

dr inż. Krzysztof Łukaszewski

Katedra Podstaw Techniki
Akademia Morska w Gdyni
Ul. Morska 81-87, 81-225 Gdynia, Polska

E-mail: klukasz@am.gdynia.pl

Adaptacyjne struktury niezawodnościowe powierzchni wymiany ciepła skraplacza turbiny parowej

Słowa kluczowe: *adaptacyjna struktura niezawodnościowa, niezawodność, skraplacz turbiny parowej, projektowanie wymienników ciepła, eksploatacja wymienników ciepła*

Streszczenie: W artykule wykazano adaptację struktur niezawodnościowych powierzchni wymiany ciepła skraplacza turbiny parowej z punktu widzenia efektywnej wymiany ciepła w zmiennych warunkach jego eksploatacji. Następnie, wskazano istotne uwarunkowania projektowo-eksploatacyjne oszacowania niezawodności podsystemu rur skraplacza turbiny parowej. Wykazano wpływ zmian układów rur stanowiących powierzchnię wymiany ciepła, które wynikają ze sposobu regulacji tej powierzchni w celu skroplenia zadanej ilości pary wodnej i utrzymywania zadanej wartości ciśnienia w skraplaczu w zmiennych warunkach jego eksploatacji, na niezawodność podsystemu rur. Powierzchnię wymiany ciepła reguluje się poprzez włączanie i wyłączanie przepływu wody chłodzącej przez zadaną liczbę rur, w określony sposób tzn. poprzez włączanie albo wyłączanie możliwych kombinacji określonych układów rur w zadanych warunkach eksploatacyjnych. Przedstawiono algorytm oszacowania niezawodności podsystemu rur skraplacza względem określonych warunków eksploatacyjnych, sposobu regulacji tej powierzchni i aktualnego stanu technicznego. Niezawodność podsystemu rur ma istotny wpływ na niezawodność skraplacza turbiny parowej w czasie jego eksploatacji, a dalej pośrednio na utrzymywanie wymaganej niezawodności systemu energetycznego, w którym występuje. Efektywne funkcjonowanie skraplacza w technicznym systemie energetycznym jest realizowane poprzez utrzymywanie zadanego stałego ciśnienia skraplania pary wodnej, co jest istotne z punktu widzenia utrzymywania wymaganej sprawności energetycznej technicznego systemu energetycznego w różnych warunkach eksploatacyjnych. Egzemplifikacja zawartych w pracy zagadnień odnosi się do rurowych skraplaczy turbin parowych.

1. Wprowadzenie

Celem artykułu jest wykazanie adaptacji struktur niezawodnościowych powierzchni wymiany ciepła, która wynika ze sposobu regulacji tej powierzchni w celu utrzymywania efektywnego procesu wymiany ciepła poprzez utrzymywanie zadanego ciśnienia skraplania pary wodnej w zmiennych warunkach eksploatacyjnych, co determinuje zmiany układów rur skraplacza i oszacowanie niezawodności jego powierzchni wymiany ciepła.

Adaptacyjnymi strukturami niezawodnościowymi powierzchni wymiany ciepła (podsystemu rur) nazywane są struktury niezawodnościowe, których zmiana następuje w wyniku przystosowania układów rur do aktualnie występujących warunków eksploatacyjnych skraplacza w systemie energetycznym.

Z dokonanego rozpoznania stanu wiedzy z użyciem informatycznych baz danych (Science Direct, Knovel, Nauka Polska, BazTech, google) wynika, że brakuje algorytmu oszacowania niezawodności powierzchni wymiany ciepła skraplacza turbiny parowej z

uwzględnieniem sposobu regulacji tej powierzchni w celu efektywnej wymiany ciepła i utrzymywania pożądanej wartości ciśnienia skraplania się pary wodnej w zmiennych warunkach eksploatacyjnych, co ma istotny wpływ na jakość eksploatacji technicznego systemu energetycznego, w którym określony skraplacz występuje.

W publikacji [10] wykazano, że utrzymywanie określonego ciśnienia skraplania pary wodnej w skraplaczu w różnych warunkach jego eksploatacji jest istotne z punktu widzenia utrzymywania pożądanej wartości sprawności energetycznej technicznego systemu energetycznego. Następnie wskazano na rozwiązanie techniczne, które polega na odpowiednim podziale powierzchni wymiany ciepła skraplacza na etapie jego projektowania (na określoną liczbę części powierzchni nieregulowanej i jedną część o regulowanej powierzchni wymiany ciepła) oraz odpowiednią nastawę tej powierzchni podczas jego eksploatacji. Takie rozwiązanie techniczne umożliwia w czasie eksploatacji skraplacza w siłowni parowej skuteczną regulację przepływu wody chłodzącej skraplacz, tzn. regulację nie tylko zapewniającą określoną wymianę ciepła między płynami ale również uwzględniającą relacje między prędkością przepływu wody chłodzącej a erozją oraz osadzaniem się zanieczyszczeń na powierzchni wymiany ciepła oraz koszty pompowania wody chłodzącej skraplacz.

W publikacjach [2, 8] wykazano wpływ warunków eksploatacyjnych skraplaczy turbin parowych na sprawność energetyczną elektrowni.

Metodę projektowania wymienników ciepła technicznych systemów energetycznych ze względu na wymaganą niezawodność tych systemów zawarto w [12,13]. W metodach projektowania wymienników ciepła, a w tym skraplaczy turbin parowych, które przedstawiono np. w publikacjach [3-5,7,9,12,13,16-18] powierzchnię wymiany ciepła traktuje się jako jeden, nieregulowany twór konstrukcyjny (element).

W publikacji [11] zawarto zagadnienia oszacowań niezawodności wymiennika i wymienników ciepła. Modele struktur niezawodnościowych wymienników ciepła mogą być określane na podstawie znajomości modeli podstawowych struktur niezawodnościowych obiektów technicznych, zawartych m. in. [6, 14].

W literaturze brakuje adaptacyjnych struktur niezawodnościowych powierzchni wymiany ciepła skraplaczy turbin parowych, które wynikają ze sposobu regulacji tych powierzchni w celu utrzymywania zadanych ciśnień skraplania pary wodnej w zmiennych warunkach eksploatacyjnych wynikających z eksploatacji technicznych systemów energetycznych, w których występują.

W nawiązaniu do celu artykułu i dokonanego rozpoznania stanu wiedzy występuje następujący problem: jak utrzymywać pożądaną niezawodność skraplacza turbiny parowej podczas jego eksploatacji do określonego czasu?

2. Struktury niezawodnościowe powierzchni wymiany ciepła skraplacza w procesie projektowania

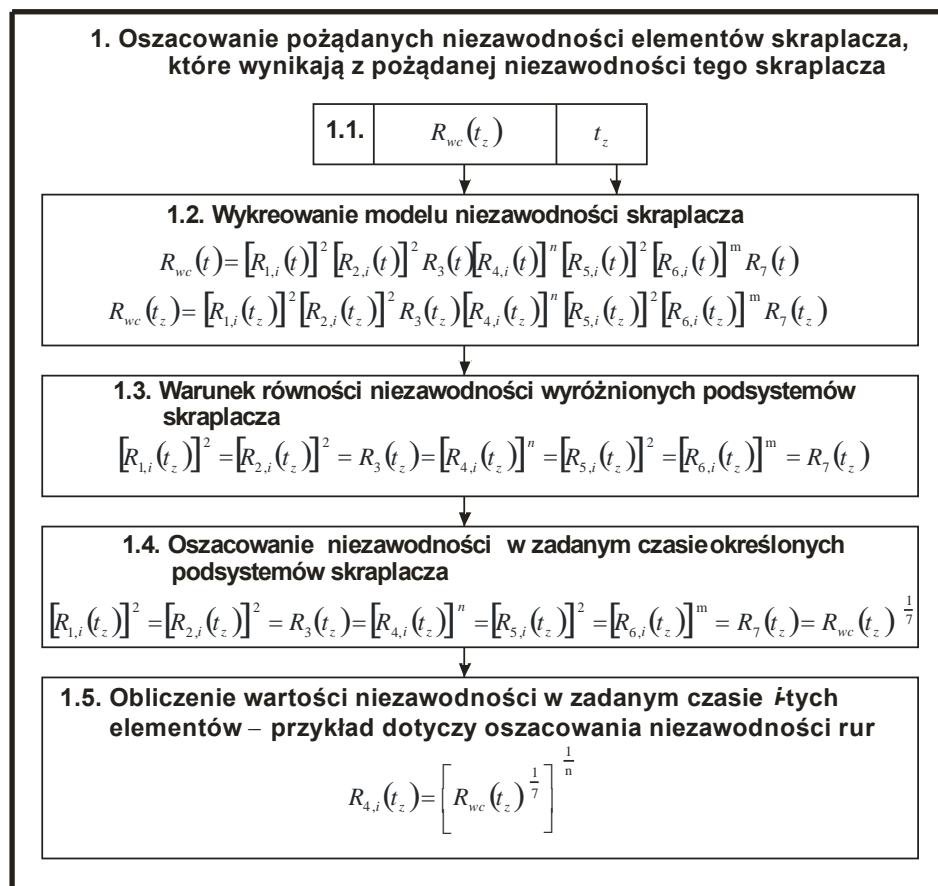
Na etapie projektowania skraplacza turbiny parowej wykreowaniu podlega jego model niezawodności $R_{wc}(t)$ z uwzględnieniem: funkcji jakie realizuje skraplacz w technicznym systemie energetycznym, rodzajów jego uszkodzeń i konstrukcji tego skraplacza – zgodnie z metodą zawartą w pracy [12]. Na przykład, model niezawodnościowy $R_{wc}(t)$ skraplacza przedstawiony na rysunku 1 określa szeregową strukturą niezawodnościową podsystemów określonych elementów, np. każdej z dwóch ścian sitowych $R_{1,i}(t)$, każdej z dwóch pokryw $R_{2,i}(t)$, płaszcza $R_3(t)$, każdej i -tej z n liczby rur $R_{4,i}(t)$, każdej z dwóch uszczelki $R_{5,i}(t)$, każdej i -tej z m śrub złączeniowych $R_{6,i}(t)$, systemu regulacji powierzchni wymiany ciepła $R_{7,i}(t)$ (tzn.

systemu sterowania zaworami odcinającymi przepływ wody chłodzącej przez określone rury skraplacza).

Model niezawodności $R_{ps,r}(t)$ podsystemu rur, który odnosi się do algorytmu przedstawionego na rysunku 1, określa szeregową strukturą niezawodnościową n -tej liczby rur:

$$R_{ps,r}(t) = [R_{4,i}(t)]^n \quad (1)$$

Model (1) jest określony dla założonych warunków eksploatacyjnych: maksymalnej wartości strumienia ciepła $\dot{Q}_{1,max}$ kondensacji pary wodnej w skraplaczu, minimalnej wartości współczynnika przenikania ciepła $k_{i,min}$ (przez powierzchnię wymiany ciepła z osadami), maksymalnej wartości temperatury $T'_{2,max}$ wody chłodzącej na wejściu do skraplacza. W takich warunkach podczas eksploatacji skraplacza włącza się przepływ wody chłodzącej przez wszystkie rury.



Rys. 1. Algorytm szacowania oczekiwanych niezawodności elementów skraplacza, które wynikają z planowanej niezawodności tego skraplacza (wzór w bloku 1.4 i 1.5 wynika z transformacji niezawodności skraplacza w pożądane niezawodności rur – opis znajduje się w publikacji [12])

Następnym istotnym etapem w projektowaniu skraplacza jest podział powierzchni wymiany ciepła względem prognozowanych, charakterystycznych warunków eksploatacyjnych, co

przedstawiono w artykule [10]. Z tych dwóch punktów widzenia wynika następujący model niezawodności $R_{ps,r}(t)$ podsystemu rur:

$$R_{ps,r}(t) = R_R(t)R_{NR}(t), \quad (2)$$

gdzie $R_R(t)$ wyraża model niezawodności podsystemu układu rur o regulowanej liczbie rur, a $R_{NR}(t)$ wyraża model niezawodności podsystemu układów rur, który składa się z liczby m -tych układów rur o określonych liczbach rur włączanych i wyłączanych w tych układach.

W pierwszej kolejności rozważa się podział powierzchni wymiany ciepła skraplacza względem charakterystycznych, prognozowanych, stanów eksploatacyjnych skraplacza z punktu widzenia maksymalizacji efektywności wymiany ciepła. Implikuje to określony sposób regulacji powierzchni wymiany ciepła – programowy, tzn. dla zadanych warunków eksploatacyjnych włączany jest przepływ wody chłodzącej (z optymalną wartością prędkości przepływu) przez minimalną liczbę rur w celu utrzymywania zadanego stałego ciśnienia skraplania pary wodnej. Następnie implikuje to utworzenie określonych struktur niezawodnościowych podsystemu rur i wprowadzenie ich do modelu $R_{ps,r}(t)$. Wówczas model $R_R(t)$ określa struktura szeregowo-równoległa i stanowi podsystem liczby rur n_R . Podsystem ten stanowi odpowiednią kombinację tej struktury względem hierarchii włączania i wyłączania zadanej n -tej liczby rur z liczby n_R w zadanych układach w określonych warunkach eksploatacyjnych, gdzie $p=n_R-n$:

$$R_R(t) = \prod_{i=1}^n R_{R,1,i}(t) \{1 - \prod_{j=1}^p [1 - R_{R,1,j}(t)]\}, \quad (3)$$

gdzie $n = n_{R,1}$ wówczas:

$$R_R(t) = \prod_{i=1}^n R_{R,1,i}(t), \quad (4)$$

oraz, gdy $p = n_{R,1}$:

$$R_R(t) = \{1 - \prod_{j=1}^p [1 - R_{R,1,j}(t)]\}, \quad (5)$$

w przypadku jeśli podsystem rur reguluje się poprzez włączanie pojedynczych rur wówczas funkcja $R_{R,1,i}(t) = R_{R,1,j}(t) = R_{4,i}(t)$.

Model $R_{NR}(t)$ określa również struktura szeregowo-równoległa i stanowi podsystem liczby rur n_{NR} . Podsystem ten stanowi odpowiednią kombinację tej struktury względem hierarchii włączania i wyłączania zadanych m -tych układów rur, gdzie $k=m_{NR}-m$, w określonych warunkach eksploatacyjnych:

$$R_{NR}(t) = \prod_{i=1}^m R_{NR,1,i}(t) \{1 - \prod_{j=1}^k [1 - R_{NR,1,j}(t)]\}, \quad (6)$$

gdzie $m = m_{NR,1}$

$$R_{NR}(t) = \prod_{i=1}^m R_{NR,i}(t), \quad (7)$$

albo, gdy $k = m_{NR}$:

$$R_{NR}(t) = \{1 - \prod_{j=1}^k [1 - R_{NR,1,j}(t)]\}, \quad (8)$$

w przypadku, jeśli reguluje się m -te układy rur w liczbie n wówczas funkcje $R_{NR,1,i}(t) = R_{NR,1,j}(t) = [R_{4,i}(t)]^n$.

Następnie rozważa się podział powierzchni wymiany ciepła względem charakterystycznych, prognozowanych, stanów eksploatacyjnych skraplacza z punktu widzenia maksymalizacji niezawodności $R_{ps,r}(t)$ podsystemu rur w dowolnej konfiguracji włączania i wyłączania określonych układów rur przy zachowaniu zadanego ciśnienia w skraplaczu. Przy takim podejściu modele $R_R(t)$ jak i $R_{NR}(t)$ określa progowa struktura niezawodnościowa typu k z n ponieważ nie występuje tu konieczność zachowania hierarchii w kolejności włączania i wyłączania określonych układów rur (przy założeniu identycznych funkcji niezawodnościowych elementów tej struktury):

$$R_R(t) = \sum_{n=1}^{n_{R,1}} \binom{n_{R,1}}{n} [R_{R,i}(t)]^n [1 - R_{R,i}(t)]^{n_{R,1}-n}, \quad (9)$$

oraz

$$R_{NR}(t) = \sum_{m=1}^{m_{NR}} \binom{m_{NR}}{m} [R_{NR,i}(t)]^m [1 - R_{NR,i}(t)]^{m_{NR}-m}. \quad (10)$$

3. Struktury niezawodnościowe powierzchni wymiany ciepła w procesie eksploatacji

Poniżej, na rysunku 2, przedstawiony algorytm oszacowania niezawodności $R_{ps,r}(t_i)$ podsystemu rur w określonym czasie t_i eksploatacji skraplacza uwzględnia następujące zmiany wartości następujących wielkości w określonych przedziałach czasu $[t_{i,\min}, t_{i,\max}]$: strumienia ciepła \dot{Q}_i wymienianego w skraplaczu, temperaturę $T'_{2,i}$ wody chłodzącej na wejściu do skraplacza, liczby rur albo zmianę układów załączonych rur $\sum_{i=1}^m n_{NR,i} + n_{R,i}$ (przez które przepływa woda chłodząca) co ma wpływ na efektywność wymiany ciepła, liczby rur wyłączonych $n_{e,p,i} = \sum_{i=1}^m (n_{NR,i} - n_{NR,u,i}) + (n_{R,i} - n_{R,u,i})$ (indeks u) z eksploatacji („zakorkowanych”), stan zanieczyszczenia powierzchni rur oraz mogące występować udziały masowe powietrza podczas skraplania pary wodnej poprzez oszacowanie wartości współczynnika przenikania ciepła $k_{e,p,i}$ w określonym czasie (zagadnienia związane z usuwaniem powietrza ze skraplacza w tej publikacji nie są podejmowane i są traktowane jako zagadnienie osobne). Umożliwia to programową regulację powierzchni ciepła względem efektywnej wymiany określonej ilości ciepła \dot{Q}_i w określonych przedziałach czasu t_i oraz z uwzględnieniem oszacowań niezawodności podsystemu rur $R_{ps,r,e,i}(t_i) \in [R_{ps,r,e,0}(t_{i,\min}), R_{ps,r,i}(t_{i,\max})]$ w tych przedziałach czasu na podstawie aktualnej niezawodności n -tych rur $R_i(t_i)$ wynikających z funkcji $R_i(t) = f(t_i)_{\{CI_{e,i}, W_{e,i}, W_{ru,e,i}\}}$. Wartości wielkości zawarte w zbiorach $CI_{e,i}, W_{e,i}, W_{ru,e,i}$ określają odpowiednio cechy identyfikujące i -te

elementy skraplacza, warunki eksploatacyjne tych elementów i ich rodzaje uszkodzeń (dokładny opis $CI_{e,i}, W_{e,i}, W_{ru,e,i}$ zawiera praca [12]).

Następnie, algorytm ten stanowi bieżącą weryfikację funkcji niezawodności rur $R_i(t) = f(t_i)_{\{CI_{e,i}, W_{e,i}, W_{ru,e,i}\}}$ wprowadzanej na etapie jego projektowania oraz daje możliwość ich zmiany (uaktualnienia) na etapie eksploatacji skraplacza.

Podczas eksploatacji skraplacza w technicznym systemie energetycznym monitorowane są następujące wielkości: ciśnienie p_1 skraplania się pary wodnej w skraplaczu i średnia prędkość w_2 przepływu wody chłodzącej przez rury skraplacza, które wskazują efektywność wymiany ciepła względem założeń wynikających z funkcjonowania turbiny parowej i ekonomicznych (koszty pompowania wody chłodzącej). Na tej podstawie zgodnie z przedstawionym na rysunku 2 algorytmem oszacowuje się eksploatacyjną powierzchnię $A_{e,i}$ wymiany ciepła oraz masowe natężenie $\dot{m}_{2,i}$ przepływu wody chłodzącej przez określony układ rur. Następnie monitorowaniu w sposób ciągły podlega przewodność elektryczna Γ skroplin. W przypadku, gdy wartość tej przewodności jest mniejsza od wartości dopuszczalnej określeniu podlega ponownie struktura niezawodnościowa podsystemu rur $R_{ps,r}(t_i)$. W przeciwnym przypadku, gdy wartość Γ jest większa od wartości dopuszczalnej wówczas występuje uszkodzenie (pęknięcie) rur. Wówczas w pierwszej kolejności włącza się inny układ

rur $n_{e,p,i} = \sum_{i=1}^m (n_{NR,i} - n_{NR,u,i}) + (n_{R,i} - n_{R,u,i})$ i sprawdza się czy nowo wyznaczona wartość

powierzchni $A_{e,i}$ wymiany ciepła zapewnia efektywną wymianę ciepła w określonych warunkach eksploatacyjnych. Należy zwrócić tu uwagę, że włączane układy o zadanych liczbach rur mają wpływ na proces wymiany ciepła.

Zwiększenie prędkości przepływu wody chłodzącej skraplacz przez rury powyżej wartości optymalnej do wartości maksymalnej dopuszczalnej $w_{2,i} + \Delta w_{2,i} \leq w_{2,max}$ następuje wówczas, gdy występuje konieczność włączenia większej liczby rur niż wynikałoby to z utrzymywania optymalnego przepływu wody chłodzącej po uszkodzeniu się określonej liczby rur. Ma to na celu utrzymanie zadanej wartości ciśnienia w skraplaczu p_1 (funkcja $R_i(t) = f(t_i)_{\{CI_{e,i}, W_{e,i}, W_{ru,e,i}\}}$ jest oszacowana m. in. dla określonego maksymalnego przedziału wartości prędkości przepływu wody chłodzącej $w_{2,i} \in \langle w_{2,opt}, w_{2,max} \rangle$ [m/s]).

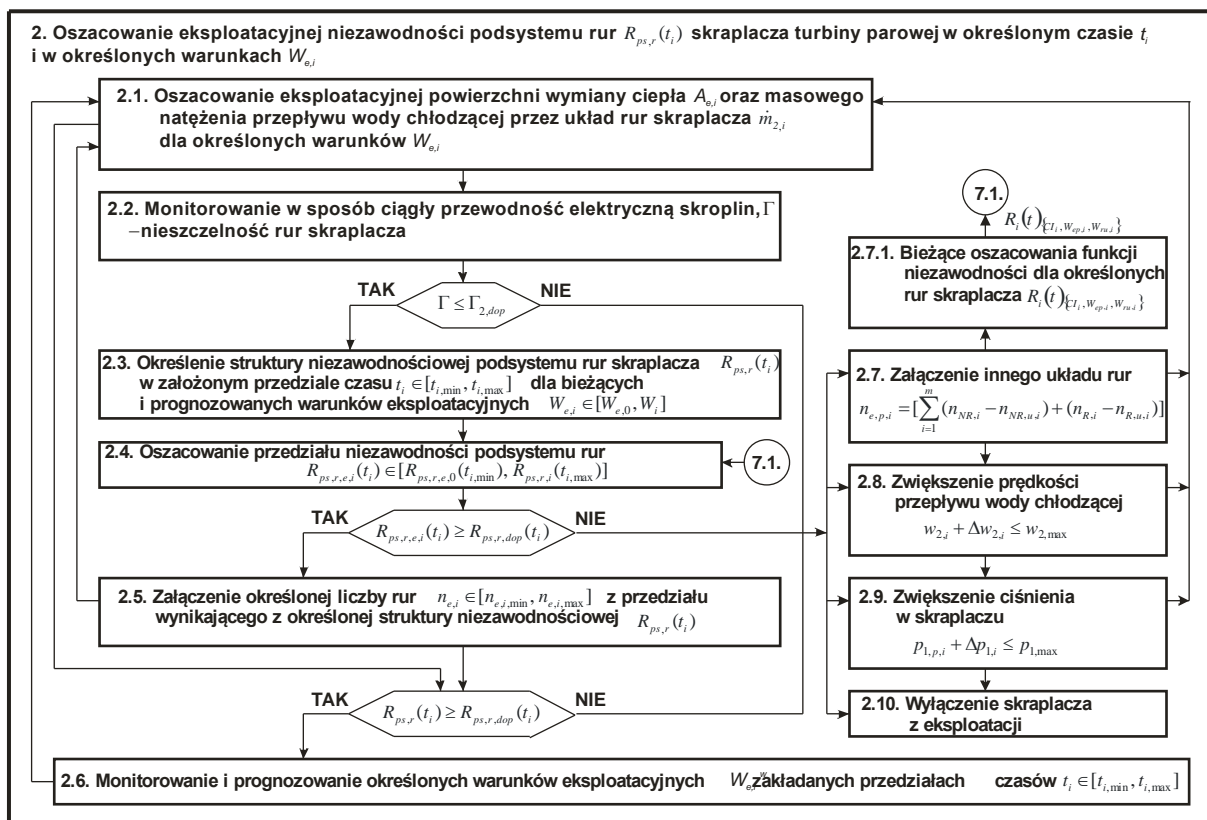
Zwiększenie wartości ciśnienia skraplania pary wodnej w skraplaczu $p_{1,p,i}$ do maksymalnej dopuszczalnej wartości $p_{1,p,i} + \Delta p_{1,i} \leq p_{1,max}$, które wynika ze zmniejszenia strumienia ciepła wymienianego w skraplaczu $\dot{Q}_{1,min}$, obniżenia mocy efektywnej $N_{e,p,i}$ turbiny parowej, wynika z postawionego warunku szczelnego przepływu wody chłodzącej przez określony układ rur. Ostatecznie należy wyłączyć skraplacz z eksploatacji – załączyć inny skraplacz albo wyłączyć system energetyczny z eksploatacji. Wszystkie wymienione działania są zdeterminowane przez funkcjonowanie technicznego systemu energetycznego w określonym czasie, w którym skraplacz funkcjonuje.

Zakłada się tu, że zostały przeprowadzone eksperymentalne badania i -tych rur w celu oszacowania funkcji niezawodności $R_i(t) = f(t_i)_{\{CI_{e,i}, W_{e,i}, W_{ru,e,i}\}}$ w zadanych i -tych przedziałach czasu $0 \leq t_i \leq t_{i,max}$, przez producentów rur. W badaniach tych uwzględnia się cechy $CI_{e,i}$ identyfikujące i -te rury skraplacza, warunki $W_{e,i}$ eksploatacyjne tych rur i ich rodzaje $W_{ru,e,i}$ uszkodzeń (wyznacza się miary uszkodzeń tych elementów i ich wartości, po przekroczeniu których traktuje się rury jako uszkodzone).

Wykorzystując funkcje niezawodności $R_i(t) = f(t)_{\{Cl_{e,i}, W_{e,i}, W_{ru,e,i}\}}$ i -tych rur odczytuje się wartości niezawodności $R_i(t_z)_{\{Cl_{e,i}, W_{e,i}, W_{ru,e,i}\}}$ tych rur w zadanym czasie t_z . Umożliwia to wprowadzenie tych wartości niezawodności do modeli określonych struktur niezawodnościowych podsystemu rur i obliczenie niezawodności w tego podsystemu w zadanym czasie i zadanych warunkach eksploatacyjnych.

W wypadku, gdy po uszkodzeniu i -tej liczby rur podejmuje się decyzję o ich wymianie na tego samego rodzaju rury. Następnie, gdy różnica między rzeczywistymi wartościami ich niezawodności a wartościami odczytanymi z wprowadzonych funkcji $R_i(t) = f(t)_{\{Cl_{e,i}, W_{e,i}, W_{ru,e,i}\}}$ przekracza założone wartości dopuszczalne wówczas oszacowuje się nowe (bieżące) funkcje niezawodności $R_i(t) = f(t)_{\{Cl_{e,i}, W_{e,i}, W_{ru,e,i}\}}$ na podstawie rejestracji trwałości rur (rys. 2, blok 2.7.1.) podczas eksploatacji skraplacza.

Każdorazowe włączanie albo wyłączenie przepływu wody chłodzącej przez określone rury $\sum_{i=1}^m n_{NR,i} + n_{R,i}$ z przedziału wynikającego z określonej struktury niezawodnościowej $R_{ps,r}(t_i)$ powoduje sprzężenie zwrotne oszacowania eksploatacyjnej powierzchni wymiany ciepła $A_{e,i}$ w celu bieżącej weryfikacji, a dalej po ponownym sprawdzeniu warunku wskazującego, że wartość niezawodności obliczona w czasie eksploatacji skraplacza $R_{ps,r}(t_i)$ jest równa albo większa od założonej dopuszczalnej niezawodności $R_{ps,r,dop}(t_i)$ w określonym przedziale czasu t_i następuje monitorowanie bieżących warunków eksploatacyjnych i prognozowanie tych warunków w dalszych przedziałach czasu t_i .



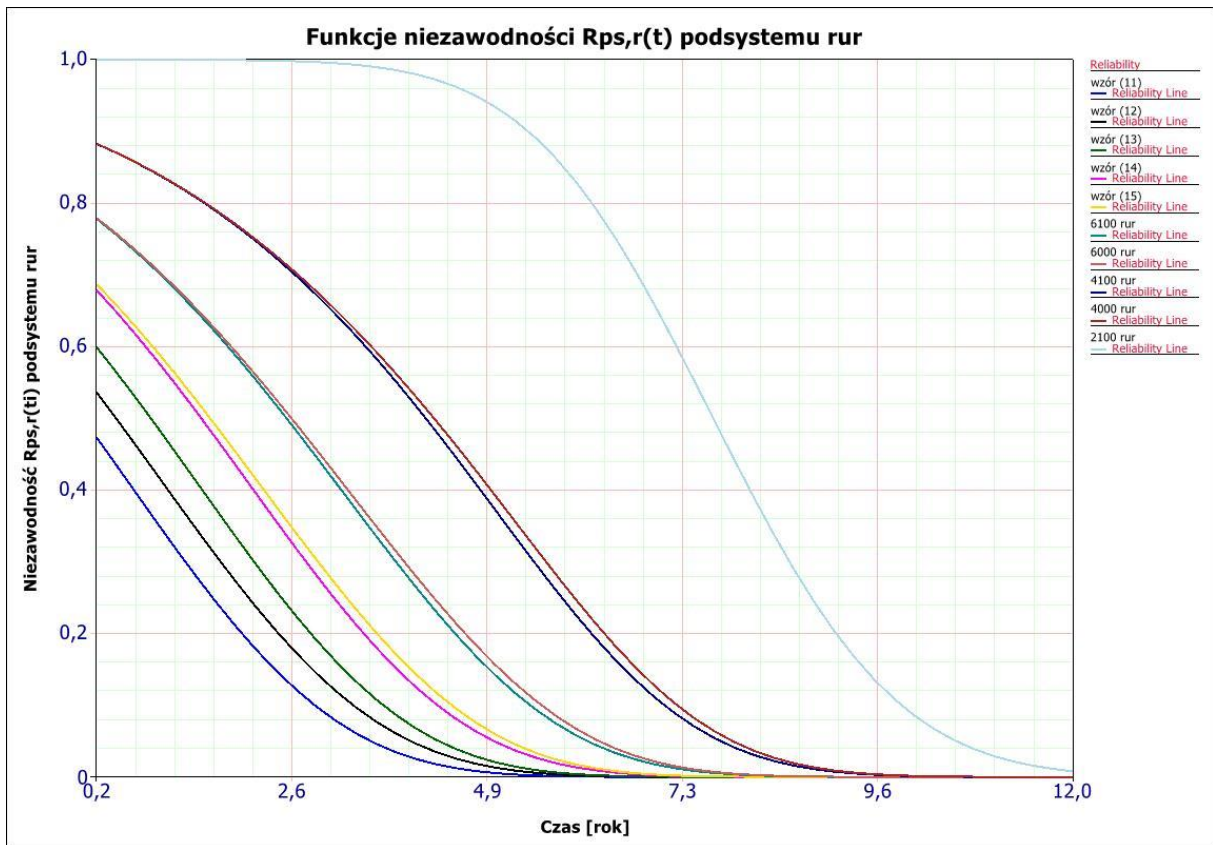
Rys. 2. Algorytm oszacowania eksploatacyjnej niezawodności podsystemu rur skraplacza turbiny parowej w określonym czasie i w określonych warunkach

4. Egzemplifikacja adaptacyjnej właściwości powierzchni wymiany ciepła skraplacza turbiny parowej

Przykład obliczeniowy odnosi się do empirycznych badań uszkodzeń rur skraplaczy zawartych w publikacjach [1,15], na podstawie których założono rozkład normalny. Parametry tego rozkładu $m=15,7$ oraz $\sigma=6,2$ w odniesieniu do 100 szt. rur skraplacza wprowadzono do obliczeń na podstawie przeprowadzonych badań uszkodzeń rur skraplaczy bloków energetycznych 225MW zawartych w publikacji [15]. Założono również całkowitą liczbę rur 12000 na podstawie pracy [10]. Obliczenia i wykresy wykonano w programie komputerowym BlockSim firmy HBM Prentisa (BlockSim – zintegrowany pakiet programowy umożliwiający analizy struktur niezawodnościowych RBD). Przykład stanowi ilustrację wyników obliczeniowych niezawodności podsystemu rur w odniesieniu do treści zawartych w artykule, w przypadku wprowadzenia do tych obliczeń funkcji niezawodności rur pozyskanych na podstawie empirycznych badań skraplaczy bloków energetycznych. Skrót metody projektowania wymienników ciepła technicznych systemów energetycznych ze względu na wymaganą niezawodność tych systemów zawarto w pracach [12,13], a w tym wskazano sposoby zwiększenia niezawodności wymienników ciepła, jeśli występuje taka konieczność.

Podsystem rur skraplacza turbiny parowej o całkowitej liczbie 12000 rur składa się z następujących układów tych rur: $n_{R,l}=2000$ to 20 układów rur po 100 rur, wówczas funkcja niezawodności jednego układu jest wyrażona następująco $R_{R,l,i}(t)=[R_{4,i}(t)]^{100}$, $n_{NR}=10000$ to $m=5$ układów rur po 2000, wówczas funkcja niezawodności jednego takiego układu jest wyrażona $R_{NR,l,i}(t)=[R_{4,i}(t)]^{2000}$. Nie występują rury uszkodzone „zakorkowane” $n_{NR,u,i}=0$, $n_{R,u,i}=0$.

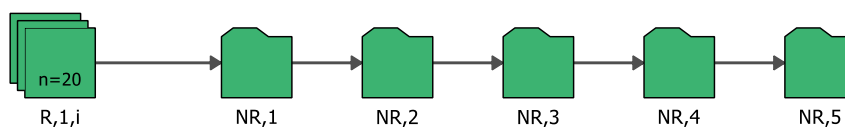
Pierwszy przykład obliczeniowy przedstawiony na rysunku 3 odnosi się do zastosowania wzorów (11-15) w określonych warunkach eksploatacyjnych $W_{e,i}$. Następne przykłady opisane liczbami rur 6100, 6000, 4100, 4000, 2100, przez które następuje przepływ wody chłodzącej są analogiczne względem przedstawionych wzorów (11-15).



Rys. 3. Funkcje niezawodności $R_{ps,r}(t)$ podsystemu rur

Funkcja niezawodności $R_{ps,r}(t)$ podsystemu rur może być wyrażona wzorem (11) jeżeli aktualnie występujące warunki eksploatacyjne $W_{e,i}$ determinują włączenie przepływu wody chłodzącej przez 12 000 rur:

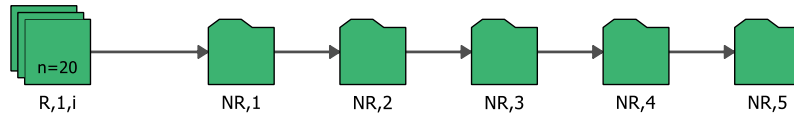
$$R_{ps,r}(t) = \prod_{i=1}^{20} R_{R,1,i}(t) \prod_{i=1}^5 R_{NR,1,i}(t). \quad (11)$$



Rys. 4. Schemat blokowy struktury niezawodnościowej podsystemu rur - wzór (11), gdzie blok $R,1,i$ wyraża 20 układów ($R_{R,1,i}(t) = [R_{4,i}(t)]^{100}$) rur w strukturze szeregowej, a subdiagramy $NR,1-NR,5$ układy rur ($R_{NR,1,i}(t) = [R_{4,i}(t)]^{2000}$) w strukturze szeregowej

Funkcja niezawodności $R_{ps,r}(t)$ może być wyrażona wzorem (12) jeżeli aktualnie występujące warunki eksploatacyjne $W_{e,i}$ determinują włączenie przepływu wody chłodzącej przez 10100 rur, a 900 rur stanowi rezerwę względem wymienianych strumieni ciepła płynów:

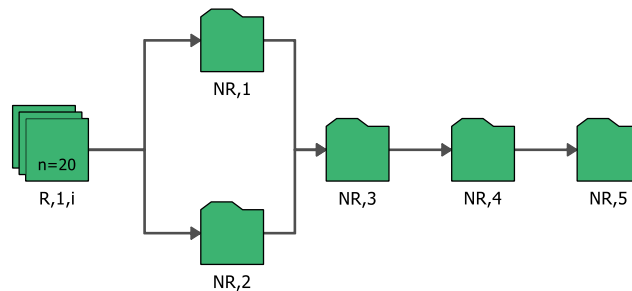
$$R_{ps,r}(t) = \{1 - \prod_{j=1}^{20} [1 - R_{R,1,j}(t)]\} \prod_{i=1}^5 R_{NR,1,i}(t). \quad (12)$$



Rys. 5. Schemat blokowy struktury niezawodnościowej podsystemu rur - wzór (12), gdzie blok $R,1,i$ wyraża 20 układów ($R_{R,1,i}(t) = [R_{4,i}(t)]^{100}$) rur w strukturze równoległej, a subdiagramy $NR,1$ - $NR,5$ układy rur ($R_{NR,1,i}(t) = [R_{4,i}(t)]^{2000}$) w strukturze szeregowej

Funkcja niezawodności $R_{ps,r}(t)$ może być wyrażona wzorem (13) jeżeli aktualnie występujące warunki eksploatacyjne $W_{e,i}$ determinują włączenie przepływu wody chłodzącej przez 10000 rur, a 2000 rur stanowi rezerwę względem wymienianych strumieni ciepła płynów:

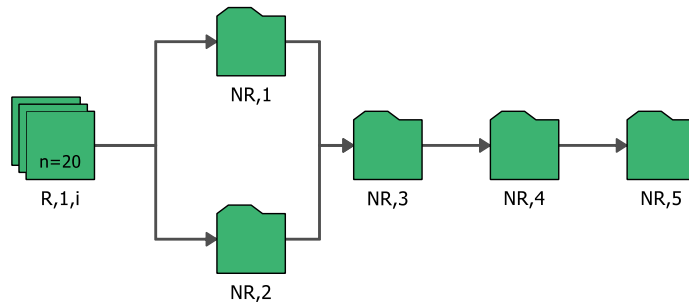
$$R_{ps,r}(t) = \prod_{i=1}^{20} R_{R,1,i}(t) \prod_{i=1}^3 R_{NR,1,i}(t) \{1 - \prod_{j=1}^2 [1 - R_{NR,1,j}(t)]\}. \quad (13)$$



Rys. 6. Schemat blokowy struktury niezawodnościowej podsystemu rur - wzór (13), gdzie blok $R,1,i$ wyraża 20 układów ($R_{R,1,i}(t) = [R_{4,i}(t)]^{100}$) rur w strukturze szeregowej, a subdiagramy $NR,1$ - $NR,2$ układy rur ($R_{NR,1,i}(t) = [R_{4,i}(t)]^{2000}$) w strukturze równoległej, a pozostałe w strukturze szeregowej

Funkcja niezawodności $R_{ps,r}(t)$ może być wyrażona wzorem (14) jeżeli aktualnie występujące warunki eksploatacyjne $W_{e,i}$ determinują włączenie przepływu wody chłodzącej przez 8100 rur, a 3900 rur stanowi rezerwę względem wymienianych strumieni ciepła płynów:

$$R_{ps,r}(t) = \{1 - \prod_{j=1}^{20} [1 - R_{R,1,j}(t)]\} \prod_{i=1}^3 R_{NR,1,i}(t) \{1 - \prod_{j=1}^2 [1 - R_{NR,1,j}(t)]\}. \quad (14)$$

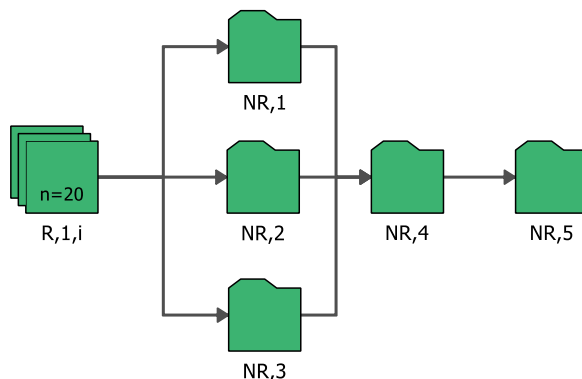


Rys. 7. Schemat blokowy struktury niezawodnościowej podsystemu rur - wzór (14), gdzie blok $R,1,i$ wyraża 20 układów ($R_{R,1,i}(t) = [R_{4,i}(t)]^{100}$) rur w strukturze równoległej, a

subdiagramy $NR,1-NR,2$ układy rur ($R_{NR,1,i}(t)=[R_{4,i}(t)]^{2000}$) w strukturze równoległej, a pozostałe w strukturze szeregowej

Funkcja niezawodności $R_{ps,r}(t)$ może być wyrażona wzorem (15) jeżeli aktualnie występujące warunki eksploatacyjne $W_{e,i}$ determinują włączenie przepływu wody chłodzącej przez 8000 rur, a 4000 rur stanowi rezerwę względem wymienianych strumieni ciepła płynów:

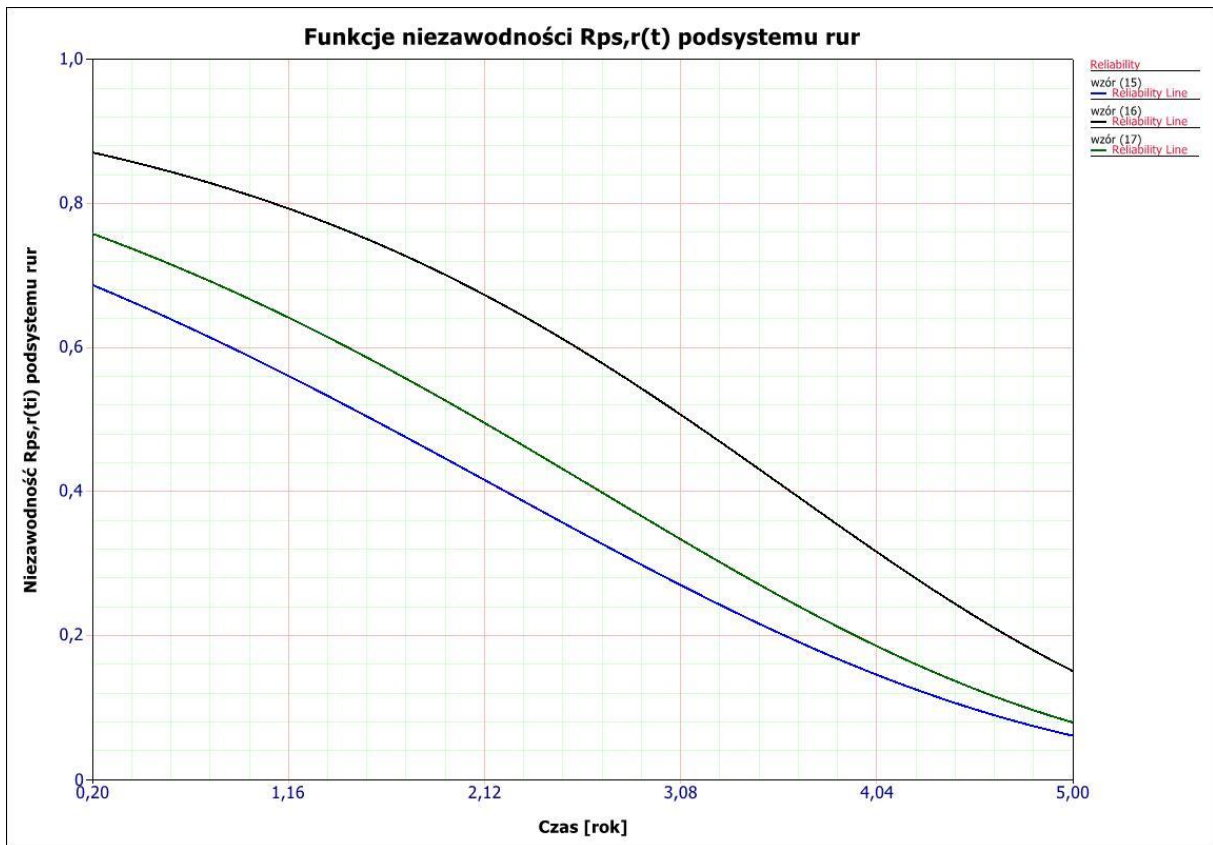
$$R_{ps,r}(t) = \prod_{i=1}^{20} R_{R,1,i}(t) \prod_{i=1}^2 R_{NR,1,i}(t) \{1 - \prod_{j=1}^3 [1 - R_{NR,1,j}(t)]\}. \quad (15)$$



Rys. 8. Schemat blokowy struktury niezawodnościowej podsystemu rur - wzór (15), gdzie blok $R,1,i$ wyraża 20 układów ($R_{R,1,i}(t)=[R_{4,i}(t)]^{100}$) rur w strukturze szeregowej, a subdiagramy $NR,1-NR,3$ układy rur ($R_{NR,1,i}(t)=[R_{4,i}(t)]^{2000}$) w strukturze równoległej, a pozostałe w strukturze szeregowej

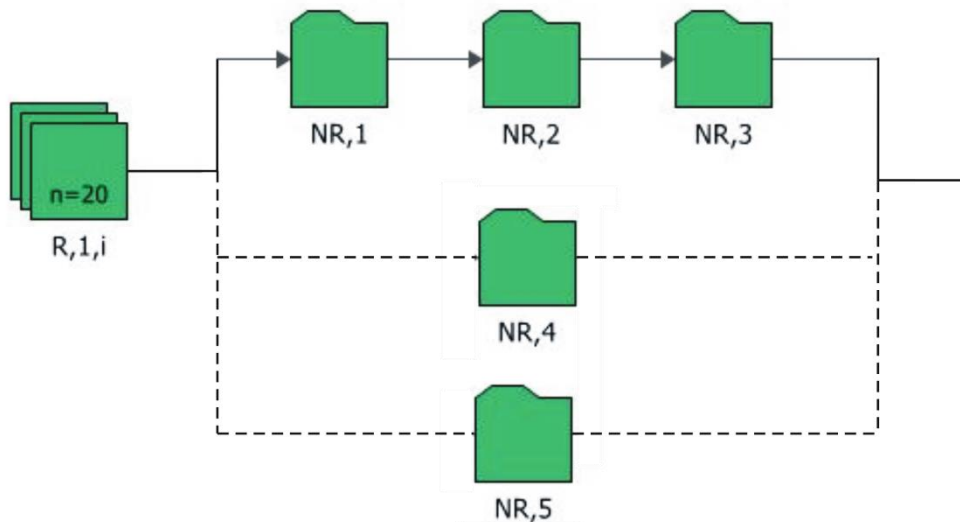
Z przedstawionego na rysunku 3 przykładu wynika, że niezawodność $R_{ps,r,e,i}(2)$ w drugim roku eksploatacji skraplacza turbiny parowej dla programowej, z uwzględnieniem warunku efektywnej wymiany ciepła, regulacji powierzchni wymiany ciepła w zależności od określonych warunków $W_{e,i}$ eksploatacyjnych wynosi odpowiednio względem rysunku 3: $R_{ps,r}(t=2)=0,194214$; $R_{ps,r}(t=2)=0,255212$; $R_{ps,r}(t=2)=0,31621$; $R_{ps,r}(t=2)=0,415523$; $R_{ps,r}(t=2)=0,434681$; $R_{ps,r}(t=2)=0,571202$; $R_{ps,r}(t=2)=0,577219$; $R_{ps,r}(t=2)=0,758509$; $R_{ps,r}(t=2)=0,760399$; $R_{ps,r}(t=2)=0,99922$.

Drugi przykład obliczeniowy przedstawiony na rysunku 9 odnosi się do zastosowania wzorów (15), (16) i (17) i określonych warunków eksploatacyjnych $W_{e,i}$, które determinują włączenie przepływu wody chłodzącej przez 8000 rur z 12000.



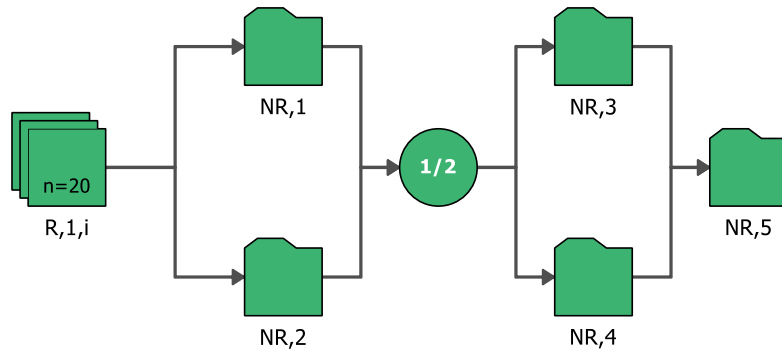
Rys. 9. Funkcje niezawodności $R_{ps,r}(t)$ podsystemu rur

$$R_{ps,r}(t) = \prod_{i=1}^{20} R_{R,i}(t) \left\{ \sum_{m=3}^5 \binom{5}{m} [R_{NR,i}(t)]^m [1 - R_{NR,i}(t)]^{5-m} \right\}. \quad (16)$$



Rys. 10. Schemat blokowy struktury niezawodnościowej podsystemu rur – wzór (16), gdzie blok $R_{1,i}$ wyraża 20 układów ($R_{R,1,i}(t) = [R_{4,i}(t)]^{100}$) rur w strukturze szeregowej, a subdiagramy $NR,1$ - $NR,5$ układy rur ($R_{NR,1,i}(t) = [R_{4,i}(t)]^{2000}$) w strukturze k z n

$$R_{ps,r}(t) = \prod_{i=1}^{20} R_{R,i}(t) R_{NR,1,i}(t) \{1 - \prod_{j=1}^2 [1 - R_{NR,1,j}(t)]\} \{1 - \prod_{j=1}^2 [1 - R_{NR,1,j}(t)]\}. \quad (17)$$



Rys. 11. Schemat blokowy struktury niezawodnościowej podsystemu rur - wzór (17), gdzie blok $R,1,i$ wyraża 20 układów ($R_{R,1,i}(t) = [R_{4,i}(t)]^{100}$) rur w strukturze szeregowej, a subdiagramy $NR,1-NR,5$ układy rur ($R_{NR,1,i}(t) = [R_{4,i}(t)]^{2000}$) w strukturze szeregowo-równoległej

Z przedstawionego na rysunku 9 przykładu wynika, że w drugim roku eksploatacji skraplacza turbiny parowej niezawodności $R_{ps,r}(t_i)$ podsystemu rur określonego wzorami (15), (16), (17) wynoszą odpowiednio: $R_{ps,r}(t=2) = 0,434681$; $R_{ps,r}(t=2) = 0,69078$; $R_{ps,r}(t=2) = 0,514836$ w określonych warunkach eksploatacyjnych.

Na podstawie wyników obliczeniowych można stwierdzić, że sposób regulacji układów rur ma istotny wpływ na niezawodność $R_{ps,r}(t_i)$ podsystemu rur.

4. Wnioski

Uwzględnienie adaptacyjnej właściwości niezawodnościowej struktury powierzchni wymiany ciepła zarówno w procesie projektowania skraplacza turbiny parowej jak i w procesie jego eksploatacji jest istotne z punktu widzenia utrzymywania pożądanej wartości niezawodności w czasie eksploatacji tego systemu oraz utrzymywania pożądanej wartości sprawności energetycznej technicznego systemu energetycznego.

Monitorowanie i prognozowanie niezawodności podsystemu rur podczas eksploatacji skraplacza turbiny parowej zwiększa dokładność oszacowania jego niezawodności.

Wskazany w pracy algorytm umożliwia programowy sposób regulacji powierzchni wymiany ciepła względem efektywnego funkcjonowania skraplacza w technicznym systemie energetycznym wraz z uwzględnieniem bieżącej (aktualnej) jego niezawodności.

Występuje potrzeba nowego podejścia do oszacowania niezawodności skraplacza, które uwzględni możliwość regulacji jego powierzchni wymiany ciepła, aktualny stan techniczny układu rur i zmienne warunki eksploatacyjne.

Bibliografia

1. Aronson K.E. Estimation of the residual life of steam turbine condensers based on statistical models. *Thermal Engineering*, 2015, 62, 11: 785-789, <https://doi.org/10.1134/S0040601515110051>.
2. Attia S. I., The influence of condenser cooling water temperature on thermal efficiency of a nuclear power plant. *Annals of Nuclear Energy*, 2015, 80: 371-378, <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2015.02.023>.
3. Christian J.L, Hermes Ch. J. L. Thermodynamic design of condensers and evaporators: Formulation and applications. *International Journal of Refrigeration*, 2013, 36: 633-640, <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2012.10.032>.
4. Edwards E. J. Design and rating shell and tube heat exchangers. Retrieved 10th January 2012, from, <http://www.chemstations.net/documents/shell.pdf>.
5. Fraas P. A, Ozisik N. M. *Heat Exchange Design*. John Wiley & Sons, Inc, 1965.
6. Gertsbakh I. *Reliability Theory. With Applications to Preventive Maintenance*. Springer, 2000.
7. Hesselgreaves, John E., Richard Law, and David Reay. *Compact heat exchangers: selection, design and operation*. Butterworth-Heinemann, 2016.
8. Ibrahim M. A. and Badawy R., A parametric study of the impact of the cooling water site specific conditions on the efficiency of a pressurized water reactor nuclear power plant. *International Journal of Nuclear Energy*, 2014, 2014:1-6.
9. Kakac S, Liu H. *Heat exchangers selection, rating and thermal design*. CRC Press LLC, Florida 1998.
10. Łukaszewski K. Efektywność funkcjonowania skraplacza turbiny parowej – zagadnienia projektowo-eksploatacyjne. *Energetyka* 2016; 4: 240-246.
11. Łukaszewski K., Eksploatacyjne badania niezawodności wymienników ciepła wspomagane komputerowo. *Materiały XII Szkoły Komputerowego Wspomagania Projektowania, Wytwarzania i Eksploatacji, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa 2008, Jurata 2008: 225-230*.
12. Łukaszewski K. Metoda projektowania wymienników ciepła technicznych systemów energetycznych ze względu na wymaganą niezawodność tych systemów – część 1. *Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Gdyni* 2014; 83: 149-173.
13. Łukaszewski K., Metoda projektowania wymienników ciepła technicznych systemów energetycznych ze względu na wymaganą niezawodność tych systemów – część 2. *Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Gdyni* 2014; 83: 174-193.
14. Rausand M. *System Reliability Theory. Models, Statistical Methods, and Applications*. John Wiley & Sons, 2004.

15. Salij A, Stępień J. C. Praca skraplaczy turbinowych w układach cieplnych bloków energetycznych. Lublin: KAPRINT, 2013.
16. Shah, Ramesh K., and Dusan P. Sekulic. Fundamentals of heat exchanger design. John Wiley & Sons, 2003, <https://doi.org/10.1002/9780470172605>.
17. Smith E. M. Thermal design of heat exchangers. John Wiley & Sons, Inc, 1997.
18. Zhu K, Chen X, Dai B, Wang Y, Li X, Li L. Eksperymental study on the thermal performance improvement of a new designed condenser with liquid separator. Energy Procedia, 2016, 104: 269-274, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.12.046>.