

doi:10.15199/48.2017.11.05

## Analiza przyczyn drgań i iskrzenia szczotek wirnika turbogeneratorsynchronicznego

**Streszczenie.** Przedstawiono problem z rzeczywistym układem szczotkowym. Dokonano symulacji przebiegów napięć i prądów w obwodzie statycznego tyrystorowego układu wzbudzenia. Wykonano szereg prac pomiarowych i badawczych oraz zaproponowano rozwiązanie problemu nadmiernych drgań i iskrzenia szczotek, zasilających wirnik turbogeneratorsynchronicznego.

**Abstract.** This paper introduces to the real brush system problems in the synchronous generator rotor. The current and voltage were simulated and the thyristor excitation system was analyzed. The proposals of the solution of the rotor supplied brush sparking problem are presented. (The analysis of vibration and brush sparking supplied the synchronous generator rotor).

**Słowa kluczowe:** szczotki, iskrzenie, drgania, aparat szczotkowy.

**Keywords:** brush, sparking, vibration, brush system.

### Wstęp

Na turbogeneratorze 48 MW stwierdzono występowanie iskrzenia oraz plam na pierścieniach ślizgowych, powodowanych prawdopodobnie przez nadmierne drgania szczotek. Dotychczasowe zabiegi, wśród których wymienić należy zainstalowanie nawilżacza powietrza w przestrzeni wokół pierścienia ślizgowego po stronie przeciwnapędowej (turbogenerator ma po jednym pierścieniu po obu stronach stojana — rozwiązanie stosowane w maszynach wyprodukowanych przez Škodę) nie rozwiązały w pełni tego problemu.

Wykonano pomiar drgań pierścieni ślizgowych, mający na celu zweryfikowanie hipotezy, zgodnie z którą pierścienie ślizgowe mogą zmieniać kształt po nagrzaniu.

Ponadto wykonano rejestrację i pomiar napięcia wzbudzenia przy prostowniku oraz na szczotkach zasilających uzwojenie wirnika turbogeneratorsynchronicznego.

### Pomiar drgań

Pomiar drgań pierścieni ślizgowych wykonano na maszynie wirującej ze znamionową prędkością obrotową za pośrednictwem dotartych szczotek, z których usunięto gumowe amortyzatory. Do szczotki dociskano metalowy bolec, na którego drugim końcu zamontowany był czujnik drgań z masą sejsmiczną. Wykorzystano kolejno trzy czujniki drgań, dwa z nich to stosunkowo ciężkie czujniki elektrodynamiczne, a trzeci — to mały i lekki akcelerometr piezoelektryczny (16 g).

Pomiar nie jest tak precyzyjny, jak pomiar przetwornikiem laserowym, ale w tym zastosowaniu wystarczający, a przede wszystkim z łatwością eliminuje wpływ spiralnego rowka na pierścieniu na wynik pomiaru drgań.

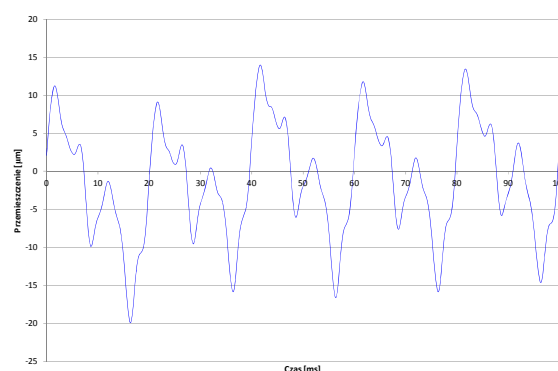
Pomiar drgań pierścieni ślizgowych wykonano na generatorze, który od około godziny pracował bez wzbudzenia i połączenia z siecią, dla pierścieni „zimnych”, to jest o maksymalnej temperaturze 45 °C (pierścień po stronie przeciwnapędowej do napędu) i 49 °C (pierścień po stronie napędu). Następnie generator wzbudzono i zsynchronizowano z siecią. Po tym, jak pierścienie ślizgowe uzyskały docelową temperaturę pracy, generator odłączono od sieci i wyłączono wzbudzenie. Podczas odwzbudzenia i odłączania generatora od sieci oba pierścienie ślizgowe wychłodziły się do około 65 °C (temperatura maksymalna zmierzona za pomocą kamery termowizyjnej), co uznaje się za stan „gorący”.

W tabeli 1 zestawiono wartości międzyszczytowe przemieszczenia drgań pierścieni o częstotliwości 50 Hz, zmierzone za pośrednictwem przygotowanych zgodnie z wcześniejszym opisem szczotek.

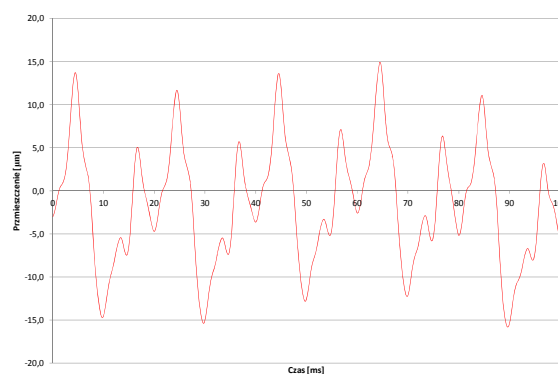
Tabela 1. Wyniki pomiaru wartości amplitudy przemieszczenia drgań

Strona	Czujnik	Międzyszczytowa amplituda przemieszczenia drgań 50 Hz		
	Temperatura	1	2	3
—	°C	µm	µm	µm
Napędu	49	14,4	13,5	14,5
Napędu	65	10,7	10,9	6,1
Przeciwna do napędu	45	12,6	16,1	6,6
Przeciwna do napędu	65	27,1	25,9	26,6

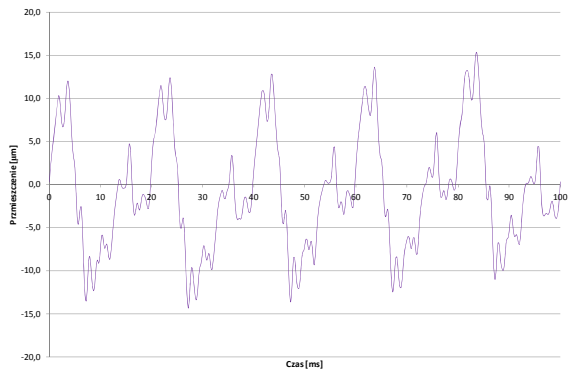
Na rys. 1 do rys. 12 przedstawiono oscylogramy wartości międzyszczytowych przemieszczeń drgań szczotek.



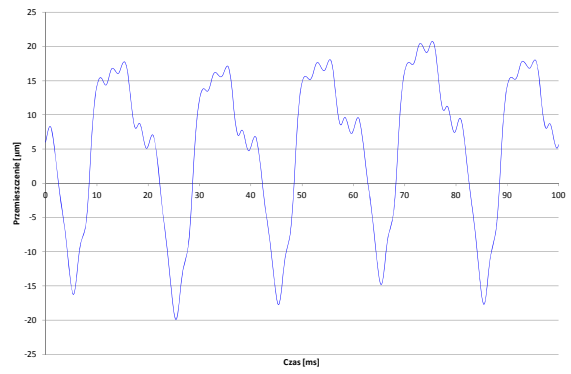
Rys. 1. Oscylogram przemieszczenia drgań pierścienia ślizgowego od strony napędu zarejestrowane za pomocą czujnika 1 (temperatura pierścienia 49°C).



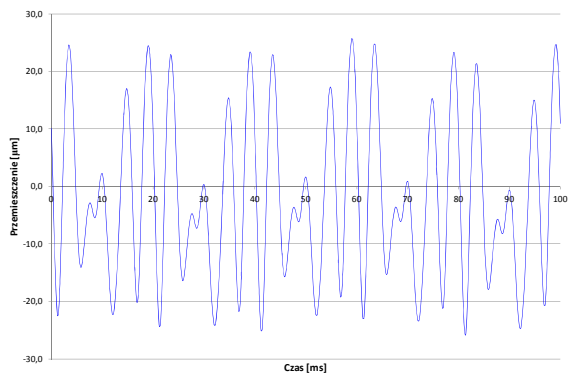
Rys. 2. Oscylogram przemieszczenia drgań pierścienia ślizgowego od strony napędu zarejestrowane za pomocą czujnika 2 (temperatura pierścienia 49°C).



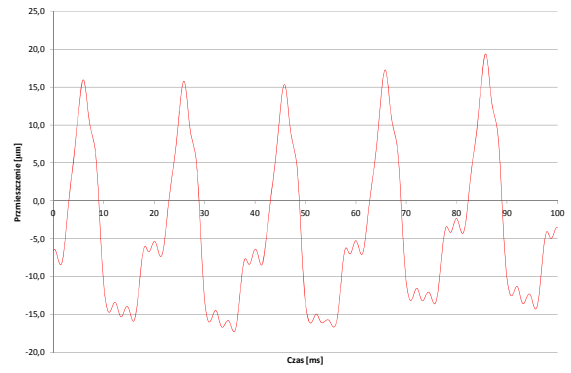
Rys. 3. Oscylogram przemieszczenia drgań pierścienia ślizgowego od strony napędu zarejestrowane za pomocą czujnika 3 (temperatura pierścienia 49°C).



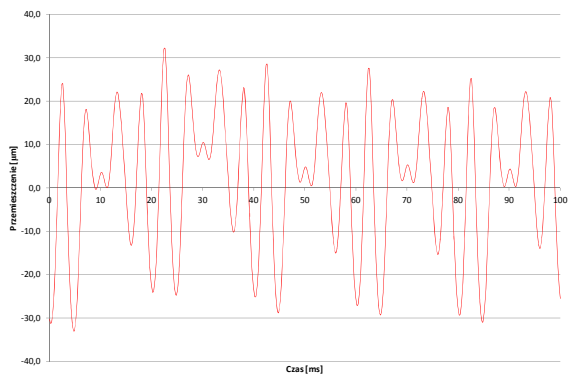
Rys. 7. Oscylogram przemieszczenia drgań pierścienia ślizgowego od strony napędu zarejestrowane za pomocą czujnika 1 (temperatura pierścienia 65°C).



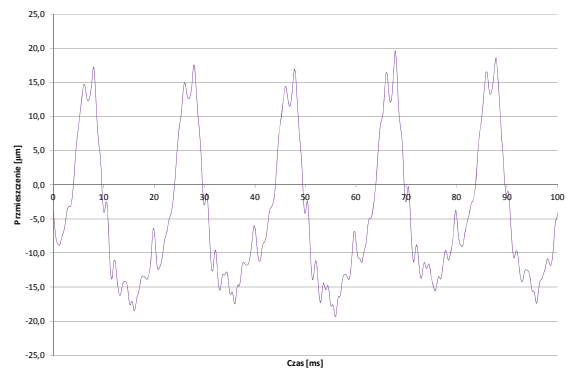
Rys. 4. Oscylogram przemieszczenia drgań pierścienia ślizgowego od strony przeciwnej do napędu zarejestrowane za pomocą czujnika 1 (temperatura pierścienia 45°C).



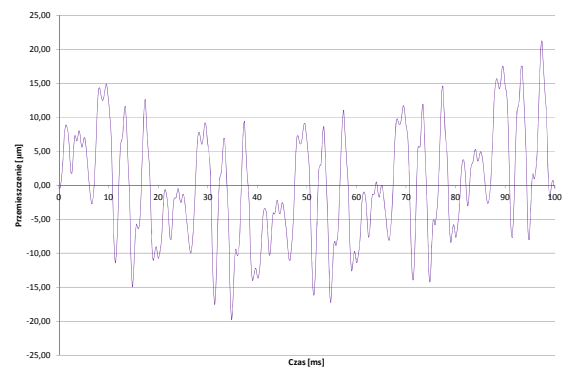
Rys. 8. Oscylogram przemieszczenia drgań pierścienia ślizgowego od strony napędu zarejestrowane za pomocą czujnika 2 (temperatura pierścienia 65°C).



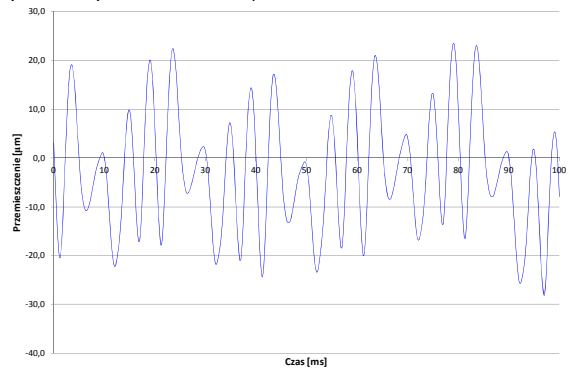
Rys. 5. Oscylogram przemieszczenia drgań pierścienia ślizgowego od strony przeciwnej do napędu zarejestrowane za pomocą czujnika 2 (temperatura pierścienia 49°C).



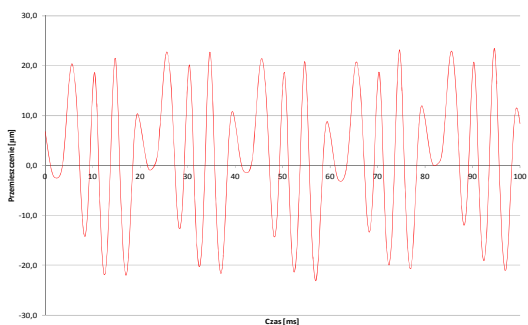
Rys. 9. Oscylogram przemieszczenia drgań pierścienia ślizgowego od strony napędu zarejestrowane za pomocą czujnika 3 (temperatura pierścienia 65°C).



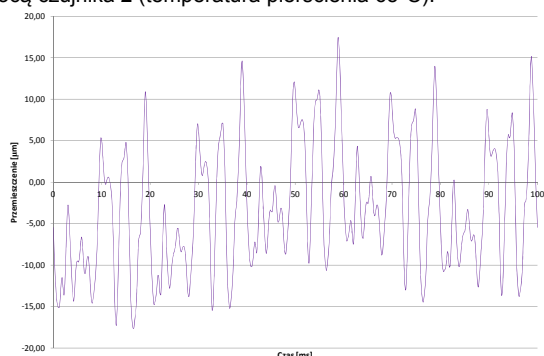
Rys. 6. Oscylogram przemieszczenia drgań pierścienia ślizgowego od strony przeciwnej do napędu zarejestrowane za pomocą czujnika 3 (temperatura pierścienia 49°C).



Rys. 10. Oscylogram przemieszczenia drgań pierścienia ślizgowego od strony przeciwnej do napędu zarejestrowane za pomocą czujnika 1 (temperatura pierścienia 65°C).



Rys. 11. Oscylogram przemieszczenia drgań pierścienia ślizgowego od strony przeciwnej do napędu zarejestrowane za pomocą czujnika 2 (temperatura pierścienia 65°C).



Rys. 12. Oscylogram przemieszczenia drgań pierścienia ślizgowego od strony przeciwnej napędu zarejestrowane za pomocą czujnika 3 (temperatura pierścienia 65°C).

### Pomiar napięcia wzbudzenia

Pomiar napięcia wzbudzenia wykonano zarówno na szynach w szafie wzbudzenia, jak i na szczotkach zasilających wirnik maszyny przy różnych obciążeniach turbogeneratorsa. Orientacyjne parametry obciążeniowe turbogeneratorsa podano w tabeli 2. Wyniki wykonywanych pomiarów zestawiono w tabeli 3.

Tabela 2. Podstawowe parametry obciążeniowe turbogeneratorsa

		Stan pracy 1	Stan pracy 2
Moc czynna	MW	4	38
Moc bierna	Mvar	7	21
Moc pozorna	MVA	8,1	43,4
Współczynnik mocy	-	0,50	0,88
Prąd stojana	A	800	1000
Napięcie wzbudzenia	V	140	239
Prąd wzbudzenia	A	290	509

Fragmenty oscylogramów napięć pokazano na rys. 13 do rys. 15. Widma napięć pokazano na rys. 16 do rys. 20.

We wszystkich widmach dominuje składowa napięcia o częstotliwości 150 Hz, spowodowana zastosowaniem prostownika półsterowanego, a porównywalna z nią jest składowa stała. Wartość składowej o częstotliwości 50 Hz, podczas wykonywanych pomiarów przy mocy czynnej około 4 MW, wynosiła maksymalnie 5,3 % składowej 150 Hz i 6,7 % składowej stałej na szczotkach oraz odpowiednio 5,0 % i 6,2 % w układzie wzbudzenia. Przy mocy czynnej około 38 MW składowa o częstotliwości 50 Hz wynosiła około 3,2 % składowej o częstotliwości 150 Hz i składowej stałej zarówno w układzie wzbudzenia, jak i na szczotkach.

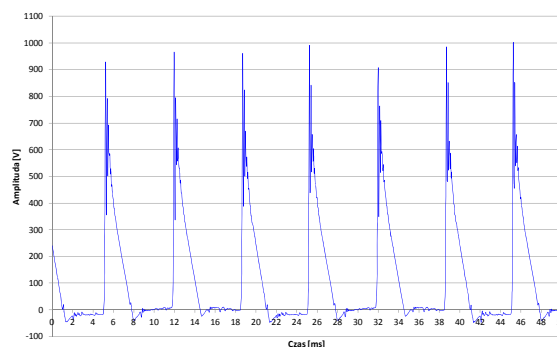
### Tyristorowy układ wzbudzenia

Doświadczenia eksploatacyjne wskazują, że pomimo niewątpliwych zalet tyristorowych układów wzbudzenia, mają one również pewne wady. Jedną z nich jest

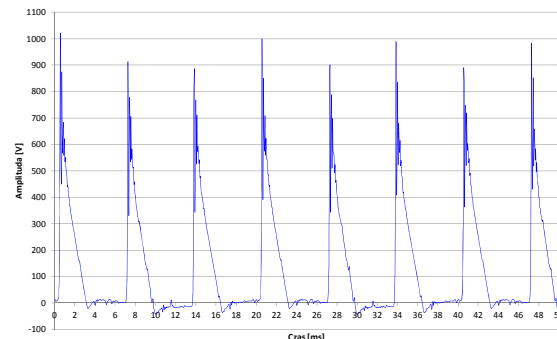
występowanie impulsów napięciowych na wale turbogeneratorsa. W przypadkach, kiedy impulsy te osiągają amplitudę powyżej 20 V, przepływ prądów wałowych przez łożysko generatorsa od strony przeciwnapędowej powoduje ich uszkodzenia wskutek korozji elektrycznej. Procesy niszczące, ze względu na stosunkowo małą wartość prądu przebiegają bardzo wolno. Powodują jednak wzrost temperatury stopu łożyskowego oraz wydatku oleju na łożysku spowodowanego mikrowzrzeniami na powierzchni babbitu.

Tabela 3. Napięcie wzbudzenia

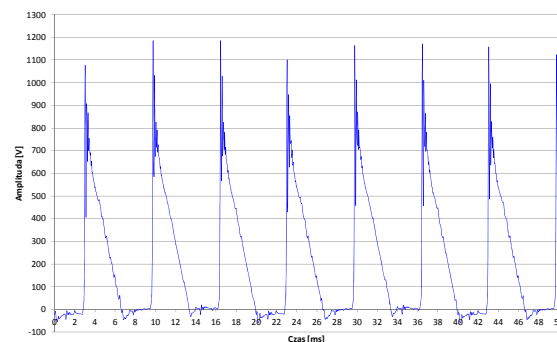
Miejsce pomiaru	Szczotki	Szyny układu wzbudzenia	Szczotki	Szyny układu wzbudzenia
DC	116,8	122,0	216,2	216,5
AVG	117,33	121,82	213,58	215,02
P-P	1075,40	1073,28	1261,50	1263,74
MAX	1028,02	1027,02	1195,00	1200,55
MIN	-47,38	-46,26	-66,50	-63,20



Rys. 13. Przebieg napięcia wzbudzenia zarejestrowany na szczotkach turbogeneratorsa przy obciążeniu mocą czynną P=4MW (Q=7Mvar, S=8,1MVA, cos φ=0,5).

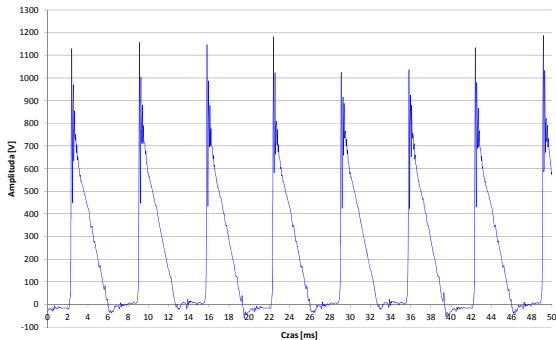


Rys. 14. Przebieg napięcia wzbudzenia zarejestrowany w układzie wzbudzenia turbogeneratorsa przy obciążeniu mocą czynną P=4MW (Q=7Mvar, S=8,1MVA, cos φ=0,5).

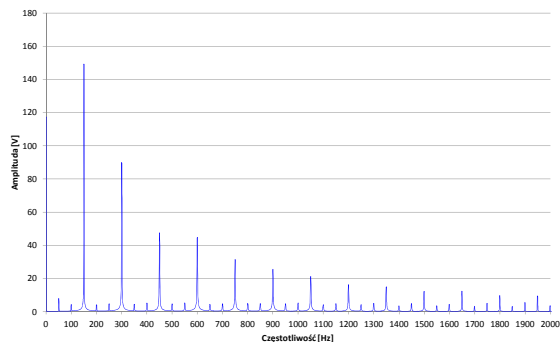


Rys. 15. Przebieg napięcia wzbudzenia zarejestrowany na szczotkach turbogeneratorsa przy obciążeniu mocą czynną P=38MW (Q=21Mvar, S=43,4MVA, cos φ=0,88).

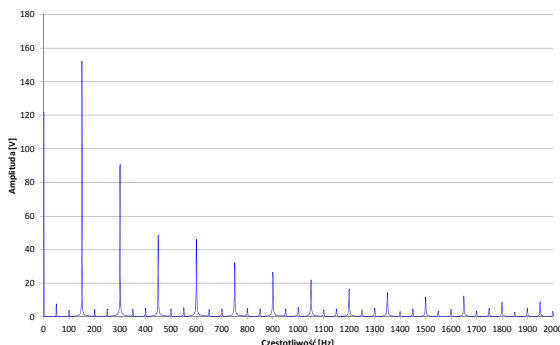
Aby temu zapobiec stosuje się uziemienie wału od strony pierścieni ślizgowych przez filtr RC. W energetyce zawodowej wyposażonej w statyczne tyrystorowe układy wzbudzenia takie filtry są stosowane. Szpilki wysokiego napięcia w obwodzie wzbudzenia w rozpatrywanym przypadku wynoszą ok. 1,2 kV. Ograniczenie ich wartości jest możliwe po zastosowaniu odpowiednich układów tłumiących przepięcia. Znaczne wartości tych przepięć powodują zakłócenia radioelektryczne [6] oraz wpływają niekorzystnie na łożyska od strony pierścieni ślizgowych [2].



Rys. 16. Przebieg napięcia wzbudzenia zarejestrowany w układzie wzbudzenia turbogeneratora przy obciążeniu mocą czynną  $P=38\text{MW}$  ( $Q=21\text{Mvar}$ ,  $S=43,4\text{MVA}$ ,  $\cos \varphi=0,88$ ).



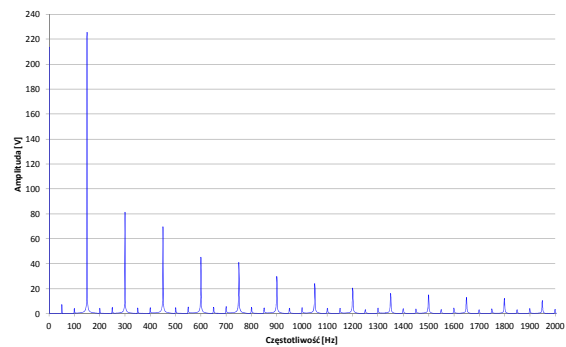
Rys. 17. Widmo napięcia zmierzonego na szczotkach turbogeneratora przy obciążeniu mocą czynną  $P=4\text{MW}$  ( $Q=7\text{Mvar}$ ,  $S=8,1\text{MVA}$ ,  $\cos \varphi=0,5$ ).



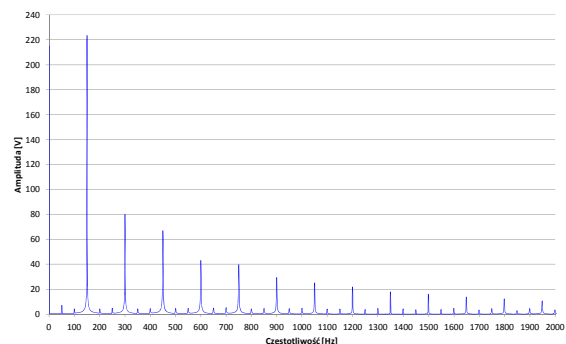
Rys. 18. Widmo napięcia zmierzonego w układzie wzbudzenia turbogeneratora przy obciążeniu mocą czynną  $P=4\text{MW}$  ( $Q=7\text{Mvar}$ ,  $S=8,1\text{MVA}$ ,  $\cos \varphi=0,5$ ).

### Badania symulacyjne

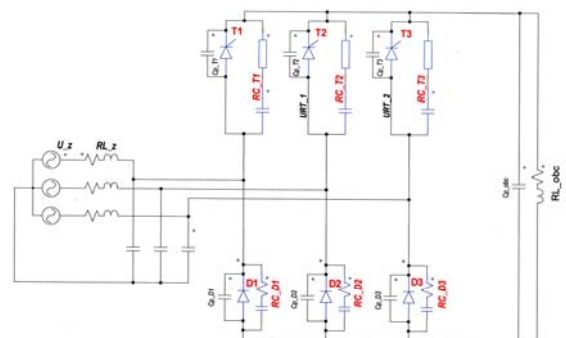
Po przeprowadzonych pomiarach drgań szczotek i napięcia wzbudzenia oraz analizie wyników pomiarów wykonano badania symulacyjne układu wzbudzenia generatora. Obliczenia symulacyjne przeprowadzono w programie PSIM 9.3, schemat układu wzbudzenia użytego do obliczeń symulacyjnych przedstawiono na rys. 21.



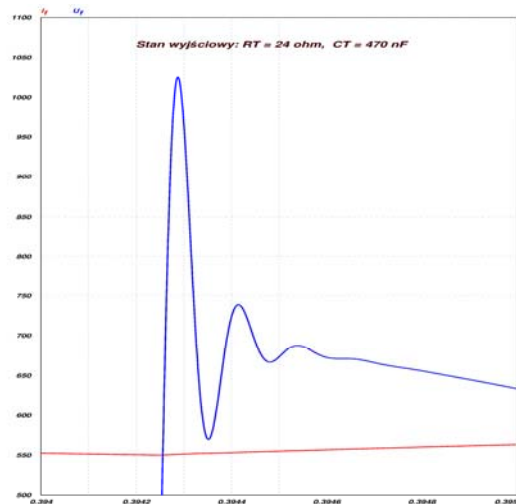
Rys. 19. Widmo napięcia zmierzonego na szczotkach turbogeneratora przy obciążeniu mocą czynną  $P=38\text{MW}$  ( $Q=21\text{Mvar}$ ,  $S=43,4\text{MVA}$ ,  $\cos \varphi=0,88$ ).



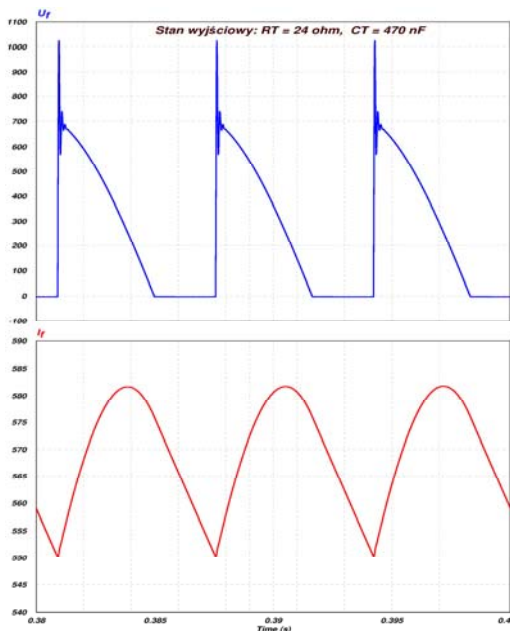
Rys. 20. Widmo napięcia zmierzonego w układzie wzbudzenia turbogeneratora przy obciążeniu mocą czynną  $P=38\text{MW}$  ( $Q=21\text{Mvar}$ ,  $S=43,4\text{MVA}$ ,  $\cos \varphi=0,88$ ).



Rys. 21. Uproszczony schemat symulacyjny układu wzbudzenia generatora.



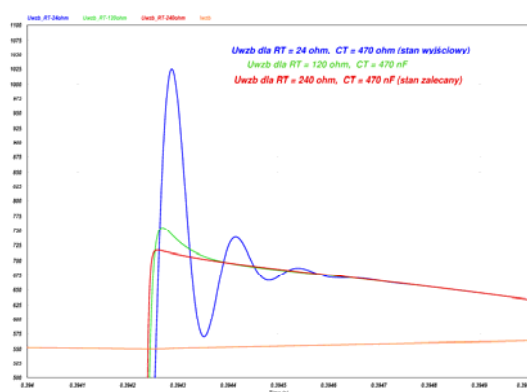
Rys. 22. Przykład przebiegu napięcia i prądu wzbudzenia podczas komutacji.



Rys. 23. Przykład przebiegu napięcia i prądu wzbudzenia.

Na rys. 22 przedstawiono przebieg prądu i napięcia wzbudzenia w chwili komutacji jednego z tyrystorów przy istniejącym układzie tłumienia przepięć. W tym przypadku napięcie wzbudzenia narasta do wartości przekraczającej 1 kV. Na rys. 23 przedstawiono przebieg napięcia i prądu wzbudzenia, przy czym pulsacje prądu o częstotliwości 300 Hz nie przekraczają 35 A zaś napięcie o częstotliwości 150 Hz, zmienia się od „zera” do wartości wynikającej z procesów komutacji kluczy [7], w tym przypadku do ponad 1 kV. Przykłady przebiegów przedstawione na rys. 22-23 zostały podane dla następujących parametrów RC układu gaszenia przepięć:  $R_T=24 \Omega$  i  $C_T=470 \text{ nF}$ .

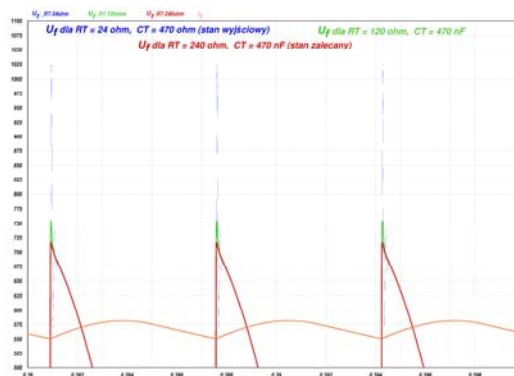
Na rys. 24 przedstawiono wyniki badań symulacyjnych dla różnych wartości parametrów RC układu tłumiącego przepięcia komutacyjne. Ze względu na niebezpieczeństwo, iż pojemność układu gaszącego przepięcia wraz z indukcyjnością uzwojenia wirnika może tworzyć układ rezonansowy zdecydowano się na zmiany tylko rezystancji w układzie gaszenia przepięć komutacyjnych. Symulację przeprowadzono dla kilku wartości rezystancji, przy czym zadowalające rezultaty uzyskano przy rezystancji  $R_T=240 \Omega$ .



Rys. 24. Przykład tłumienia przepięć komutacyjnych za pomocą zmian rezystancji układu gaszenia przepięć komutacyjnych.

Rys. 25 przedstawia przebieg prądu i napięcia wzbudzenia przy znacznie zredukowanych przepięciach komutacyjnych. Przyjęto, że rezystancja  $R_T = 240 \Omega$  pozwala na satysfakcjonujące zredukowanie wartości

napięcia podczas komutacji. Ograniczenie przepięć komutacyjnych może mieć wpływ na intensywność iskrzenia na styku pierścień-szczotka.



Rys. 25. Przykład przebiegu prądu i napięcia wzbudzenia przy rezystancji układu tłumienia przepięć  $R_T=240 \Omega$ .

### Szczotki układu wzbudzenia turbogeneratora

Przyjmuje się, że jednym z powodów nadmiernych drgań i iskrzenia szczotek, na styku szczotka-pierścień mogą być nadmierne wartości przepięć, jednak badania na obiekcie rzeczywistym dowodzą, że wymiana szczotek na odpowiednio „miękkie” w znacznym stopniu lub całkowicie eliminuje powstałe iskrzenie niezależnie od warunków pracy panujących w okolicy pierścieni ślizgowych.

### Podsumowanie

Przeprowadzone pomiary drgań pierścieni ślizgowych, zrealizowane za pośrednictwem szczotki poddanej silnemu dociskowi, nie wskazują, by zmiana temperatury pierścieni ślizgowych powodowała istotny wzrost drgań tych pierścieni, a więc, wobec wykonanych pomiarów, wykluczyć należy niewłaściwe osadzenie tych pierścieni, powodujące ich luz i zwiększone drgania po nagraniu. Należałoby sprawdzić prawidłowość osadzenia szczotek w szczotkotrzymaczach, poprzez weryfikację równomierności docisku sprężyn dociskających szczotki, który powinien być rzędu: 150 do 200 g/cm<sup>2</sup> tj od 0,15 do 0,2 kg/cm<sup>2</sup> [1].

W poniższej tabeli 4 zestawione są wyniki czterech serii pomiarów drgań szczotek i uchwytów, zawierające wartości sumaryczne prędkości drgań w zakresie 10÷10000 Hz:

Tabela 4. Wyniki pomiaru wartości skutecznej prędkości drgań

Serie	1	2	3	4	
Strona	Rodzaj	Prędkość skuteczna drgań szczotek [mm/s]			
P	MIN	10,0	19,0	20,0	7,5
	MAX	14,5	27,0	23,0	13,0
N	MIN	2,9	5,1	5,9	6,6
	MAX	3,9	6,5	6,8	15,5

Pierwsza seria pomiarów została wykonana przy zmniejszonej prędkości obrotowej, pozostałe przy znamionowej prędkości obrotowej, kolejno: dla niesynchronizowanej maszyny, dla maszyny zsynchronizowanej oraz po zmianie biegunowości, dla maszyny pracującej z pewnym obciążeniem.

Drgania szczotek pierścienia, zmierzone w trzech pierwszych seriach po stronie napędu („N”) są zdecydowanie niższe od drgań mierzonych po stronie przeciwnej do napędu („P”), choć przy prędkości obrotowej 3000 obr/min. przekraczają wartość dopuszczalną na niektórych szczotkach. Zgodnie z [1] prędkość drgań szczotek nie powinna być większa od 6 mm/s. Po stronie „P” wartości prędkości drgań znacząco przekraczają wartość dopuszczalną.

Po zmianie biegunowości obserwuje się zmniejszenie poziomu prędkości drgań po stronie „P” oraz wzrost po stronie „N”. Wszystkie zarejestrowane wartości są wyższe od wartości uznawanej za dopuszczalną.

Niepokoici poziom drgań (liczne przekroczenia wartości dopuszczalnej prędkości drgań), jednak zmiana poziomów drgań związana ze zmianą polaryzacji jest jak najbardziej właściwa.

Pomiary zrealizowane przez Instytut Energetyki były specyficzne, zorientowane na składową 50 Hz w widmie drgań, dla zaobserwowania zachowania pierścieni ślizgowych przy różnych temperaturach, w celu potwierdzenia bądź zaprzeczenia występowaniu owalizacji pierścienia ślizgowego po jego nagraniu.

Wyniki pomiarów wykonanych przez Instytut Energetyki opracowano w wartościach przemieszczenia drgań i wyrażono w mikrometrach. W tabeli 1 wyników zestawiono wartości międzyszczytowe dla składowej 50 Hz, związanej z wymuszeniami mechanicznymi. Dla celów porównania z powyższym zestawieniem wykonano przeliczenie wartości przemieszczenia drgań na wartości prędkości drgań wyrażone w [mm/s]. Widmo zarejestrowanych sygnałów wykonywano do 2000 Hz, jednak istotne wartości w widmach prędkości drgań praktycznie występują dla co najwyżej kilkuset herców. Mierzone wartości sumaryczne przyjmują wartości od 4,7 mm/s do 20,0 mm/s, zależnie od pierścienia i stanu jego nagrzania, a najważniejsze składowe mają częstotliwości: 50 Hz (tylko na „P” przy 65°C), 100 Hz, 200 Hz, 350 Hz oraz 650 Hz (obserwowane w niektórych widmach tylko za pomocą małego akcelerometru).

**Autorzy:** mgr inż. Marcin Biernacki, Instytut Energetyki Instytut Badawczy, 01-330 Warszawa ul. Mory 8, e-mail: [Marcin.Biernacki@ien.com.pl](mailto:Marcin.Biernacki@ien.com.pl); dr inż. Przemysław Majewski, Instytut Energetyki Instytut Badawczy, 01-330 Warszawa ul. Mory 8, e-mail: [Przemyslaw.Majewski@ien.com.pl](mailto:Przemyslaw.Majewski@ien.com.pl);

#### LITERATURA

- [1] J. Przybysz: „Urządzenia szcztokowe generatorów synchronicznych. Zagadnienia eksploatacyjne.”, Wydawnictwo Instytutu Energetyki, Warszawa, 2016
- [2] J. Przybysz, M. Szydłowski, P. Matras: „Napięcia na wałach generatorów ze wzbudzeniem tyrystorowym”, Energetyka 1/1992.
- [3] Układ wzbudzenia MAW-625W88 – instrukcja obsługi
- [4] Mieczysław Nowak, Roman Barlik: „Poradnik inżyniera energoelektronika”, Warszawa WNT 1998
- [5] Praca zbiorowa: „Projektowanie przekształtników tyrystorowych”, Warszawa WNT 1974
- [6] R.T. Harrold, F.T. Emery „Radio Frequency Diagnostic Monitoring of Electrical Machines” IEEE Electrical Insulation Magazine, March 1986-Vol. 2, No. 2
- [7] B. Drury, „The Control Techniques Drives and Control Handbook” The Institution of Electrical Engineers, London 2001.