

doi:10.15199/48.2017.02.23

Propozycje do standaryzacji parametrów konstrukcyjnych i eksploatacyjnych turbogeneratorów dwubiegunowych

Streszczenie. W pracy przeanalizowano kwestię standaryzacji niektórych parametrów konstrukcyjnych, eksploatacyjnych i strukturalnych turbogeneratorów pracujących w krajowym systemie elektroenergetycznym. Uważa się bowiem, że standaryzacja wskazanych parametrów, uwarunkowana oczywiście wymogami konstrukcyjnymi, technologicznymi, ekonomicznymi itp. przyczynia się do podwyższenia efektywności eksploatacyjnej oraz sprawności technicznej przeglądów i remontów tych maszyn ze względu na standaryzację oprzyrządowania i osprzętu stosowanego w pracach remontowych i serwisowych. Problem jest trudny, ponieważ trzeba we wskazanych wyborach konstrukcji uwzględnić aspekty mechaniczne oraz systemy chłodzenia i wentylacji maszyny, czynniki bardzo ważne, ale pozaelektromagnetyczne.

Abstract. The key objectives explored in the below paper are to standardize some of design, structural and operating parameters of the various turbo-generators installed in the national power grid. It's proven that standardization of selected parameters, considering the aspects of design as well as technological and commercial requirements, is critical in case of operability and maintainability effectiveness. These advantages are materialized only when the used servicing equipment are standardized as well. The complexity increases when other significant non-electromagnetic factors such mechanical, cooling and ventilation (EHS, transport, scheduled maintenance periods) must be considered. (**Proposed standardization of two pole turbo-generators design and ratings parameters.**)

Słowa kluczowe: turbogeneratory, stojan, wirnik, standaryzacja, parametry konstrukcyjne i eksploatacyjne.

Keywords: turbo-generators, stator, rotor, standardization, operating and design parameters.

Wstęp

Wzrost zapotrzebowania na energię elektryczną powoduje ciągły rozwój zawodowych zakładów energetycznych (ale również i przemysłowych) oraz zwiększanie mocy jednostkowej generatorów w nich zainstalowanych, których sumaryczna moc w krajowym systemie elektroenergetycznym w bieżącym wieku przekroczyła wartość 35 GW. Obserwuje się jednocześnie znaczne zróżnicowanie mocy znamionowych instalowanych jednostek, co również oznacza znaczne zróżnicowanie ich konstrukcji. O rozwoju konstrukcji i wyborze tych maszyn mają niewątpliwie znaczenie aspekty ekonomiczne, ponieważ koszty elektrowni są proporcjonalne do spotęgowanej sumy mocy zainstalowanych jednostek według relacji $K = C(\sum P_{N(k)})^{0.6}$, co określone jest tzw. „prawem mocy”. W wyborze jednostek energetycznych mają również znaczenie koszty eksploatacyjne, ponieważ roczne koszty eksploatacyjne są odwrotnie proporcjonalnie do mocy jednostkowej turbogeneratorów z przedziału wartości <100 – 1000 MW>.

Ważnym czynnikiem w doborze generatorów energetycznych powinno się również brać pod uwagę niezawodność jednostek energetycznych i ich operatywność eksploatacyjną, sprawność przeprowadzania okresowych przeglądów serwisowych i remontów oraz uwarunkowanie statycznej i dynamicznej stabilności systemu elektroenergetycznego.

Tymczasem w krajowych siłowniach elektroenergetycznych obserwuje się znaczne zróżnicowanie turbogeneratorów pod względem mocy znamionowych (<200 – 360 – 500 – 800 – (1200) MW>). Powoduje to znaczne zróżnicowanie konstrukcji tych maszyn i parametrów eksploatacyjnych. Przykładem tego jest zróżnicowanie liczby żłobków stojana i wirnika maszyn o zbliżonych wartościach mocy znamionowej oraz zróżnicowanie napięć znamionowych. Spowodowane jest to niewątpliwie zróżnicowaniem producentów tych maszyn. Wskazane jest więc ustalenie, w pewnym zakresie, standaryzacji konstrukcji maszyn ich podzespołów i elementów oraz zunifikowanie niektórych parametrów eksploatacyjnych.

Ważnym aspektem standaryzacji konstrukcji maszyn o mocach granicznych jest usprawnienie szeroko rozumianej

technologii wytwarzania i typizacja niektórych elementów konstrukcyjnych (przewodów i prętów uzwojeń oraz sposobów zamocowań) w zakresie typoszeregu maszyn. Przedstawione sugestie standaryzacji turbogeneratorów opierają się na analizie wybranych konstrukcji tych maszyn wytwarzanych w okresie ostatniego półwiecza przez czołowych wytwórców, do których zalicza się: DZWME DOLMEL – Polska, ASEA, ABB – Szwecja; Elektrosiłę, Elektrołóżmiasz, Sibełektrołóżmiasz – Rosja (ZSRR); Kraftwerkunion, Simens – RFN; Alsthom-Atlantique, ALSTOM – Francja, BBC – Szwajcaria, General Electric – USA. Toshiba, Hitachi – Japonia, ASGEN Włochy, Parsons – Anglia.

Podstawowe zależności

Przyjmując podstawową zależność na moc czynną maszyny elektrycznej

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

można wyznaczyć zależność na moc maszyny w reprezentacji wielkości fizycznych i parametrów strukturalno-geometrycznych

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

gdzie: m – liczba pasm fazowych, A_s – okład prądu twornika, B_δ – indukcja magnetyczna w szczeliny przywornikowej, f – częstotliwość napięcia, D_r – średnica wirnika, L_r – długość czynna poosiowa wirnika (magneśnicy), p – liczba par biegunów, k – współczynnik.

Należy zauważyć, że wielkość f/p jest miarą prędkości kątovej wirnika maszyny i jest czynnikiem nadrzędnie standaryzowanym. Zalecane standaryzowanie turbogeneratorów odnośnie do struktury konstrukcyjnej, wybranych parametrów fizycznych i parametrów eksploatacyjnych jest w naturalny sposób związane ze zwiększeniem ich mocy jednostkowych. Z kolei zwiększanie mocy jednostkowej tych maszyn doświadcza ograniczeń od strony kryteriów: wytrzymałościowych (statycznych i dynamicznych), cieplnych, izolacyjnych i magnetycznych [2 - 7].

W celu ujawnienia związków energetycznych maszyny z efektami cieplnymi, które należy kompensować układami chłodzenia i wentylacji, można zależność (2) przedstawić w

postaci, która określa moc maszyny przez gęstość prądu twornika i wymiary żłobków.

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

gdzie: j_s – gęstość prądu stojana, b_s – szerokość żłobka stojana, h_s – głębokość żłobka stojana,

Współczynnik mocy zawiera również czynnik energetyczny, ponieważ jest miarą prądu biernego w prądzie twornika.

W zasadzie standaryzacja konstrukcji generatorów o mocach granicznych powinna być dokonana dla trzech lub czterech wartości ich mocy znamionowych w odniesieniu do ich systemów chłodzenia.

Ważnym parametrem strukturalnym konstrukcji maszyny jest liczba żłobków stojana $Q_s = 2pmq$ wyznaczona liczbą par biegunów, pasm fazowych m i liczbą żłobków na biegun i fazę q , a wymiary żłobków stanowią o parametrach obwodowych maszyny i efektywności pracy w systemie elektroenergetycznym. W zasadzie każdy z czynników determinujących moc maszyny w określonym typoszeregu może być standaryzowany z uwzględnieniem ich korelacji. Należy przy tym mieć na uwadze (oprócz wskazanych uprzednio zaleceń) również maksymalizację mocy jednostkowej (W/kg) projektowanej i konstruowanej jednostki określonego typu, co związane jest z ekstremalizacją jej sprawności. Za standard sprawności turbogeneratorów zarówno dwu- i czterobiegunowych można przyjąć wartość co najmniej równą $\eta_N = 98,5\%$ (jako wartość średnią dla szerokiego zbioru turbogeneratorów o mocach granicznych), z zaleceniem zwiększania jej dla jednostek o największych mocach. Ustalenie określonej wartości sprawności turbogeneratora, jako wartości kryterialnej jest ważne od strony procesu projektowego, ponieważ ukierunkowuje procedury obliczeniowe na wybór optymalny parametrów konstrukcyjnych i eksploatacyjnych maszyny, należy jednak mieć na uwadze, że sprawność całego bloku elektroenergetycznego nie przekracza (w średniej ocenie) 40%. Z tego powodu zwiększanie sprawności turbogeneratora znacznym zwiększeniem kosztów jego produkcji nie jest racjonalne.

Niewątpliwie zmiany technologii konstrukcji turbogeneratorów i postęp w inżynierii materiałów stosowanych do ich konstrukcji będzie mieć wpływ na zmiany niektórych współzależności między wskazanymi wielkościami.

Z zależności (1) wynika bezpośredni wniosek, że ze względu na maksymalizację mocy korzystnie jest projektować turbogeneratory o zwiększonej liczbie faz, zwiększonym napięciu i współczynniku mocy. Wielkości te są oczywiście uwarunkowane wymaganiami systemu elektroenergetycznego, parametrami transformatora blokowego, własnościami izolacyjnymi i strukturą żłobków stojana. Biorąc pod uwagę określone uwarunkowania można zalecić następujące zestawy wartości wskazanych wielkości:

- liczby pasm fazowych $m = \langle 3, 6 \rangle$,
 - wartości współczynnika mocy $\cos \phi_N = \langle 0,85, 0,90, 0,95 \rangle$,
 - wartości napięć znamionowych: $U_N = \langle 20, 24, 27, 30, 33 \text{ kV} \rangle$; dla jednostek od wartości mocy znamionowej 200 MW. Można przyjąć, że nie ma ograniczeń na wartość napięcia strony pierwotnej transformatora blokowego.
- Przy ustalonej mocy znamionowej projektowanej jednostki energetycznej można ustalić dowolny zestaw wskazanych parametrów – $m, \cos \phi_N, U_N$, z określonych przedziałów ich wartości, a wartość znamionowa prądu będzie parametrem wynikowym.

Ze względu na koszty inwestycyjne i eksploatacyjne oraz ze względu na maksymalizację sprawności energetycznej jednostki korzystne jest zwiększenie

określonych parametrów. Zwiększenie liczby faz przykładowo do $m=6$ powoduje zwiększenie współczynnika uzwojenia o 4% oraz zmniejszenie strat powierzchniowych w wirniku od pól wyższych harmonicznych twornika ($n = -11, +13$) o około 6%. Tak więc za standardową liczbę pasm fazowych turbogeneratorów o mocach granicznych, np. większych od wartości 500 MW, można by przyjąć $m=6$.

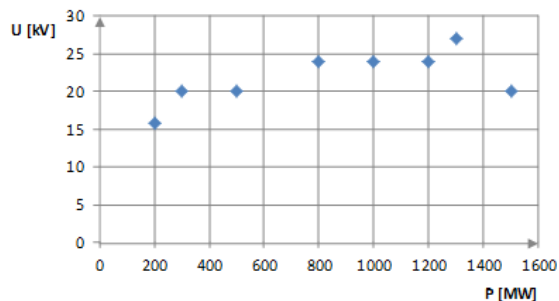
Współczynnik mocy można zwiększyć wieloma sposobami, ale trzeba mieć na uwadze odwrotnie proporcjonalny związek tego parametru z wartością współczynnika statycznego przeciążenia maszyny, który można zwiększyć przez zwiększenie znamionowego prądu wzbudzenia. Jednocześnie przyjęta jest zasada zmniejszania współczynnika przeciążenia o 10% od wartości 1.8 ze wzrostem mocy jednostkowej turbogeneratora o około 250 MW, przy zwiększeniu ich mocy od wartości 300 MW. Tak więc za wartość standardową współczynnika mocy można przyjąć $\cos \phi_N = 0,9$, z preferencją wartości 0,95.

Zwiększenie napięcia jest związane z wielkościami fizycznymi i konstrukcyjnymi ujętymi wzorem

$$(4) \quad U = k_u N_s L_{sFe} D_s B_\delta f$$

gdzie: k_u – współczynnik uzwojenia, N_s – liczba zwojów pasma fazowego uzwojenia stojana, D_s – średnica rdzenia stojana, L_{sFe} – długość aktywna rdzenia stojana.

Tak więc w przypadku tego parametru eksploatacyjnego ustalenie wartości standardowych wiąże się z wieloma wielkościami i wymaga ich uszeregowania. W zasadzie od początku konstrukcji tych maszyn przyjmowano pewien stopień normalizacji i uszeregowanie wartości napięć znamionowych. Od wartości mocy 100 MW napięcia były ustalane w następującym szeregu $U_N < 10,5, (13,8), 15,75, 18,0, 20,0, 24,0, 27,0 \text{ kV} \rangle$, choć nie zawsze wyższym mocom odpowiadało wyższe napięcie (rys. 1).



Rys. 1. Uszeregowanie napięć znamionowych turbogeneratorów o mocach z przedziału <100 – 1500 MW>

Z przedstawionego zestawienia relacji $U \leftrightarrow P$ wynika, że wskazane jest znormalizowanie napięć turbogeneratorów. Na przykład na poziomie trzech wartości napięć: $\approx 20 \text{ kV}$, $\approx 25 \text{ kV}$, $\approx 30 \text{ kV}$? i zwiększaniem napięcia o ustalony przyrost ΔU w miarę zwiększania zdolności dielektrycznych nowych materiałów izolacyjnych.

Klasyfikacja turbogeneratorów według kryteriów mocy i systemu chłodzenia

Próba standaryzacji podstawowych wielkości wyznaczających moc maszyny wskazuje na konieczność odniesienia się do mocy, ale również bazą klasyfikacji jest odniesienie do systemów chłodzenia. I ta norma klasyfikacji jest najważniejsza w ustaleniu podklas maszyn o ustalonych standardowych wartościach parametrów konstrukcyjnych i eksploatacyjnych w danej klasie.

Na użytek prowadzonych klasyfikacji dogodnie jest rozdzielić turbogeneratory o dużych mocach w trzech grupach, z preferowanymi w nich systemami chłodzenia.

W związku z nadzwyczaj szybkim rozwojem turbogeneratorów chłodzonych powietrzem można ustalić pierwszą grupę o mocach $P_N \in \langle 100 - 200 - 400 \text{ MW} \rangle$ z chłodzeniem powietrznym uzwojeń stojana i wirnika oraz rdzenia stojana.

Drugą grupą są turbogeneratory o chłodzeniu wodowym przynależące do przedziału mocy $P_N \in \langle 300 - 500 - 800 \text{ MW} \rangle$; z wodorowym bezpośrednim chłodzeniem beczki i uzwojenia wirnika i rdzenia stojana oraz pośrednim lub bezpośrednim chłodzeniem wodorem prętów uzwojenia stojana.

Trzecią grupę stanowią generatory najwyższych mocy w przedziałach $P \in \langle 800 - 1000 - 1200 - 1500 \text{ MW} \rangle$ o chłodzeniu wodno-wodorowym: bezpośrednie chłodzenie wodne prętów uzwojeń stojana i wodorowe chłodzenie rdzenia stojana i wirnika.

Jak wynika z dokonanej specyfikacji zaproponowane klasy podziału nie są rozłączne, gdyż trudno jest ujednoznaczyć kryteria ich rozdziału. Wyraźne rozdzielanie tych klas może być przeprowadzone na podstawie podstawowego czynnika zmiennych strat obciążeniowych, którym jest gęstość prądu twornika.

Ponieważ ustalana gęstość prądu związana jest z wieloma innymi parametrami takimi jak geometria żłobka i struktura przewodów w przecie, to kwestię tę należy rozpatrzyć

oddzielnie podejmując optymalizację gęstości prądu z kryteriami elektrycznymi, cieplnymi i z uwzględnieniem struktury żłobkowo-zębowej stojana.

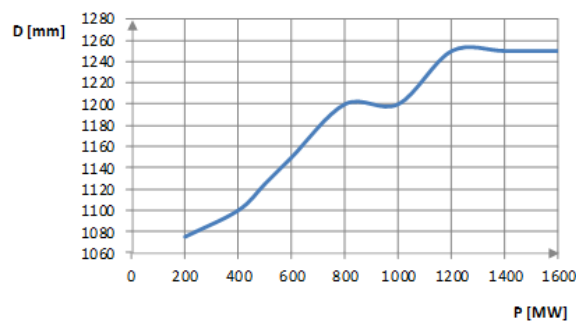
Nieostry rozdział klas standaryzowanych konstrukcji stanowi jednocześnie przesłankę do tworzenia częściowych typoszeregów na podstawie wymiarowych parametrów konstrukcyjnych tych maszyn.

Standaryzacja oparta na głównych wymiarach wirnika – magneśnicy jest bardzo ważna, ponieważ stanowi o procesach wytwórczych maszyn w zakresie doboru technologii, materiałów i oprzyrządowania produkcyjno-remontowego i diagnostycznego. Standaryzowane klasy pod względem czynników wymiarowych można ustalić w odniesieniu do najmniejszych przyrostów tych wymiarów względem ustalonej jednostki przyrostu mocy.

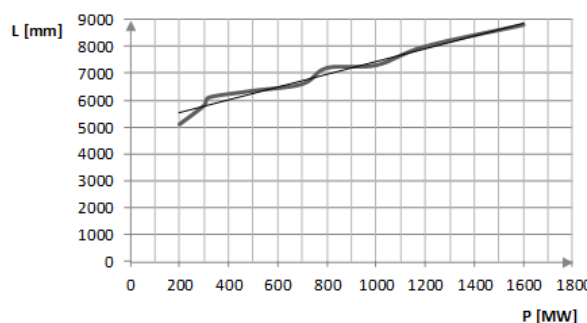
Z doświadczalnej analizy wymiaru średnicy wirnika wynika, że z dotychczas wyprodukowanych turbogeneratorów, największy przyrost tego wymiaru $\Delta D = 100 \text{ mm}$ przypada w przedziale mocy $\langle 400 - 800 \text{ MW} \rangle$. Następnie wymiar ten jest ustalony na poziomie wartości $D_r = 1200 \text{ mm}$, i ponownie następuje przyrost $\Delta D = 20 \text{ mm}$ w przedziale mocy $\langle 1100 - 1250 \text{ MW} \rangle$, i ponownie ustalony jest na poziomie wartości 1250 mm dla turbogeneratorów powyżej mocy 1300 MW .

Analogicznie można określić stopień przyrostów długości wirników w odniesieniu do przyrostów mocy. Ponieważ trend tej funkcji jest quasilineowy, to można w przybliżeniu przyjąć relację $\Delta L / \Delta P = 250 \text{ mm} / 100 \text{ MW}$ dla całego przedziału mocy turbogeneratorów. Biorąc pod uwagę technologię i oprzyrządowanie w procesie wytwórczym wirnika należy specyfikować typoszeregi maszyn ze względu na moc z jednoczesnym odniesieniem do wymiarów beczki wirnika.

Ustalając oczywiście w danej klasie konstrukcję bazową, którą można uznać za optymalną pod względem elektromagnetycznym, cieplnym, mechanicznym i sprawnościowym. Tak więc typoszereg byłby wyznaczony wskazanymi przyrostami wymiaru radialnego (średnicy) i aksjalnego (długości) beczki wirnika. Za jednostki bazowe można by przyjąć turbogenerator według przykładowego szeregu mocy znamionowych $\{2, 3, 4, \dots\} \times 100 \text{ MW}$.



Rys. 2. Charakterystyka zależności średnicy beczki wirnika od mocy turbogeneratorskiej



Rys. 3. Charakterystyka zależności długości beczki wirnika od mocy turbogeneratorskiej

Unifikacja wielkości fizycznych

Do znormalizowanych wielkości fizycznych można włączyć indukcję magnetyczną w strefie szczeliny przywirnikowej. Składowa radialna indukcji w szczelinie każdej maszyny elektrycznej jest fundamentalną wielkością fizyczną bowiem stanowi o jej koenergii, stanie namagnesowania poszczególnych odcinków obwodu magnetycznego i oczywiście determinuje parametry energetyczne. W turbogeneratorach wielkość tę trudno jest ściśle i jednoznacznie określić z uwagi na znaczny rozmiar promieniowy szczeliny i niejednorodność reluktancyjną obszarów przyległych do szczeliny. Stosowne jest odniesienie tej wielkości do stanu znamionowego obciążenia i w miejscu pośredniej powierzchni walcowej między pobocznicami walcowymi zewnętrznej powierzchni rdzenia wirnika i wewnętrznej powierzchni rdzenia stojana. Z dotychczasowych doświadczeń wynika, że powinno się ustalić wartość indukcji $B_{\delta r}$ na poziomie wartości 1 T .

Z ustaleniem indukcji magnetycznej w szczelinie powietrznej związana jest kwestia układu prądowego wirnika i związane z tą wielkością takie parametry jak: liczba zwojów tego uzwojenia, liczba zwojów w zezwoju, przekrój przewodów i ich forma, liczba żłobków (podziałek żłobkowych na obwodzie wirnika) oraz kształt żłobków magneśnicy.

Jest to najtrudniejszy problem konstrukcyjny turbogeneratorów i silnie związany z wyborem systemu (i medium) chłodzącego maszynę. Z bardzo licznych zbioru wymienionych parametrów można wskazać tendencje lub zasady ustalenia liczby podziałek żłobkowych magneśnicy o wartościach równych odpowiednio 32/42, 36/48, 40/52, 40/60 i zalecanie stopniowania żłobków wirnika, ze względów wytrzymałościowych.

Nasuwa się w tym miejscu problem unifikacji napięcia obwodu wzbudzającego. Jednak nie jest ten problem silnie uwarunkowany, ponieważ wartość napięcia wzbudzenia nie jest stosunkowo duża w odniesieniu do właściwości izolacji i nie ma ograniczeń prądowych (poza cieplnymi) ze względu na przekształtnikowe układy zasilania tego obwodu.

Należy zauważyć, że wybór konstrukcji wirnika powinien być istotnie uwarunkowany wynikami obliczeń mechanicznych i to zarówno wytrzymałościowych jak i dynamicznych np. częstościami drgań własnych.

Unifikacja parametrów strukturalnych

Do parametrów strukturalnych zalicza się liczbę gałęzi równoległych uzwojenia twornika liczbę warstw uzwojenia, które pozostaną niezmiennicze w każdym typie i wielkości turbogenerators, więc są równe odpowiednio $a=2$, $w=2$. Parametrem strukturalnym, który powinien być również ustalony normatywnie jest; liczba żłobków stojana Q_s . Wydaje się racjonalne ustalenie tej liczby z przedziału wartości $Q_s = < 48, 54, 66, 72, 90 >$ biorąc pod uwagę wybór liczby pasm fazowych o wartości $m=3, 6$. Dalsze zwiększenie liczby żłobków lub zwiększenie podziałki żłobkowej stojana wymaga zwiększenia średnicy wewnętrznej rdzenia stojana.

Kolejnym parametrem strukturalnym uzwojenia twornika jest liczba kolumn przewodów elementarnych w przecie. Jest ona uwarunkowana stratami dodatkowymi w przewodach elementarnych, szerokością pręta stojana oraz sposobem chłodzenia (pośrednie lub bezpośrednie) i rodzajem medium chłodzącego (powietrze, wodór, woda). Z dotychczasowych doświadczeń wynika, że preferowane są układy dwu kolumnowe z przewodami drażnionymi umieszczonymi przemiennie na wysokości i szerokości pręta. Zaletą jest łatwość odprowadzenia ciepła, wartość mechaniczna z rdzeniem i łatwość wykonania przepleceń, konstrukcja ta wymaga jednak wzmocnienia zamocowań połączeń czołowych. Ograniczeniem dla tej struktury pręta jest głębokość żłobka, która powoduje powiększenie reakcji rozproszenia.

W zakresie tego problemu dochodzi kwestia doboru wymiarów przewodów elementarnych. Uważa się obecnie, że powinny być zmniejszone grubości tych przewodów (poniżej grubości 2 mm) ze względu na ograniczenie strat dodatkowych związanych z nierównym rozkładem gęstości prądu. Osobliwą kwestią w procesie wytwórczym turbogeneratorów jest spakietowanie rdzenia stojana z segmentów blach (elektrotechnicznych) o grubości 0.5 mm, segmentowanych wzdłuż obwodu w stopniu 1/6, które cechują się odpowiednim kierunkiem walcowania z uwagi na ustalenie kierunków magnesowania. Ze względu na podwyższenie sprawności procesów technologicznych należałoby rozpatrzyć zmniejszoną segmentację o stopniu 1/3 np. dla turbogeneratorów o małych i średnich mocach. Co niewątpliwie polepszyłoby efekt pakietowania i sztywność rdzenia oraz zmniejszyłoby stopień anizotropii konstrukcyjnej rdzenia, wpływając również korzystnie na stan elastowyrzmałościowy.

Uwagi końcowe

Projektowanie i standaryzacja konstrukcji turbogeneratorów jest problemem bardzo złożonym, ponieważ obejmuje przede wszystkim zagadnienia elektryczne, magnetyczne i elektrodynamiczne oraz problemy cieplne, termodynamiczne, mechaniczne jak również aerodynamiczne związane z przepływem mediów chłodzących. Bardzo ważnym problemem jest oczywiście

proces wytwórczy tych maszyn, a w szczególności wytwarzanie wirników. Znaczenie ma również procedura przeglądów i remontów tych maszyn oraz związane z tym oprzyrządowanie i technologia tych czynności. Tak więc standaryzacja konstrukcji maszyn poczynając od elementarnych składników konstrukcji, którymi są przewody i pręty, blachy rdzenia stojana, elementy mocujące i izolacyjne, a szczególnie struktura i konstrukcja wirnika pozwoliłaby usprawnić procesy wytwórcze, a przede wszystkim przeglądy remontowe i procedury diagnostyczne. Przedstawione sugestie odnośnie do standaryzacji wskazanych parametrów konstrukcyjnych, eksploatacyjnych i fizycznych turbogeneratorów nie wyczerpują rozpatrywanego problemu, ponieważ są również układy niezwiązane bezpośrednio z konstrukcją tych maszyn, ale mające istotne znaczenie w procesie ich eksploatacji. Do układów tych można przykładowo zaliczyć systemy wzbudzenia. Pewnym stopniem standaryzacji tych systemów są stosowane obecnie układy prostownicze. W podstawowej klasyfikacji systemy wzbudzenia magnetycznych turbogeneratorów można wyróżnić:

- system wzbudzenia statycznego z zewnętrznym obwodem regulacji, połączonym z obwodem wzbudzającym przez węzeł pierścieniowo szczotkowy,
- system wzbudzenia z układem elektromaszynowym (z prądnicą synchroniczną lub indukcyjną) o tworniku na wirniku sprzęgniętym z wałem turbogenerators a magnetyczną stojanową.

Bardzo ważne są również takie aspekty normalizacji jak standaryzacja użytych materiałów i ich dostawców oraz standaryzacja procesów technologicznych wraz z ich optymalizowaniem czasu produkcji.

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.
Mgr inż. Jerzy Drosik, General Electric Power sp. z o.o. / Gas Power Systems, Biuro Generatorów - R&D, 53-609, ul. Fabryczna 10, Wrocław, E-mail jerzy.drosik@ge.com

LITERATURA

- [1] CIGRE Session 11 – Rotating Machines. Paris, 1974, 1978, 1984, 1998.
- [2] Titow W.W., Chutorieckij G.M., Zagorodnaja G. A. i in.: Turbogeneratory. Rasczet i konstrukcja. Energija, Leningrad, 1967.
- [3] Latek W.: Turbogeneratory. WNT, Warszawa, 1970.
- [4] Walker J. H.: Large Synchronous Machines. Clarendon Press Oxford, 1981.
- [5] Glebow I.A., Danilewicz Ja.B.: Naucznyje osnovy projektowanija turbogeneratorow. Nauka, Leningrad, 1986.
- [6] Dąbrowski M., Projektowanie maszyn elektrycznych prądu przemiennego. Wydaw. Nauk. Techn., Warszawa, 1988.
- [7] Abramow A.I., Izwienow W.I., Sierihin N.A.: Projektowanie Turbogeneratory. Wyszczaja Szkoła, Moskwa, 1990.
- [8] Cigre SC A1 Meeting and Cigre Colloquium on Large Electrical Machines and Renewable Generation 03-04 September, Bucharest, Romania 2013.
- [9] Meeting and Colloquium "Rotating Electrical Machines: Requirements, Operation & Maintenance" September 6th-11th, Madrid, Spain, 2015.