

OZIEMSKI Andrzej¹
SIKORA Roman²

KOMPUTEROWY SYSTEM WSPOMAGANIA OCENY NIEZAWODNOŚCI BLOKÓW ENERGETYCZNYCH

W referacie omówiono syntetycznie stosowane w praktyce eksploatacyjnej metody wyznaczania wskaźników niezawodności, dyspozycyjności i awaryjności bloków energetycznych. Na tym tle dokonano prezentacji opracowanego w Instytucie Elektroenergetyki Politechniki Łódzkiej programu komputerowego, utworzonego w oparciu o aplikację MS Access, służącego do oceny wskaźników niezawodnościowych bloków 370 MW zainstalowanych w największej w kraju i Europie elektrowni blokowej opalanej węglem brunatnym – Elektrowni Bełchatów, wchodzącej w skład koncernu PGE Górnictwo i Energetyka Konwencjonalna S.A. Ocenę przeprowadzono w oparciu o zgromadzone w komputerowej bazie danych populacje zdarzeń eksploatacyjnych, zaistniałych na wszystkich dwunastu blokach elektrowni od początku ich eksploatacji do końca 2010 r.

COMPUTER AIDED SYSTEM FOR ESTIMATION OF POWER UNIT RELIABILITY

W paper presents methods of estimation of power units reliability, availability and failure frequency used in operational practice. With use of MS Access environment, the computer program has been worked out in Institute of Electrical Power Engineering at Technical University of Lodz and intended for 370 MW rated power units installed in the largest lignite fired power plant in Europe, i.e. in Belchatow Power Plant. The reliability study has been done with use of the computer database containing failure files for the dozen of power units and covering the period since power plant commissioning till 2010.

1. WSTĘP

Ocena wskaźników niezawodnościowych bloków energetycznych prowadzona jest od wielu lat praktycznie we wszystkich przemysłowo rozwiniętych krajach, a jej wyniki są wykorzystywane zarówno na etapie eksploatacji (racjonalizacja gospodarki remontowej

¹ Politechnika Łódzka, Wydział Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki i Automatyki,
Instytut Elektroenergetyki, 90-924 Łódź, ul. Stefanowskiego 18/22.

Tel: + 48 42 631-25-98, Fax: + 48 42 631-26-06, E-mail: andrzej.ozieski@p.lodz.pl

² Politechnika Łódzka, Wydział Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki i Automatyki,
Instytut Elektroenergetyki, 90-924 Łódź, ul. Stefanowskiego 18/22.

Tel: + 48 42 631-25-95, Fax: + 48 42 631-26-06, E-mail: roman.sikora@p.lodz.pl

i materiałowej, ustalanie programów modernizacji urządzeń, formułowanie wymagań jakościowych wobec dostawców urządzeń), jak i projektowania (określanie normatywnych poziomów niezawodności odrębnych węzłów technologicznych i urządzeń bloków, programowanie i optymalizacja poziomu niezawodności bloków, wybór optymalnego – ze względu na minimum sumarycznych kosztów – wariantu rozwiązania).

Zasadnicze urządzenia bloku (tzn. kocioł, turbina, generator) są pojedyncze, natomiast urządzenia pomocnicze (np. wentylatory ciągu i podmuchu, młyny węglowe, pompy zasilające, pompy kondensatu, pompy wody chłodzącej, urządzenia odpowielające itd.), w celu zwiększenia niezawodności pracy, posiadają rezerwę jawną lub utajoną (tzw. nadmiar strukturalny). Bezpośrednio ze sposobu rozłożenia i rezerwowania urządzeń pomocniczych wynika możliwość występowania w obrębie bloku kilku odmiennych stanów, tzn. blok może posiadać pełną zdolność wytwórczą, pracować z ograniczeniami mocy różnego stopnia, bądź być całkowicie wyłączony z ruchu.

Powyższe fakty świadczą jednoznacznie, że pod względem niezawodności blok energetyczny jest urządzeniem wielostanowym – w przeciwieństwie do zdecydowanej większości elementów układów przesyłu i rozdziału energii elektrycznej, charakteryzujących się dwustanowością pracy (tzn. znajdujących się w stanie zdatności bądź całkowitego uszkodzenia). W konsekwencji sprawia to, że do analizy niezawodności bloków energetycznych wykorzystuje się na ogół procesy Markowa lub bardziej złożone Semi-Markowa, stanowiące ich adekwatny model probabilistyczny.

Analityczne metody oceny niezawodności bloków bazujące na procesach Markowa, w których wskaźniki niezawodnościowe całej jednostki określa się na podstawie znanych parametrów niezawodnościowych poszczególnych układów i elementów bloku, posiadają jednak istotny mankament, jakim jest brak wystarczająco wiarygodnej liczby populacji zdarzeń dla większości z rozpatrywanych elementów. Dlatego też w praktyce eksploatacyjnej wskaźniki niezawodnościowe bloków wyznacza się najczęściej korzystając z łącznej populacji badanych zjawisk w obrębie danego bloku.

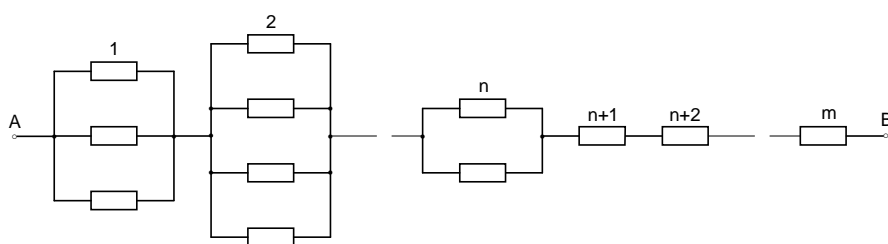
2. MATEMATYCZNE PODSTAWY OCENY NIEZAWODNOŚCI BLOKÓW ENERGETYCZNYCH

Analizę niezawodności pracy złożonych układów przeprowadza się na ogół przy wykorzystaniu schematów niezawodnościowych o strukturze zwykle znacznie różniącej się od struktury funkcjonalnej układu. Schemat struktury niezawodnościowej ma bowiem na celu odwzorowanie wpływu dowolnego elementu na niezawodność pracy całego układu. Struktury niezawodnościowe wyposażenia elektrowni są typu mieszanego, jednak ze zdecydowaną przewagą liczebną szeregowych połączeń elementów.

Ogólnie dla struktury niezawodnościowej bloku obejmującej $1, 2, \dots, n$ elementów wielokrotnych (mogących się znaleźć w stanie ograniczonej możliwości działania) oraz $n+1, \dots, m$ elementów pojedynczych (rys. 1), wypadkowy wskaźnik niezawodności, będący miarą prawdopodobieństwa zdatności do pracy całego bloku, wynosi:

$$P_{bl} = \prod_{i=1}^m p_i \quad (1)$$

Z zależności (1) można wnioskować, że zawadność jednego z elementarnych urządzeń powoduje niezdatność do pracy całego zgrupowania, co unaocznia, jak duże znaczenie dla niezawadności pracy bloku i elektrowni mają pozornie drugorzędne układy i urządzenia pomocnicze (np. układ odpowielania, pompy olejowe). Drugim istotnym wnioskiem wynikającym z tego wzoru jest fakt proporcjonalnej zależności niezawadności szeregowego zgrupowania elementów od ich liczby, co w praktyce oznacza, że im mniejsza jest liczba elementów przewidzianych do realizacji określonych funkcji, tym jest to korzystniejsze z punktu widzenia niezawadności całego obiektu, gdyż układy o prostszych strukturach cechuje większa niezawadność.



Rys.1. Ogólna struktura niezawadnościowa bloku energetycznego

W przypadku współpracy równoległej urządzeń istnieje wiele możliwych kombinacji stanów układu. Na przykład prawdopodobieństwo awarii dowolnych k urządzeń o takich samych wskaźnikach, przy równoczesnej zdadności do pracy pozostałych urządzeń, określa wzór Bernoulliego (2):

$$q_{ak} = \frac{m!}{k!(m-k)!} \cdot q_a^k \cdot p^{m-k} \quad (2)$$

Można wykazać, że prawdopodobieństwo awarii wszystkich m elementów połączonych równoległe (3) maleje w m -tej potędze wraz ze wzrostem ich liczby, zaś koszty budowy układu wzrastają proporcjonalnie (4).

$$q_{am} = q_a^m \quad (3)$$

$$K_m = m \cdot K \quad (4)$$

Dlatego struktury równoległe stosuje się dla tych elementów układu, które cechuje relatywnie niska trwałość (np. młyny węglowe) lub których odstawienie grozi zniszczeniem innych ważnych elementów bloku.

Niezawadność bloku można określić również korzystając z badań statystycznych. Możliwość dokonywania porównań pod względem niezawadnościowym podobnych obiektów energetycznych eksploatowanych na świecie, umożliwiają wówczas algorytmy

opracowane przez Ośrodek North American Electric Reliability Council w systemie Generating Availability Data System (GADS). W kraju, uzyskane w ten sposób niezawodnościowe wskaźniki eksploatacyjne są przekazywane przez poszczególne elektrownie do Agencji Rynku Energii S.A. (ARE S.A.) w Warszawie, gdzie są archiwizowane a następnie wykorzystywane do kompleksowej oceny pracy Krajowego Systemu Elektroenergetycznego (KSE) i ustalania planów jego rozwoju. W energetyce jest powszechnie używany wskaźnik dyspozycyjności czasowej d_t (Availability Factor – AF), zdefiniowany następująco (5):

$$d_t = \frac{\tau_d}{\tau} = \frac{\tau_{dp} + \tau_{dr}}{\tau} = \frac{\tau - \tau_{nd}}{\tau} = \frac{\tau - (\tau_{np} + \tau_{na})}{\tau} = 1 - r_p - r_a \quad (5)$$

gdzie: τ_d – sumaryczny za okres τ czas pozostawania obiektu w stanie dyspozycyjności (gotowości do pracy);

τ_{dp} – sumaryczny za okres τ czas pracy;

τ_{dr} – sumaryczny za okres τ czas postojów w rezerwie;

τ_{nd} – sumaryczny za okres τ czas niedyspozycyjności;

τ_{np} – sumaryczny za okres τ czas postojów w remontach planowych (kapitałnym, średnim i bieżącym);

τ_{na} – sumaryczny za okres τ czas postojów awaryjnych;

$r_p = \frac{\tau_{np}}{\tau}$ – wskaźnik postojów w remontach planowych;

$r_a = \frac{\tau_{na}}{\tau}$ – wskaźnik postojów awaryjnych.

Powyższy wskaźnik jest przydatny tylko do oceny wyników eksploatacji elektrowni za dłuższy okres czasu. Do bieżącej kontroli służą natomiast nieco inaczej zdefiniowane wskaźniki, wyznaczone przy założeniu, że proces eksploatacji elektrowni jest procesem stochastycznym, zaś takie wielkości, jak τ_{dp} , τ_{na} , τ_{np} są zmiennymi losowymi.

W najprostszym dwustanowym (praca – awaria) modelu matematycznym procesu eksploatacji urządzenia prawdopodobieństwo, że w dowolnej chwili t będzie ono w stanie pracy, określa wzór (6):

$$p(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \cdot \exp[-(\lambda + \mu) \cdot t] \quad (6)$$

gdzie: $\lambda = \frac{1}{E(\tau_{dp})}$ – intensywność awarii;

$\mu = \frac{1}{E(\tau_{na})}$ – intensywność napraw;

$E(\tau_{dp})$ – wartość oczekiwana czasów pracy;

$E(\tau_{na})$ – wartość oczekiwana czasów awarii.

W praktyce wartości $E(\tau_{dp})$ i $E(\tau_{na})$ są szacowane najczęściej za pomocą średnich arytmetycznych, obliczanych na podstawie zgromadzonych danych statystycznych (7) i (8):

$$E(\tau_{dp}) = \lim_{N_a \rightarrow \infty} \frac{1}{N_a} \cdot \sum_{i=1}^{N_a} \tau_{dpi} = \bar{\tau}_{dp} \quad (7)$$

$$E(\tau_{na}) = \lim_{N_a \rightarrow \infty} \frac{1}{N_a} \cdot \sum_{i=1}^{N_a} \tau_{nai} = \bar{\tau}_{na} \quad (8)$$

gdzie: N_a – liczba zaistniałych awarii.

W większości stosowanych modeli matematycznych rozpatruje się zwykle wartość ustaloną prawdopodobieństwa określonego wzorem (6) przy $t \rightarrow \infty$:

$$p = \frac{\mu}{\lambda + \mu} = \frac{\bar{\tau}_{dp}}{\bar{\tau}_{dp} + \bar{\tau}_{na}} \quad (9)$$

gdzie: p – wskaźnik gotowości do pracy.

Jako miarę zawodności pracy elektrowni używa się wtedy wskaźnika awaryjności q_a (Forced Outage Rate – FOR), zdefiniowanego następująco (10):

$$q_a = 1 - p = \frac{\bar{\tau}_{na}}{\bar{\tau}_{dp} + \bar{\tau}_{na}} \quad (10)$$

Z kolei średni czas pracy pomiędzy awariami $\bar{\tau}_{dp}$, średni czas trwania awarii $\bar{\tau}_{na}$ oraz intensywność występowania awarii λ wyznacza się odpowiednio z zależności (11), (12) i (13):

$$\bar{\tau}_{dp} = \frac{\sum_{i=1}^{N_a} \tau_{dpi}}{N_a} \quad (11)$$

$$\bar{\tau}_{na} = \frac{\sum_{i=1}^{N_a} \tau_{nai}}{N_a} \quad (12)$$

$$\lambda = \frac{1}{\bar{\tau}_{dp}} \quad (13)$$

gdzie: N_a – liczba zaistniałych za okres τ awarii,

3. CHARAKTERYSTYKA ZBUDOWANEGO PROGRAMU KOMPUTEROWEGO

Podstawowym założeniem przyjętym na etapie projektowania i realizacji omawianego programu było zapewnienie należytego bezpieczeństwa dla archiwizowanych danych statystycznych dotyczących stanów eksploatacyjnych bloków energetycznych. Dane te przechowywane są w utworzonej relacyjnej bazie, co zapewnia odpowiedni poziom redukcji redundancji danych oraz ich integralność i bezpieczeństwo.

Zbudowany program umożliwia kompleksowe przetwarzanie danych statystycznych dotyczących zaistniałych zdarzeń eksploatacyjnych bloków oraz wyznaczanie na tej podstawie ich głównych wskaźników niezawodnościowych. Możliwa jest także szczegółowa ocena niezawodności pracy głównych urządzeń bloków 370 MW oraz młynów węglowych z uwzględnieniem parametrów eksploatacyjnych ich kół bijakowych. Zarówno bieżąca, jak i comiesięczna analiza uzyskanych przez Elektrownię Bełchatów wskaźników na operatywnych naradach kierownictwa, pozwala między innymi na bieżące podejmowanie decyzji odnośnie handlu energią elektryczną i korzystania z przyznanego limitu na emisję CO₂.

Program został wyposażony w rozbudowany, intuicyjny interfejs graficzny, zapewniający użytkownikowi wysoki komfort pracy oraz wydatnie ograniczający możliwość błędnego wprowadzenia danych lub wykonania niepoprawnych operacji.

Ogólny widok formularza umożliwiającego przeglądanie, wprowadzanie i korygowanie zgromadzonych danych przedstawiono na rys. 2.

Urządź.	Data odst.	Data ur	RodzAw	Przekwalifikowanie	Nazwa urządzenia
B	2009-10-03 00:10:00	2009-10-04 22:16:00	B	<input type="checkbox"/>	Blok
B	2009-10-04 22:16:00	2009-10-05 05:01:00	R	<input checked="" type="checkbox"/>	Blok
B	2009-10-24 02:22:00	2009-10-24 16:16:00	A	<input type="checkbox"/>	Blok
B	2009-10-24 16:16:00	2009-10-26 09:02:00	R	<input checked="" type="checkbox"/>	Blok
B	2009-11-20 00:07:00	2009-11-21 08:01:00	B	<input type="checkbox"/>	Blok
B	2009-12-14 00:11:00	2009-12-15 04:31:00	B	<input type="checkbox"/>	Blok
▼	2010-01-17 00:09:00	2010-01-18 04:46:00	B	<input type="checkbox"/>	Blok
* B			R	<input type="checkbox"/>	

Rys.2. Widok formularza służącego do wprowadzania danych

Na rys. 3 i 4 przedstawiono natomiast widok formularzy służących do wprowadzania żądanych kryteriów obliczeń. Trzeba zaznaczyć, że program umożliwia wykonywanie przedmiotowych obliczeń w wielu wariantach (np. dla dowolnie wybranego bloku, dla

wszystkich dwunastu bloków elektrowni lub losowo wybranej grupy bloków) i w dowolnie określonych przedziałach czasowych (np. za dowolnie wybrany rok lub okres kilku kolejnych lat). Takie postępowanie umożliwia wyznaczanie zarówno bieżących wartości wskaźników niezawodnościowych bloków, jak i prześledzenie ich zmienności w kolejnych latach eksploatacji.

a)

b)

c)

d)

Rys.3. Widok formularzy do wprowadzania żądanych kryteriów obliczeń: a) za dowolny okres, b) za dany rok, c) za poszczególne lata, d) porównawczych za wybrane okresy

Rys.4. Widok formularza do wprowadzania żądanych kryteriów w przypadku wykonywania tzw. obliczeń dziennych

Na rys. 5 przedstawiono przykładowo formę prezentacji uzyskanych wyników obliczeń, realizowaną po wyborze wariantu „Zestawienie” (rys. 5a) oraz widok zakładki do prezentacji wyników obliczeń porównawczych za zadane okresy czasu (rys. 5b).

W programie uwzględniono możliwość wszechstronnego przeglądania zgromadzonych danych statystycznych (np. pod kątem poszczególnych rodzajów odstawień) oraz ich wydruku w formie wymaganej przez ARE S.A. Dostępna jest także opcja przesyłania wyników przeprowadzonych obliczeń za pomocą poczty elektronicznej w postaci raportu w formacie PDF, która realizowana jest za pomocą intuicyjnego kreatora.

Wyznaczone przez pracowników Działu Inspekcji Eksploatacji Elektrowni Bełchatów wskaźniki niezawodnościowe bloków 370 MW i ich badanych urządzeń (za pomocą przeznaczonego wyłącznie do tego celu komputera z zainstalowaną główną bazą danych) przesyłane są następnie na serwer zakładowej sieci komputerowej, na którym zainstalowana jest pomocnicza baza danych do ich przechowywania. Z uwagi na poufność i zagwarantowanie bezpieczeństwa zgromadzonym w głównej bazie danym zdecydowano, że w przypadku pracy w sieci będą one udostępniane tylko osobom uprawnionym i to w ograniczonym zakresie (tzn. bez możliwości ingerencji w te dane). W tym celu opracowane zostały dwie oddzielne aplikacje, z których jedna służy wyłącznie do przeglądania danych przesłanych na serwer, natomiast druga, oprócz funkcji przeglądania umożliwia także usuwanie danych z bazy na serwerze.

W programie ograniczono do minimum liczbę operacji koniecznych do przesłania danych na serwer. Użytkownik ma do wyboru tylko dwa przyciski poleceń, odpowiednio o nazwach: „Nowa ścieżka” (umożliwiający wprowadzanie pełnej nazwy ścieżki dostępu do serwera sieciowego na który przesyłane są dane) oraz „Prześlij dane” (umożliwiający automatyczne przesyłanie danych na serwer) (rys. 6). Ponadto przewidziano możliwość graficznej wizualizacji uzyskanych wyników obliczeń i ich wydruk.

a)

Report zestawienie - akcept

Dane za pierwszy okres | Dane za drugi okres | Dane za trzeci okres | Dane za czwarty okres | Dane za okres od początku eksploatacji | Zestawienie | Drukuj wyniki

Dla urządzenia: **B** OD 2009-06-01 00:00 DO 2009-06-30 23:59 Dla bloków: 1 do 12

Blok	Dysp.	Awar.	Czas pracy	Czas awarii	Czas rezerw	Średni czas ruchu	Czas remontów:				Liczba odstawię:				
							bieżących	średnich	kapitałnych	suma post.	planowe	rezerwa	awaryjne	ogółem	
		%	h			h									
1	100,0	0,0	665,5	0,0	54,5	665,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0	1	0	1	
2	100,0	0,0	720,0	0,0	0,0	720,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0	0	0	
3	3,2	0,0	17,2	0,0	6,0	17,2	0,0	696,8	0,0	696,8	1	0	0	1	
4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	720,0	720,0	0	0	0	0	
5	95,9	0,0	666,3	0,0	24,2	333,1	29,5	0,0	0,0	29,5	1	1	0	2	
6	75,7	12,3	463,4	64,7	81,9	154,5	110,0	0,0	0,0	110,0	0	1	2	3	
7	93,1	0,0	612,3	0,0	58,0	204,1	0,0	49,8	0,0	49,8	1	2	0	3	
8	58,8	4,3	407,8	18,5	15,4	407,8	0,0	278,3	0,0	278,3	0	1	0	1	
9	100,0	0,0	635,5	0,0	84,5	317,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0	2	0	2	
10	99,8	0,2	718,7	1,3	0,0	718,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0	1	1	
11	97,6	0,0	654,6	0,0	48,2	327,3	17,3	0,0	0,0	17,3	0	2	0	2	
12	89,0	5,0	600,8	31,9	40,0	300,4	47,3	0,0	0,0	47,3	0	0	2	2	
		76,1	1,9	6162,1	116,3	412,5	342,3	204,1	1024,9	720,0	1948,9	3	10	5	18

Anuluj

b)

Report zestawienie - akcept

Dane za pierwszy okres | Dane za drugi okres | Dane za trzeci okres | Dane za czwarty okres | Dane za okres od początku eksploatacji | Zestawienie | Drukuj wyniki

Elek.	Dysp.	Awar.	Czas pracy	Czas awarii	Czas rezerw	Średni czas ruchu	Czas remontów:				Liczba odstawię:				
							bieżących	średnich	kapitałnych	suma post.	planowe	rezerwa	awaryjne	ogółem	
		%	h			h									
Obliczone wartości dla pierwszego okresu															
		76,1	1,9	6162,1	116,3	412,5	342,3	204,1	1024,9	720,0	1948,9	3	10	5	18
Obliczone wartości dla drugiego okresu															
		82,7	1,5	6966,0	105,5	179,1	302,9	183,9	1158,8	46,5	1389,1	17	4	2	23
Porównanie wartości dla pierwszego i drugiego okresu															
		-6,6	0,4	-804,0	10,8	233,4	39,5	20,1	-133,9	673,5	559,8	-14,0	6,0	3,0	-5,0
Obliczone wartości dla trzeciego okresu															
		83,0	0,9	41394,7	368,5	1893,9	481,3	922,3	4650,4	2898,0	8470,7	21	50	15	86
Obliczone wartości dla drugiego okresu															
		76,1	1,9	6162,1	116,3	412,5	342,3	204,1	1024,9	720,0	1948,9	3	10	5	18
Porównanie wartości dla pierwszego i drugiego okresu															
		0,3	-0,3	-283,7	-138,9	206,5	115,7	-223,5	1422,1	-1270,4	-71,9	-36,0	12,0	-4,0	-28,0

Anuluj

Rys.5. Widok formularzy do prezentacji wyników obliczeń: a) wariant „Zestawienie”, b) porównanie wskaźników niezawodnościowych za zadane okresy czasu

Rys.6. Widok formularza służącego do przesyłania wyników obliczeń na serwer sieciowy, ich wydruku i graficznej prezentacji

4. WNIOSKI

Gromadzone systematycznie od początku eksploatacji dane statystyczne, dotyczące zakłóceń w pracy bloków 370 MW, pozwalają analizować w długim horyzoncie czasowym zmienność ich niezawodnościowych wskaźników eksploatacyjnych oraz określać przyczyny i skutki wadliwej pracy urządzeń.

Uzasadnione ekonomicznie progi (wartości) intensywności występowania awarii mogą być miernikiem trwałości urządzeń, a ich znajomość pomocna w tworzeniu programów modernizacji bloków oraz optymalizacji gospodarki remontowej i materiałowej Elektrowni Bełchatów.

W ujęciu globalnym wskaźniki dyspozycyjności i awaryjności bloków energetycznych elektrowni krajowych mogą służyć do określania niezbędnej rezerwy mocy i sterowania pracą KSE.

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] Gerebach J. B., Kordoński C. B.: *Modele niezawodnościowe obiektów technicznych*, Warszawa, WNT 1968.
- [2] Janiczek R. S.: *Eksploatacja elektrowni parowych*, Warszawa, WNT 1992.
- [3] Oziemski A., Sikora R.: *Modelowanie niezawodności bloków 370 MW zainstalowanych w BOT Elektrownia Bełchatów*, Wiadomości Elektrotechniczne 2006, nr 12, s. 34-38.