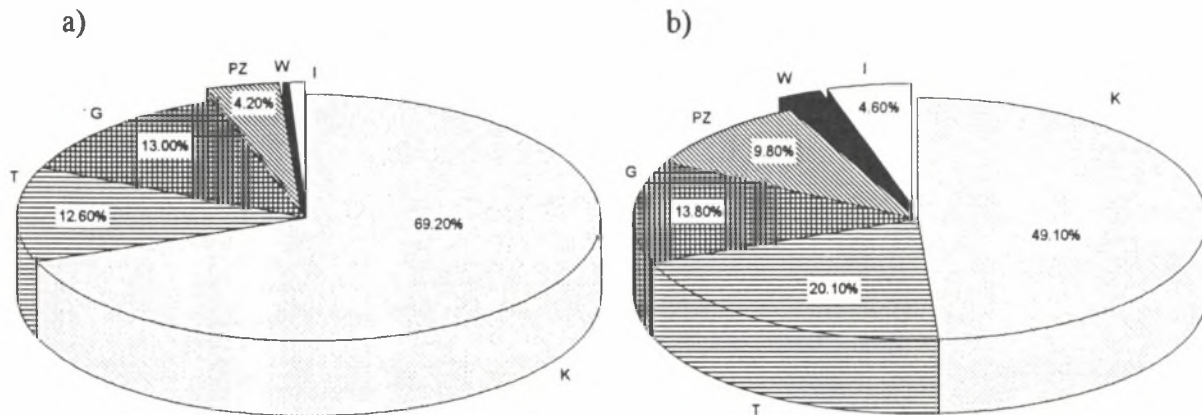
Od uruchomienia w Elektrowni Bełchatów w 1982 roku pierwszego bloku energetycznego 360 MW w Instytucie Elektroenergetyki Politechniki Łódzkiej gromadzone są w komputerowej bazie danych informacje o awaryjności urządzeń bloków. Rejestrowane są momenty uszkodzeń i napraw urządzeń, ustalone ich fizyczne przyczyny, a zbiory danych statystycznych w kolejnych latach pracy elektrowni są systematycznie uzupełniane i weryfikowane. Do końca 1993 roku zebrano materiał statystyczny, dotyczący ponad 1200 przypadków wyłączeń awaryjnych bloków. Dane te potwierdzają powszechnie panującą wśród energetyków opinię, że decydujący wpływ na dyspozycyjność czasową elektrowni ma awaryjność kotłów.

Dla celów prognozowania stanów eksploatacyjnych dokonano dekompozycji układów technologicznych oraz opracowano klasyfikację awarii i remontów bieżących. Prowadzone od lat badania dowiodły, że większość remontów bieżących urządzeń podlega procesom stochastycznym, dzięki czemu stało się możliwe prognozowanie czasów pracy pomiędzy kolejnymi remontami i czasów trwania remontów między innymi najbardziej zawodnych elementów kotła. Pewnym ograniczeniem okazała się zbyt mała jak dotychczas dla niektórych elementów licznosc populacji badanych zjawisk.

## 2. STATYSTYKA NIEZAWODNOŚCI PRACY KOTŁÓW

Głównym źródłem informacji o awaryjności urządzeń wytwórczych są protokoły awaryjności, zawierające opis i analizę zaistniałego uszkodzenia. Na podstawie danych dotyczących awarii w układach technologicznych bloków elektrowni prowadzona jest wszechstronna analiza awaryjności urządzeń. Statystykę zakłóceń w pracy głównych urządzeń bloków przedstawiono w ujęciu czasowym i ilościowym na rys. 1. Z rysunku wynika, że zarówno liczba, jak i czas trwania wyłączeń awaryjnych są zdecydowanie najdłuższe w przypadku kotła. Kocioł BB-1150 składa się w przeważającej części z rurowych wymienników ciepła, które poddawane są w wysokiej temperaturze naprężeniom mechanicznym, a także chemicznym i fizycznym oddziaływaniom spalin, pary i wody. Czynniki te powodują, że rury powierzchni ogrzewalnych wykazują zdecydowanie największą awaryjność.

Ustalono, że najczęściej ulegają uszkodzeniom przegrzewacze pary, których awarie powodują wyłączenia kotłów w 32% przypadków i rury parowników,

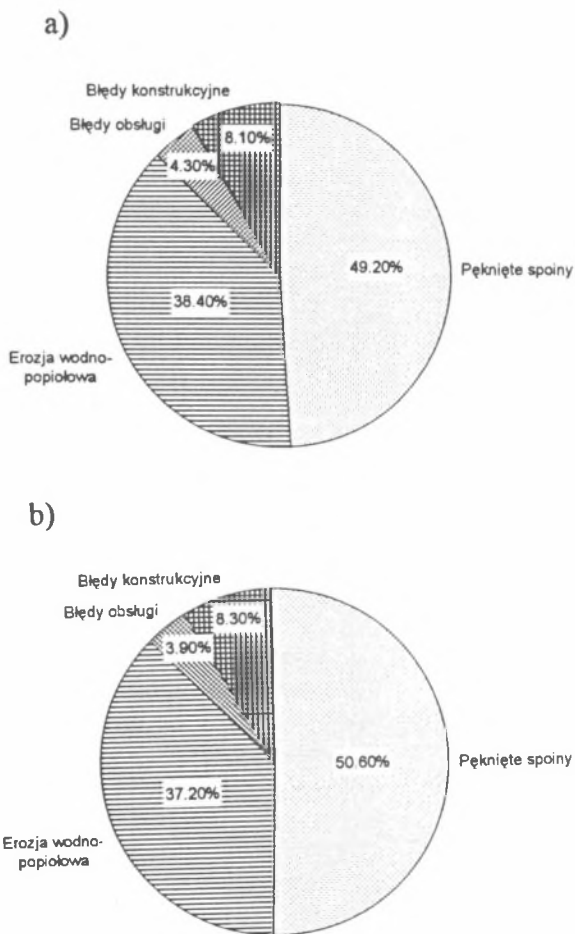


Rys. 1. Procentowy udział wyłączeń bloków 360 MW w zależności od miejsca awarii w ujęciu: a) czasowym, b) ilościowym. Objaśnienia: K – kocioł i przynależne mu urządzenia pomocnicze, T – turbina i przynależne jej urządzenia pomocnicze, G – generator i przynależne mu urządzenia pomocnicze, PZ – układ pomp wody zasilającej, W – układ pomp wody chłodzącej i pomp wody ruchowej, I – inne (w tym awarie urządzeń elektrycznych)

Fig. 1. Percentage portion of shut-downs of power units of 360 MW depending on the place of failure with reference to a) time, b) quantity. Explanations: K – boiler and its auxiliary installations, T – turbine and its auxiliary installations, G – generator and its auxiliary installations, PZ – system of feed water pumps, W – system of cooling water and working water pumps, I – others (including failures of electrical equipment)

które są przyczyną 29% ogólnej liczby wyłączeń. Czasy napraw tych elementów są długie, co sprawia, że postoje z powodu uszkodzeń przegrzewaczy i parowników stanowią łącznie ok. 77% całkowitego czasu postojów awaryjnych kotłów. Stanowi to jednocześnie ok. 53% czasu awaryjnych postojów bloków.

Uszkodzenia powierzchni ogrzewalnych wynikają z akumulacji wpływów kilku przyczyn bezpośrednich – interakcji zjawisk fizycznych i chemicznych,

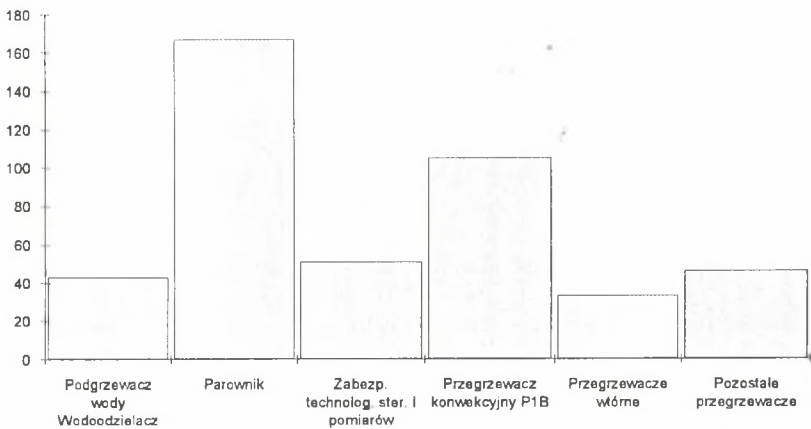


Rys. 2. Statystyka przyczynowa uszkodzeń: a) przegrzewaczy pary, b) rur ekranowych parowników

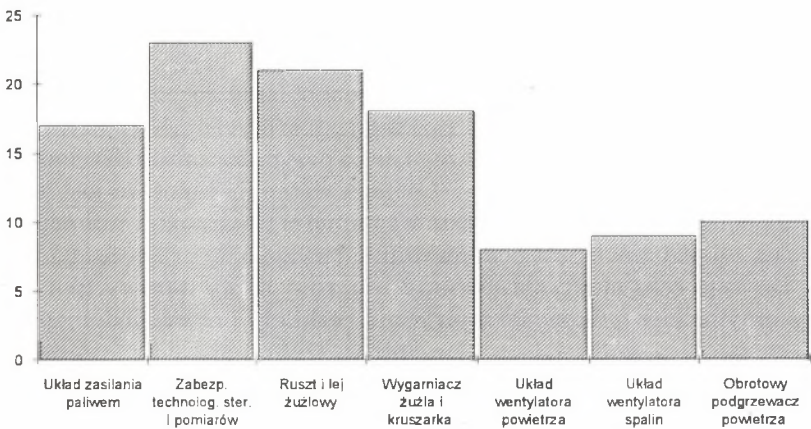
Fig. 2. Cause statistics of failures of: a) superheaters, b) radiant tubes of boilers proper

których najbardziej widocznym skutkiem jest erozja wodno–popiołowa. W statystyce ujęte są także przyczyny pośrednie, związane z działalnością ludzką. Należą do nich: uchybienia projektowo–konstrukcyjne, usterki technologiczne

a)



b)



Rys. 3. Statystyka wyłączeń awaryjnych kotłów BB–1150 od początku eksploatacji elektrowni do końca 1993 roku w zależności od miejsca wystąpienia awarii: a) układ wodno–pompowy, b) układ paliwo–powietrze–spaliny

Fig. 3. Statistics of emergency shut–downs of the BB–1150 boilers from the beginning of the operation of the power station until the end of 1993 depending on the place of failure: a) water–steam system, b) fuel–air–flue gas system



(np. wadliwe spoiny fabryczne, montażowe i remontowe, wady fabrykacyjne), pomyłki personelu eksploatacji i nadzoru elektrowni. Na rys. 2 przedstawiono statystykę uszkodzeń przegrzewaczy pary i rur ekranowych parownika kotła BB-1150 w ujęciu przyczynowym.

Należy podkreślić stosunkowo niewielką liczbę uszkodzeń spowodowanych błędami personelu eksploatacyjnego. Zdecydowana większość tych przypadków miała miejsce w początkowym okresie pracy elektrowni, natomiast w ostatnich latach awarie z tego powodu występują sporadycznie.

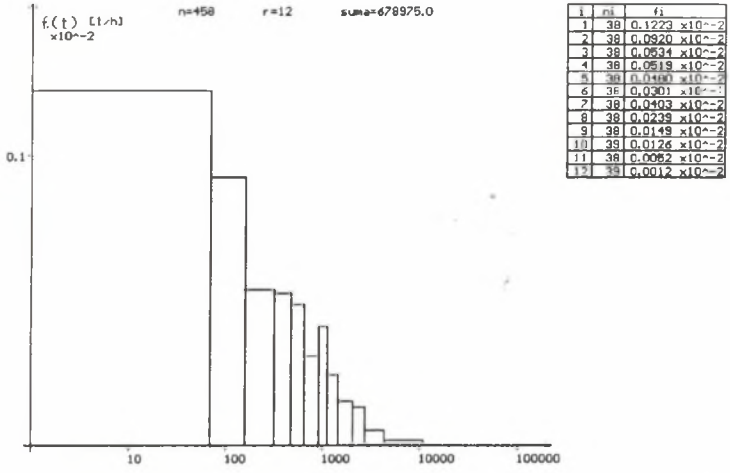
### 3. ROZKŁADY PRAWDOPODOBIENSTW CZASÓW: PRACY, AWARII, REMONTÓW BIEŻĄCYCH ORAZ CZASÓW MIĘDZYREMONTOWYCH WYBRANYCH ELEMENTÓW KOTŁA

Jednorodność konstrukcyjna bloków 360 MW zainstalowanych w elektrowni Bełchatów oraz fakt, że pracują one w zbliżonych warunkach obciążeń, umożliwia przypisanie zaistniałych przypadków uszkodzeń jednemu modelowemu blokowi. Przyjęcie takiej koncepcji pozwoliło ustalić odpowiednio liczne populacje badanych cech  $\tau_d$ ,  $\tau_a$ ,  $\tau_{RB}$  i  $\tau_{RB}''$  nie tylko dla bloku, ale także jego głównych urządzeń wytwórczych i znaczących elementów. Przy ustalaniu populacji pominięto przypadki incydentalnych awarii zaistniałych w początkowym okresie eksploatacji elektrowni. W szczególności dotyczy to bloków nr 1 i 2 w pierwszych trzech latach eksploatacji.

Autorzy badają corocznie histogramy o założonej liczbie realizacji w klasach. Empiryczna funkcja gęstości prawdopodobieństwa porównywana jest z kształtem funkcji gęstości różnych rozkładów teoretycznych, po czym dokonuje się wyboru subiektywnie najlepszego, jako przypuszczalnie odwzorowującego badaną zmienną losową. Tak postawiona wstępnie hipoteza jest weryfikowana za pomocą statystycznych testów zgodności (Pearsona i Kołmogorowa) i dopiero na tej podstawie jest podejmowana decyzja o jej przyjęciu bądź odrzuceniu. Do tego celu służy opracowany program komputerowy, pozwalający między innymi identyfikować empiryczne rozkłady prawdopodobieństw czasów  $\tau_d$ ,  $\tau_a$ ,  $\tau_{RB}$  i  $\tau_{RB}''$  kotła i jego elementów. Obliczenia wykonywane są na standardowym poziomie istotności  $\alpha = 0,05$ .

We wszystkich analizowanych stanach przyjęto jednolity system oznaczeń wielkości:  $i$  – wskaźnik iteracji,  $n$  – licznosc próbki,  $r$  – liczba klas, 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)

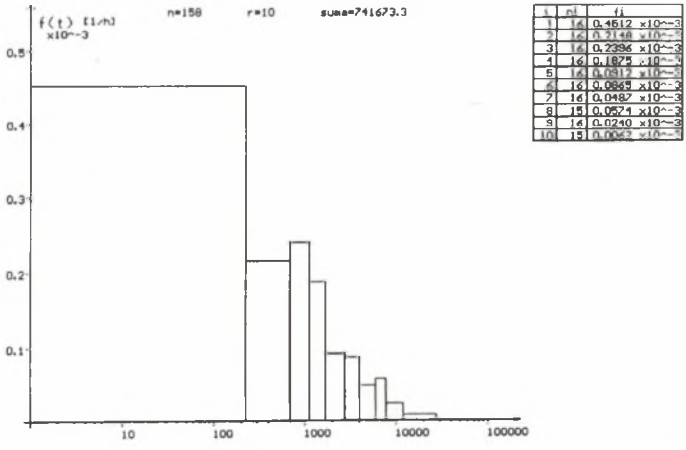


TESTOWANIE HIPOTEZY O ROZKŁADZIE WEIBULLA: a = 1345.38, b = 0.828

**Test Pearsona**  
 $\chi^2 = 10.337$ ,  $\chi_{\alpha}^2 = 16.919$

**Test Kolmogorowa**  
 $\lambda = 0.442$ ,  $\lambda_{\alpha} = 1.358$

b)



TESTOWANIE HIPOTEZY O ROZKŁADZIE WEIBULLA: a = 4205.05, b = 0.816

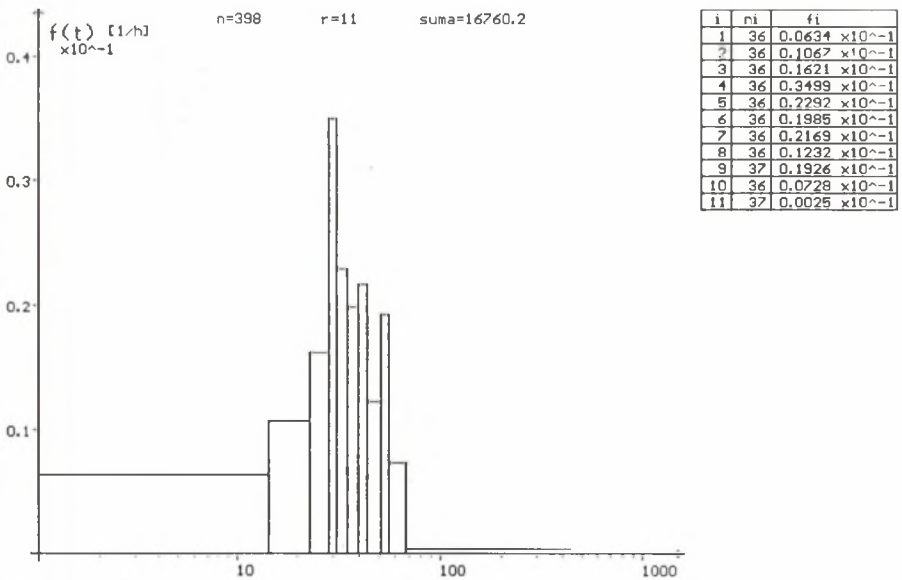
**Test Pearsona**  
 $\chi^2 = 5.891$ ,  $\chi_{\alpha}^2 = 14.067$

**Test Kolmogorowa**  
 $\lambda = 0.395$ ,  $\lambda_{\alpha} = 1.358$

Rys. 4. Gęstość prawdopodobieństwa czasów międzyawaryjnych: a) kocioł – rozkład Weibulla, b) parownik – rozkład Weibulla

Fig. 4. Probability density of service life times: a) boiler – Weibull's distribution, b) boiler proper – Weibull's distribution

Rozkłady czasów międzyawaryjnych dla kotła i jego elementów (podgrzewaczy wody, rur ekranowych parowników, przegrzewaczy pary, rusztów i odzuzłaczy) zidentyfikowano jako rozkłady Weibulla z parametrem  $b < 1$  (rys. 4). W stanach awaryjnych kotła stwierdzono silną zależność czasu likwidacji zakłóceń od przyczyny jego powstania. Średnie czasy trwałych awarii wyraźnie odbiegają od wartości czasów dla pozostałych wyłączeń i wynoszą odpowiednio 41 h i 1,2 h. Wnioskować należy o przynależności czasów awarii  $\tau_a$  do dwóch statystycznie różnych populacji i wynikającej stąd konieczności odrębnego badania rozkładów. Zarówno dla kotła, jak i jego wybranych powierzchni ogrzewalnych rozkłady  $\tau_a$  trwałych awarii mają dość złożoną postać i wymagają dalszych badań (rys. 5). Charakterystyczne dla tych rozkładów jest występowanie dwóch przedziałów czasowych o wysokim prawdopodobieństwie ich zaistnienia. W pierwszym przedziale znajdują się awarie o czasach trwania około 30 h, w drugim – awarie o czasach rzędu  $(40 \div 60)$  h. Jest to związane z zakresem występujących w praktyce nieszczelności. Awarie o innych czasach trwania nie mają związku z uszkodzeniami powierzchni ogrzewalnych kotła bądź też zachodzą procesy superpozycji uszkodzeń kilku elementów.



Rys. 5. Gęstość prawdopodobieństwa czasów długotrwałych awarii kotła. Rozkład niezidentyfikowany

Fig. 5. Probability density of times of prolonged failures of the boiler. Unidentified distribution



Badane są także rozkłady prawdopodobieństw czasów trwania remontów bieżących oraz czasów pomiędzy kolejnymi remontami bieżącymi dla niektórych elementów kotła. Stało się to możliwe dzięki udostępnieniu przez służby kontroli eksploatacji materiałów statystycznych dotyczących zakresów remontów bieżących, przeprowadzonych na blokach 360 MW od początku eksploatacji elektrowni. Pominięto trzy pierwsze lata eksploatacji (1982, 1983 i 1984), gdyż uznano, że dane z tego okresu, ze względu na znaczną intensywność występowania badanych zjawisk (związanych z tzw. okresem oswojania elektrowni), mogą zniekształcać wyniki analizy. Większość prowadzonych wówczas remontów wynikała bowiem z uchybień projektowych i konstrukcyjnych oraz błędów montażowych urządzeń.

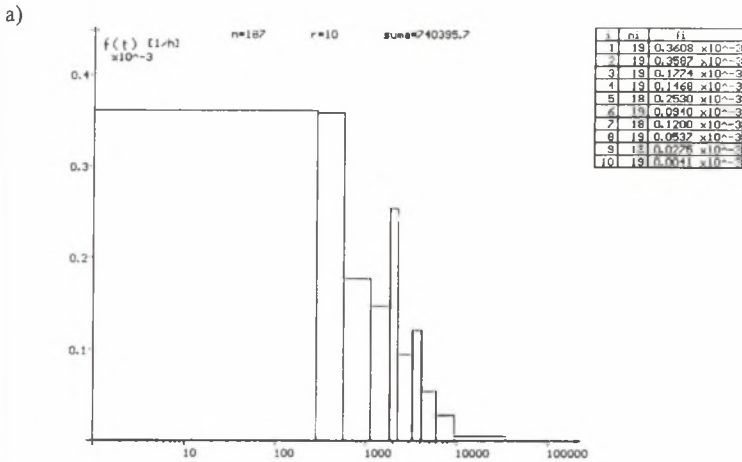
Ustalone populacje danych umożliwiły zbadanie rozkładów czasów międzyremontowych i czasów napraw dla podgrzewaczy wody, parowników, rur wieszakowych wewnętrznych, podgrzewaczy konwekcyjnych P1B, rusztów i odzūżlaczy. Przykładowe wyniki badań przedstawiono na rys. 6. Uzyskane postacie rozkładów wskazują na występowanie (podobnie jak przy awariach) dwóch wyróżniających się czasów trwania remontów bieżących.

W tabelicy 1 zamieszczono wyniki prognoz remontów bieżących istotnych elementów kotła. Wyniki jednoznacznie wskazują na parownik jako najczęściej odnawiany element. Średni czas trwania remontu wynosi w jego przypadku około 40 h, co przy przewidywanej liczbie remontów w ciągu roku 1,53 daje łączny czas trwania prac remontowych około 62 h. Przewidywany czas międzyremontowy jest w tym przypadku najkrótszy ze wszystkich badanych elementów i wynosi 3900 h.

Tablica 1

## Prognozy remontów bieżących elementów kotłów

Element	Intensywność remontów, l/a	Średni czas remontu bieżącego, h	Łączny czas remontów bieżących, h/a	Średni czas pomiędzy remontami, h
Podgrzewacz wody	0,49	35,5	17,4	12400
Parownik	1,53	40,4	61,8	3900
Rury wieszakowe wewnętrzne	0,60	35,1	21,1	10200
Przegrzewacz konwekcyjny P1B	0,62	39,8	24,7	10100
Ruszt i odzūżlacz	0,56	35,5	19,9	10700



TESTOWANIE HIPOTEZY O ROZKŁADZIE WEIBULLA:  $a = 3637,63$   $b = 0.856$

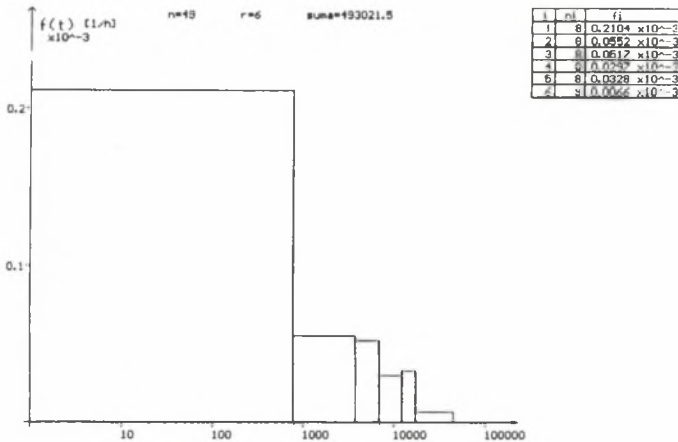
Test Pearsona

$$\chi^2 = 12.509, \chi_\alpha^2 = 14,067$$

Test Kolmogorowa

$$\lambda = 0.430, \lambda_\alpha = 1.358$$

b)



TESTOWANIE HIPOTEZY O ROZKŁADZIE WEIBULLA:  $a = 9335.86$   $b = 0.853$

Test Pearsona

$$\chi^2 = 5.025, \chi_\alpha^2 = 7.815$$

Test Kolmogorowa

$$\lambda = 0.466, \lambda_\alpha = 1.358$$

Rys. 6. Gęstość prawdopodobieństwa czasów międzyremontowych: a) parownik – rozkład Weibulla, b) przegrzewacz konwekcyjny P1B – rozkład Weibulla

Fig. 6. Probability density of inter-repair times: a) boiler proper – Weibull's distribution, b) P1B convection superheater – Weibull's distribution

#### 4. PODSUMOWANIE

Przedstawiona statystyka awarii wskazuje, że najpoważniejszym źródłem zakłóceń obniżających dyspozycyjność bloków 360 MW na węgiel brunatny jest kocioł BB-1150. Zatem celowe jest, aby w obrębie tego urządzenia poszukiwać możliwości zmniejszenia liczby wyłączeń awaryjnych poprzez odpowiednie sterowanie gospodarką remontową, co powinno doprowadzić do wzrostu trwałości eksploatacyjnej najbardziej zawodnych elementów. Prowadzone na bieżąco badania statystyczne umożliwiają identyfikację rozkładów prawdopodobieństw czasów remontów bieżących wybranych elementów kotła. Z opisów zakresów wykonywanych remontów bieżących można także wnioskować, czy remont danego elementu (poza przeglądem i usunięciem pewnej liczby usterek) był konieczny jako planowy. Dotychczasowe ustalenia wskazują, że częstość występowania i zakres wielu remontów bieżących należy traktować jako wielkości stochastyczne.

#### LITERATURA

- [1] Pawlik M., Skierski J., Sobczyk F.: Ocena i prognozowanie niezawodności dużych bloków energetycznych. *Archiwum Energetyki* 1989, nr 3, ss. 117–127.
- [2] Bilkowski E., Gieras M., Skierski J.: Prognoza niezawodności urządzeń wytwórczych Elektrowni Bełchatów. *Energetyka* 1993, nr 7, ss. 225–231.
- [3] Oziemski A., Pawlik M., Skierski J.: Prognoza niezawodności bloków energetycznych 360 MW na węgiel brunatny i ich wybranych elementów. *Drugie Seminarium Naukowe nt. Planowanie i eksploatacja systemów zaopatrzenia w energię, Gdańsk* 1994, ss. 89–100.
- [4] Buchta J., Oziemski A., Skierski J.: Modelowanie niezawodności urządzeń wytwórczych dużej mocy. *III Sympozjum nt. Metody matematyczne w elektroenergetyce, Zakopane* 1993, tom I, ss. 27–32.
- [5] Bilkowski E., Gieras M., Oziemski A., Skierski J.: Badania prognostyczne urządzeń i układów technologicznych bloków 360 MW Elektrowni Bełchatów. *Konferencja Naukowo-Techniczna nt. Potrzeby własne elektrowni, eksploatacja-remonty, Słok* 1993, ss. 195–202.
- [6] Dobosiewicz J.: Niezawodność powierzchni ogrzewalnych w kotłach typu OP-380k i OP-650k. *Energetyka* 1976, nr 4, ss. 118–122.

- [7] Praca zbiorowa: Wieloletnie opracowanie komputerowych analiz i prognoz niezawodności, dyspozycyjność i awaryjność bloków 360 MW w Elektrowni Bełchatów dla potrzeb kontroli eksploatacji i racjonalizacji gospodarki remontowej. Instytut Elektroenergetyki Politechniki Łódzkiej. Coroczne raporty od 1982 do 1993.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Tadeusz CHMIELNIAK

Wpłynęło do Redakcji 8.08.1994 r.

### **Abstract**

Since the first power unit of 360 MW was set working in the Bełchatów Power Station in 1982, information on the failure frequency of the power unit installation has been collected in the computer data base at the Institute of Electrical Power Engineering of the Technical University of Łódź. The times of failures and installation repairs are recorded, their physical causes determined, and the statistical data files of the successive years of the power station operation are systematically complemented and verified. By the end of 1993 statistical material concerning over 1200 cases of presented indicates that the BB-1150 boiler is the most serious source of disturbances reducing the availability of 360 MW power units for brown coal. Thus, it is purposeful to make an attempt to reduce the number of emergency shut-down within this plant through adequate control of repair management, which should lead to an increase in the service life of the most defective elements.

In order to forecast operational states, the technological unit were disassembled and classifications of failures and routine repairs have been carried out. The investigations carried out for a number of years have proved that most of the routine repairs of the plants undergo stochastic processes, which allowed forecasting the service life between successive repairs and the duration of repairs of, among others, the most defective boiler elements. The population size of the phenomena under study is too small for some elements and has proved to be a certain limitation.

Some probability distributions of the occurrence of service life failure, routine repairs, and inter-repair life of the boilers and their most defective elements: feedheaters, radiant tubes of boilers proper, superheaters, grates and slag traps have been identified.