

# XVI Konferencja Naukowo-Techniczna

# TKI2022

## TECHNIKI KOMPUTEROWE W INŻYNIERII

18–21 października 2022

### Modelowanie dynamicznej odpowiedzi transformatora na wymuszenie harmoniczne z uwzględnieniem płynu i absorberów energii

Jacek Świniarski<sup>1</sup>, Paweł Witeczak<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Katedra Wytrzymałości Materiałów i Konstrukcji, Politechnika Łódzka

<sup>2</sup>Instytut Mechatroniki i Systemów Informatycznych, Politechnika Łódzka

email: jacek.swiniarski@p.lodz.pl, pawel.witeczak@p.lodz.pl

**STRESZCZENIE:** Transformatory wysokiej mocy są urządzeniami powszechnie spotykanymi w energetyce. Konstrukcja tych urządzeń jest bardzo skomplikowana i choć praca ich w głównej mierze jest pracą elektryczną to na skutek działania obciążeń roboczych w postaci prądów wirowych w uzwojeniach generowane są siły mechaniczne, które przenoszone są do ścian kadzi i w skrajnych przypadkach mogą spowodować jej rozszczelnienie. Siły te w wyniku oddziaływania poprzez olej transformatorowy generują hałas, który ze względu na jego tonalność jest nieprzyjemny. Zjawiska te wymagają by konstrukcję transformatora przeanalizować pod kątem odseparowania częstotliwości własnych od częstotliwości wymuszenia. Ze względu na bardzo skomplikowaną budowę transformatora obliczenia takie nie mają charakteru ilościowego ale jakościowy. Celem pracy było zbadanie i w jakim stopniu wpływa domena płynu w postaci oleju na transfer obciążeń roboczych z części aktywnej do ścian transformatora.

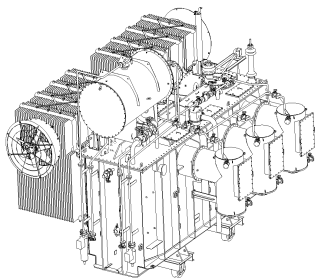
**SŁOWA KLUCZOWE:** obliczenia kadzi transformatorów, FSI, odpowiedź układu na wymuszenie harmoniczne

#### 1. Wstęp

Stopień skomplikowania konstrukcji transformatora wymaga dość dużego nakładu pracy jeśli chodzi o obliczenia inżynierskie. Obliczenia prowadzone dla nowej konstrukcji są bardzo drogie dlatego praktyką jest, że uzyskane wcześniej wyniki mogą stanowić bazę do uproszczeń dla kolejnych analiz numerycznych.

Wyniki obliczeń przedstawione w referacie również dotyczą takiej sytuacji. Proces modelowania zastępczych własności materiałowych i analiza uproszczeń została wykonana w odrębnych pracach a prezentowane wyniki bazują w znacznej mierze na wykonanych wcześniej badaniach.

Przedstawione w dalszej części wyniki pozwoliły na ocenę konstrukcji transformatora rys. 1 wysokiej mocy ze względu na dynamiczne obciążenia robocze z uwzględnieniem interakcji części aktywnej poprzez olej którym transformator jest zalany podczas normalnej pracy do ścian kadzi transformatora.



Rys. 1. Szkic poglądowy trójfazowego transformatora 21 kV

#### 2. Model numeryczny konstrukcji

Na potrzeby analiz dynamicznych z konstrukcji transformatora usunięto w modelu MES radiatory, instalacje pomocniczą, zbiornik wyrównawczy oraz korpusy przyłączy. Do transportu transformator wyposażony jest w podpory rolkowe ale podczas normalnej pracy podpory te są usuwane a transformator stoi na fundamencie. Pokrywa kadzi transformatora jest mocowana do kadzi za pomocą 154 śrub dlatego też połączenia pokrywy z kadzią w modelu numerycznym odbywa się na zasadzie ciągłości przemieszczeń na granicy ściany kadzi i pokrywy. W modelu MES pozostawiono żebra na ścianach bocznych i pokrywie oraz usztywnienia w podstawie transformatora które są spawane do ścian kadzi. Do dyskretyzacji kadzi wykorzystano elementy powłokowe o sześciu stopniach swobody w każdym węźle. Własności materiałowe odpowiadają stali S355. Część aktywną w postaci uzwojeń, przekładek i rdzenia zamodelowano jako model hybrydowy – bryłowo – powłokowo – belkowy. Jako bryłowy został dyskretyzowany rdzeń, przekładki preszpanowe i uzwojenie. Jako powłokowe wykonano sprzęgi części aktywnej poszczególnych uzwojeń fazowych transformatora natomiast elementami belkowymi zamodelowano połączenia śrubowe pomiędzy dolnym i górnym sprzęgiem części aktywnej. Konstrukcja części aktywnej w rzeczywistości składa się z kilku kręgów uzwojeń rozdzielonych olejem i przekładkami. W modelu podlegającym obliczeniom własności materiałowe zdefiniowane są jako zastępcze. Sposób określania tych własności i metodyka modelowania uzwojeń części aktywnej były przedmiotem innych prac.

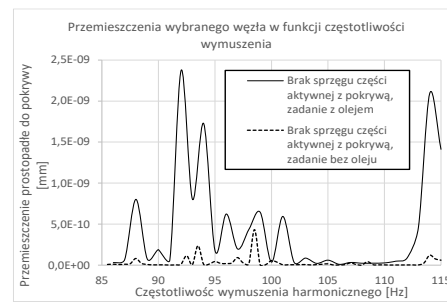
W prezentowanych obliczeniach wykorzystano wiedzę autorów dotyczącą takiego modelowania. W obszarze badań znalazł się również aspekt innowacyjnego podparcia części aktywnej w kadzi. Szczegóły dotyczące modelowania tego podparcia pod względem konstrukcyjnym jak i materiałowym są przedmiotem praw autorskich i są chronione. Własności części aktywnej z wyłączeniem połączeń śrubowych zdefiniowano jako ortotropowe w odpowiednich układach współrzędnych. Połączenia śrubowe zdefiniowano jako izotropowe o własnościach odpowiadających własnościom materiału śruby. W pracy przedstawiono również wyniki obliczeń przy założeniu modelowego sprzęgu części aktywnej z pokrywą kadzi oraz przy braku tego połączenia. Elementem konstrukcji jest także olej transformatorowy, którym zalana jest kadź wraz z częścią aktywną. Olej zamodelowano elementami bryłowymi, akustycznymi o trzech stopniach swobody w każdym węźle a własności akustyczne oleju takie jak gęstość i prędkość dźwięku oraz tłumienie przyjęto w temperaturze pracy urządzenia. Interakcja pomiędzy elementami bryłowymi oraz powłokowymi a elementami akustycznymi odbywa się na zasadzie transferu ciśnienia akustycznych na granicy płyn – ciało stałe.

### 3. Warunki brzegowe przyjęte w obliczeniach

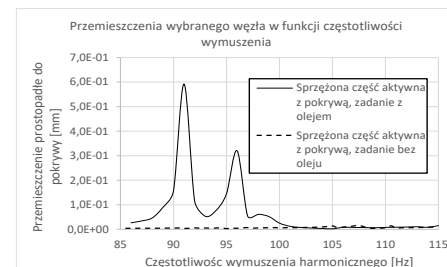
W trakcie normalnej pracy transformator stoi na fundamencie zatem w podstawie transformatora odebrano przemieszczeniowe stopnie swobody. Wymuszenia harmoniczne przyłożone zostały w postaci sił węzłowych do węzłów elementów uzwojenia w postaci części rzeczywistej i urojonej. Taki sposób modelowania obciążenia pozwala zdefiniować przesunięcie fazowe w obciążeniu pomiędzy uzwojeniami każdej fazy. Wartości sił węzłowych zostały wyznaczone na drodze obliczeń numerycznych w oprogramowaniu Magneto. Obliczenia wykonano w zakresie wymuszeń od 85 do 115 Hz co 1 Hz. Taka częstotliwość obliczeń w przypadku obecności oleju jest wystarczająco do obserwacji zjawisk odpowiedzi dynamicznej. W modelach z brakiem sprzęgu część aktywna – pokrywa, obliczenia wykonano co 0,5 Hz. Brak oleju powoduje pojawienie się zjawisk szybkozmiennych które przy obserwacji co 1 Hz mogą powodować zafałszowanie wniosków. Wielkość zadania to nieco ponad 750 tys stopni swobody dla modeli z olejem i nieco ponad 400 tys z usuniętym czynnikiem z modelu MES. Zadanie rozwiązano w klasycznym środowisku ANSYS.

### 4. Wyniki obliczeń numerycznych

Wyniki obliczeń zaprezentowano w postaci map przemieszczeń wybranych elementów konstrukcji oraz w postaci wykresów przemieszczeń. Przemieszczenia w wybranym charakterystycznym węźle pokrywy porównano przy założeniu braku sprzęgu pomiędzy częścią aktywną a pokrywą rys. 3 oraz przy zdefiniowanym sprzęgu pomiędzy pokrywą a częścią aktywną transformatora rys. 4. W obu przypadkach brak oleju zmienia charakter pracy układu. Brak sprzęgu zmniejsza amplitudę drgań o kilka rzędów. Wymagana jest równocześnie analiza stanu naprężenia i odkształcenia w podstawie części aktywnej.



Rys. 3. Przemieszczenie wybranego węzła pokrywy w funkcji wymuszenia, brak sprzęgu części aktywnej z pokrywą kadzi



Rys. 4. Przemieszczenie wybranego węzła pokrywy w funkcji wymuszenia, część aktywna połączona z pokrywą kadzi

### 5. Podsumowanie

Na podstawie obliczeń numerycznych stwierdzono, że w modelowaniu odpowiedzi dynamicznej na wymuszenie harmoniczne należy uwzględniać czynnik oleju poprzez analizę zespoloną FSI. Brak w modelu FEM poważnie zmienia wynik obliczeń rys. 3 oraz rys. 4. Znaną i powszechnie stosowaną praktyką jest by część aktywną mocować również do pokrywy. Obliczenia pokazują, że brak takiego sprzęgu znacząco obniża hałas jaki generuje część aktywna do ścian kadzi. Wibracje transferowane do ścian kadzi przekładają się na duże amplitudy przemieszczeń elementów mocowanych do ścian kadzi i do pokrywy.

### Literatura

- [1] Ochelski S., Gotowicki P., *Experimental assessment of energy absorption capability of carbon-epoxy and glass-epoxy composites*, Composite Structures, Vol. 87, No. 3, pp. 215-224, 2009.
- [2] NATO MAS Standardization Agreement (STANAG 4569): *Procedures for evaluating the protection levels of logistic and light armoured vehicles for KE and artillery threats*, 2004.
- [3] Nilsson M., *Constitutive model for ArmoX 500T and ArmoX 600T at low and medium strain rates*, Technical Report F01-R-1068-SE, Swedish Defence Research Agency, 2003.
- [4] B. Garcia, J. C. Burgos, and A. Alonso, Transformer tank vibration modeling as a method of detecting winding deformation, Part I and Part II: Theoretical foundation, IEEE TRANS. ON POWER DELIVERY, VOL. 21, NO. 1, JANUARY 2006, 153-163, doi: 10.1109/TPWRD.2005.852280.
- [5] M. Ertl, H. Landes, Investigation of load noise generation of large power transformer by means of coupled 3D FEM analysis, COMPEL, Vol.26, No.3, 2007, pp.788-799. doi:10.1108/03321640710751226.
- [6] M. Rausch, M. Kaltenbacher, H. Landes, R. Lerch, J. Anger, J. Gerth, P. Boss, Combination of Finite and Boundary Element Methods in Investigation and Prediction of Load-Controlled Noise of Power Transformers, Journal of Sound and Vibration (2000), Vol. 250, Issue 2, February 2002, pp. 323-338, doi:10.1006/jsvi.2001.393.
- [7] Witczak P., Świątkowski M., Modelling axial vibration in windings of power transformers, Open Physics, Volume 15, Issue 1, 29 December 2017, p. 862-866, doi:10.1515/phys-2017-0103.