

Jerzy Podhajecki*, Adrian Młot*, Mariusz Korkosz**

*Politechnika Opolska, Opole

**Politechnika Rzeszowska, Rzeszów

ANALIZA DRGAŃ STOJANA SILNIKA BLDC POCHODZENIA MAGNETYCZNEGO

VIBRATIONS OF STATOR STRUCTURE OF BLDC MOTOR DUE TO MAGNETIC SOURCES

Abstract: Vibrations and acoustic noise are some of the fundamental problems in the design and exploitation of rotating electrical machines. The aim of this paper is to use finite element multi-physical model – electro-magnetic and mechanic – in order to predict the forced vibrations due to Maxwell forces in stator structure of BLDC. In aim of verification numeric calculations experimental measurements was made by sensors measuring radial component of acceleration in selected point. A vibration prediction model for the BLDC motor is constructed in this paper, the model is verified by experiments, with acceptable accuracy.

1. Wstęp

Wzrastające w ostatnich latach wymagania odnośnie ograniczenia hałasu są przyczyną, że również producenci maszyn elektrycznych starają się o to, żeby poziom drgań i hałasu był jak najmniejszy. Poziom emitowanego hałasu akustycznego stał się jednym z ważnych czynników decydujących o sukcesie marketingowym na rynku maszyn elektrycznych [1].

W ostatnich kilkunastu latach obserwuje się intensywny rozwój silników zasilanych z przekształtników energoelektronicznych, które wprowadzają dodatkowe harmoniczne do spektrum sił magnetycznych, co jest powodem zwiększonego poziomu hałasu i drgań.

Rezultaty numerycznych i eksperymentalnych badań zagadnienia hałasu i drgań są pomocne do zrozumienia mechanizmów generowania hałasu z maszyn elektrycznych wirujących. Tworzone są strategie do ograniczenia emisji drgań i hałasu już na etapie projektowania.

Jednym ze sposobów modelowania drgań i hałasu jest tworzenie numerycznych modeli. Modelowanie hałasu i drgań wirujących maszyn elektrycznych za pomocą metod numerycznych zakłada zwykle budowę trzech modeli: magnetycznego w wyniku, którego otrzymuje się rozkład sił magnetycznych, mechanicznego, którego wynikiem jest odpowiedź układu mechanicznego na wymuszenie siłowe. Trzecim etapem może być tworzenie modelu akustycznego dzięki, któremu otrzymuje się odpowiedź akustyczną układu [1].

Siły magnetyczne generowane w szczelinie powietrznej między wirnikiem a stojanem, działają na stojan i wirnik maszyny. Są główną przyczyną powstawania drgań struktury silnika.

W przeciwieństwie do metod analitycznych metoda elementów skończonych pozwala uwzględnić w modelu, więcej szczegółów budowy mechanicznej silnika. W modelowaniu za pomocą metody elementów skończonych istotną rolę odgrywa poprawność modelu, a dynamiczna odpowiedź układu zależy nie tylko od geometrii układu, ale również od właściwości materiałowych oraz warunków brzegowych [4].

W budowie modelu numerycznego najważniejszymi etapami są: określenie parametrów materiałowych, warunków brzegowych oraz określenie koniecznych uproszczeń potrzebnych do zamodelowania silnika. Zazwyczaj pomiędzy modelem numerycznym a fizycznym występują różnice w parametrach materiałowych i warunkach brzegowych. Określenie rzeczywistych parametrów materiałowych nie jest zagadnieniem łatwym. Obudowa rdzenia stojana wykonana jest ze stali, której gęstość jest znana, natomiast rdzeń stojana składa się z pakietu blach, którego gęstość zastępcza jest inna i trudna do dokładnego określenia. Podobnie jest z innym parametrem materiałowym – modułem Young'a. Również przyjęcie odpowiednich warunków brzegowych modelu, zgodnych z rzeczywistymi, jest zagadnieniem bardzo ważnym, które ma duże znaczenie dla analizy mechanicznej.

Najbardziej istotnymi z punktu widzenia skutków akustycznych są drgania zewnętrznej powierzchni stojana, które mają zasadniczy wpływ na emisję dźwięku do otoczenia przez pracującą maszynę [2].

Obliczone w analizie numerycznej drgania pochodzenia magnetycznego porównano z wynikami eksperymentalnymi drgań całkowitych wybranego punktu stojana.

2. Analiza wibroakustyczna silnika BLDC

Głównymi etapami wibroakustycznej analizy za pomocą metody elementów skończonych są:

- analiza modalna modelu – wyznaczenie istotnych częstotliwości rezonansowych,
- wyznaczenie drgań wymuszonych.

Wyznaczenie drgań wymuszonych można podzielić na dwie części: przejściową oraz harmoniczną. Przeprowadzając analizę harmoniczną wyznaczone są najczęściej przemieszczenia dla każdej częstotliwości siły działającej osobno. Określając wielkość deformacji dla każdej częstotliwości oddzielnie, wyznacza się udział danej harmonicznej siły, porównując obliczone deformacje wyznaczone dla różnych częstotliwości.

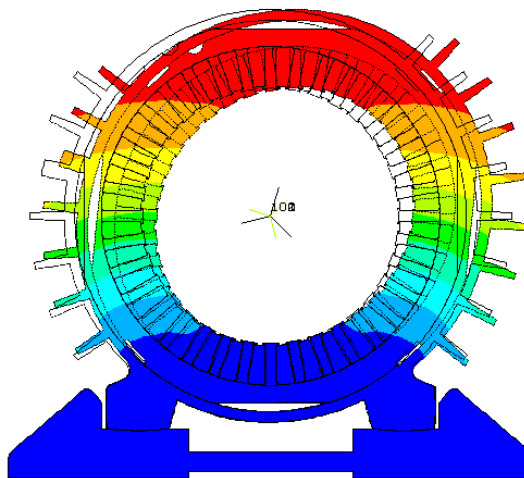
W rzeczywistości układ wymuszeń jest bardziej skomplikowany i składa się z sił o częstotliwościach wielu wymuszeń. Więcej informacji o charakterze zjawiska może dać analiza przejściowa, w której wymuszenia nie ograniczają się do jednej wybranej częstotliwości, a są wymuszeniami działającymi w czasie.

Modele, które są stosowane w analizie wibroakustycznej można podzielić na dwu- i trójwymiarowe. Do analizy zjawisk magnetycznych zastosowanie modelu 3D nie jest tak konieczne, jak w przypadku analizy mechanicznej. Model 3D zazwyczaj pozwala uwzględnić więcej części konstrukcyjnych, z których złożony jest silnik, a które mają wpływ na wielkość i charakter drgań. Ponadto niektóre mody drgań własnych występują tylko w modelu 3D.

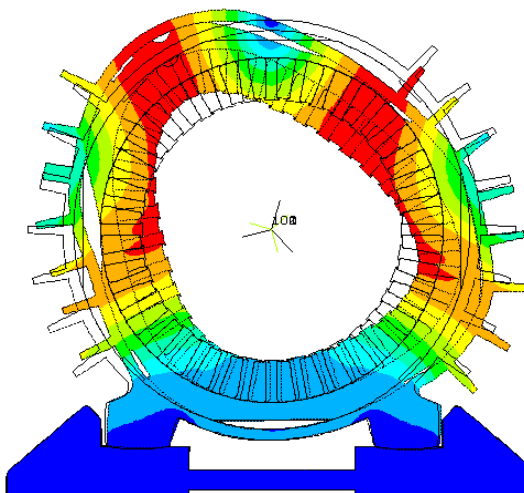
3. Modalna analiza numeryczna

Zazwyczaj przyczyną występowania w widmie drgań modelu charakterystycznych pików są drgania własne. Stosując modalną analizę numeryczną wyznacza się charakterystyczne częstotliwości drgań własnych modelu. W przypadku silników elektrycznych jedną z możliwych przyczyn występowania pików drgań są drgania własne obudowy. Na rysunkach 1 - 2

pokazano przykładowe drgania własne modelu 2D stojana z obudową.



Rys. 1. Postać modu o częstotliwości $f = 912$ Hz



Rys. 2. Postać modu o częstotliwości $f = 4299$ Hz

4. Analiza drgań wymuszonych

Drgania stojana pod wpływem sił magnetycznych zmieniających się w czasie opisywane są następującym równaniem, które jest zapisem magneto-mechanicznego zagadnienia pól połączonych sprzężonych [1, 2]:

$$\mathbf{S} \cdot \mathbf{A} = \mathbf{J}_e \quad (1)$$

$$\mathbf{M} \cdot \ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{C} \cdot \dot{\mathbf{U}} + \mathbf{K} \cdot \mathbf{U} = \mathbf{f}(t) \quad (2)$$

gdzie: \mathbf{S} – elektromagnetyczna macierz sztywności, \mathbf{A} – wektor potencjału magnetycznego, \mathbf{J}_e – macierz prądowa wymuszenia, \mathbf{K} – macierz sztywności, \mathbf{U} – wektor przemieszczenia, $\dot{\mathbf{U}}$ – wektor prędkości, $\ddot{\mathbf{U}}$ – wektor przyspieszenia, \mathbf{M} – mechaniczna macierz mas, \mathbf{C} –

macierz tłumienia ($C=0$ – pominięta), $f(t) = f^a$ – wektor sił Maxwella działających w obszarze szczeliny powietrznej na zęby stojana dla określonego kąta obrotu wirnika α . Dla problemu opisującego zagadnienie magnetoostatyczne wyznacza się rozkład sił magnetycznych działających na stojan maszyny. Wykonując obliczenia dla różnych położen wirnika otrzymuje się rozkład siły wymuszającej w czasie. Wektor sił f reprezentuje siłę Maxwella f_i działającą na węzeł o numerze i .

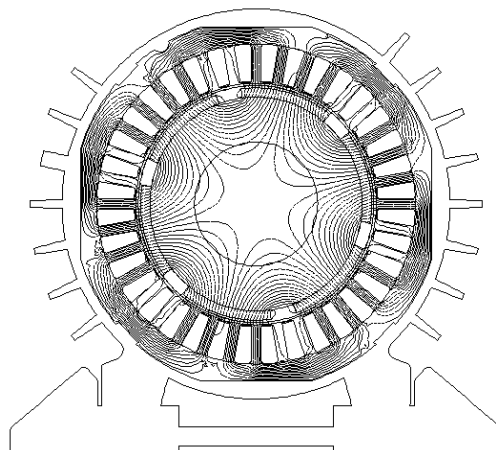
Masę układu wibrującego M nazywa się macierzą mas, macierz sztywności układu określono jako K , tłumienie układu reprezentowane jest przez macierz C . Siła powoduje powstawanie drgań, natomiast sztywność, masa i siły tłumienia działają przeciwnie do działającej siły wymuszającej i ograniczają drgania. Zadana siła powoduje powstanie drgań, których wzmocnienie k zależy od tego, czy częstotliwość siły wymuszenia znajduje się w okolicach częstotliwości własnej konstrukcji stojana. Współczynnik wzmocnienia k wynosi:

$$k = 1 / \left(1 - \left(\frac{f}{f_0} \right)^2 \right) \quad (3)$$

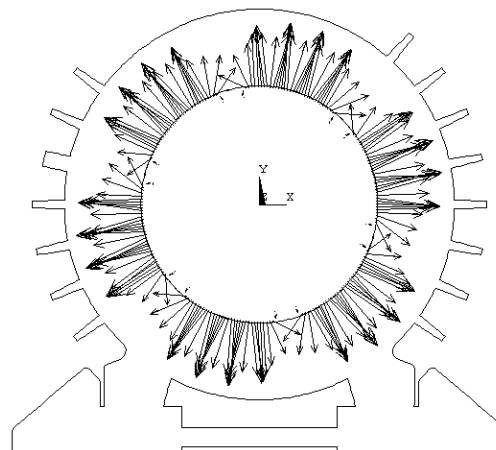
gdzie: f jest częstotliwością wymuszenia, natomiast f_0 – częstotliwością rezonansową.

Analizę drgań wymuszonych autorzy przeprowadzili dla modelu silnika BLDC o konfiguracji: liczba biegunów stojana $N_s = 36$ oraz liczba biegunów wirnika $N_r = 6$. Założono, że silnik pracuje ze stałą prędkością na biegu jałowym. Obliczenia wykonywano w programie Ansys dedykowanym do analizy zagadnień sprzężonych.

Napisano procedurę, która sprzęgała obliczenia magnetyczne z obliczeniami mechanicznymi. W trakcie analizy magnetycznej dla każdego położenia wirnika wyznaczano wartość siły magnetycznej działającej na stojan maszyny. Siła ta była jednocześnie wymuszeniem dla analizy mechanicznej. Przykładowy rozkład linii strumienia pokazano na rysunku 3. Odpowiadający mu rozkład siły magnetycznej działającej na stojan maszyny pokazano na rysunku 4.



Rys. 3. Rozkład linii strumienia dla jednego z położen wirnika



Rys. 4. Rozkład siły magnetycznej działającej na stojan maszyny dla położenia wirnika z rysunku 3

Zarówno stojan jak i wirnik podlegają działaniu wytworzonej siły magnetycznej. Jednak częstotliwość f_s z jaką siła magnetyczna działa na stojan różni się od częstotliwości f_r oddziaływania na wirnik. Podstawowe częstotliwości siły i ich wielokrotności oblicza się z zależności:

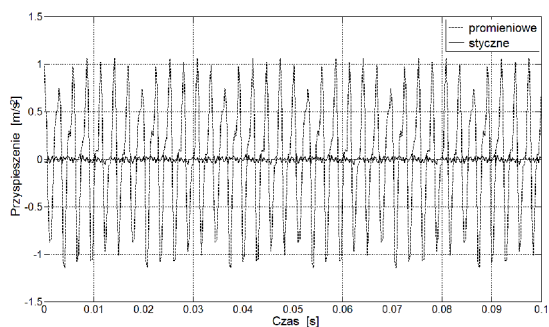
$$f_s = h n N_r, \quad (4)$$

$$f_r = h n N_s, \quad (5)$$

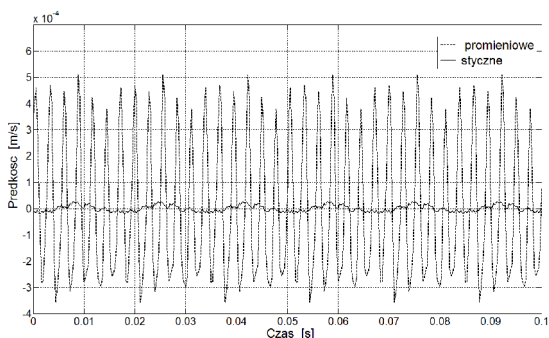
gdzie $h = (1, 2, 3, 4, \dots)$.

Dla analizowanej prędkości $n = 600$ obr/min., częstotliwość siły f_s działającej na stojan i jej krotności wynoszą: 60 Hz, 120 Hz, 180 Hz, 240 Hz, ..., itd. Wartości częstotliwości f_s i f_r zmieniają się wraz ze zmianą prędkości obrotowej n . Jeżeli przy zmianie prędkości obrotowej silnika któraś z częstotliwości znajdzie się w pobliżu częstotliwości rezonansowej maszyny, to nastąpi zauważalny wzrost poziomu ge-

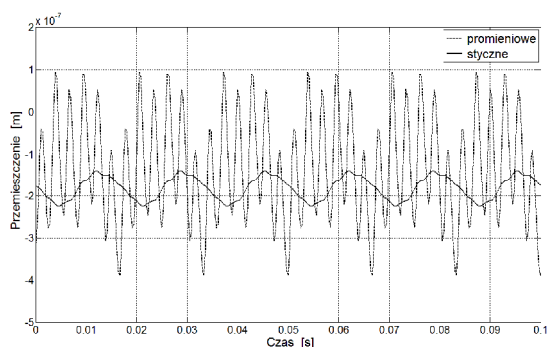
nerowanych drgań. Z uwagi na to, że w silniku BLDC możliwości regulacji prędkości obrotowej są dość duże, to prawdopodobieństwo wzbudzenia drgań rezonansowych jest wysokie. Na rysunkach 5 - 7 pokazano przebiegi czasowe przyspieszenia (rys. 5), prędkości (rys. 6) oraz przemieszczenia (rys. 7) wybranego punktu obudowy stojana dla prędkości silnika wynoszącej $n = 600$ obr/min. Wszystkie wyniki przedstawione są we współrzędnych biegunowych.



Rys. 5. Przebieg czasowy przyspieszenia wybranego punktu stojana dla prędkości $n = 600$ obr/min.



Rys. 6. Przebieg czasowy prędkości wybranego punktu stojana dla prędkości $n = 600$ obr/min.

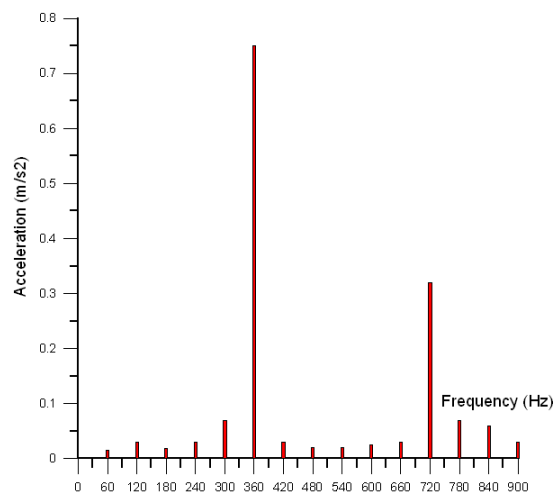


Rys. 7. Przebieg czasowy przemieszczenia wybranego punktu stojana dla prędkości $n = 600$ obr/min.

Wartości przyspieszenia i prędkości w kierunku promieniowym są o rząd większe, niż w przypadku kierunku stycznego. Są one równocześnie

nie głównym źródłem drgań i hałasu pochodzenia magnetycznego.

Dla prędkości $n = 600$ obr/min. przeprowadzono analizę harmonicznych występujących w przebiegu przyspieszenia, prędkości i przemieszczenia w kierunku promieniowym. Na rysunku 8 pokazano wyniki analizy harmonicznej przyspieszenia.



Rys. 8. Zawartość wyższych harmonicznych przebiegu przyspieszenia dla prędkości $n = 600$ obr/min.

Jak widać, w przebiegu przyspieszenia, występują wszystkie częstotliwości związane z oddziaływaniem siły magnetycznej na stojan silnika.

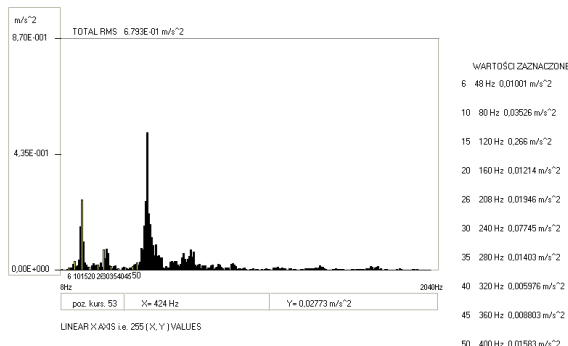
5. Wyniki badań laboratoryjnych

W celu porównania obliczonych numerycznie drgań z wynikami eksperymentalnymi przeprowadzono pomiary za pomocą akcelerometru. Badany bezszczotkowy silnik prądu stałego (BLDC) pracował bez obciążenia, (bieg jałowy) z prędkością 400 i 600 obr/min. Dla tych warunków wykonano pomiary przyspieszenia drgań wybranego punktu obudowy silnika. Podczas pomiaru akcelerometr został zamontowany na zewnętrznej powierzchni obudowy stojana na tarczach łożyskowych. Sygnał otrzymany z akcelerometru był poddany analizie Fouriera, a następnie porównany z wynikami uzyskanymi na drodze obliczeń numerycznych. Pomiar prądu umożliwił określenie wystąpienia dodatkowych częstotliwości jakie są wynikiem odkształconego zasilania.

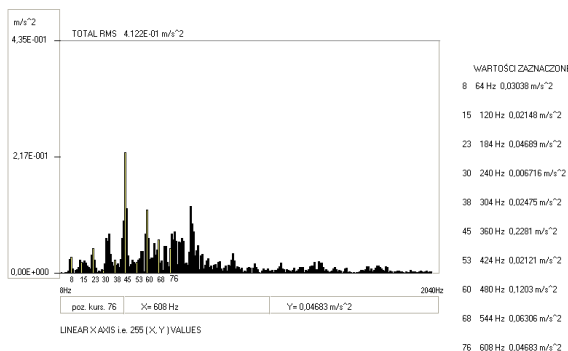
Częstotliwości drgań emitowanych przez maszynę wirującą typowo, zawiera w sobie szerokie spectrum drgań mechanicznych z dodatko-

wymi dominującymi pikami drgań wynikających z sił magnetycznych.

Rezultaty pomiarów drgań (przyspieszenia) wybranego punktu stojana zostały pokazane na rysunkach 9 i 10.

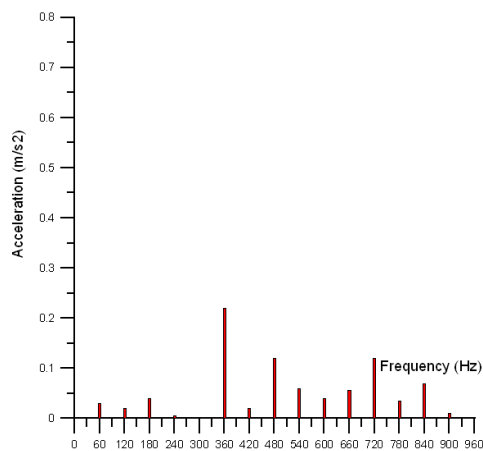


Rys. 9. Wyniki pomiarów przebiegu przyspieszenia dla prędkości $n = 400$ obr/min.



Rys. 10. Wyniki pomiarów przebiegu przyspieszenia dla prędkości $n = 600$ obr/min.

Na rysunku 11 pokazano analizę harmoniczną wykonaną dla przebiegu przyspieszenia otrzymanego na podstawie badań, dla prędkości $n = 600$ obr/min.



Rys. 11. Zawartość wyższych harmonicznych eksperymentalnego przebiegu czasowego przyspieszenia dla prędkości $n = 600$ obr/min.

Porównując uzyskane spektrum zawartości wyższych harmonicznych na podstawie badań symulacyjnych i eksperymentalnych można stwierdzić dużą zgodność wyników co do wartości występujących częstotliwości.

Harmoniczne występujące w odkształconym prądzie zasilającym mogą powodować powstawanie dodatkowych prązków w dziedzinie częstotliwości, które są przyczyną wystąpienia dodatkowych drgań.

6. Wnioski

W pracy przeprowadzono analizę drgań wybranego punktu stojana silnika BLDC w oparciu o przyjęty model matematyczny. Poprawność modelu została zweryfikowana badaniami eksperymentalnymi wykonanymi na modelu fizycznym dla dwóch prędkości wirowania wirnika (400 i 600 obr/min.). Porównano spektrum harmonicznego przyspieszenia dla wybranego punktu obudowy stojana, uzyskane na drodze obliczeń numerycznych i pomiaru. Uzyskane wyniki są zbieżne, co pokazuje, że zbudowany model symulacyjny jest poprawny i może służyć do predykcji drgań już na etapie projektowania.

Najważniejszym źródłem drgań w silniku BLDC są tętnienia momentu elektromagnetycznego i zaczepowego. Wyniki badań eksperymentalnych i na modelu matematycznym, pokazują, że główną przyczyną powstawania drgań pochodzenia magnetycznego silnika pracującego na biegu jałowym, jest moment zaczepowy. W przypadku wzrostu wartości prądów pasmowych ujawniać się będzie również wpływ procesów komutacyjnych.

Potencjalnie, największą przyczyną występujących różnic, pomiędzy wynikami obliczeń numerycznych i badań eksperymentalnych, są różnice między modelem mechanicznym silnika przyjętym do obliczeń a rzeczywistym obiektem. Model numeryczny 2D jest modelem uproszczonym, z uwagi na brak możliwości uwzględnienia wielu istotnych szczegółów konstrukcyjnych.

7. Literatura

- [1] Furlan M., Cernigoj A., Boltezar M.: *Modeling and verification of the magnetic forces in DC electric motor*, 16th International Conference on Electrical Machines, 5-8 September 2004, Kraków – Polska
- [2] Kasperski M.: *Drgania własne i wymuszone silnika reluktancyjnego przelączalnego*, Praca doktorska, Politechnika Łódzka, 1996

[3] Delare K., Heylen W., Belmans R., Hameyer K.: *Comparasion of Induction Machine Stator Vibration Spectra Induced by Reluctance Forces and Magnetostriction*, IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 38, no. 2, March 2002

[4] Witczak P.: *Wyznaczanie drgań mechanicznych silnika indukcyjnego wywołanych siłami magnetycznymi*, 1995, Politechnika Łódzka (rozprawa habilitacyjna)

Autorzy

Mgr inż. Jerzy Podhajecki,

e-mail: jerzypodh@op.pl

Dr inż. Adrian Młot,

e-mail: amlot@po.edu.pl

Politechnika Opolska

Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki

ul. Luboszycka 7, 45-036 Opole

Dr inż. Mariusz Korkosz,

e-mail: mkosz@prz.edu.pl

Politechnika Rzeszowska,

Wydział Elektrotechniki i Informatyki

ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów