

## Problemy zwiększania mocy turbogeneratorów

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono możliwości zwiększania mocy turbogeneratorów, wskazując jednocześnie na ograniczenia konstrukcyjne tych maszyn. Zwiększanie mocy turbogeneratorów może być realizowane przez zwiększanie parametrów konstrukcyjnych i eksploatacyjnych. Te pierwsze są ograniczone kryteriami mechanicznymi. Natomiast zwiększanie parametrów fizycznych i eksploatacyjnych jest uwarunkowane systemami chłodzenia maszyny i wartościami granicznymi parametrów materiałowych.

**Abstract.** In the paper the possibilities of increasing the power of turbo-generators taking in to account their constructional limitations is presented. Increasing of power of turbo-generators could be done by increasing the constructional and operational parameters. The first ones are limited by mechanical criteria. However increasing the physical and exploitation parameters is contingent upon machine's cooling system and border values of material parameters. (**Problems of increasing power of turbo-generators**).

**Słowa kluczowe:** Turbogeneratory, konstrukcje, parametry konstrukcyjne, fizyczne i eksploatacyjne.

**Keywords:** Turbo-generators, construction, design parameters, physical and operational parameters.

**Artykuł ten dedykuję pamięci Prof. Władysława Latka, jako wspomnienie prowadzonych z Profesorem dyskusji na tematy turbo-generatorowe**

### Wstęp

Stopień wzrostu mocy turbogeneratorów o mocach granicznych następował w różnych okresach czasu ubiegłego wieku z różną intensywnością, bowiem było to (i jest) związane z postępowaniem w dziedzinie technologii i własności materiałów konstrukcyjnych elementów i podukładów tych maszyn. Decydują o tym również coraz doskonalsze modele obliczeniowe i projektowe w tej dziedzinie. W przypadku turbogeneratorów problem ten jest wyjątkowo złożony, ponieważ obejmuje obliczenia projektowe w zakresie zagadnień: elektromagnetycznych, mechanicznych, ciepłno-wentylacyjnych jak również eksploatacyjnych z uwagi na zapewnienie statecznej pracy turbogeneratorsa w systemie elektroenergetycznym.

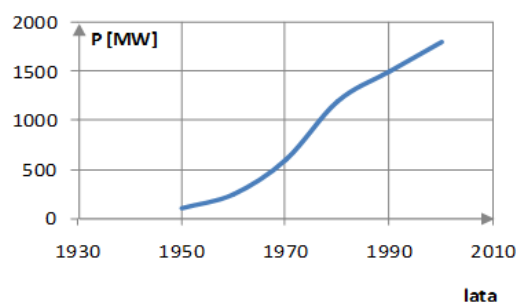
Postęp w konstrukcji maszyn elektrycznych o mocach granicznych związany jest z postępowaniem w dziedzinie zagadnień wytrzymałościowych (statycznych i dynamicznych) elementów konstrukcyjnych. Parametrów przewodnościowych i również wytrzymałościowych prętów uzwojenia wzbudzającego i tłumiącego (zwartego) oraz własności dielektrycznych materiałów izolacyjnych.

Postęp ten ma na względzie zwiększenie mocy jednostkowej turbogeneratorów, zwiększenie ich sprawności, obniżenie kosztów eksploatacji oraz zwiększenie niezawodności. Na co niewątpliwie poza wskazanymi czynnikami mają również wpływ systemy i media chłodzące te maszyny.

Szybki wzrost mocy turbogeneratorów nastąpił w okresie lat <1970 – 2000> [1], a zmniejszył się w ostatnim okresie z tendencją do stabilizacji wartości maksymalnych mocy na poziomie 1200 MW turbogeneratorów dwubiegunowych i na poziomie 1600 MW turbogeneratorów czterobiegunowych, z preferencją maszyn o wartości mocy rzędu <600 – 800 – 1000 – 1200 MW> (rys. 1).

Prognozy dotyczące rozwoju turbogeneratorów w latach siedemdziesiątych ubiegłego wieku; co można uznać za okres przełomowy w konstrukcji tych maszyn o mocach granicznych; wskazywały na osiągnięcie pod koniec ubiegłego wieku poziomu mocy jednostek o wartości 3000 MW. Opinia ta była wyrażana przez czołowych wytwórców turbogeneratorów w Anglii, Francji, Japonii, Stanach Zjednoczonych, ZSRR, Szwajcarii [1, 2]. Uważano, że będzie temu sprzyjać dokonywany postęp w dziedzinie materiałów konstrukcyjnych i elektrycznych (pod względem właściwości izolacyjnych, przewodnościowych i

magnetycznych oraz mechanicznych), jak również systemów i technologii chłodzenia tych maszyn. Przewidywano rozwój chłodzenia ciekowo-wodorowego z ograniczeniem chłodzenia powietrznego.



Rys. 1. Średni wzrost mocy turbogeneratorów w okresie ostatniego półwiecza

Uważano, że będzie temu sprzyjać dokonujący się postęp w dziedzinie: materiałów konstrukcyjnych jak również systemów i technologii chłodzenia tych maszyn. Przewidywano rozwój chłodzenia ciekowo-wodorowego (a nawet ciekłymi dielektrykami). Prognozowano jednocześnie silniejszy rozwój generatorów dwubiegunowych w stosunku do czterobiegunowych, choć turbogeneratory czterobiegunowe można konstruować na większą moc niż dwubiegunowe [2, 3, 4, 5, 6].

Pomimo entuzjastycznego prognozowania wzrostu mocy turbogeneratorów, wyrażane były opinie, że należy zwrócić uwagę na zmniejszającą się niezawodność tych maszyn ze wzrostem ich mocy, a przede wszystkim wskazywano na ograniczenia konstrukcyjno-mocowe jednostek napędowych – turbin, zarówno konwencjonalnych, jak i reaktorowych. Tak więc w realistycznych prognozach rekomendowano granice mocy turbogeneratorsa na poziomie <1500 – 2000 MW>. Brano, bowiem pod uwagę, że moc graniczna reaktorów atomowych wynosiła wówczas około 2500 MW. W mniejszym stopniu zważano wówczas na koszty eksploatacyjne (i kwestie ekologiczne produkcji energii), choć symptomem tego problemu był wysoki koszt gospodarki wodorowo-wodnej odnośnie do chłodzenia tych maszyn. Należy jednak podkreślić, że wzrost w stopniu czterokrotnym jednostkowej mocy turbogeneratorsa zmniejsza jednostkowe koszty inwestycyjne około 25 %, a koszty eksploatacyjne czterokrotnie. Jednakże powyżej mocy 1200 MW wielkości te są stabilizowane. Należy zaznaczyć, że parametry inwestycyjne i eksploatacyjne

mogą się znacznie zmieniać nawet w dziesięcioletnich interwałach czasowych. Wskazane zamierzenia wzrostu mocy turbogeneratorów i przedsięwzięcia konstrukcyjne były korygowane, co dało wyraz w pracach prezentowanych na kongresie CIGRE w roku 1998.

Po upływie niespełna pół wieku od ówczesnych prognoz można stwierdzić, że nastąpiła sytuacja graniczna w konstrukcji turbogeneratorów dwubiegunowych o mocach granicznych na wartości około 1500 MW i czterobiegunowych o wartości 2500 MW i wartości napięć znamionowych na poziomie <24 – 27 kV>. Pojawiły się jednocześnie osłabienia konstrukcyjne tych maszyn w rodzaju turbogeneratorów klasy Powerformer o napięciu 50 kV oraz turbogeneratory o chłodzeniu powietrznym o mocach rzędu 200 MW z perspektywą osiągnięcia poziomu 400 MW, co dwukrotnie przekracza prognozy z końca ubiegłego wieku.

W procesach projektowych maszyn o mocach granicznych [2, 6, 7] należy uwzględnić, poza uwarunkowaniami techniczno-technologicznymi, ciepłowodnymi i wytrzymałościowymi, a także ekonomicznymi, również aspekty transportu tych maszyn do miejsc ich instalacji. Ważnym aspektem wyboru konstrukcji turbogeneratorów jest również sprawność eksploatacyjna i operatywność tych maszyn w systemie elektroenergetycznym w szczególności odnośnie do jego stabilności. Pod tym względem znaczenie mają parametry wewnętrzne turbogeneratorów, a w szczególności reaktancje: synchroniczna, rozproszona, przejściowa i podprzejściowa.

W wyborze podstawowych jednostek prądowych należy mieć również na uwadze problemy niezawodności, co wiąże się z serwisowaniem i remontami tych maszyn. Ponieważ awaryjność maszyn wzrasta ze wzrostem ich mocy i wydłużają się oczywiście okresy remontów bloków elektroenergetycznych.

Należy zauważyć, że w ostatnim okresie wystąpiły takie kwestie jak: lokalizacje elektrowni zawodowych, wymagania ekologiczne i krajobrazowe, co niewątpliwie związane jest z wyborem wielkości bloków elektroenergetycznych.

W artykule przeanalizowano zmiany głównych wielkości fizycznych i konstrukcyjnych turbogeneratorów dwu- i czterobiegunowych w procesie zwiększania mocy znamionowych tych maszyn, ze wskazaniem na fizyczne możliwości i ograniczenia tego wzrostu.

### Moc turbogeneratorsa

Ogólną zależność na moc czynną generowaną przez maszynę

$$(1) \quad P = m U_{ph} I_{ph} \cos \varphi$$

można wyrazić przez wielkości fizyczne i wymiarowe ujęte wzorem

$$(2) \quad P = k m A_s B_\delta f D_s D_r L_r (\cos \varphi) / p$$

gdzie:  $m$  – liczba pasm fazowych,  $A_s$  – okład prądowy twornika,  $B_\delta$  – indukcja magnetyczna w szczelinie przywornikowej,  $D_s$  – średnica wewnętrzna stojana,  $D_r$  – średnica wirnika,  $L_r$  – czynna długość poosiowa bezki wirnika (magneśnicy),  $p$  – liczba par biegunów,  $f$  – częstotliwość napięcia,  $\cos \varphi$  – współczynnik mocy,  $k$  – współczynnik.

Zależności (1, 2) wskazują na sposoby zwiększenia mocy generatora w zależności od podstawowych wielkości, elektrycznych, elektroenergetycznych i parametrów geometrycznych. Należy

zauważyć, że wielkość  $f/p$  jest miarą prędkości obrotowej wirnika maszyny; jest maksymalna dla maszyn dwubiegunowych i podlega standaryzacji – <50, 60 Hz>. Wzrost mocy jednostkowej turbogeneratorów uzyskuje się przez zwiększenie ich parametrów stanu eksploatacyjnego, a więc napięcia  $U$ , prądu  $I$ , współczynnika mocy, ale również liczby pasm fazowych  $m$ , co niewątpliwie wiąże się z kompatybilną transformacją wytwarzanej mocy do sieci elektroenergetycznej. Szczególne znaczenie w zwiększeniu mocy mają wymiary rdzeni, a więc średnice strefy szczelinowej i oczywiście wymiar długości poosiowej rdzeni maszyny [2, 3, 7]. Ważne jest również zwiększanie parametrów napięciowo-prądowych obwodu wzbudzającego, ponieważ przepływ wzbudzający determinuje indukcję magnetyczną w szczelinie. Indukcja w szczelinie ma ograniczenie w swej pochodnej wielkości, którą jest indukcja w zębach wirnika i stojana. Ograniczenie to spowodowane jest związkiem konstytutywnym wyznaczającym stan nasycenia magnetycznego rdzeni.

W zależności (2) nie uwzględnia się ograniczeń, jakie trzeba nałożyć na konstrukcję maszyny, ze względu na:

- efekty cieplne uwarunkowane obciążeniem prądowym i wszystkimi rodzajami strat mocy;

- problemy wytrzymałościowe, odnośnie do kinematyki rotora i obciążeń konstrukcji nośnej stojana i fundamentów.

Problemy mechaniczne limitują przede wszystkim wymiary maszyny  $\{D_r, D_s, L_r\}$  [8].

Należy jednocześnie zauważyć, że zagadnienia cieplne i mechaniczne są implícite związane z wartościami ustalonego w projekcie maszyny okładu prądowego  $A_s$  i indukcji magnetycznej  $B_\delta$ , a stosunek tych wielkości determinuje z kolei reaktancje maszyny. Trzeba jednocześnie podkreślić, że reaktancje maszyny, poza determinowaniem stanów dynamicznych generatora; w znaczeniu jego sterowania, ograniczenia stanów zwarciovych i efektów oddziaływania twornika; mają również wpływ na stabilność systemu elektroenergetycznego.

W konstrukcji i eksploatacji maszyn elektrycznych ważne są również problemy izolacyjne, ponieważ zastosowana izolacja przewodów i żłobków ma wpływ na przewodzenie ciepła, a jej „skuteczność” dielektryczna i grubość limituje zwiększanie napięcia i stanowi o współczynniku wypełnienia żłobka. Obserwowany postęp w dziedzinie materiałów izolacyjnych umożliwi znaczne zwiększenie nominalnej wartości napięcia twornika.

Do wskazanych powyżej oczywistych ograniczeń wzrostu wielkości fizycznych i gabarytowych maszyny należy dołączyć takie zagadnienia jak: drgania wirnika oraz drgania elementów konstrukcyjnych maszyny, rdzenia i uzwojenia stojana, a w szczególności drgania połączeń czołowych.

Zależność (2) można rozszerzyć przez wprowadzenie gęstości prądu stojana  $j_s$

$$(3) \quad P = k m j_s b_s h_s Q_s B_\delta f D_r L_r (\cos \varphi) / p$$

gdzie:  $Q_s$  – liczba żłobków stojana,  $b_s$  – szerokość żłobka,  $h_s$  – głębokość żłobka.

Gęstość prądu jest miarą strat mocy w uzwojeniu stojana i stanowi przesłankę do wyboru sposobu chłodzenia i parametrów geometrycznych strefy żłobkowo-zębowej.

Postulowane są następujące relacje wartości gęstości prądów stojana  $j_s$  z rodzajami mediów chłodzących:  $(2.5 \div 3.5) 10^6 \text{ A/m}^2$  – powietrze;  $(3 \div 5) 10^6 \text{ A/m}^2$  – wodór;  $(5 \div 10) 10^6 \text{ A/m}^2$  – woda. W relacjach tych należy również wziąć pod uwagę ciśnienie mediów chłodzących. Ponieważ przy zwiększeniu prędkości przepływu medium

chłodzącego może być zwiększona gęstość prądu. Współczynnik  $k$  we wzorze (3) zawiera, oprócz współczynników liczbowych, również parametry konstrukcyjne jak np. współczynnik uzwojenia i współczynnik wypełnienia żłobków przewodami (miedzią), który wyznaczony jest grubością zastosowanej izolacji. Jak wynika z przedstawionych zależności moc maszyny zależy w sposób ciągły (z wyjątkiem liczby faz i liczby par biegunów) od parametrów konstrukcyjnych i zmiennych stanu  $\{I, U, A, B\}$ , lecz wszystkie te wielkości są majoryzowane w znacznym stopniu przez czynniki pozaelektromagnetyczne niewystępujące explicite w tych zależnościach. W ustalaniu parametrów energetycznych, eksploatacyjnych i strukturalnych maszyny wskazane jest również posługiwanie się zależnościami wyrażającymi moc maszyny przez wielkości zintegrowane jak przepływ i strumień główny, co można zapisać wzorem

$$(4) \quad P = k^* p f \theta_a \Phi_f$$

gdzie:  $\theta_a$  – przepływ oddziaływania twornika,  $\Phi_f$  – strumień główny,  $k^*$  – współczynnik.

Czynniki mechaniczne odgrywające podstawowe znaczenie w ustaleniu konstrukcji nośnej turbogeneratora i wirnika można ująć wzorem na moc doprowadzoną do maszyny

$$(5) \quad P_1 = \omega_s T_m$$

gdzie:  $\omega_s$  – prędkość kątowna synchroniczna,  $T_m$  – moment napędowy turbogeneratora.

Należy, bowiem podkreślić, że moment napędowy i moment bezwładnościowy w odniesieniu do momentu elektromagnetycznego stanowią o efektach wytrzymałościowych wirnika w przejściowych stanach kinematycznych (tzw. stanach kołysań). Natomiast moment elektromagnetyczny turbogeneratora jest miarą jego mocy, a w rozszerzonym zapisie jest również funkcją parametrów wewnętrznych maszyny, co w uproszczonej formie można zapisać wzorem

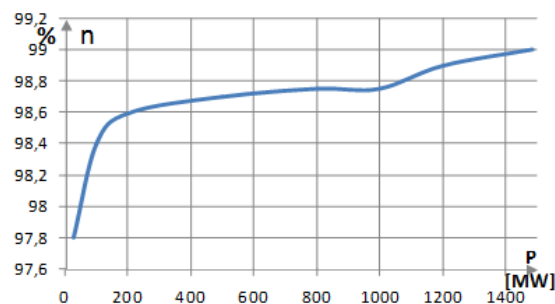
$$(6) \quad T_{em} = \frac{m}{\omega_s} \left[ \frac{U U_i}{X_d} \sin \vartheta \right]$$

gdzie:  $U_i$  jest napięciem indukowanym,  $X_d$  reaktancją synchroniczną,  $\vartheta$  kątem obciążenia.

Problemy mechaniczno-wytrzymałościowe mają szczególnie doniosłe znaczenie w maszynach o mocach granicznych [6, 8]. Ponieważ, poza siłami odśrodkowymi oddziałującymi na odkuwkę wirnika i jego elementy konstrukcyjne (kliny żłobkowe, kołpaki), należy wziąć pod uwagę stany rozruchowe, procesy synchronizacji maszyny z siecią elektroenergetyczną, jak również stany kinematycznie przejściowe i oddziaływania na wirnik sił (szerokorozumianych oddziaływań) elektromagnetycznych. Jednym z podstawowych obliczeń projektowych w tym zakresie jest wyznaczenie częstości własnych wirnika.

Zwiększanie mocy turbogeneratora ma na celu poza zmniejszeniem czynników ekonomicznych inwestycji energetycznych, w znaczeniu infrastrukturalnym, zwiększenie również ich sprawności, co stanowi o kosztach eksploatacyjnych.

Parametr ten, co należy podkreślić, przekroczył już wartość 98% dla turbogeneratorów o mocach granicznych i osiągnął poziom 99% niektórych jednostek powyżej mocy 1200 MW. Należy podkreślić, że poziom tak wysokiej sprawności jest niespotykany w innych maszynach z całej technosfery (rys. 2).



Rys. 2. Wykres sprawności turbogeneratorów w zależności od mocy

### Parametry strukturalne i konstrukcyjne

Multiplikatywnym parametrem w zależności (2, 3) jest liczba pasm fazowych  $m$  i odwrotność liczby par biegunów  $p$ . Zależność mocy maszyny od tych parametrów jest proporcjonalna. Wielkości te mają wpływ jednocześnie na wiele innych parametrów fizycznych i konstrukcyjnych maszyny. Liczba biegunów jest parametrem bazowym, determinuje wiele parametrów strukturalnych (np. uzwojeń), i wielkości elektromagnetycznych i jest ustalona, jako niezmiennik dalszych analiz i obliczeń projektowych. W konwencjonalnej klasyfikacji generatorów energetycznych maszyny o liczbie par biegunów  $p = 1, 2$  zalicza się do klasy turbogeneratorów i wskazane jest ich równorzędne analizowanie, chociaż liczba biegunów zasadniczo różni ich wirniki pod względem kinematycznym i strukturalnym oraz stanowi o strefie żłobkowo-zębowej stojana.

Liczba pasm fazowych stanowi o konstrukcji stojana, w szczególności strefy żłobkowo-zębowej, ale determinuje również strukturę rozkładu pola magnetycznego, a więc wpływa również na wiele wielkości fizycznych jak: momenty (i ogólnie oddziaływania elektrodynamiczne – siły i naprężenia) wytworzone w maszynie oraz straty mocy zarówno w obwodach elektrycznych, jak również w rdzeniach. Zwielenokrotnianie liczby pasm fazowych jest korzystnym czynnikiem zwiększania mocy maszyny i to w stopniu proporcjonalnym, ale oczywiście przez czynniki strukturalne, straty obciążenia i straty lokalne. Liczba pasm ma bezpośredni wpływ na strukturę uzwojenia, ponieważ proporcjonalnie zwiększa liczbę żłobków stojana  $Q=2pmq$  i zmniejsza liczbę dominujących harmonicznych w przepływie twornika,  $v=1+2mk$ ,  $k=0,1,2,\dots$ . Liczba pasm fazowych stanowi, więc o wielkościach elektromagnetycznych i parametrach obwodowych maszyny oraz sprawności, zmniejszając np. współczynnik strat powierzchniowych. Przykładowo uzwojenie dziewięciofazowe cechuje się przepływem od harmonicznych o numerach 17 i 19 najbliższych podstawowej. Tak więc biorąc pod uwagę współczynnik strat powierzchniowych wirnika od wyższych harmonicznych przepływu stojan określony wzorem (6) widać silnie zmniejszenie tych strat

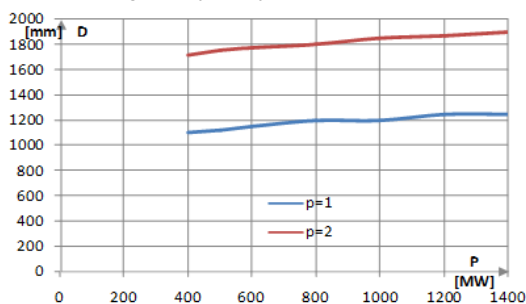
$$(7) \quad w_{\Delta} = \sum_{v=17,19,\dots} \frac{(v \pm 1)^{1,5}}{v^4} k_u^2$$

gdzie:  $k_u$  – współczynnik uzwojenia.

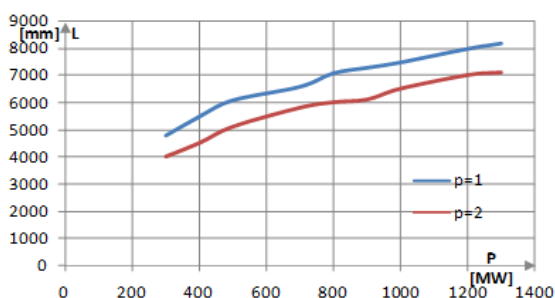
Należy również zaznaczyć, że zwiększenie liczby faz przy ustalonej liczbie żłobków stojana powoduje zwiększenie współczynnika uzwojenia o około 8% w stosunku do współczynnika uzwojenia trójfazowego. Znaczne zmniejszenie przepływu wyższych harmonicznych oddziaływania twornika może być przesłanką do zmniejszenia szerokości szczeliny przywimikowej, pamiętając jednak, że powoduje to zwiększenie reaktancji synchronicznej maszyny.

Głównymi parametrami konstrukcyjnymi turbogeneratorów są wymiary średnic i poosiowych długości rdzeni wirnika i stojana. Wzrost mocy generatorów w zależności od wymiarów konstrukcyjnych – radialnych i poosiowych stojana i wirnika jest oczywista, ale ograniczeniem jest wytrzymałość mechaniczna, w pierwszym rzędzie wirnika, ale również stojana i płyty fundamentowej. W kwestii szeroko rozumianej wytrzymałości wirnika należą brać pod uwagę dynamikę całego ustroju wirnika – wału, beczki i łożysk, czego miarą jest poziom drgań w stanie pracy ustalonej i prędkości kątowych (w procesie rozruchu i synchronizacji) odpowiadających stanom rezonansowym. Ważne są również ograniczenia wytrzymałościowe nakładane na elementy konstrukcyjne wirnika, a więc uzwojenie, zęby, kliny i kołpaki. Wielkościami ograniczającymi są naprężenia (a w zasadzie przedziały) plastycznego płynięcia i naprężenia wytrzymałościowe na rozciąganie. Wielkości te szacuje się, przykładowo dla wysoko wytrzymałościowych materiałów, wartościami  $\sigma_p = (110 - 120) \cdot 10^7$  Pa,  $\sigma_w = (120 - 130) \cdot 10^7$  Pa. Ważne są także naprężenia zmęczeniowe materiałów wirnika; z uwagi na częste stany rozruchowe niektórych bloków energetycznych, jednakże trudne jest dokładne określenie tych parametrów materiałowych.

Dotychczasowy przyrost wymiaru średnicy wirnika na jednostkę mocy turbogeneratora, z uwzględnieniem kryteriów wytrzymałościowych i wszelkich oddziaływań, odpowiada wartości 120 mm/200 MW dla maszyn do 1200 MW, a powyżej wymiar ten jest ustalony na poziomie około 1250 mm dla turbogeneratorów dwubiegunowych i 2000 mm dla czterobiegunowych (rys. 3).



Rys. 3. Współzależności wymiarów średnicy beczki wirnika; od mocy turbogeneratorów jedno- i dwubiegunowych



Rys. 4. Współzależności wymiarów beczki wirnika długości od mocy turbogeneratorów jedno- i dwubiegunowych

W odniesieniu do długości poosiowej beczki wirnika odpowiedni przyrost szacuje się wartościami –  $\Delta L/\Delta P = 250$  mm / 100 MW. Wskazane współzależności zilustrowano na rys. 4.

Znaczny postęp w dziedzinie materiałów konstrukcyjnych spowodował zwiększenie możliwości konstrukcyjnych pod względem mechanicznym ustroju wirnika w zakresie wskazanych parametrów. Zwraca się uwagę na odpowiednie kształtowanie elementów konstrukcyjnych jak zęby, kliny, przewody i pręty uzwojenia w celu zapewnienia odpowiedniej wytrzymałości.

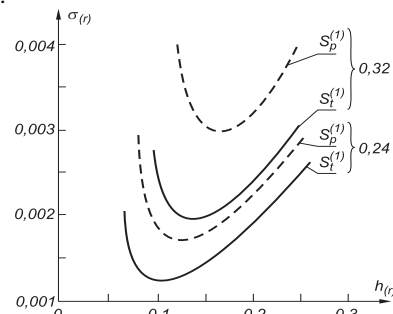
Przykładowo naprężenia w koronkach zębów wirnika od osi odśrodkowych można określić wzorem [9] zsyntetyzowanym na podstawie wieloparametrycznych obliczeń połowych

$$(8) \quad \sigma_{rr} = \frac{\rho \omega_s^2}{2g} D_r^2 f(\alpha, \beta)$$

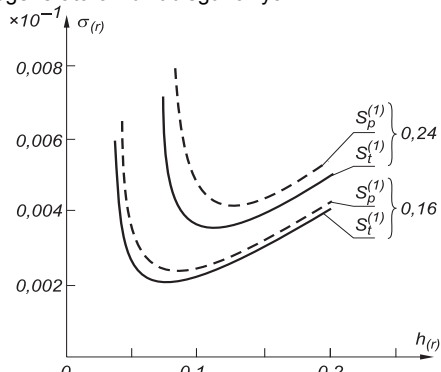
gdzie:  $\rho$  – ciężar właściwy materiału wirnika (zęba),  $f(\alpha, \beta)$  – funkcja zależna od parametrów ( $\alpha, \beta$ ) wymiarowych strefy zębowo-żłobkowej i liczby zębów wirnika oraz powierzchni żłobka,  $g = 9,81$  m/s<sup>2</sup>.

Zależność ta jest istotna z powodu możliwości optymalnego doboru geometrii i struktury zębów (żłobków) pod względem minimalnego ustalenia współczynnika naprężeń w koronkach zębów. Na rysunkach 5,6 przedstawiono względne naprężenia w koronkach zębów [9] (rys. 5 - turbogenerators  $g = 1$ , rys. 6 -  $p = 2$ ), w funkcji względnej wysokości zęba przy parametrycznej zmianie powierzchni żłobka, dla żłobków prostokątnych  $S_p$  i trapezowych  $S_t$ . Wartości względne są odniesione do średnicy beczki wirnika. Warto podkreślić, że wykrycie podobnych lokalnych ekstremów wartości funkcji naprężeń, czy funkcji temperaturowych, może przyczynić się do zmiany parametrów konstrukcyjnych niektórych elementów w celu zwiększenia mocy jednostkowej turbogeneratora. Znaczenie w tym zagadnieniu ma również stan naprężeń w uzwojeniach wzbudzających wirnika oraz wytrzymałość mechaniczna kołpaka otaczającego połączenia czołowe tego uzwojenia. W tym aspekcie problemu ważny jest system i czynnik chłodzący uzwojenie wirnika, który w przypadku chłodzenia wodorowego wymaga odpowiedniego zabezpieczenia, co niewątpliwie komplikuje konstrukcję wirnika.

Z tego powodu dogodne jest rozważanie chłodzenia powietrznego, które jest już stosowane, jak zaznaczono, w maszynach o wartości mocy nawet rzędu 400 MW. Można postawić tezę, że poziom mocy 400 MW (a być może 500 MW?) będzie wartością graniczną w wyborze typu turbogeneratora w kwestii rodzaju zastosowanego chłodzenia.



Rys. 5. Wieloparametryczne funkcje naprężeń w koronkach zębów wirnika turbogeneratorów dwubiegunowych

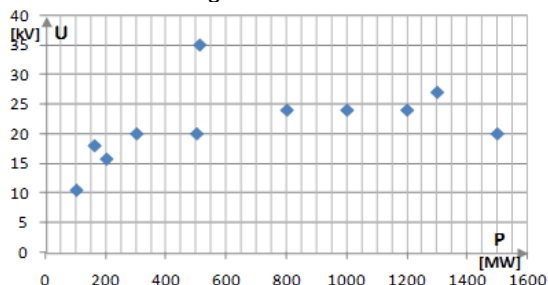


Rys. 6. Wieloparametryczne funkcje naprężeń w koronkach zębów wirnika turbogeneratorów czterobiegunowych

## Parametry eksploatacyjne i fizyczne

Jak wskazuje podstawowy wzór na moc czynną maszyn (1) wielkość ta jest proporcjonalna do wartości napięcia, prądu i współczynnika mocy. Współczynnik mocy jest osobliwym parametrem mocy, ponieważ stanowi o jakości energetycznej urządzenia elektrycznego, a w przypadku generatora może być ustalany w szerokich granicach zmienności i to zarówno o charakterze pojemnościowym, jak i indukcyjnym. Świadczy to o możliwości generowania, przez turbogenerator mocy biernej pojemnościowej i indukcyjnej. Pierwszoplanowe znacznie ma oczywiście generowanie mocy biernej indukcyjnej, chociaż zachodzi również potrzeba (w czasie *dolin* energetycznych) przejścia turbogeneratora w stan pracy pojemnościowej. Na etapie projektowania wartości znamionowych maszyny, współczynnik mocy powinien być ustalony na poziomie wartości, co najmniej równej 0.9, co przekracza około 6% wartość standardową równą 0.85.

Ustalanie wartości napięć znamionowych turbogeneratorów jest zagadnieniem trudnym, ponieważ obejmuje kwestie struktury uzwojenia maszyny (rozkładu i zamocowań prętów uzwojenia) i parametrów materiałowych izolacji, ale także połączenia z transformatorem blokowym. W przypadku tego parametru eksploatacyjnego jego zwiększenie powoduje (przy ustalonej mocy) zmniejszenie strat obciążeniowych. Na podstawie dotychczasowych ustaleń można stwierdzić pewien stopień wyboru tego parametru według szeregu wartości mocy znamionowych turbogeneratorów, co przedstawia wykres na rys. 7. Przy polepszaniu właściwości dielektrycznych, mechanicznych i cieplnych współczesnych materiałów izolacyjnych możliwe jest zwiększanie kolejno o 15% napięcia i w niedalekiej przyszłości osiągnięcie poziomu 35 kV<sup>3</sup>, a może i wyższego? Należy zauważyć, że nie ma ograniczeń (poza ustaleniami normatywnymi) napięcia pierwotnego transformatora blokowego.



Rys. 7. Wartości napięć znamionowych tworników turbogeneratorów

Znaczne zwiększenie napięcia turbogeneratora wymagałoby zastosowania chłodzenia olejowego stojanów lub wprowadzenie, jako medium chłodzącego ciekłego dielektryka, co było już rozważane w końcu ubiegłego wieku, a czego być może rezultatem było wprowadzenie *kablowego* uzwojenia stojanów w generatorach typu Powerformers. Należy jednocześnie podkreślić, że wartość napięcia zależy w sposób podstawowy od liczby zwojów uzwojenia i indukcji magnetycznej, zależnej z kolei od przepływu obwodu wzbudzającego.

Okład prądowy magnesnicy (wornika) jest w następującej relacji z okładem prądowym twornika (stojana)

$$(9) \quad A_r = k_v \frac{D_s}{D_r} A_s w_p \cos \varphi_N ;$$

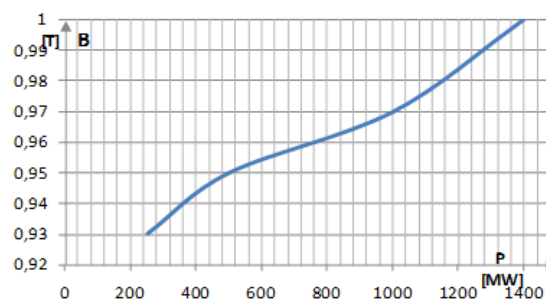
gdzie:  $k_v$  – współczynniki rozkładu uzwojenia wzbudzającego,  $w_p$  – współczynnik statycznej przeciążalności przyjmowany z przedziału wartości <1.4 – 1.8>.

Należy przy tym zaznaczyć, że relacja średnic magnesnicy i twornika występuje w wielu szczegółowych związkach algorytmów obliczeniowych wielkości elektromagnetycznych maszyny. Dla przykładu można wymienić zależność związaną ze strumieniem głównym wyrażonym średnicami i indukcją, odpowiednio, na powierzchni magnesnicy i na powierzchni twornika

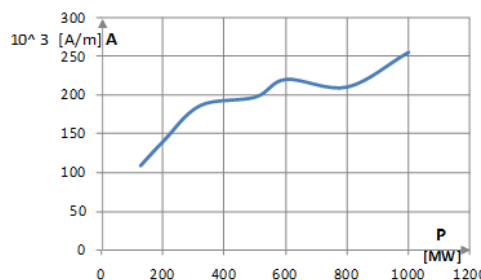
$$(10) \quad B_r D_r = B_s D_s$$

Z kolei zastępczą indukcję w szczelinie powietrznej można określić zależnością wyznaczoną również przez stosunek napięcia szczelinowego i napięcia na zaciskach maszyny w stanie jałowym, co finalnie można uzależnić od stosunku reaktancji oddziaływania twornika i reaktancji synchronicznej

$$(11) \quad B'_s = B_r \frac{U_\delta}{U} = B_r \frac{X_{ad}}{X_s}$$



Rys. 8. Zależność wartości indukcji magnetycznej w szczelinie przywornikowej turbogeneratora w funkcji mocy



Rys. 9. Zależność wartości okładu prądowego twornika w funkcji mocy turbogeneratora

W dotychczasowych konstrukcjach turbogeneratorów dla szerokiego zakresu mocy wartości indukcji ustalane były w dość wąskim przedziale, co przedstawione jest na rys. 8. Przy ustalonej wartości prądu zdeterminowanego napięciem, liczbą pasm fazowych  $m$  i  $\cos \varphi$ , okład prądowy może być zwiększony wskutek zwiększenia liczby zwojów w paśmie.

W całościowym projekcie turbogeneratora trzeba mieć na uwadze, o czym wcześniej nadmieniono, parametry obwodowe. Do najważniejszych zalicza się: reaktancję synchroniczną  $X_d$  i zwarcia  $X_z$ , oraz reaktancję przejściową  $X_d'$  i podprzejściową  $X_d''$ . Reaktancje  $X_d$  i  $X_d'$  mają wpływ na stabilność pracy turbogeneratora w systemie elektroenergetycznym i powinny mieć małe wartości, co jest wymaganiem przeciwnym do zalecenia dużych wartości reaktancji  $X_z$  i  $X_d'$ , których zadaniem jest ograniczenie prądów, a zatem również elektromagnetycznych momentów dynamicznych turbogeneratora, w stanach zwarcia.

Ponieważ obecnie o stabilności dynamicznej turbogeneratora w dużym stopniu decydują systemy automatycznej regulacji wzbudzenia, więc wartości

reaktancji  $X_d$  i  $X_d'$  są ustalane optymalnie w odniesieniu do nie zmniejszenia sprawności maszyny.

Dla szerokiego przedziału mocy turbogeneratorów można oszacować względną wartość reaktancji  $X_d$  przedziałem wartości  $\langle 1.0 - 3.5 \rangle$ . Należy jednak zaznaczyć, że wartość tego parametru jest związana ze współczynnikiem przeciążenia oraz współczynnikiem mocy. Dla średnich wartości parametrów  $w_p$  i  $\cos\phi$ , wskazany przedział jest zawężony do wartości  $\langle 1.5 - 2.5 \rangle$ . Względne wartości reaktancji  $X_d'$ , dla szerokiego zakresu mocy znamionowych turbogeneratorów dwu- i czterobiegunowych, można oszacować przedziałem wartości  $\langle 0.3 - 0.51 \rangle$ .

Względne wartości reaktancji podprzejściowych dla turbogeneratorów o mocy  $\langle 100 - 1000 \text{ MW} \rangle$  określone są w przedziale  $\langle 0.15 - 0.3 \rangle$  i są funkcją rosnącą ze wzrostem mocy, co jest zależnością charakterystyczną i bardzo korzystną ze względu na ograniczenie prądów (momentów) w stanie zwarcia.

### Zakończenie

W krótkim artykule trudno jest omówić większość zagadnień dotyczących zmiany konstrukcji turbogeneratorów w celu zwiększenia ich mocy przede wszystkim, dlatego, że problem ten jest wyjątkowo interdyscyplinarny, bowiem dotyczy zagadnień elektromagnetycznych, elektryczno-izolacyjnych, mechanicznych, cieplnych, wentylacyjnych, oraz hydraulicznych i aerodynamicznych (przepływowych), jak również ekonomicznych i całej sfery problemów eksploatacyjnych. Wydaje się, że należałoby zmierzać do pewnego rodzaju unifikacji konstrukcji tych maszyn, trochę przesadnie sugerując, aby ustalać typoszeregi turbogeneratorów.

W konstrukcji turbogeneratorów ważne są również szczególne zabiegi konstrukcyjne i technologiczne, nie zawsze podkreślane w algorytmach projektowych, ale świadczące o pewnego rodzaju kunszcie inżynierskim i poznawczym w tej dziedzinie. Są to mianowicie np. formy przepieceń (transpozycyjne i krzyżowe) przewodów w prętach uzwojenia stojana, będące wprost *koronkowym* dziełem konstruktorskim.

*Konstatując przedstawione współzależności i rozważania można zaryzykować stwierdzenie, że pod*

*względem elektromagnetycznym możliwe jest zaprojektowanie turbogenerators o dowolnej mocy, gdyby nie uwarunkowania termiczno-mechaniczne.*

W zakończeniu przedstawionych zagadnień należy wyrazić dezaprobatę zbyt małej publicznej wymiany informacji merytorycznych i braku szczegółowych danych technicznych bieżących konstrukcji turbogeneratorów o mocach granicznych. Z zażenowaniem należy stwierdzić, że współczesne prezentacje omawianych tu zagadnień sprowadzają się do informacji jedynie opisowych i bardzo poglądowych, co można by określić mianem *marketingowych*. Przykładem są publikacje np. z ostatnich konferencji, które odbyły się w Bukareszcie [10] i w Madrycie [11].

**Autor:** *Dr hab. inż. Włodzimierz Przyborowski, Politechnika Warszawska, Instytut Maszyn Elektrycznych, Pl. Politechniki 1, 00-662 Warszawa E-mail: [Wlodzimierz.Przyborowski@ime.pw.edu.pl](mailto:Wlodzimierz.Przyborowski@ime.pw.edu.pl).*

### LITERATURA

- [1] CIGRE Session 11 – Rotating Machines. Paris, 1974, 1978, 1984, 1998.
- [2] Latek W.: Turbogeneratory. WNT, Warszawa, 1970.
- [3] Titow W.W., Chutorieckij G.M., Zagorodnaja G. A. i in.: Turbogeneratory. Rasczet i konstrukcja. Energija, Leningrad, 1967.
- [4] Walker J. H.: Large Synchronous Machines. Clarendon Press, Oxford, 1981.
- [5] Bytnar A.: Wybrane zagadnienia konstrukcji i eksploatacji turbogeneratorów. WPW, Warszawa, 1983.
- [6] Glebow I.A., Danilewicz Ja.B.: Naucznyje osnowy projektowanija turbogieniatorow. Nauka, Leningrad, 1986.
- [7] Abramow A.I., Izwienow W.I., Sierihin N.A.: Projektowanie turbogieniatorow. Wyszaja Szkoła, Moskwa, 1990.
- [8] Detinko F.M., Zagorodnaja G. A., Fastowskij W.M.: Procznost i koliebanija elektriceskich maszin. Energija, Leningrad, 1969.
- [9] Cziemodanowa I B., Suworina W. G.: Optymalna geometria zubcowej zony rotora turbogieniatora. W kn Issledowanie turbo-i gidrogieniatorow. Izd. Nauka, Leningrad, 1976.
- [10] CIGRE SC A1 Meeting and Cigre Colloquium on Large Electrical Machines and Renewable Generation 03-04, Bucharest, Romania, 2013.
- [11] Meeting and Colloquium "Rotating Electrical Machines: Equirements, Operation & Maintenance". Madrid, Spain, 2015.