Analiza wytrzymałościowa kołpaka turbogeneratora TWW-200-2A

Tomasz GOMOLUCH
Dział Rozwoju Produktu i Marketingu, EthosEnergy Poland S.A.

Streszczenie. W pracy przedstawiono rozkład przemieszczeń i naprężeń kołpaka turbogeneratora TWW-200 2A, przy zwiększonej prędkości obrotowej w czasie wyważania, 3600 [obr/min]. Obliczenia zostały wykonane za pomocą Metody Elementów Skończonych w programie Ansys Mechanical 15.0. Złożoność problemu wynika z bezpośredniej współpracy kołpaka z beczką wirnika, z interakcji z wieloma elementami znajdującymi się pod kołpakiem jak i z samego stopnia wytężenia. W artykule dodatkowo przestawiono wykonane uproszczenia modelu geometrycznego, założenia oraz ustawienia analizy. Otrzymane wyniki odniesiono ponadto do wyników obliczeń w przestrzeni 2D. Porównanie tych dwóch metod pokazuje zalety i wady obu rozwiązań, zróżnicowanie w szczegółowości otrzymanych wyników, czasu obliczeń oraz wymaganych danych wejściowych.

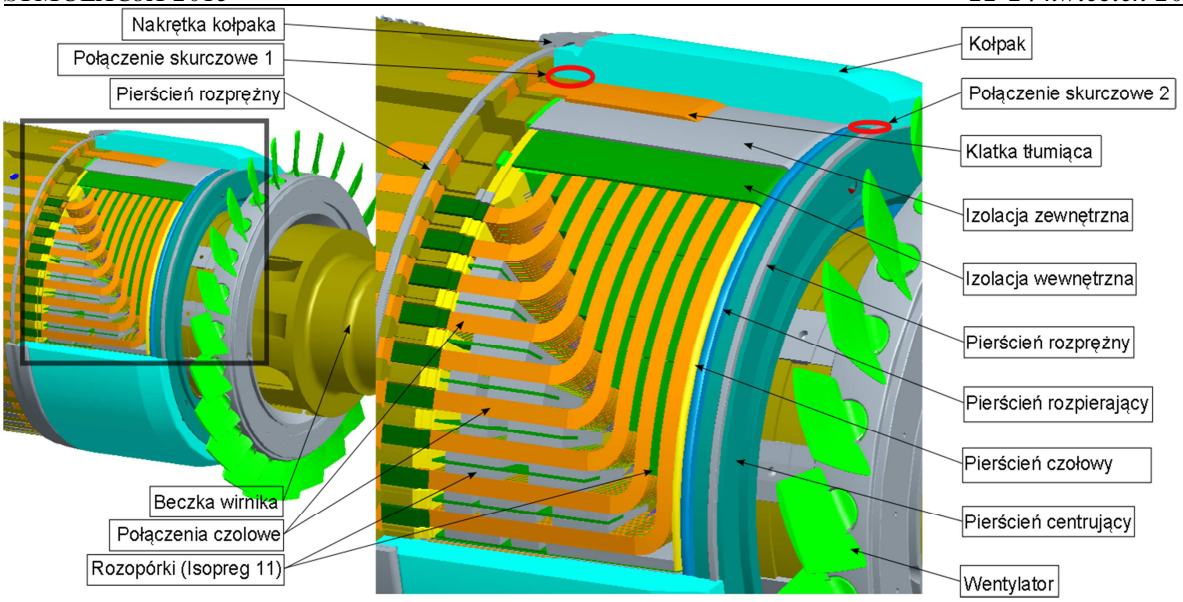
l. WSTĘP

Jednym z najbardziej obciążonych elementów w turbogeneratorze jest kołpak wirnika, jest to spowodowane m.in. funkcją jaką spełnia. Ma on za zadanie zabezpieczyć połączenia czołowe uzwojenia przeciw działaniu sił odśrodkowych. Wysokie wartości naprężeń w tym elemencie, wynikają również z jego gabarytów, masa 1025kg, średnica zewnętrzna wynosi 1140 mm, długość natomiast 607 mm, oraz z nominalnej prędkości obrotowej, 3000 [obr/min]. Stan naprężenia w kołpaku jest złożony, naprężenia są nierównomiernie rozłożone wzdłuż długości i obwodu, występują naprężenia rozrywające i gnące. Uwzględnienie elementów znajdującym się pod kołpakiem i ich wzajemnych oddziaływań w obliczeniach wytrzymałościowych w przestrzeni 3D, daje możliwość odwzorowania złożonego stanu naprężenia oraz eliptycznego kształtu deformacji.

2. ANALIZA MECHANICZNA KOŁPAKA

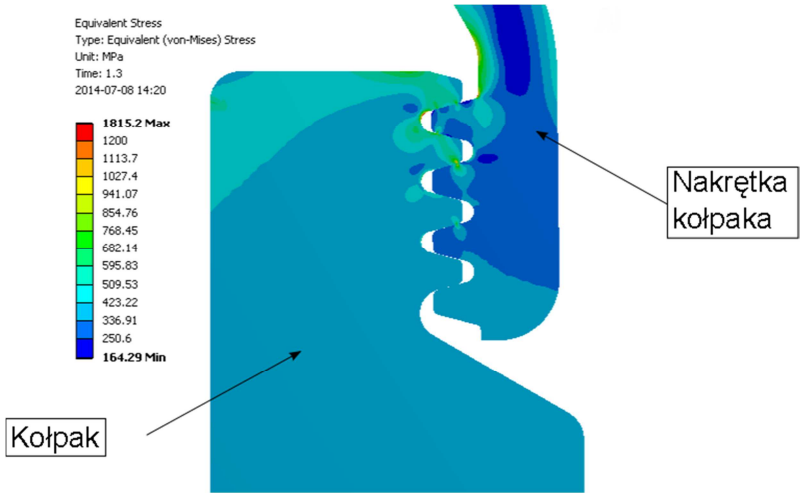
2.1. Geometria modelu

Model geometryczny został wykonany w programie ProE WF 4.0 i jest pokazany na rys. 1. Kołpak z beczką wirnika jest połączony za pomocą połączenia skurczowego (Połączenie skurczowe 1, rys. 1). Połączenie to musi zapewnić stabilne połączenie, uniemożliwiające oddzielenie kołpaka od beczki wirnika w czasie pracy. Odłączania się kołpaka od wirnika i ponowne łączenie, może prowadzić do zmęczenia materiału na skutek uderzeń i znacznie utrudnić pracę przy wyważaniu. Połączenie skurczowe występuje również pomiędzy kołpakiem i pierścieniem centrującym (Połączenie skurczowe 2).



Rys. 1 Geometria kołpaka i elementów współpracujących

Połączenia skurczowe nie zabezpieczają kołpaka przed zsunięciem się z miejsca osadzenia. W analizowanym przykładzie, funkcję tą spełnia specjalna nakrętka, jest ona nakręcana od strony wirnika. W celu ograniczenia stopnia skomplikowania zadania, zdecydowano się na wykonanie analizy osiowosymetrycznej, której celem było obliczenie sztywności połączenia gwintowego pomiędzy nakrętką i kołpakiem, rys. 2. W docelowej analizie kołpaka, połączenie gwintowe zostało zastąpione sprężynami o odpowiedniej sztywności, z uwzględnieniem wstępnego naciągu. Sama nakrętka jest zabezpieczona za pomocą pierścienia rozprężnego.



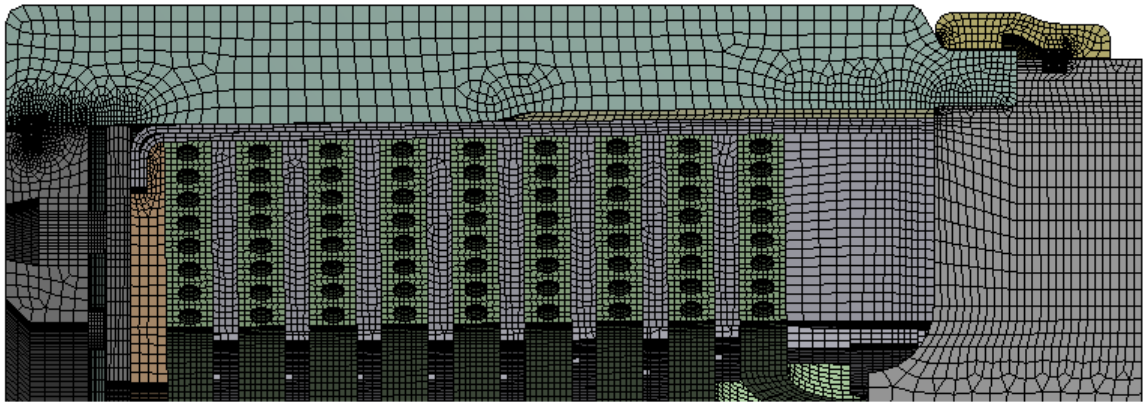
Rys. 2 Analiza osiowosymetryczna połączenia gwintowego nakrętka - kołpak

Proces uzwajania wirnika jest skomplikowany, długotrwały i wykonywany manualnie. Powoduje to, że dużą rolę w tym procesie odgrywa monter. Jego dokładność i powtarzalność w znacznym stopniu może skomplikować właściwe odwzorowanie rzeczywistości w analizie numerycznej. Na rys. 3 pokazany jest jeden z etapów uzwajania wirnika oraz sam kołpak.

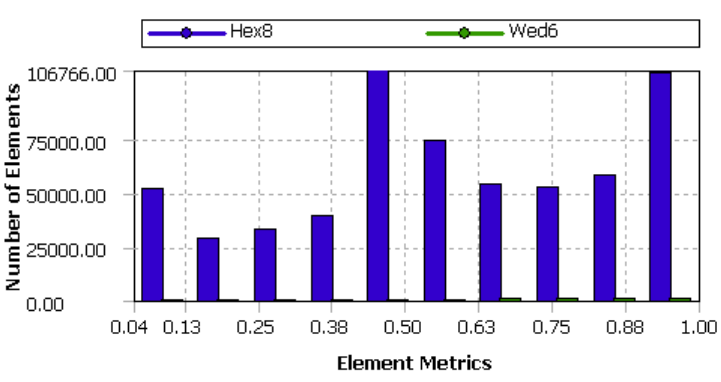
Rys. 3 Wirnik w czasie uzwajania

2.2. Siatka elementów skończonych, parametry materiałowe, ustawienia kontaktów

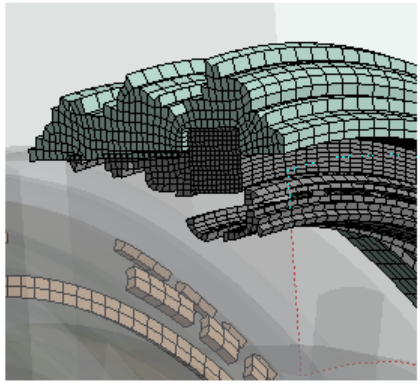
Siatka elementów skończonych składa się z 602 183 Hex8 i 4 176 Wed 6, co daje 886 337 węzłów. Wskaźnik jakości siatki Element Quality pokazany jest na rys. 4b. Objętość elementów poniżej wartości 0,2 stanowi 0,92% objętości całego modelu. Te elementy są pokazane na rys. 4c. Konieczność zagęszczenia w kierunku osi wirnika i ograniczone możliwości zagęszczenia po obwodzie, wykluczają możliwość wyeliminowania elementów poniżej wartości 0.2. Charakter obciążenia elementów o pogorszonej jakości, nie powinien mieć większego wpływu na otrzymane wyniki końcowe.



a



b



c

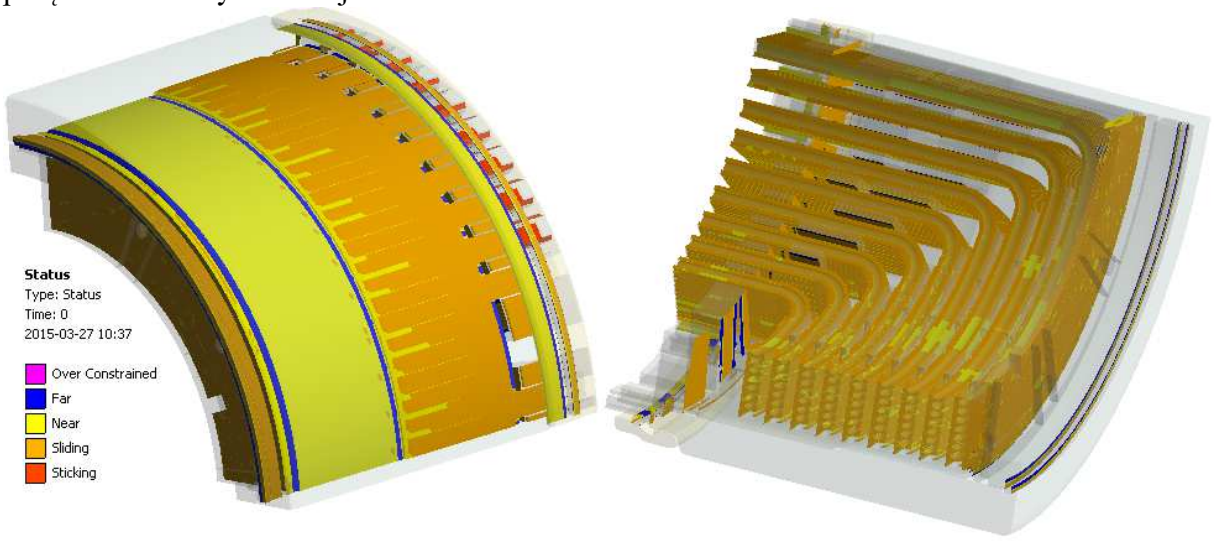
Rys. 4 a. Wycinek siatki elementów skończonych, b. Wskaźnik jakości siatki Element Quality c. Elementy poniżej wartości Element Quality 0.2

Wszystkie użyte modele materiałów są modelami liniowymi, a właściwości mechaniczne ważniejszych elementów są pokazane w tabela 1.

Tabela 1 Właściwości mechaniczne użytych modeli materiałów

Element	Materiał	Moduł Younga [MPa]	Współ. Poissona	Gęstość [kg/m^3]	$R_{p\ 0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]
Kołpak	G18H18	2.1e5	0.3	7850	1100	1100
Pozostałe elementy stalowe	-	2.1 e5	0.3	7850	-	-
Pręty	Miedź srebrowa	1.15 e5	0.307	8940	-	-
Usztywnienia	Isopreg/ Isoval 11/	2.4 e4	0.3	2000	-	-

Ważną częścią wykonanej analizy są połączenia kontaktowe, sumaryczna liczba nieliniowych par kontaktowych (Frictionless) wynosi 92, natomiast liniowych (Bonded) 18. Liczba elementów kontaktowych wynosi 346 976. Zastosowanie kontaktów nieliniowych było konieczne do właściwego odwzorowania rzeczywistości. Przykładowo, każdy pręt cewki składa się z prętów elementarnych, które nie są w żaden sposób połączone ze sobą na stałe. Pominięcie tego faktu w drastyczny sposób zmieniłoby sztywność połączeń czołowych uzwojenia na zginanie, co w dalszej kolejności przełożyłoby się zniekształcenie rozkładu naprężeń i przemieszczeń w modelu. Status wszystkich par kontaktowych na początku analizy jest pokazany na rys. 5. Założono, że wstępna penetracja pomiędzy usztywnieniami a połączeniami czołowymi wynosi 0,05 mm. Wcisk ten symuluje sztywny montaż usztywnień połączeń czołowych uzwojenia.



Rys. 5 Status kontaktów

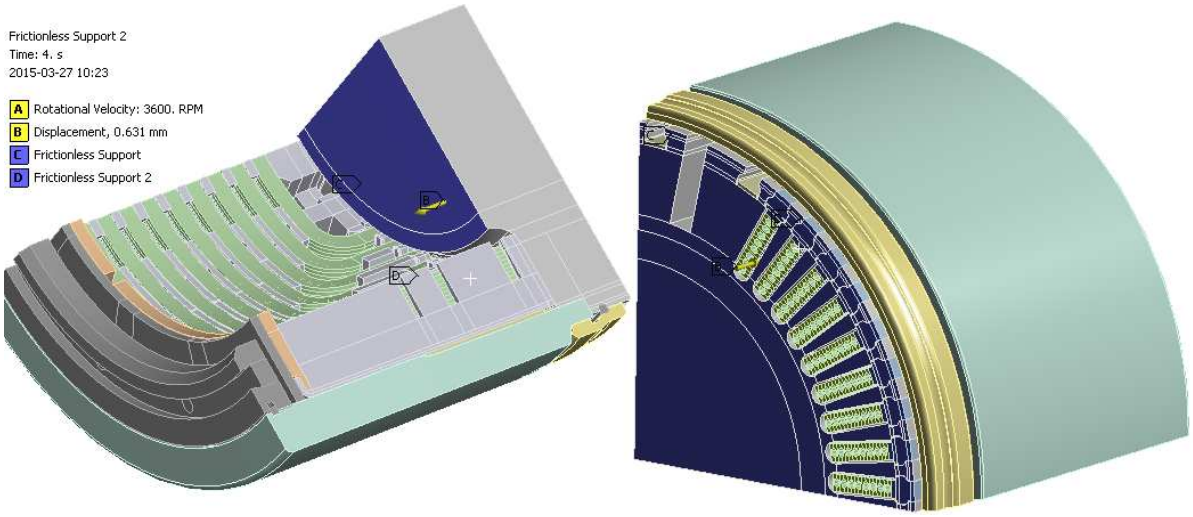
2.3. Warunki brzegowe, ustawienia analizy

Głównym obciążeniem układu jest prędkość obrotowa, której wartości w zależności od stanu pracy wynoszą odpowiednio:

- prędkość znamionowa 3000 [obr/min],
- prędkość przy wyważaniu kołpaków używanych 3300 [obr/min],
- prędkość przy wyważaniu kołpaków nowych 3600 [obr/min].

Ze względu na ograniczenie rozmiaru zadania i na rodzaj analizy (analiza statyczna, nieliniowa), zdecydowano się na wprowadzenie dwóch płaszczyzn symetrii, równoległych do osi wirnika. Beczka wirnika została skrócona do wymiaru, który był wystarczający do poprawnego obliczenia połączenia skurczowego. Pręty uzwojenia również zostały skrócone, dodatkowo uproszczono w nich system wentylacyjny, wprowadzając stały kanał osiowy przez całą ich długość. Pozwoliło to na uzyskanie siatki elementów skończonych o dobrej jakości, przy zachowaniu sztywności na zginanie.

Wpływ temperatury został pominięty. Uwzględniono jedynie różnicę wydłużenia osiowego beczki wirnika i prętów, która jest spowodowana nagrzaniem tych elementów o 58°C i różnymi wartościami współczynnika rozszerzalności cieplnej. Różnica w wydłużeniu wynosi 0.631 mm na stronę i powoduje przesunięcie połączeń czołowych w kierunku pierścienia centrującego. Pozostałe warunki są przedstawione na rys. 6.



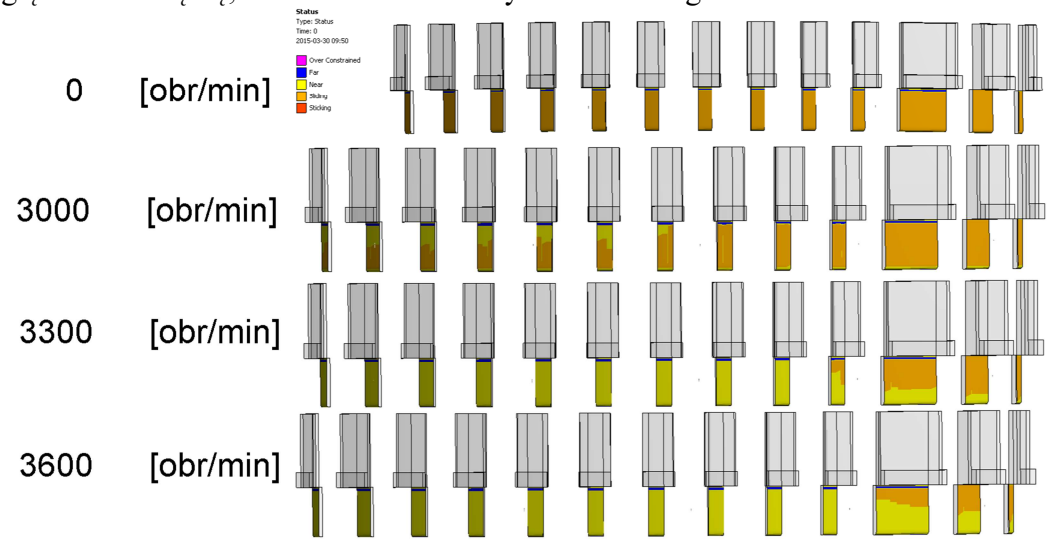
Rys. 6 Warunki brzegowe

A. Prędkość obrotowa: 3000, 3300 i 3600 [obr/min]
B. Przemieszczenie końców prętów o 0,631 mm
C. Frictionless support, symuluje działanie uciętej części beczki wirnika
D. Frictionless support, odpowiada za sztywne zamocowanie prętów w żłobkach

Ze względu na dużą liczbę kontaktów nieliniowych oraz stopień skomplikowania, analiza uwzględnia duże przemieszczenia oraz została podzielona na cztery kroki obciążenia. W kontaktach w miejscach skurczu występuje duża penetracja wstępna, co dodatkowo wymusza odpowiednie przykładanie/włączanie poszczególnych warunków brzegowych w czasie analizy.

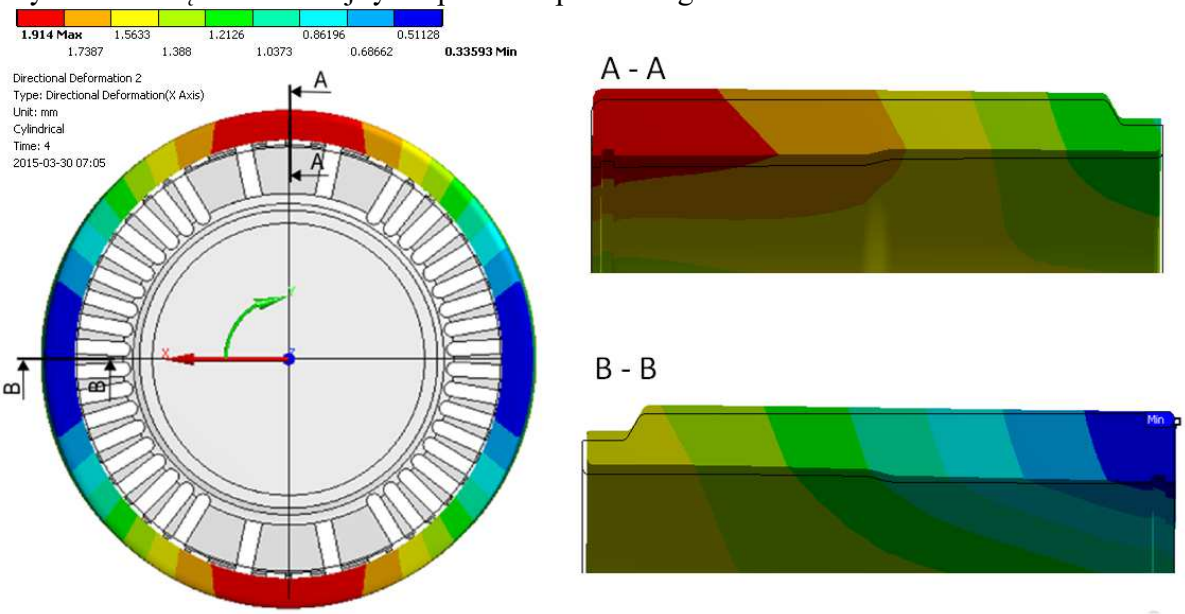
2.4. Wyniki

Przedstawione wyniki uwzględniają wszystkie przyłożone obciążenia. Na rys. 7 przedstawiony jest status kontaktu przy prędkości 3000, 3300 i 3600 [obr/min]. Wynika z niego, że istnieje możliwość oddzielenie kołpaka na części obszaru osadzenia kołpaka, powyżej prędkości znamionowej. Takie oddzielenie nie zagraża zsunięciu się kołpaka ze względu na nakrętkę, ale może utrudnić wyważenie całego wirnika.



Rys. 7 Status kontaktu pomiędzy kołpakiem i beczką wirnika

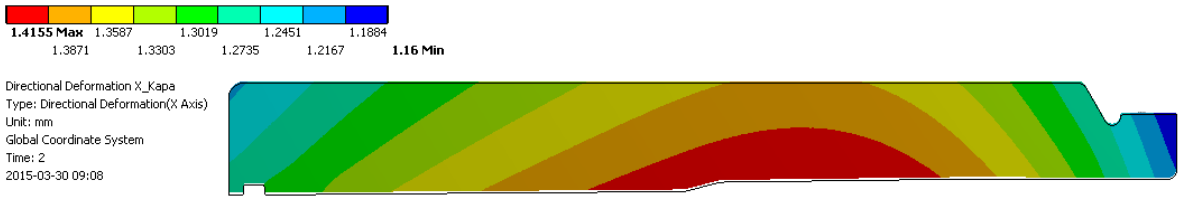
Występuje bardzo ciekawy rozkład przemieszczeń promieniowych, który jest pokazany na rys. 8. Tak jak to wynikało z wielu opracowań, przemieszczenia promieniowe są zróżnicowane wzdłuż obwodu i długości. W dużym uproszczeniu, kołpak przyjmuje kształt elipsy. W okolicach dużego zęba, przy pierścieniu centrującym występują największe przemieszczenia promieniowe. Wynika to głównie z geometrii i sztywności prętów, które są trzymane w części czołowej tylko przez kołpak turbogeneratora.



Rys. 8 Przemieszczenia promieniowe kołpaka, 3600 [obr/min]

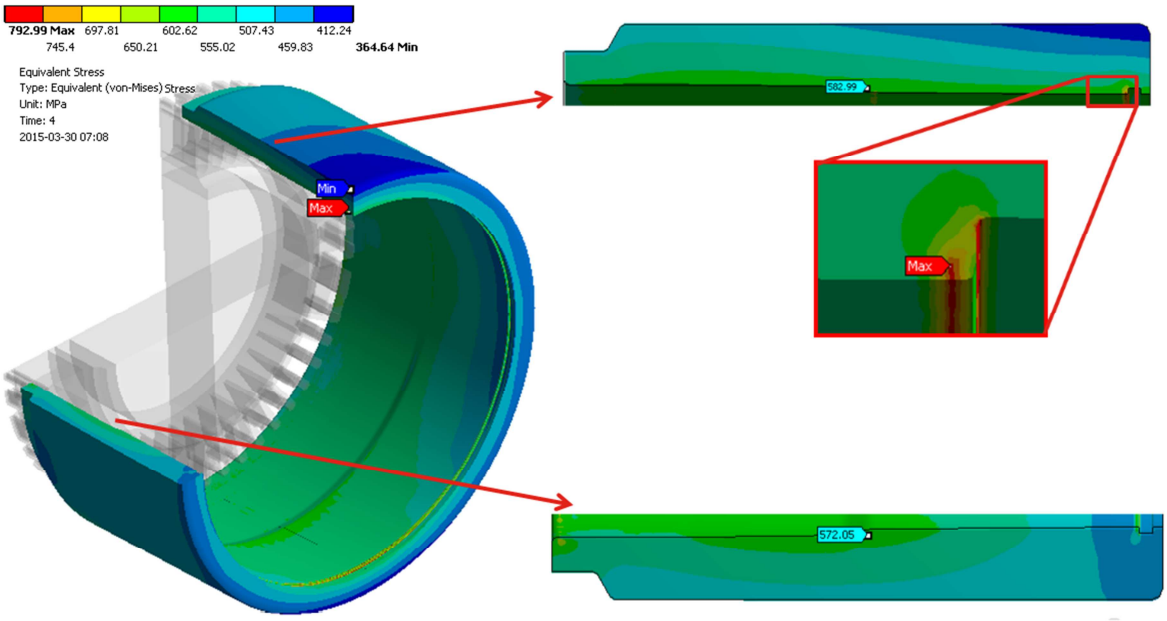
Dla porównania na rys. 9 przedstawiono przemieszczenia promieniowe otrzymane w analizie osiowosymetrycznej. Elementy znajdujące się pod kołpakiem zostały zastąpione siłą

odśrodkową wynikającą z prędkości obrotowej i średniego promienia. Przy obliczaniu wcisku, zastosowano osiowosymetryczne modele pierścienia centrującego, pierścienia rozprężnego oraz beczki wirnika. W tej analizie nie można uwzględnić geometrii połączeń czołowych, głównej przyczyny otrzymanej niesymetrii wzdłuż obwodu kołpaka.

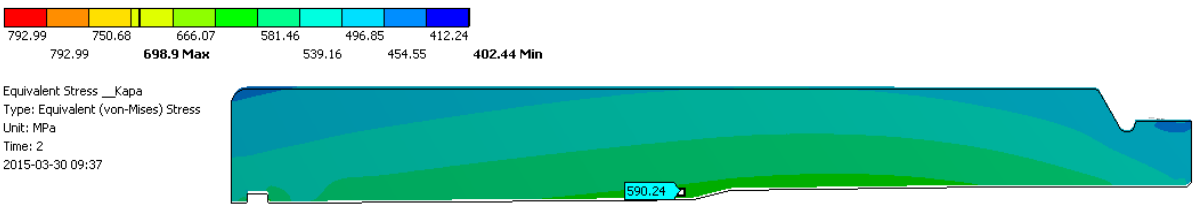


Rys. 9 Przemieszczenia promieniowe, analiza osiowosymetryczna, 3600 [obr/min]

Maksymalne wartości naprężeń zredukowanych występują w punktach osadzenia pierścienia centrującego i beczki wirnika, są to punktowe spiętrzenia naprężeń. Te różnice są spowodowane m. in. przez uwzględnienie wydłużenia prętów oraz przez wstępną penetrację między usztywnieniami i prętami. Duże wartości naprężeń zredukowanych znajdują się na wewnętrznej powierzchni kołpaka. W odróżnieniu do przemieszczeń promieniowych, wartości maksymalne na wewnętrznej stronie są porównywalne z wynikami otrzymanymi w analizie 2D, pokazanymi na rys. 11.



Rys. 10 Naprężenia zredukowane w kołpaku wg hipotezy HMH [MPa], 3600 [obr/min]



Rys. 11 Naprężenia zredukowane w kołpaku wg hipotezy HMH [MPa], analiza osiowo symetryczna, 3600 [obr/min]

Współczynnik bezpieczeństwa przy prędkości 3600 [obr/min.] w analizie 3D wynosi 1,387, a bez uwzględnienia spiętrzenia naprężeń przy połączeniu skurczowym, wynosi 1,805. Dla analizy 2D wartości współczynnika wynoszą odpowiednio 1,57 oraz 1.85.

3. WNIOSKI

- Nakład pracy związany z przygotowaniem modelu CAD przeznaczonego do obliczeń, wykonaniu pewnych uproszczeń, przygotowaniu siatki elementów skończonych, uzyskanie zbieżności przy wielu nieliniowych parach kontaktowych jest nieporównywalnie większy niż przy modelu osiowosymetrycznym 2D. Czas obliczeń przy tej samej konfiguracji sprzętowej dla modelu 3D jest 163 razy dłuższy w stosunku do modelu osiowosymetrycznego.

- Wartości naprężeń występujące na wewnętrznej stronie kołpaka w obu analizach są porównywalne. Różnice występują w miejscach osadzenia oraz przy pierścieniach rozprężnych, co przekłada się na różne wartości współczynnika bezpieczeństwa.

- Rozkład przemieszczeń w modelu 2D znacznie się różni od otrzymanego w dokładnej analizie. Jednak przemieszczenia nie są w tym przypadku kryterium wytrzymałościowym, dlatego nie ma potrzeby poznania ich dokładnego rozkładu.

- Jednym z plusów obliczania wcisku w modelu osiowosymetrycznym w przestrzeni 2D, jest dokładniejsze w porównaniu do modelu trójwymiarowego odwzorowanie geometrii przez elementy skończone. W modelu osiowosymetrycznym niestety nie można uwzględnić żłobków, które znacznie zmniejszają obszar skurczu pomiędzy beczką wirnika i kołpakiem. W przestrzeni 2D nie można dodatkowo uwzględnić geometrii elementów znajdujących się pod kołpakiem.

LITERATURA

1] Latek W. : Turbogeneratory. Wyd. Naukowo-Techniczne Warszawa, 1973.

2] Dobosiewicz J., Adamek J. : Ocena stanu kołpaków wirników turbogeneratorów. XIV Konferencja Energetyki, 2005, str.39-46.

3] Klempner G., Kerszenbaum I. : Handbook of Large Turbo-Generator Operation and Maintenace. Second Edition, Hoboken, New Jersey, John Wiley & Sons, Inc., 2008.

4] Ansys Mechanical 15.0 Help.