

Adam Charchalis
Bogdan Pojawa

METODA DIAGNOZOWANIA UKŁADU MECHANICZNEGO OKRĘTOWEGO TURBINOWEGO SILNIKA SPALINOWEGO

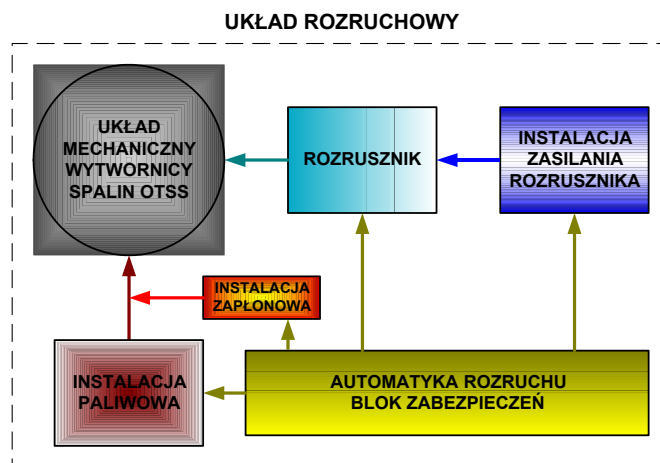
STRESZCZENIE

W referacie przedstawiono wyniki badań układów rozruchowych okrętowych turbinowych silników spalinowych. Obejmowały one identyfikację oraz analizę niezawodnościową obiektu badań, badania wstępne, badania rozruszników, wybór symptomów diagnostycznych oraz analizę ich trendu w czasie eksploatacji na przykładzie silnika uszkodzonego i nieuszkodzonego. Wyniki pozwoliły opracować metodę diagnozowania układów rozruchowych okrętowych turbinowych silników spalinowych.

WSTĘP

W procesie eksploatacji okrętowych turbinowych silników spalinowych ważną rolę odgrywają ich układy rozruchowe. Dobry stan techniczny tych układów ma wpływ na niezawodność uruchamianych silników, a co za tym idzie – na gotowość bojową okrętu. Jak wykazały badania literaturowe, problematyka związana z eksploatacją i diagnostyką układów rozruchowych tego typu silników nie jest w pełni rozpoznana. Potrzeba diagnozowania układów rozruchowych okrętowych turbinowych silników spalinowych była zatem inspiracją do przeprowadzenia badań mających na celu opracowanie metody ich diagnozowania.

Każdy układ rozruchowy silnika turbinowego niezależnie od jego typu (rys. 1.) składa się z następujących elementów: układu mechanicznego wytwornicy spalin silnika turbinowego ze sprzęgłem samorozłączającym, rozrusznika, instalacji zasilania rozrusznika, instalacji paliwowej wraz z instalacją zapłonową oraz układu automatyki.



Rys. 1. Schemat układu rozruchowego okrętowego turbinowego silnika spalinowego

Przyjmując układ rozruchowy za klasyczny układ energetyczny [1, 8], w którym z jednej strony występuje rozrusznik wraz z instalacją jego zasilania, a z drugiej układ mechaniczny wytwornicy spalin silnika turbinowego, to dla takiego układu w stanie ustalonym elektrycznego obracania można dokonać bilansu energetycznego, w którym występować będzie moment obrotowy dostarczany od rozrusznika, a jednocześnie moment oporowy pochodzący od układu mechanicznego. Wzrost oporów w układzie mechanicznym silnika turbinowego, wynikający z jego naturalnego starzenia się lub w wyniku występujących w nim uszkodzeń, spowoduje wzrost dostarczanego momentu obrotowego pochodzącego od rozrusznika niezbędnego do zachowania wymaganych parametrów kontrolnych w tym procesie [1, 2, 9, 10]. Można zatem uznać, że ocenę stanu technicznego układu kinematycznego da się przeprowadzić w sposób pośredni, tzn. na podstawie parametrów kontrolnych rozrusznika zarejestrowanych podczas jego pracy w stanie ustalonym elektrycznego obracania, przy założeniu, że znany jest jego stan techniczny [7].

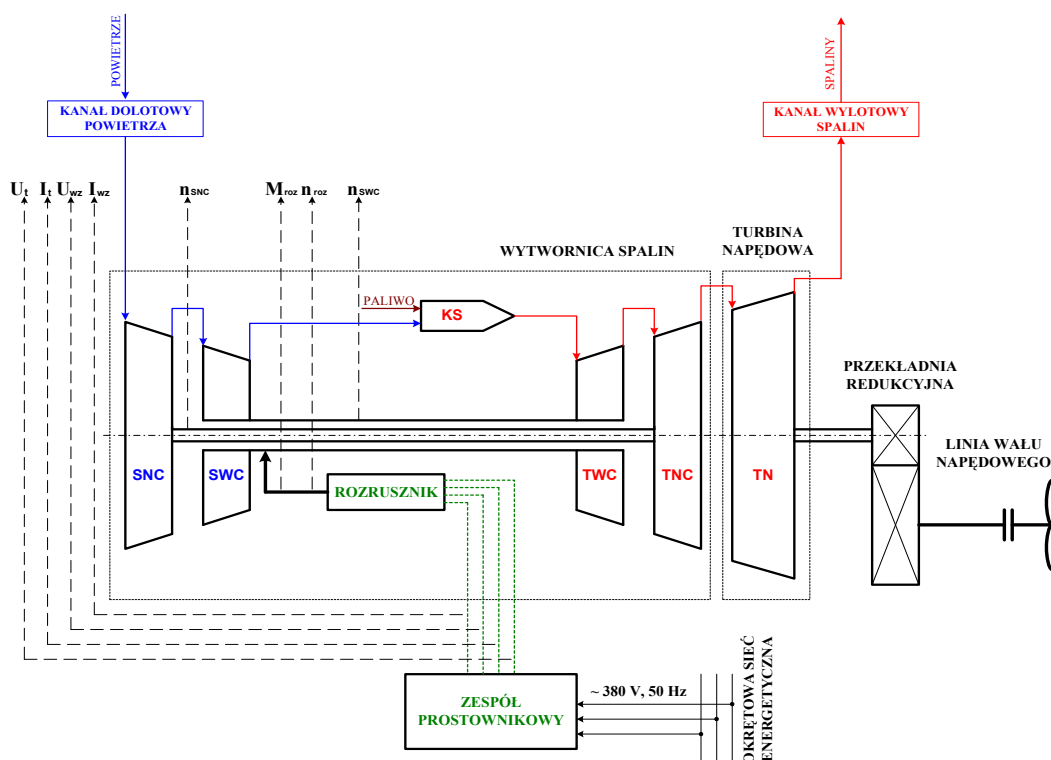
Elektryczne obracanie jest jednym z wariantów pracy układu rozruchowego, w którym nie występuje proces spalania paliwa w komorze spalania silnika. Fakt ten pozwala założyć, że kolejne elektryczne obracania można uważać za porównywalne.

CEL I OBIEKT BADAŃ

Przeprowadzone badania miały na celu wykazanie zależności między zmianą stanu technicznego układu mechanicznego wytwornicy spalin silnika turbinowego

a zmianą ustalonych wartości parametrów kontrolnych pracy układu rozruchowego w wariancie elektrycznego obracania wirników oraz opracowanie metody jego diagnozowania.

Badania dotyczyły elektrycznych układów rozruchowych okrętowych turbinowych silników spalinowych wchodzących w skład układu napędowego M-15 okrętów projektu 1241 RE (rys. 2.). Silniki te są konstrukcji trójwirnikowej z dwuwirnikową wytwornicą spalin. Charakterystyczne dla tej konstrukcji jest współosiowe ułożenie wałów wirników niskiego i wysokiego ciśnienia. Wał wirnika niskiego ciśnienia ułożony jest wewnątrz drażnionego wału wirnika wysokiego ciśnienia. Do łożyskowania wirników silnika zastosowano łożyska toczne.

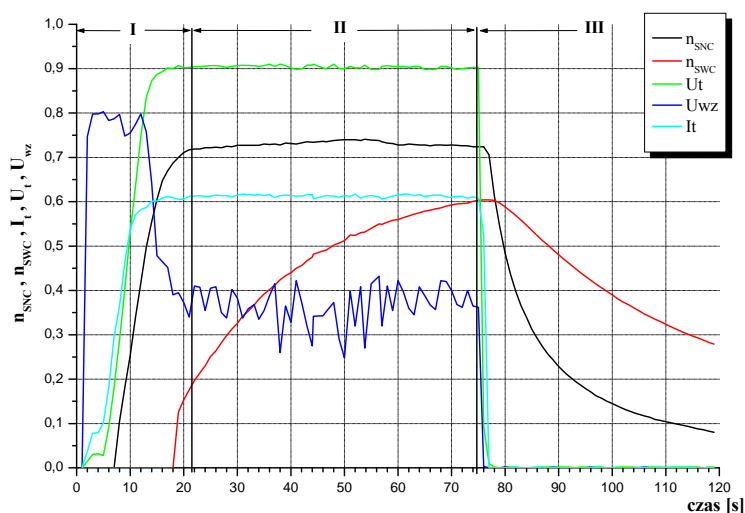


Rys. 2. Schemat elektrycznego układu rozruchowego okrętowego turbinowego silnika spalinowego:

SNC, SWC – odpowiednio: sprężarka niskiego i wysokiego ciśnienia; TNC, TWC – odpowiednio: turbina niskiego i wysokiego ciśnienia; TN – turbina napędowa; I_t – prąd twornika; I_{wz} – prąd wzbudzenia; U_t – napięcie twornika; U_{wz} – napięcie wzbudzenia; M_{roz} – moment obrotowy rozrusznika; n_{roz} – prędkość obrotowa rozrusznika

Podczas pracy układu rozruchowego zespół prostownikowy zasila rozrusznik będący silnikiem elektrycznym prądu stałego o wzbudzeniu szeregowo-równoległym. Rozrusznik przekazuje moment obrotowy na wieniec wirnikowy wysokiego ciśnienia. Wirnik napędzany od rozrusznika przekazuje moment obrotowy za pomocą skrzynek napędowych wszystkim mechanizmom pomocniczym niezbędnym do zapewnienia prawidłowej pracy silnika turbinowego. Automatyka zespołu prostownikowego ma za zadanie utrzymanie wymaganych parametrów kontrolnych rozruchu, ich rejestrację oraz wyłączenie układu rozruchowego w przypadku przekroczenia parametrów kontrolnych rozruchu poza dopuszczalny przedział ich wartości. Układ rozruchowy zapewnia następujące warianty pracy: rozruch gorący, rozruch pozorny i elektryczne obracanie.

Podczas pracy układu rozruchowego w rzeczywistych warunkach siłowni okrętowej jest możliwość rejestracji napięcia i prądu w obwodzie twornika, napięcia w obwodzie wzbudzenia oraz prędkości obrotowych wirników niskiego i wysokiego ciśnienia. Przebiegi czasowe tych wielkości w procesie elektrycznego obracania przedstawia rysunek 3. W owych przebiegach można wyróżnić trzy charakterystyczne etapy: pokonanie bezwładności wirników i wprawienie ich w ruch obrotowy, stan ustalony oraz wyłączenie rozrusznika i wybieg tychże wirników. Przebieg momentu obrotowego rozrusznika w procesie elektrycznego obracania może być zmierzony lub wyznaczony na drodze obliczeń analitycznych. Silniki turbinowe nie są wyposażone w momentomierze umożliwiające pomiar momentu rozruchowego, jednak istnieje możliwość jego wyznaczenia na podstawie parametrów kontrolnych pracy układu rozruchowego.



Rys. 3. Przebieg parametrów kontrolnych w procesie elektrycznego obracania

WYNIKI BADAŃ

W prowadzonych badaniach w pierwszej kolejności dokonano analizy uszkodzeń występujących w procesie eksploatacji obiektu badań oraz możliwości ich naprawy. Wyniknęło z niej, że przeprowadzenie regulacji bądź wymiany podzespołów w instalacji zasilania rozrusznika lub układzie automatyki w pełni przywraca zdolność eksploatacyjną układu rozruchowego. Dotyczy to również rozrusznika. Czynności te mogą być wykonane z powodzeniem przez załogę i nie są bardzo kosztowne.

Inaczej wygląda to w odniesieniu do układu mechanicznego wytwornicy spalin, który jest nieodłącznym elementem struktury konstrukcyjnej silnika, w szczególności węzłów łożyskowych. Koszt i zakres czynności związanych z naprawą układu mechanicznego różni się od wcześniej wymienionych elementów układu rozruchowego. Poza tym, może ją przeprowadzić tylko zakład wytwórczy (często poza granicami kraju), dlatego w warunkach eksploatacji jest to problem bardzo poważny.

W prowadzonych badaniach przyjęto zatem, że stan techniczny instalacji zasilania rozrusznika jest znany, a zmianie ulega jedynie stan techniczny układu mechanicznego wytwornicy spalin silnika turbinowego, spowodowany procesami naturalnego zużywania się lub wystąpieniem w nim nagłych uszkodzeń.

Niesprawności układu mechanicznego mogą wynikać z wielu przyczyn, do głównych należą:

- błędy popełnione w procesie produkcji oraz montażu;
- niewłaściwe warunki pracy układów trybologicznych;
- wyłączenie z pracy silnika turbinowego pracującego na wysokim obciążeniu, w wyniku zadziałania automatyki zabezpieczeń;
- uszkodzenia mechanizmów pomocniczych;
- nadmierne obciążenia dynamiczne podczas wykonywania powtórnego rozruchu silnika przed całkowitym zatrzymaniem się wirnika napędzanego od rozrusznika.

Następstwem wspomnianych przypadków są niewyważenia oraz utrata współosiowości wirników silnika, jak również zwiększone naciski jednostkowe w łożyskach powodujące ich późniejsze uszkodzenia.

W dalszej kolejności przeprowadzono badania wstępne rozruszników w rzeczywistych warunkach siłowni okrętowej mających na celu wykazanie zmian

w przebiegu parametrów kontrolnych elektrycznego obracania, ze względu na zakłócenia występujące podczas pracy układu rozruchowego, do których należą:

- zmiana stanu technicznego układu mechanicznego wytwornicy spalin;
- zmiana stanu cieplnego silnika turbinowego;
- zmiana stanu cieplnego rozrusznika spowodowana wielokrotnymi następującymi po sobie elektrycznymi obracaniem;
- zmiana parametrów otoczenia.

Przeprowadzone eksperymentalne badania wstępne wykazały [5, 6], że największy wpływ na zmianę przebiegu tych parametrów ma zmiana stanu technicznego układu mechanicznego. Najbardziej czułymi parametrami na zmianę stanu są napięcie wzbudzenia U_{wz} , moment obrotowy rozrusznika M_{roz} oraz prędkości obrotowe wirników niskiego n_{SNC} i wysokiego ciśnienia n_{SWC} . Na przebieg parametrów kontrolnych elektrycznego obracania ma również wpływ stan cieplny silnika turbinowego, jednak aby go pominąć, dalsze badania układów rozruchowych prowadzono tylko z wykorzystaniem silników, których stan cieplny zdefiniowany był jako „zimny”. Jeżeli chodzi o wpływ stanu cieplnego rozrusznika oraz zmiany zewnętrznych parametrów otoczenia, to nie mają one istotnego wpływu na przebieg parametrów kontrolnych elektrycznego obracania. Badania wstępne pozwoliły również na ocenę możliwości zrealizowania postawionego celu badań.

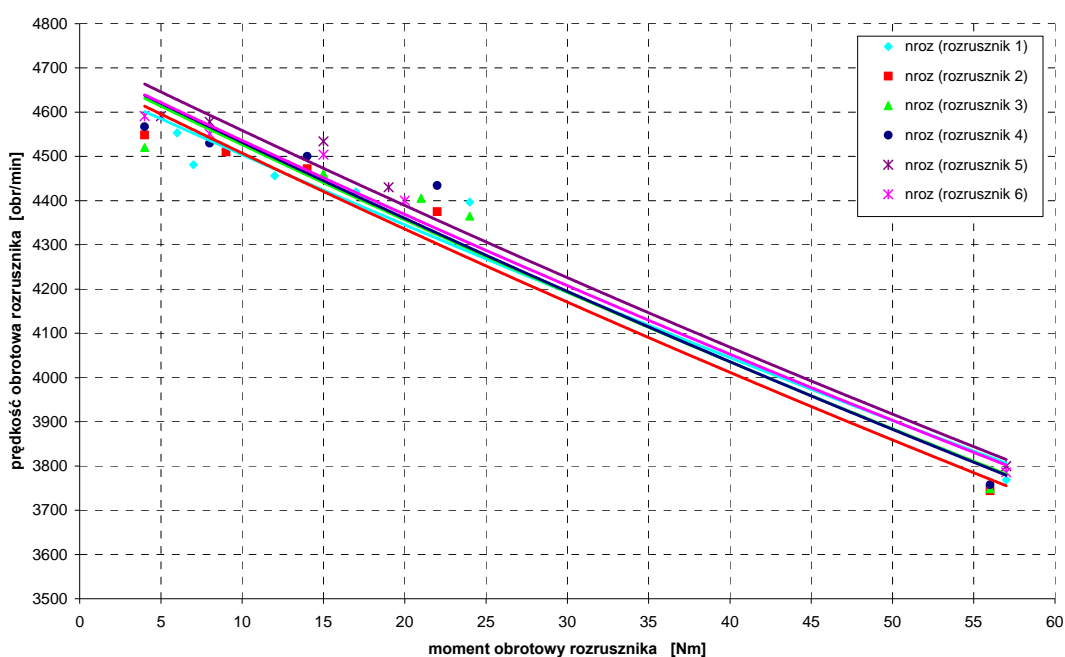
Zakładając, że ocenę stanu technicznego układu mechanicznego można przeprowadzić w sposób pośredni, tzn. na podstawie parametrów kontrolnych rozrusznika zarejestrowanych podczas jego pracy w stanie ustalonym elektrycznego obracania, przy założeniu, że znany jest jego stan techniczny, w dalszej kolejności należało przeprowadzić badania rozruszników [4]. Miały one na celu:

- określenie wpływu liczby wykonanych cykli rozruchowych przez rozrusznik na jego stan techniczny, przy założeniu, że na jego stan ma głównie wpływ liczba wykonanych przez niego cykli rozruchowych;
- opracowanie modelu matematycznego przebiegu momentu obrotowego rozrusznika w procesie elektrycznego obracania na podstawie parametrów kontrolnych tego procesu.

Do kompleksowych badań rozruszników wytypowano sześć losowo wybranych rozruszników o różnej liczbie wykonanych cykli rozruchowych, w tym dwóch rozruszników nowych. W celu wykonania badań zaprojektowano oraz wykonano laboratoryjne stanowisko hamowniane, przeznaczone do badań charakterystyk

mechanicznych rozruszników silników turbinowych, oraz skonstruowano specjalną wersję momentomierza wchodzącego w skład tego stanowiska. Specjalna konstrukcja momentomierza wynika z tego, że ma on specjalne kołnierze, które umożliwiają jego wykorzystanie zarówno podczas badań laboratoryjnych, jak i w warunkach rzeczywistych, kiedy z jednej strony można go podłączyć do skrzynki napędowej silnika, a z drugiej strony podłączyć do niego rozrusznik. Poza tym momentomierz umożliwia jednoczesny pomiar momentu i prędkości obrotowej rozrusznika.

Określenia stanu technicznego badanych rozruszników dokonano na podstawie porównania ich charakterystyk mechanicznych (rys. 4.). Z przebiegu tych charakterystyk wynika, że przy eksploatacji rozruszników zgodnie z instrukcją, liczba wykonanych cykli rozruchowych nie powoduje znacznego odchylenia charakterystyk rozruszników starych od charakterystyk rozruszników nowych.



Rys. 4. Przebieg aproksymowanych charakterystyk mechanicznych wytypowanych rozruszników

W dalszej kolejności opracowano model matematyczny przebiegu momentu obrotowego rozrusznika w procesie elektrycznego obracania na podstawie parametrów kontrolnych tego procesu, który przedstawia zależność:

$$M_{roz}(t) = \frac{60 U_t(t) - 0,015 I_t(t) - (579,26 [I_t(t)]^{-1,711}) I_t(t)}{2\pi n_{roz}(t)} I_t(t),$$

gdzie: M_{roz} – moment obrotowy rozrusznika;

I_t – prąd twornika;

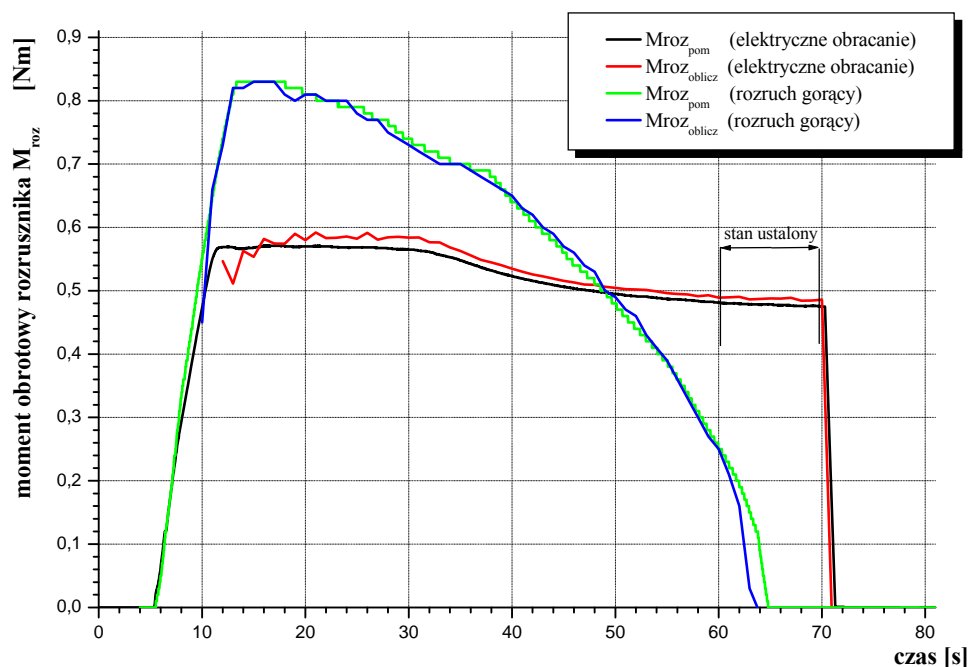
U_t – napięcie twornika;

n_{roz} – prędkość obrotowa rozrusznika;

R_t – rezystancja twornika;

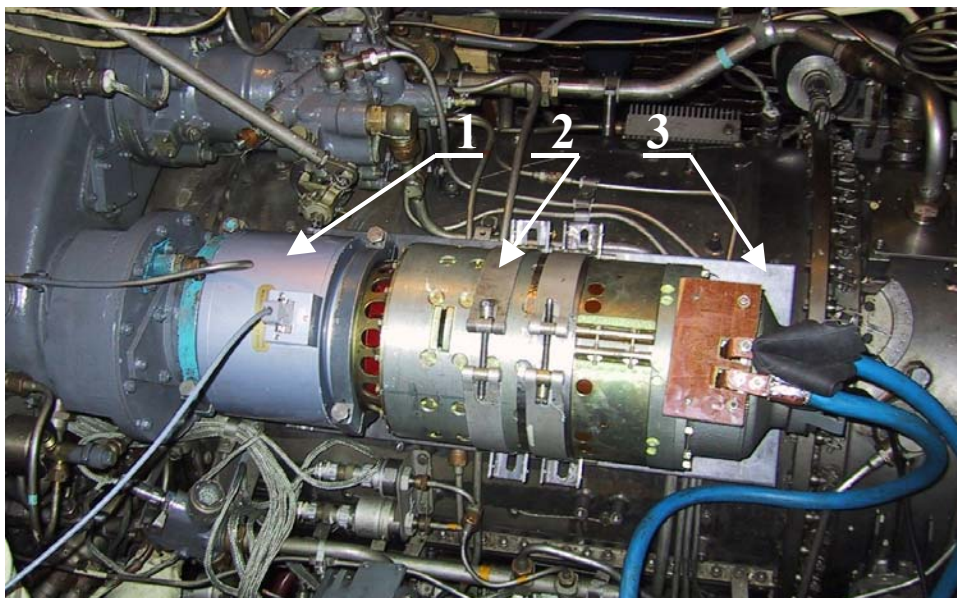
R_p – rezystancja przejścia.

W celu sprawdzenia adekwatności opracowanego modelu poddano go testom statystycznym polegającym na wyznaczeniu współczynnika korelacji liniowej pomiędzy wynikami pomiarów bezpośrednich (dokonanych za pomocą momentomierza) i obliczeń na podstawie opracowanego modelu (rys. 5.).



Rys. 5. Wyniki badań adekwatności opracowanego modelu matematycznego przebiegu momentu obrotowego rozrusznika dla elektrycznego obracania i rozruchu gorącego

W wyniku przeprowadzenia badań otrzymano współczynnik korelacji liniowej dla elektrycznego obracania równy **0,964**. Dodatkowo to samo wykonano dla przebiegu momentu obrotowego podczas rozruchu gorącego, otrzymując wartość współczynnika korelacji liniowej równą **0,992**. Widok momentomierza podłączonego do skrzynki napędowej silnika turbinowego podczas badań rozruszników na okręcie przedstawia rysunek 6.

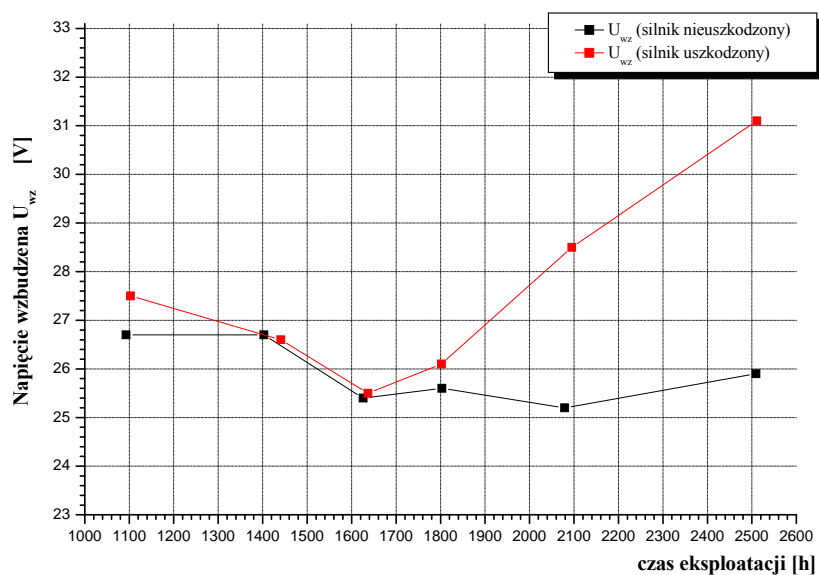


Rys. 6. Widok momentomierza podłączonego do skrzynki napędowej silnika turbinowego podczas badań rozruszników na okręcie:
1 – rozrusznik; 2 – momentomierz Mt-200; 3 – łożo ustalające

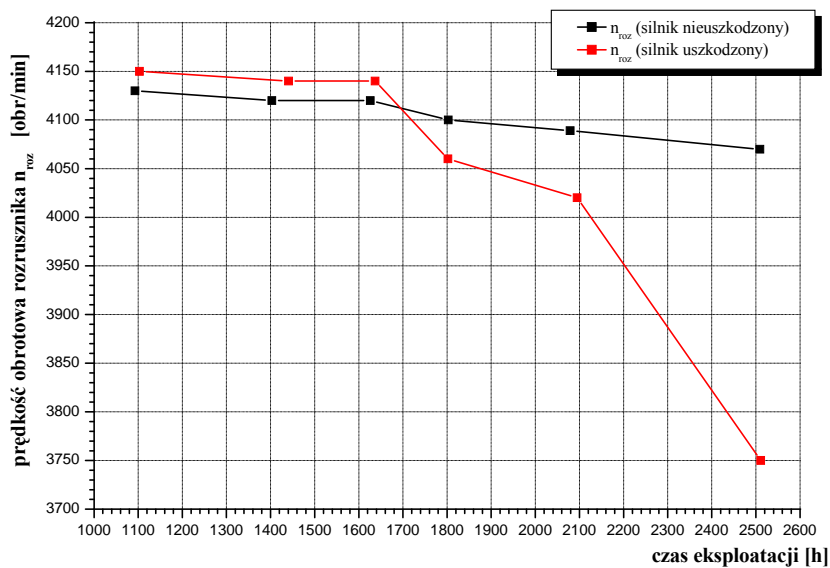
Z wyników przeprowadzonych badań można wnioskować, że opracowany model pozwoli w sposób przybliżony, ale z wystarczającą w aplikacjach inżynierskich dokładnością, opisywać przebieg momentu obrotowego rozrusznika podczas elektrycznego obracania wirników wytwornicy spalin badanych silników turbinowych.

Kończącym etapem badań był wybór i analiza trendu wybranych symptomów diagnostycznych zmiany stanu technicznego układu mechanicznego wytwornicy spalin silnika turbinowego. Wyboru symptomów dokonano spośród ustalonych wartości parametrów kontrolnych elektrycznego obracania.

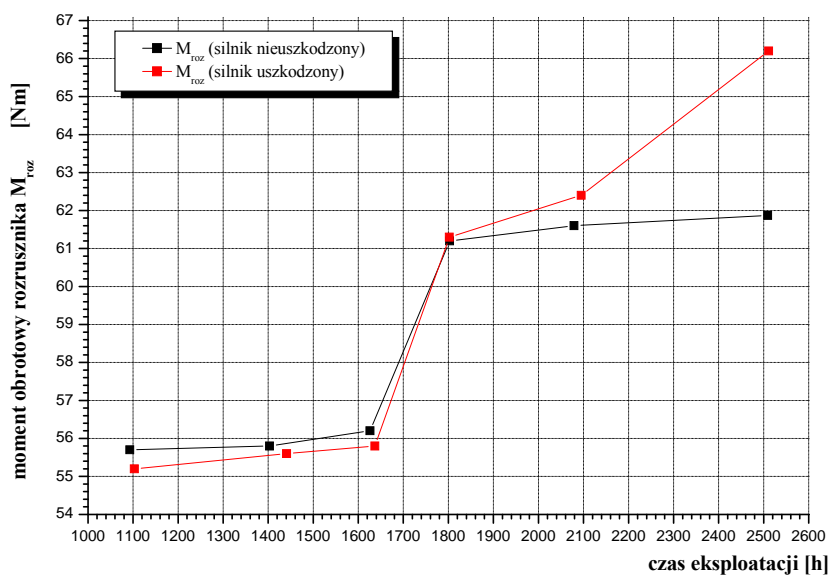
Dysponując modelem matematycznym przebiegu momentu obrotowego rozrusznika oraz rejestracjami parametrów kontrolnych elektrycznego obracania zawartych w bazie danych Bazowego Systemu Diagnostycznego [3], można było odtworzyć trend zmian stanu technicznego układu mechanicznego wytwornicy spalin w czasie życia jednego z silników. Należy nadmienić, że w badaniach silników turbinowych eksploatowanych na okrętach wojennych możliwy jest jedynie eksperyment bierny i analiza trendu symptomów diagnostycznych w czasie ich eksploatacji. Analizę przeprowadzono dla jednego z eksploatowanych silników, który uległ uszkodzeniu, a jego eksploatacja została wstrzymana. Był nim silnik turbinowy marszowy kombinowanego układu napędowego COGAG, w którym nastąpiło uszkodzenie łożyska tylnej podpory turbiny niskiego ciśnienia. Lokalizację uszkodzenia przeprowadzono w oparciu o wielosymptomową analizę diagnostyczną [3]. Dodatkowo w celu odniesienia się podczas tej analizy do silnika nieuszkodzonego wykonano analizę trendów wybranych symptomów diagnostycznych dla drugiego silnika marszowego, który wchodził w skład tego samego układu napędowego okrętu co silnik uszkodzony. Jest to o tyle istotne, że zakresy obciążeń tych silników oraz charakter ich eksploatacji były takie same. Największą wrażliwość na zmianę stanu technicznego wykazały: napięcie wzbudzenia U_{wz} , moment obrotowy rozrusznika M_{roz} oraz prędkość obrotowa rozrusznika n_{roz} . Wyniki analizy symptomów diagnostycznych wrażliwych na zmianę stanu technicznego układu mechanicznego wytwornicy spalin badanych silników w czasie ich eksploatacji przedstawiają rysunki 7., 8. i 9.



Rys. 7. Przebieg ustalonych wartości napięcia wzbudzenia U_{wz} podczas elektrycznego obracania w czasie eksploatacji rozpatrywanych silników turbinowych



Rys. 8. Przebieg ustalonych wartości prędkości obrotowej rozrusznika n_{rot} podczas elektrycznego obracania w czasie eksploatacji rozpatrywanych silników turbinowych



Rys. 9. Przebieg ustalonych wartości momentu obrotowego rozrusznika M_{rot} podczas elektrycznego obracania w czasie eksploatacji rozpatrywanych silników turbinowych

Z charakteru tych przebiegów wynika, że dla obu rozpatrywanych silników turbinowych symptomy stanu technicznego układów mechanicznych wytwornicy spalin w czasie ich eksploatacji w sposób ciągły ulegają zmianie. Dynamika zmian symptomów jest różna, w zależności od tego czy występuje zużycie eksploatacyjne, czy też degradacja stanu spowodowana jest uszkodzeniem istotnych elementów układu mechanicznego silnika.

Wyniki przeprowadzonych badań umożliwiły opracowanie metodyki oceny stanu technicznego układu mechanicznego wytwornicy spalin silnika turbinowego na podstawie ustalonych wartości parametrów kontrolnych elektrycznego obracania.

WNIOSKI KOŃCOWE

Przeprowadzone badania wykazały, że istnieje zależność między zmianą stanu technicznego układu mechanicznego wytwornicy spalin silnika turbinowego a mierzonymi wartościami parametrów kontrolnych elektrycznego obracania. Tym samym wykazano, że parametry pracy układu rozruchowego mogą być nośnikami informacji diagnostycznej. Największą wrażliwość na zmianę stanu technicznego wykazały napięcie wzbudzenia U_{wz} , moment obrotowy rozrusznika M_{roz} oraz prędkość obrotowa rozrusznika n_{roz} . Wartości tych parametrów w stanie ustalonym elektrycznego obracania stanowią symptomy diagnostyczne, charakteryzujące ogólny stan techniczny układu mechanicznego wytwornicy spalin silnika turbinowego w procesie jego eksploatacji. Z analizy przebiegu trendów tych symptomów wynika potrzeba prowadzenia systematycznych badań diagnostycznych.

Model matematyczny, opracowany podczas badań, z wystarczającą dokładnością opisuje przebieg momentu obrotowego rozrusznika w procesie elektrycznego obracania. Został on zweryfikowany na podstawie pomiaru momentu obrotowego rozrusznika, za pomocą specjalnie skonstruowanego momentomierza.

Zaproponowana metoda diagnozowania układu rozruchowego w dużym stopniu obniża koszty badań, gdyż umożliwia diagnozowanie układu kinematycznego wytwornicy spalin silnika turbinowego bez konieczności „gorącego” uruchamiania silnika i jego pracy na obciążeniach.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Cannon R. H. jr., *Dynamika układów fizycznych*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1973.
- [2] Cempel C., Tomaszewski F., *Diagnostyka maszyn*, Międzyresortowe Centrum Naukowe Eksploatacji Majątku Trwałego, Radom 1992.
- [3] Charchalis A. i in., *Sprawozdania z badań diagnostycznych turbinowych silników spalinowych eksploatowanych na okrętach MW RP, prace badawcze AMW, Gdynia 1986 – 1998.*
- [4] Charchalis A., Pojawa B., *Ocena charakterystyk mechanicznych rozruszników elektrycznych okrętowych turbinowych silników spalinowych*, XXX Ogólnopolskie Sympozjum – Diagnostyka Maszyn, Węgierska Górka 2003.
- [5] Charchalis A., Pojawa B., *Wpływ pogorszenia się stanu technicznego okrętowego turbinowego silnika spalinowego na jego charakterystyki rozruchowe*, XXVII Ogólnopolskie Sympozjum – Diagnostyka Maszyn, Węgierska Górka 2000.
- [6] Charchalis A., Pojawa B., *Wpływ stanu cieplnego okrętowego turbinowego silnika spalinowego na jego charakterystyki rozruchowe*, IV Sympozjum Naukowo-Techniczne pt. „Silniki w zastosowaniach wojskowych”, Jurata 1999.
- [7] Charchalis A., Pojawa B., *Wstępne założenia diagnozowania układu rozruchowego okrętowego turbinowego silnika spalinowego*, II Międzynarodowy Kongres Diagnostyki Technicznej, Warszawa 2000.
- [8] Kowalowski H., *Maszyny i napędy elektryczne*, PWN, Warszawa 1975.
- [9] Orłowski Z., *Diagnostyka w życiu turbin parowych*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2001.
- [10] Sitnik L., *Kinetyka zużycia*, PWN, Warszawa 1998.

ABSTRACT

The paper present the results of investigations into start-up systems used in marine turbine internal combustion engines. They included identification and reliability analysis of the object investigated, initial investigations, investigations of starters, selection of diagnostic

symptoms and their trends analysis during exploitation, based on an example of a damaged and non-damaged engine. The results were used to develop the method for diagnosing start-up systems in marine turbine internal combustion engines.

Recenzent kmdr dr hab. inż. Zbigniew Korczewski