

Problemy obliczeń częstości drgań własnych wirników turbogeneratorów o mocach granicznych, na przykładzie jednostki o mocy 800 MW

Streszczenie. W pracy przedstawiono wyniki obliczeń częstości drgań własnych wirnika turbogeneratorsa o mocy granicznej rzędu 800 MW. Turbogenerator o tym poziomie mocy jest jednostką typową i pośrednią pod względem parametrów konstrukcyjnych i eksploatacyjnych dla klasy maszyn, których moce zawierają się w przedziale wartości <400, ..., 1600 MW>. Zastosowano nowoczesny numeryczny model obliczeniowy wirnika umożliwiający uwzględnienie jego osobliwości konstrukcyjnych i materiałowych.

Abstract. The paper presents the results of calculations of the natural frequency of turbo-generator rotor with a power rating limit about 800 MW. Turbo-generator with this level of power is a typical and average unit in terms of design and operating parameters for the class of machines, whose powers are in the range of values <400, ..., 1600 MW>. An advanced numerical computational model of the rotor is used. It enables to take into account various design and material characteristics. (**Problems of calculation natural frequencies of turbo-generators rotors, based on 800 MW unit.**)

Słowa kluczowe: turbogeneratory, wirniki, częstości drgań własnych, formy drgań.

Keywords: turbo-generators, rotors, natural frequency vibrations turbine-generator.

Wstęp

Jednym z ważniejszych zagadnień w konstrukcji maszyn elektrycznych o mocach granicznych jest problem częstości drgań własnych elementów konstrukcyjnych, do których zalicza się przede wszystkim częstości drgań własnych wirników, kadłubów, elementów zawieszonych lub zamocowanych rdzeni stojanów. Znajomość częstości drgań własnych elementów konstrukcyjnych maszyn elektrycznych ma znaczenie w kwestii odstrojenia od efektów rezonansowych w procesach wibracji ustroju maszyny przy różnego rodzaju wymuszeniach sił: elektromagnetycznych, mechanicznych i oddziaływań kinematycznych ruchu obrotowego.

Zagadnienie to było zawsze bardzo ważne, jednak obecnie nabiera szczególnego znaczenia ze względu na wzrastające moce turbogeneratorów, optymalizację konstrukcji wirników – magneśnic i stosowanie stosunkowo częstych rozruchów.

Modele matematyczne dotyczące problematyki obliczeń częstości drgań własnych elementów i podzespołów maszyn elektrycznych prezentowane w literaturze nie są zadawalające. Zdaniem autorów należy obecnie zastosować modele numeryczne obliczeń tych wielkości, z możliwie pełnym uwzględnieniem osobliwości konstrukcyjnych i różnorodności materiałów.

W pracy rozpatrzono problem częstości drgań własnych wirnika – magneśnicy turbogeneratorsa o mocy znamionowej $P_N=800$ MW, który można uznać za jednostkę limitacyjną zainstalowanych w kraju turbogeneratorów. Jest to jednostka charakterystyczna dla tej klasy maszyn, których moce zawierają się w przedziale wartości <400, ..., 1600 MW>.

Wirnik – magneśnica turbogeneratorsa jest obok stojana – twornika najważniejszym podsystemem konstrukcyjnym tych maszyn, ponieważ przez wał wirnika doprowadzona jest do generatora moc z turbiny. A parametry konstrukcyjne – wymiary geometryczne, parametry strukturalne strefy żłobkowo-zębowej i parametry fizyczne – przepływy (amperozwoje) i wzbudzona tym przepływem indukcja magnetyczna determinują moc generowaną przez maszynę.

Uwagi o częstościach drgań własnych wirników turbogeneratorów

Zagadnienie częstości drgań własnych maszyn wirnikowych należy do jednego z najważniejszych

problemów w konstrukcji tych maszyn [1 - 7]. Zagadnienie to jest szczególnie ważne w przypadku maszyn o mocach granicznych i maszyn wysokoobrotowych, a więc turbin, turbogeneratorów, silników turbinowych itp. W monografiach [8, 9] dotyczących turbogeneratorów zagadnienia te są jedynie wzmiankowane. Obliczanie częstości własnych wirników turbogeneratorów będzie pozostawać zagadnieniem aktualnym ze względu na zmianę (polepszenie) własności konstytutywnych materiałów konstrukcyjnych, modernizację systemów chłodzenia wirników oraz zakładanie zwiększonej liczby uruchomień bloków energoelektrycznych, co wpływa obciążająco na ustrój konstrukcyjny wirnika. Ważne jest, więc zminimalizowanie drgań przy przejściach prędkości obrotowej wirnika przez częstości drgań własnych, a nawet przesunięcia wyższej dominującej częstości własnej poza prędkość synchroniczną. Należy zauważyć, że częstości drgań własnych wirników tych maszyn sytuują się w otoczeniu $\Delta\omega$ częstości obrotów synchronicznych podzielonej przez ciąg harmoniczny

$$(1) \quad \omega_m = \frac{\omega_s}{n} \pm \Delta\omega$$

$$(2) \quad \omega_s = \frac{2\pi f}{p}$$

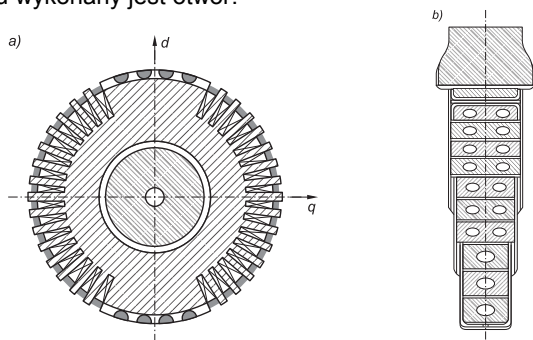
gdzie: ω_s – prędkość kątową synchroniczną, f – częstotliwość napięcia sieci elektroenergetycznej, p – liczba par biegunów turbogeneratorsa, $n = 1, 2, 3, \dots$

Zasadniczymi trudnościami w obliczeniach i analizie częstości drgań własnych wirników turbogeneratorów, a więc sformułowaniu właściwego modelu matematyczno-numerycznego, jest silna niejednorodność materiałowa strefy żłobkowo-zębowej i anizotropia konstrukcyjna wirnika oraz znaczne wymiary jego elementów konstrukcyjnych.

Konstrukcja wirników turbogeneratorów

Ważność i złożoność zagadnienia drgań własnych wirników turbogeneratorów związana jest z wieloma procesami fizycznymi zachodzącymi w tym podukładzie maszyny, a więc procesami elektromagnetycznymi, cieplnymi i oczywiście kinetycznymi. Ponadto, czynnikiem silnie komplikującym generowanie i wyznaczenie tych

częstości jest niejednorodność strukturalna i anizotropia konstrukcyjna oraz różnorodność elementów konstrukcyjnych wirników, a tym samym różnorodność materiałowa. Na złożoność konstrukcyjną i materiałową wirników – magneśnic turbogeneratorów składa się przykładowo: rdzeń *beczki* wirnika z wyróżnionymi biegunami i wieńcem żłobkowo-zębowym w strefie przypoверхniowej *beczki* oraz ustąpienie wirnika na jego długości. Anizotropia konstrukcyjna powoduje różne momenty bezwładności, a więc różne sztywności na zginanie względem osi d i q (rys.1a). Osie te, wzajemnie prostopadłe w mierze kąta elektrycznego, oznaczają skierowanie (oś d) głównego strumienia magnetycznego magnesującego obwód magnetyczny maszyny. Konsekwencją tej struktury wirnika jest dwukrotna zmiana na jeden obrót jego sztywności na zginanie. Efektem kinetycznym takiej konstrukcji wału jest możliwość wystąpienia rezonansów parametrycznych w pewnych przedziałach obrotów wirnika. Wskazuje to, zatem na doniosłość rozważanego problemu. Materiałem *beczki* wirnika jest wysokogatunkowa stal pod względem magnetycznym i wytrzymałościowym. Żłobki wirnika są o nie jednakowej geometrii i zawierają miedziane pręty złożone z przewodów o różnych przekrojach z otworami do przepływu medium chłodzącego (rys.1b). W części skrajnej wirnika zmienione jest ukształtowanie prętów uzwojenia, które stanowią tzw. połączenia czołowe i są osłonięte kołpakami w formie cienkościennych powłok (zabezpieczających uzwojenie przed oddziaływaniem sił odśrodkowych), wykonanych z niemagnetycznej stali lub tytanu o wysokich własnościach wytrzymałościowych. Należy zauważyć, że pręty uzwojenia wzbudzącego ułożone są nierównomiernie w żłobkach, a w strefie przyszczelinowej żłobki zamknięte są klinami wykonanymi ze stopu aluminium lub miedzi albo stali niemagnetycznej. Trudnością modelu obliczeniowego drgań własnych wirnika turbogeneratora są różnego rodzaju kanały do przepływu czynników chłodzących, którymi są powietrze, wodór lub woda. Kanały te są umieszczone wewnątrz przewodów uzwojenia wzbudzącego i rdzenia odkuwki, co powoduje niejednorodność strukturalną rdzenia. W części centralnej wału wykonany jest otwór.



Rys. 1. Szkic poprzecznego przekroju: a) wirnika w strefie centralnej, b) żłobka z przewodami uzwojenia wzbudzącego

Należy zauważyć, że stosunek długości *beczki* wirnika do jego średnicy dla turbogeneratorów dwubiegunowych z wskazanego przedziału mocy znamionowej $P_N < 400 - 1600 \text{ MW} >$, zawiera się w przedziale $< 5 - 7 >$, a długość wału wirnika jest około dwukrotnie większa od długości *beczki* wirnika

$$(3) \quad k_{LD} = \frac{L_{br}}{D_r} \approx < 5 \div 7 >, k_L = \frac{L_r}{L_{br}} \approx < 1.5 \div 2 >$$

gdzie: L_{br} – długość *beczki* wirnika, D_r – średnica *beczki* wirnika, L_r – całkowita długość wału.

W tabeli 1. przedstawiono podstawowe wymiary wirników turbogeneratorów dwubiegunowych produkowanych obecnie przez różnych światowych wytwórców tych maszyn.

Tabela1. Główne wymiary wirników turbogeneratorów

P_N	D_r średnica <i>beczki</i> wirnika	L_{br} długość <i>beczki</i> wirnika	L_r Całkowita długość wirnika
	[mm]	[mm]	[mm]
500	1125	5900	12600
800 ¹⁾	1200	7200	14300
1000	1200	7200	14100
1200	1250	8000	15000
1600	1250	8800	16600

¹⁾ Wyróżniony turbogenerator został zamodelowany do obliczeń częstości własnych wirnika. Wirnik o wskazanych wymiarach nie odnosi się do żadnej maszyny obecnie eksploatowanej, ale jego wymiary i struktura są podobne do wirników maszyn o określonej mocy znamionowej.

Uwagi o kinetyce wirnika

Stan kinetyczny (kinematyczny i dynamiczny) wirnika turbogeneratora jest wyjątkowo skomplikowany, ponieważ wirnik jest napędzany przez wirnik turbiny, a wewnątrz generatora na jego ustrój oddziałują siły objętościowe, naprężenia i „ciśnienia” w rodzaju naciągu magnetycznego, czyli różnego rodzaju oddziaływania elektromagnetyczne, związane z przemianą energii elektromagnetycznej. Główne oddziaływania mają formę pola wirującego z częstotliwością dwukrotnie większą od częstotliwości napięcia sieci elektroenergetycznej. Występują również dodatkowe oddziaływania (naprężenia i siły objętościowe) o złożonym widmie częstotliwościowym, wskutek ekscentryczności statycznej i dynamicznej wirnika (ekscentryczności nieuniknionych wskutek tolerancji technologicznych i montażowych). Oddziaływania te mają zarówno postać oscylacyjną jak i wirują o kierunku zgodnym i przeciwnym do ruchu obrotowego wirnika [10, 11]. Tak więc wirnik turbogeneratora doznaje pełnej postaci drgań: poprzecznych (giętych), skrętnych i wzdłużnych (osiowych). Oddziaływania te - siły są zależne od indukcji magnetycznej i prądu magneśnicy turbogeneratora, co można symbolicznie przedstawić w postaci zależności

$$(4) \quad f_{Bi} = \sum_{n,k} C_n B_\delta j \sin n\lambda\varphi \cos k\omega_k t$$

$$(5) \quad f_B = \sum_{n,k} C_n B_\delta^2 \cos(n\lambda\varphi - k\omega_k t)$$

gdzie: B_δ – indukcja w szczelinie powietrznej przywirnikowej, j – gęstość prądu wzbudzenia, ω_k – częstości zmienności w czasie oddziaływań elektromagnetycznych, λ – liczba fali oddziaływań wzdłuż obwodu wirnika, n, k – numeratory harmonicznych przestrzennych i czasowych.

Z uwagi na kinetykę wirnika i jego strukturę konstrukcyjną i materiałową zalicza się je do grupy wirników giętych. Bardzo ważnym problemem jest, więc odstrojenie częstości własnych wirnika od częstości oddziaływań (sił) różnej natury fizycznej.

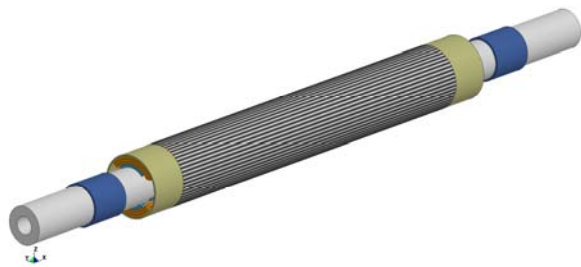
Model fizyczny i obliczeniowy wirnika turbogeneratora

Do analizy modalnej wirnika turbogeneratora wykorzystano oprogramowanie LS-DYNA. Jest ono wszechstronnym programem do analizy zjawisk fizycznych i procesów technicznych metodą elementów skończonych. Oprogramowanie to umożliwia rozwiązywanie zagadnień

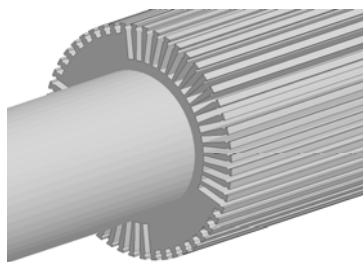
nieliniowej statyki i dynamiki, dynamiki brył sztywnych, analizę modalną, analizę termiczną, analizę przepływów oraz zagadnienia pól sprzężonych. Z tego też względu oprogramowanie to znajduje szerokie zastosowanie w różnych dziedzinach techniki i działach przemysłu. Do podstawowych zastosowań należy zaliczyć: modelowanie procesów obróbki plastycznej i wytrzymałości konstrukcji, analizę przepływów, modelowanie zagadnień biomechaniki, modelowanie zderzeń pojazdów, a także zagadnień związanych z odpornością uderową (np. oddziaływaniem ładunków wybuchowych)

Jako przykład obliczeniowy przyjęto konstrukcję wirnika – magnesicy turbogeneratora o mocy znamionowej $P_N=800$ MW, bez odniesienia do typu obecnie produkowanych turbogeneratorów tej mocy. Maszyna ta jest jednostką limitacyjną generatorów zainstalowanych w krajowym systemie elektroenergetycznym, a wirnik jest pod względem struktury konstrukcyjnej zbliżony (z wyjątkiem wymiaru aksjalnego) do wirników maszyn o wyższych mocach, nawet o mocy dwukrotnie większej.

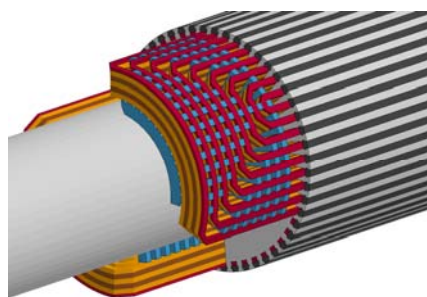
Model numeryczny w postaci zdyskretyzowanej struktury wirnika przedstawiono na rys. 2. Składa się on ze stalowego wału, który w strefie powierzchni zewnętrznej ma wyfrezowane żłobki, w których ułożone są miedziane przewody, zabezpieczone klinami. W części skrajnej beczki wirnika połączenia czołowe uzwojenia ułożone są w kierunku obwodowym i są osłonięte (zabezpieczone) tytanowym kołpakiem. Pomiędzy poszczególnymi elementami zdefiniowane są warunki wzajemnego kontaktu. Wirnik podparty jest na obu końcach przez dwa jednakowe łożyska.



Rys. 2. Pełny Model wirnika turbogeneratora przystosowany do obliczeń numerycznych



Rys. 3. Model fragmentu części skrajnej żelaza beczki wirnika turbogeneratora przystosowany do obliczeń numerycznych



Rys. 4. Model fragmentu części skrajnej beczki wirnika turbogeneratora z oznaczonymi uzwojeniami w strefie połączeń czołowych

W programie LS-DYNA obliczenia częstości własnych wirników przeprowadza się metodą Lanczosa. Umożliwia ona obliczenie zarówno częstości jak i postaci drgań własnych analizowanych konstrukcji. Sformułowany problem sprowadza się do rozwiązania równania stanu opisującego tzw. uogólnione zagadnienie na wartości własne, które w postaci macierzowej ma postać:

$$(5) \quad (\mathbf{K} - M\omega_0^2) \cdot \Psi = 0$$

gdzie: ω_0 – częstość kołowa drgań własnych, Ψ – wektor postaci drgań, \mathbf{K} – macierz sztywności układu, \mathbf{M} – macierz bezwładności.

W ramach badań numerycznych częstości drgań własnych wirnika określonego turbogeneratora przeanalizowano wpływ długości panwi łożysk a także rozstaw stojaków łożyskowych na częstości drgań własnych wirnika. Przyjęto następujące długości panwi łożysk: <600, 800, 1000 mm>. Rozstaw stojaków zmieniano od wartości 9,6 m, co 1 m do 12,6 m.

W wyniku przeprowadzonych obliczeń wyznaczono dziesięć pierwszych wartości częstości drgań własnych. W tabeli 2 zestawiono pięć najniższych częstości drgań własnych dla kolejnych wariantów. Najniższa wartość 19,2 Hz wystąpiła dla rozstawu stojaków łożysk 12,6 m i jego długości 600 mm. Zmniejszenie rozstawu do 9,6 m przy jednoczesnym zwiększeniu długości panwi łożyska spowodowało zwiększenie częstości do 34,1 Hz. Analizując otrzymane rezultaty należy stwierdzić, że spośród analizowanych czynników największy wpływ na częstości drgań własnych ma rozstaw łożysk (rys. 4). Zdecydowanie mniejszy wpływ ma długość łożyska. W szczególności dla pierwszej częstości różnice nie przekraczają kilku procent

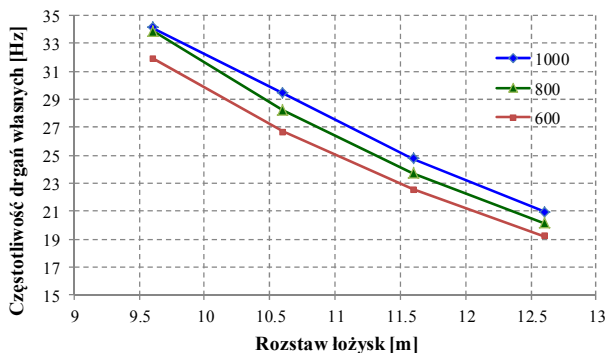
Tabela 2. Częstości drgań własnych

Nr częstości	Długość panwi łożyska [mm]	Rozstaw stojaków łożysk [m]			
		9,6	10,6	11,6	12,6
		Częstość drgań własnych [Hz]			
1	600	32,0	26,7	22,5	19,2
	800	33,9	28,2	23,8	20,2
	1000	34,1	29,5	24,7	21,0
2	600	32,8	27,3	22,9	19,4
	800	34,7	28,9	24,2	20,4
	1000	34,9	30,2	25,3	21,2
3	600	46,6	43,8	41,4	39,4
	800	51,5	47,8	44,8	42,2
	1000	54,0	51,1	47,4	44,3
4	600	81,7	78,3	63,9	53,1
	800	91,5	83,9	67,9	55,9
	1000	101,5	88,4	71,2	58,4
5	600	82,2	79,2	65,5	54,8
	800	91,8	84,2	69,3	57,6
	1000	101,9	88,5	72,5	60,1

Na rys. 5. przedstawiono pierwszą i czwartą postać drgań własnych wirnika. Dwie pierwsze postacie są drganiami giętnymi. Odbywają się one w płaszczyźnie XY (oś d) oraz XZ (oś q). Ich częstości nieznacznie różnią się między sobą, spowodowane jest to brakiem pełnej symetrii. Trzecia postać odpowiada drganiom skrętnym wału. Dwie kolejne stanowią drugą postać drgań giętnych. W tym przypadku również częstości drgań w dwóch prostopadłych płaszczyznach różnią się nieznacznie.



Rys. 5. Postaci drgań własnych wirnika



Rys. 6. Wpływ rozstawu stojaków łożysk na częstotliwość drgań własnych wirnika przy parametrycznej zmianie długości panwi (pierwsza postać drgań)

Wnioski i uwagi końcowe

Wyznaczony zbiór częstotliwości drgań własnych wirnika turbogeneratorsa wskazuje na różnorodność tych wielkości w znaczeniu różnych postaci i wartości częstotliwościowych. Dowodzi to konieczności wprowadzenia odpowiedniej ich klasyfikacji i ustalenia normatywnego w celu określenia odpowiednich zaleceń w procesie projektowania magnesy – wirnika turbogeneratorsa. Ważna jest znajomość częstotliwości drgań skrętnych, których wartości są zbliżone do częstotliwości napięcia sieci. Sprężenie rezonansowe odnośnie do tych częstotliwości może być bardzo groźne w sytuacji zburzenia stanu synchronicznego turbogeneratorsa. Interesujące jest zbadanie wpływu struktury konstrukcyjnej wieńca strefy żłobkowo-zębowej na formę i wartości częstotliwości drgań własnych wirnika.

Z uwagi na określoną strukturę konstrukcyjną wirnika oraz proces jego konstrukcji i montaż poszczególnych elementów (uzwojenia, klinów kołpaków, wentylatorów itp.), wskazane jest wykonanie również obliczeń częstości drgań własnych tych elementów o ich strukturach topologicznych odpowiadających formom konstrukcyjnym. Jest to niewątpliwie problem złożony z uwagi na ich dyskretną formę konstrukcyjną. Przykładowo, opracowanie modelu numerycznego do obliczeń częstości drgań własnych uzwojenia wzbudzającego i tłumiącego oraz zespołu klinów żłobkowych, wymagałoby wprowadzenia wirtualnych więzów dla takich konstrukcji. Naturalnie interesujące są obliczenia częstości drgań własnych wirnika z założonymi poszczególnymi podukładami elementów. Interesujące jest również przeprowadzenie tych obliczeń dla przypadków z zamontowanymi podukładami, ale zawierającymi pewne ich

uszkodzenia. Pozwoliłoby to rozszerzyć spektrum częstotliwości wskazujących na przyczyny niesprawnościowych drgań turbozespołów [13]. Nasuwa się również wniosek, że obliczenia te należałoby przeprowadzić dla całkowitego szeregowego układu turbowirnikowego, a więc obejmującego również wirniki (z podporami) poszczególnych stopni turbiny wysoko, średnio i niskoprężnej.

Ważnym aspektem omawianych obliczeń jest rozszerzenie równania (5) o składnik stanowiący macierz współczynników tłumienia, ale problemem jest określenie właściwych parametrów konstytutywnych.

Szczególnie interesujące są obliczenia dynamiki wirnika turbogeneratorsa przy oddziaływaniu sił o naturze elektromagnetycznej z uwzględnieniem jednocześnie założonych ekscentryczności wirnika.

W zakończeniu należy zauważyć, że współczesne oprogramowanie, modele numeryczne i środowiska obliczeniowe umożliwiają dokładniejsze rozpoznanie stanu dynamicznego wirników turbomaszyn w stosunku do modeli formułowanych na bazie *wirujących belek Timoshenki*, czy tak zwanych wielotarczowych modeli wirników [12], choć te modele klasyczne miały duże znaczenie w poznawaniu tych zjawisk.

Autorzy: Dr hab. inż. Włodzimierz Przyborowski, Politechnika Warszawska, Instytut Maszyn Elektrycznych, Pl. Politechniki 1, 00-662 Warszawa E-mail: Wlodzimierz.Przyborowski@ime.pw.edu.pl.
Dr inż. Zdzisław Hryciów, Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechaniczny, ul. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, E-mail: zdzislaw.hryciow@wat.edu.pl.

LITERATURA

- [1] Żicharewicz M.S., Siwkow A.P., Fridman W.M.: Rascziet koliebanni rotora turbogienieratira ot dvojnoj ziestkosti i sobstwiennowo wiesa. Elektrosiła nr 25, 1966.
- [2] Gryboś R.: Dynamika maszyn wirnikowych PWN Warszawa 1994.
- [3] Detinko F.M., Zagorodnaja G. A., Fastowskij W.M.: Procznost i koliebanija elektriczeskich maszin. Energija Leningrad 1969.
- [4] Tondl A.: Dynamika rotorow turboginieratorow przekł. z jęz. ang. Energia, Leningrad 1971
- [5] Grigoriew N. W., in. Wibracija energeticzeskich maszin. Maszynostroiennje, Leningrad 1974.
- [6] Pr. zbiorow. Dynamika maszyn. Modelowanie i analiza dynamiczna wirników. Ossolineum 1979.
- [7] Gosiewski Z., Muszyńska A. Dynamika maszyn wirnikowych, WSInż. Koszalin 1992.
- [8] Titow W. W. i in.: Turbogienieratory Energija Leningrad 1967.
- [9] Latek W.: Turbogeneratory WNT, Warszawa 1968.
- [10] Przyborowski W.: Elektromagnetyczne naprężenia radialne oddziałujące na wirnik turbogeneratorsa. Rozd. 11. pt. Wpływ pola turbogeneratorsa na wirnik turbozespołu. W monografii pt. Dynamika turbozespołów energetycznych pod red. Z. Walczyka, Wydawnictwa Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2005.
- [11] Przyborowski W.: Siły elektromagnetyczne ekscentryczności od pola statora oddziałujące na rotor turbogeneratorsa. XXXII Sympozjum Maszyn Elektrycznych Ustronie Dolne 2001.
- [12] Glebow I.A., Danilewicz Ja.B.: Naucznyje osnovy projektowanija turbogienieratorow, Nauka, Leningrad 1986.
- [13] Przybysz J.: Turbogeneratory Zagadnienia eksploatacyjne, Wyd. Instytutu Energetyki, Warszawa 2003.