

Analiza stanów dynamicznych w transportowym układzie napędowym z silnikiem liniowym

Streszczenie. W pracy przedstawiono konstrukcję liniowego napędu trójfazowego. Wzbudnik umieszczono na wózku transportowym, poruszającym się ponad bieżnią napędową spełniającą rolę wirnika silnika liniowego, wykonanej z miedzi lub aluminium. Laboratoryjne Stanowisko pomiarowe umożliwia pomiar siły ciągu napędu. Dynamometr zamocowany do wózka z jednej strony oraz elementu sztywnego z drugiej, pozwala na pomiar tej siły. Schemat stanowiska pomiarowego przedstawiono na rys. 1. Artykuł będzie zawierał dwie podstawowe części, opis matematyczny wraz z symulacją w środowisku Ansys, oraz porównanie wyników symulacji z pomiarami w układzie rzeczywistym stanowiska w warunkach laboratoryjnych.

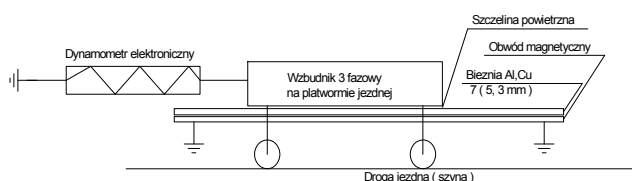
Abstract. The work presents the construction of a three-phase linear drive. The inductor was placed on a transport trolley, moving over the driving race, acting as a rotor of a linear motor, made of copper or aluminum. Laboratory Measuring station allows measuring the thrust of the drive. Dynamometer attached to the trolley on one side and rigid element on the other, allows you to measure this force. The diagram of the measurement station is shown in Fig. 1. The article will contain two basic parts, a mathematical description with simulation in the Ansys environment, and a comparison of simulation results with measurements in the real system of the laboratory stand. (Analysis of dynamic states in a transport drive system with a linear motor.)

Słowa kluczowe: silnik, liniowy, symulacja, ansys.

Keywords: motor, linear, computing, ansys

Wstęp

Ciągi produkcyjne w warunkach przemysłowych wymagają często samobieżnych linii transportowych [4]. Napędy tego typu mogą być realizowane, jako ciągi mechaniczne oparte o połączenia łańcuchowe z centralnym napędem oraz stałymi odległościami pomiędzy jednostkami transportowymi, lub niezależne wózki transportowe z indywidualnymi mechanizmami napędowymi oraz sterowaniem. Istnieje możliwość zastosowania napędu obrotowego lub liniowego. Napędy z silnikami obrotowymi wymagają dodatkowych urządzeń mechanicznych do przekazywania ruchu (przekładnie zębate, pasy klinowe). Zastosowanie silnika liniowego w przypadku napędu indywidualnego pozwala na dodatkową eliminację mechanicznego sprzężenia z bieżnią transportową. Tarcie nie zawsze wystarcza do wymuszenia ruchu [5]. Dodatkową zaletą tego rodzaju napędu stanowi elastyczność przesuwu poszczególnych jednostek napędowych. Konstrukcja silnika liniowego pozwala dodatkowo na wyeliminowanie wielu elementów mechanicznych sprzęgających tor ruchu z wózkiem transportowym.



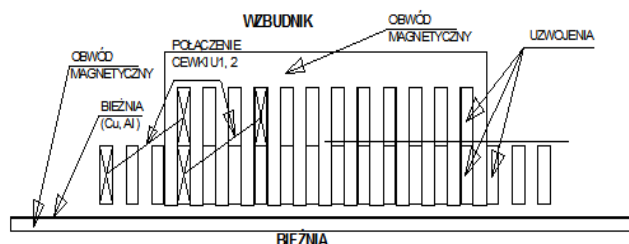
Rys. 1. Stanowisko do badania silnika liniowego

W artykule przedstawiono symulację trójfazowego liniowego napędu, którego schemat strukturalny przedstawiono na Rys.1. Główną część układu badawczego stanowi trójfazowy wzbudnik silnika liniowego. Pod wzbudnikiem przebiega bieżnia wykonana z dobrze przewodzącego materiału (tak jak aluminium, miedź) oraz stalowa część bieżni, stanowiąca zamknięcie obwodu magnetycznego wzbudnika, a jednocześnie wzmocnienie konstrukcji mechanicznej całego napędu. Strumień generowany przez wzbudnik zamykany jest dolną częścią obwodu magnetycznego, odpowiednika obwodu magnetycznego wirnika silnika indukcyjnego. Składa się z

dwóch materiałów. Stali, materiału stanowiącego przewodnik obwodu magnetycznego, zamykającego obwód magnetyczny bieżni, oraz przewodnika elektrycznego, przewodzącego prąd elektryczny, będący źródłem pola magnetycznego oddziałującego na wzbudnik, oraz generującego siłę ciągu urządzenia. Sam wzbudnik umocowany jest na kółkach pozwalających na przesuwanie całego zespołu w wybranym kierunku (funkcja transportowa siłownika). W tym samym czasie bieżnia pozostaje nieruchoma. Ruch powodowany jest siłą występującą pomiędzy wzbudnikiem a unieruchomioną bieżnią. W stanowisku umieszczono dodatkowo dynamometr do pomiaru siły generowanej przez wzbudnik. Zaczepiony pomiędzy obudową urządzenia a ruchomym wzbudnikiem pozwala na pomiar siły generowanej przez wzbudnik (siła transportowa). Szczelina powietrzna umiejscowiona pomiędzy bieżnią a wzbudnikiem separuje mechanicznie te dwa elementy i umożliwia ruch napędu.

Uzwojenia wzbudnika położone są w rowkach obwodu magnetycznego.

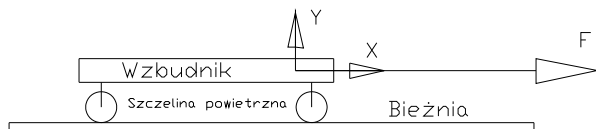
Przedstawiony na rys. 2 wzbudnik, składa się z obwodu magnetycznego okalającego uzwojenia silnika. Pod tym względem podobny jest do silnika łukowego o nieskończonej wielkim promieniu wirnika (powierzchnia płaska). Ze względu na skończoną długość stojana tak skonstruowanego silnika, konieczne jest umieszczenie na obu końcach wzbudnika zwojów kończących uzwojenie stojana nieobejmujących obwodu magnetycznego. Tego rodzaju silnik liniowy generuje pole biegnące jedynie w obrębie obwodu magnetycznego wzbudnika.



Rys. 2. Schemat budowy wzbudnika liniowego silnika trójfazowego z zaznaczonymi przykładowymi cewkami nawojowymi wzbudnika

Metodyka obliczeń

Do obliczeń przyjęto układ elektromechaniczny o schemacie przedstawionym na rys. 2 [1, 2, 3]. Składa się ze wzбудnika indukcyjnego z obwodem magnetycznym zbudowanym z blach elektrotechnicznych oraz cewek wzbudnika nawiniętych w przeplocie zgodnie z zasadą budowy silników indukcyjnych. Przykładowe rozmieszczenie cewek przedstawiono na rys. 2



Rys. 3. Schemat rozmieszczenia sił w badanym układzie.

Siła F stanowi obiekt zainteresowania [6], wyliczana jest w procesie symulacji, zaczepiona w początku układu osi X , Y układu płaskiego współrzędnych do dowolnego punktu wzbudnika. Dowolność zaczepienia punktu pomiaru siły wynika ze sztywności konstrukcji wzbudnika, oraz ścisłego ukierunkowania możliwości przesuwania się kółeczek. Konstrukcja nie pozwala na jakikolwiek skręt całego układu. Występujące tam siły nie mają możliwości wpływania na kierunek ruchu analizowanego napędu [7, 8].

Symulację komputerową przeprowadzono w środowisku ANSYS, w oparciu o Metodę Tensorów dla równania Maxwella [1, 2, 3]. Wartość siły ciągnącej F [N] wynikająca z równania Maxwella w postaci wektorowej opisana jest zależnością (1). Siły mogą przebiegać w dowolnym kierunku na płaszczyźnie X , Y . Jedynie składowa siły liczona wzdłuż osi X zaczepiona o wzbudnik jest obiektem zainteresowania autorów niniejszego artykułu. Ze względu na to, że wzbudnik jest ciałem sztywnym, nie jest istotne, w którym punkcie liczona siła jest zaczepiona. Kształt bieżni uniemożliwia dodatkowo jakikolwiek obrót (skręt) wzbudnika i nie jest liczona żadna dodatkowa siła, ani moment obrotowy. Wzór liczonej siły składowej \vec{F}_i opisany jest wzorem (1).

$$(1) \quad \vec{F}_i = \int_C \left[\frac{1}{\mu_0} B(B \cdot \vec{n}) - \frac{1}{2\mu_0} B^2 \cdot \vec{n} \right] dC$$

Suma sił \vec{F}_i , jako rzutów siły wyliczonej w programie ANSYS na oś X płaskiego układu współrzędnych X , Y , stanowi siłę wypadkową oddziałującą na wzbudnik indukcyjny silnika liniowego, przedstawioną na rys. 3.

$$(2) \quad F_x = \sum_i \vec{F}_i \cdot \cos \alpha$$

gdzie: α jest kątem pomiędzy wektorem działającej siły

składowej \vec{F}_i , a osią X .

Wielkości występujące we wzorach (1) i (2) oznaczają kolejno:

B - chwilowe wartości obwodowego rozkładu indukcji w szczelinie B [T],

n - jednostkowy wektor składowej równoległej do osi X układu współrzędnych,

μ_0 - przenikalność magnetyczna próżni $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^7$ [H/m].

Obliczenia wykonano w ustalonych warunkach szczeliny powietrznej, oraz napięcia zasilania wzbudnika. Szczelinę powietrzną pomiędzy bieżnią a wzbudnikiem ustalano przy pomocy czterech pokręteł śrubowych, regulujących dystans

pomiędzy bieżnią, a wzbudnikiem. Wysokość szczeliny mierzono laboratoryjnym szczelinomierzem. Dodatkowo, w stanowisku istnieje możliwość wymiany bieżni, umożliwiając tym samym zmianę rodzaju materiału bieżni oraz grubości materiału zastosowanego do jej budowy. W artykule pokazano jedynie dwa rodzaje materiału bieżni dla ustalonej grubości materiału. Inne przypadki mogą być obiektem dalszych rozważań w innych warunkach analizy podobnego napędu.

Obwód elektryczny

Schemat elektryczny obwodu dotyczący układu zasilania wzbudnika indukcyjnego silnika liniowego przedstawiono na rys.4. Program ANSYS pozwala na obliczenia obwodów elektrycznych zasilających przetworniki elektromaszynowe z zastosowaniem różnych elementów składowych obwodów elektrycznych począwszy od prostych elementów biernych (cewka, kondensator, rezystor) a skończywszy na półprzewodnikach, źródłach prądu i napięcia, elementach pomiarowych.

Obwód biorący udział w symulacji badanego układu składa się z trzech źródeł napięcia sinusoidalnego (trzy fazy sinusoidalnego źródła zasilania), trzech gałęzi po pięć cewek faz zasilających umieszczonych przestrzennie w obwodzie magnetycznym konstrukcji wzbudnika indukcyjnego, jako uzwojenia trójfazowego wzbudnika, rezystancji zastępczych pojedynczych faz, wskaźników kontrolnych (trzech woltomierzy oraz trzech amperomierzy), oraz punktu uziemienia jako punktu odnośnego potencjałów występujących w obwodach elektrycznych. Fazowe rezystancje zastępcze pozwalają na łatwą wymianę wartości zastępczych rezystancji wzbudnika w trakcie obliczeń, oraz tym samym łatwej możliwości obserwacji zachowania układu zasilającego przy jej zmianie i wpływowi na właściwości silnika liniowego.

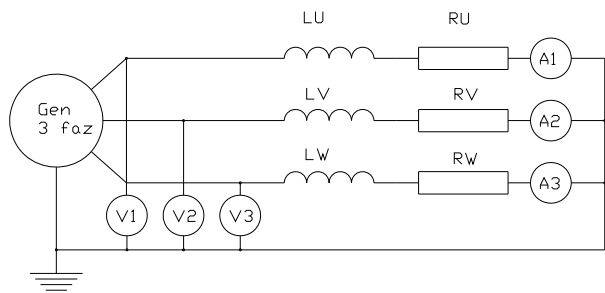
Cewki nawojowe umieszczone w obwodzie magnetycznym siłownika są połączone szeregowo w obrębie fazy silnika (5 symetrycznych cewek przykład rozmieszczenia których przedstawiono na rys. 2), połączonych szeregowo w trzech fazach zasilających. Zarówno przy konstrukcji siłownika jak i na etapie konstrukcji schematu elektrycznego należy zwrócić baczną uwagę na właściwe umieszczenie początków i końców uzwojeń. Na schemacie elektrycznym przedstawionym na Rys.4 oznaczono je kropkami oznaczającymi początki uzwojeń każdej cewki. Odwrócenie kierunku nawijania cewek może spowodować niewłaściwy rozptył strumienia w obwodzie magnetycznym siłownika jego zniwelowanie, oraz całkowicie niewłaściwe ukierunkowanie sił generowanych przez siłownik lub wręcz ich całkowitego zaniku. Jedynie uzwojenie cewek nawojowych zgodnie ze schematem elektrycznym pozwoli na wygenerowanie i zsumowanie składowych sił, które działając w tym samym kierunku pozwolą na uzyskanie maksymalnej siły ciągu siłownika. Jednocześnie zamiana przesunięcia fazowego napięć zasilających (tzw. zamiana fazy) pozwoli na zmianę kierunku działania siły głównej siłownika, oraz odwrócenie jego kierunku ruchu (możliwość pracy siłownika w obu kierunkach).

Układ zasilania stanowią trzy źródła napięcia sinusoidalnego, fazowo przesuniętych względem siebie o 120 stopni elektrycznych każda. Do kontroli napięcia oraz prądu w poszczególnych fazach umieszczono w układzie fazowe woltomierze i amperomierze mierzące odpowiednio napięcie i prąd fazowy w układzie. W obwodzie szeregowym każdej fazy umieszczono rezystancję zastępczą fazy, reprezentującą sumaryczną rezystancję wszystkich 5 cewek biorących udział w pracy fazy silnika liniowego. Pozwala to na łatwą zmianę rezystancji zastępczej w programie ułatwiając tym samym łatwiejszą

obserwację wpływu zmiany rezystancji na właściwości całego napędu.

Cewki nawojowe powinny mieć precyzyjnie oznaczone początki i końce uzwojeń. Wynika to z istotności kierunku generowania strumienia. Na schemacie początki uzwojeń oznaczono kropką przy jednym z końców cewki nawojowej. Kropki oznaczają początek uzwojenia cewki. Umieszczenie punktu masy na jednym z końców schematu elektrycznego symulowanego układu silnika liniowego, wynika z konieczności posiadania punktu odniesienia w układzie elektrycznym badanego stanowiska.

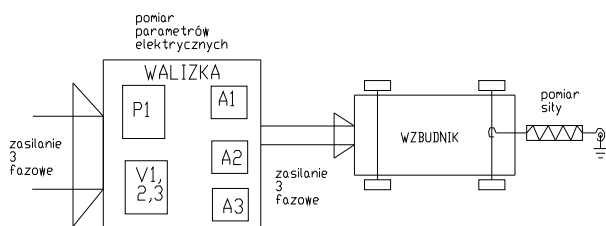
Po przesłaniu danych informacyjnych do programu głównego ANSYS, sprawdzeniu prawidłowości wszelkich parametrów symulowanego układu można rozpocząć pracę symulacji zaprojektowanego układu.



Rys. 4. Schemat elektryczny trójfazowego zasilania silnika liniowego wraz z elementami kontrolującymi obwody.

Stanowisko laboratoryjne

Układ pomiarowy zbudowany w laboratorium Maszyn Elektrycznych WE P.Cz. pozwala na badania wzbudnika silnika liniowego w warunkach statycznych. Brak miejsca w laboratorium nie pozwala na uwolnienie wzbudnika i badanie go w warunkach dynamicznych przy ruchu swobodnym. Pomiar wzbudnika bez ruchu pozwala na badania jedynie części właściwości wzbudnika silnika liniowego powiązanej z własnościami elektrycznymi, elektrycznymi stałymi czasowymi i własnościami obwodów elektrycznych prądu przemiennego.

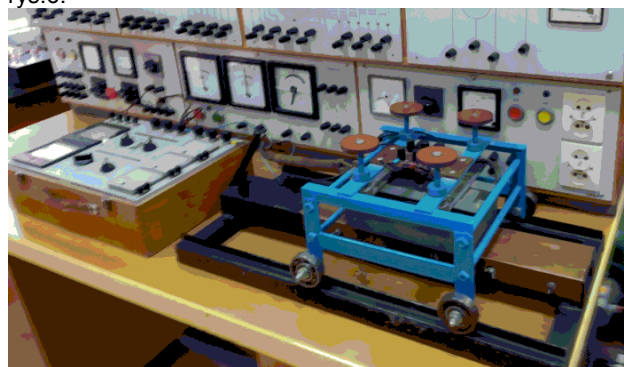


Rys.5. Schemat blokowy stanowiska do badań wzbudnika silnika liniowego.

Dokonano symulacji całego układu obserwując przebiegi prądów i sił w układzie. Przy zmianie parametrów obwodów, pozwala to na sprawdzenie korelacji własności urządzenia powiązanymi z materiałami, których użyto do budowy urządzenia oraz właściwości elementów elektrycznych, z których zbudowano urządzenie. Dokonano symulacji oraz porównano do wielkości rzeczywistych zależności siły ciągu przy zmienianym napięciu zasilania. Na rys. 5 przedstawiono schemat sytuacyjny analizowanego układu.

Stanowisko składa się z wzbudnika umieszczonego na platformie jezdnej, której jedna strona zaczepiona jest poprzez dynamometr do elementu stałego symbolicznie oznaczonego symbolem uziemienia (punkt nieruchomy). Umożliwia to pomiar siły ciągu wzbudnika. Zdjęcie

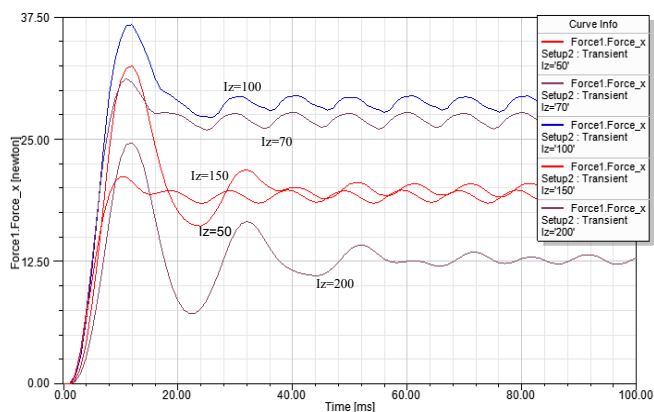
stanowiska laboratoryjnego przedstawiono na fotografii z rys.6.



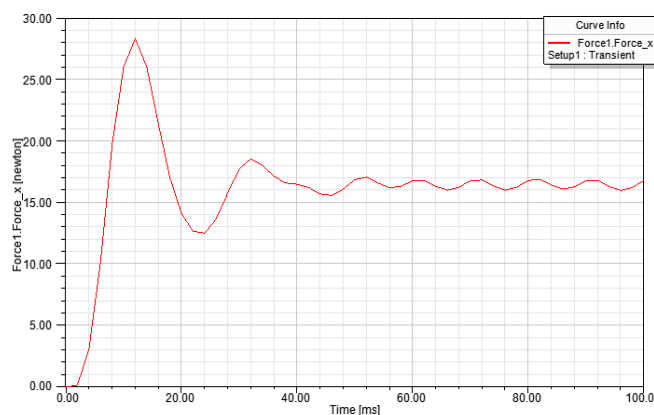
Rys.6. Fotografia stanowiska badawczego wzbudnika liniowego w laboratorium na Wydziale Elektrycznym P.Cz.

Wzbudnik podłączony jest przy pomocy luźnych przewodów elektrycznych poprzez trójfazową walizkę pomiarową do regulowanego źródła zasilania. Stanowią je autotransformatory zasilane z trójfazowej sieci napięcia sinusoidalnego. W skład walizki pomiarowej wchodzi: woltomierz wraz z przełącznikiem mierzonego napięcia, trój-ustrojowy watomierz mierzący sumaryczną moc pobieraną przez wzbudnik z sieci trójfazowej oraz trzy fazowe amperomierze. Wzbudnik może poruszać się na kółkach w obrębie ruchomej części dynamometru. Nie może poruszać się swobodnie. Na tak skonstruowanym stanowisku dokonano pomiarów siły ciągu silnika dla bieżni aluminiowej o grubości 1 mm. Pozostałe parametry wzbudnika jak: grubość szczeliny powietrznej pomiędzy bieżnią a wzbudnikiem, rezystancję cewek jednej fazy wzbudnika, w symulacji dobrano zgodnie z pomiarami w układzie rzeczywistym. Ilość zwojów pojedynczego uzwojenia cewki wzbudnika dobrano na podstawie wyników szeregu symulacji, gdyż nie było możliwości policzenia ilości zwojów pojedynczej cewki bez badań niszczących, jako że cewki wzbudnika unieruchomione są żywicą epoksydową. Na podstawie szeregu symulacji wybrano optymalną (ilość zwojów dającą największy efekt generowania siły ciągu wzbudnika. Przebiegi zależności siły ciągu w czasie w zależności od ilości zwojów w przedziale od $I_z=50$ do 200 zwojów w pojedynczej cewce przedstawiono na Rys 7. Wyniki przedstawiono, jako przebiegi czasowe generowanej siły, różnicowano dla różnej ilości cewek nawojowych I_z silnika liniowego zaznaczając ilości zwojów symulowanych cewek z dodatkowym zróżnicowaniem kolorystycznym przebiegów. Zgodnie z wynikami można stwierdzić, że maksimum siły generowanej przez wzbudnik można osiągnąć przy 100 zwojach przypadających na jedną cewkę fazy wzbudnika, od tego momentu wydajność wzbudnika zaczyna maleć. W symulacji przyjęto 100 zwojów na cewkę, jako liczbę optymalną przy identyfikacji wzbudnika. Uzgadniając ilość zwojów pojedynczej cewki z układem rzeczywistym, wskazano metodę optymalizacji konstrukcji urządzenia. Postępowanie takie w znacznym stopniu upraszcza konstrukcję i optymalizację wzbudnika. Charakterystykę zależności pomiędzy siłą ciągu a napięciem zasilania wyliczono dokonując symulacji przy ustalonych pozostałych parametrach napędu (ilość zwojów, materiał bieżni, szczelina powietrzna, rezystancja cewek nawojowych wzbudnika. Dokonano tego na podstawie niezależnych symulacji przy zmianie napięcia zasilania w przedziale napięć od 100 do 250V napięcia fazowego. Wyniki pojedynczej symulacji przedstawiono na rys. 8. Przedstawia ona dynamiczny przebieg siły ciągu wzbudnika od momentu

złączenia trójfazowego napięcia zasilania, do ustabilizowania się siły ciągu. Z przebiegu siły widać, że stabilizuje się on po czasie nieco dłuższym od 40ms.



Rys.7. Przebieg zależności siły ciągu wzbudnika w czasie, przy różnych ilościach zwojów w pojedynczej cewce fazy wzbudnika.



Rys.8. Zależność siły ciągu wzbudnika silnika liniowego [N] w czasie (symulacja).

Symulacji tego rodzaju, dla zmienianej wartości napięcia zasilającego wzbudnika, dokonano dla każdego punktu z wykresu przedstawionego w tabeli 1.

Tabela 1. Tabela symulacji, pomiarów

U[V]	T _{Cu} [N]	T _{Al} [N]	T pomiary al [N]
120	4,15	4,9	5,92
140	5,65	6,6	
160	7,45	8,9	10,75
180	9,4	11,1	
200	11,6	13,6	
220	14	16,5	17,49

W tabeli 1 pokazano zależności siły ciągu silnika od napięcia zasilania. W ostatniej kolumnie tabeli przedstawiono wyniki pomiarów. Odzwierciedlają one dane pochodzące z symulacji. Niedokładność odzwierciedlenia pomiaru może wynikać z trudności pozycjonowania wzbudnika wystarczająco precyzyjnie równolegle w stosunku do bieżni (zachowanie precyzyjnej grubości szczeliny powietrznej). Brak precyzji w tym względzie wynika z niezbyt dużej precyzji konstrukcji mechanicznej napędu laboratoryjnego oraz mało precyzyjnej identyfikacji parametrów rzeczywistych przyjętych w symulacji.

Udokładnienie tego odzwierciedlenia wymagałoby znacznie większej ilości czasu przy dopasowaniu rzeczywistości do symulacji. Przedstawiona siła pokazana jest w [N] Newtonach, a napięcie podawane na wzbudnik w [V] voltach. Porównano dwie główne zależności siły dla bieżni aluminiowej oraz miedzianej przedstawione dla aluminium, dla miedzi. Symulacje przedstawione w tabeli są porównane z punktami pomiarowymi na stanowisku laboratoryjnym.

Wnioski

Symulacja skomplikowanego układu silnika liniowego z pełnym uzwojeniem jest cennym osiągnięciem zespołu. Braki wynikające zarówno ze zbyt małej precyzji odzwierciedlenia rzeczywistości, jak i niepełnej symulacji rzeczywistości (brak uwzględnienia masy symulowanego układu) pozwala na dalsze rozwijanie modelu i dalsze badania. Prowadzi badający zespół do poszukiwań nowych konstrukcji i inspirację do budowy nowego stanowiska lepiej odzwierciedlającej rzeczywistość. Przyszłość stanowi zawieszenie i badanie układu w zakresie lewitacji magnetycznej. Program ANSYS umożliwia tego rodzaju badania. Budowa tego rodzaju stanowiska również pozostaje w zasięgu możliwości zespołu.

Podziękowanie:

Autorzy wyrażają głęboką wdzięczność Politechnice Częstochowskiej a w szczególności MSK CzestMAN za przyznanie dostępu do infrastruktury obliczeniowej zbudowanej w ramach projektów PLATON nr. POIG.02.03.00-00-028/08 - usługa obliczeń kampusowych U3 oraz MAN-HA nr. POIG.02.03.00-00-110/13 - "Realizacja w MAN-ach usług krytycznych o wysokim poziomie niezawodności". Obliczenia do niniejszego artykułu wykonano dzięki dostępie do niniejszej struktury

Autorzy: dr hab. inż. Marek Lis prof. PCz., Politechnika Częstochowska Wydział Elektryczny, al. Armii Krajowej 17, e-mail: lis@el.pcz.czest.pl dr inż. Krzysztof Szewczyk, Politechnika Częstochowska Wydział Elektryczny, Instytut Elektrotechniki Przemysłowej, Al. Armii Krajowej 17, 42 -200 Częstochowa, szewczyk500@gmail.com , dr inż. Tomasz Walasek, Politechnika Częstochowska, WIMil, al. A.Krajowej 21, 42-200 Częstochowa, tomasz.walasek@gmail.com , dr inż. Elżbieta Moryń-Kucharczyk, Politechnika Częstochowska, WIMil, al. A. Krajowej 21, 42-200 Częstochowa,

LITERATURA

- [1] Maxwell 15.0 application User's Guide
- [2] Ansys 14.0 application User's Guide
- [3] WorkBench 14 application User's Guide
- [4] T. Machula, Opracowanie metody ciągłej analizy stanu technicznego taśm przenośnikowych z linkami stalowymi, Doctoral dissertation (AGH Kraków, 2011)
- [5] R. Zimroz, R. Błażej, P. Stefaniak , A. Wyłomańska, J. Obuchowski, M. Hardygóra, Fundamental Problems of Conveyor Transport 21(2), 99-109 (2014)
- [6] J. Jonak, J. Gajewski, Maintenance and Reliability 4, 74-78 (2006)
- [7] Popenda A., Mathematical modelling of real transmission shafts and mechanical connections with clearances, *Przegląd Elektrotechniczny*, 93 NR 1/2017, 189-192
- [8] Popenda A., Simple mathematical models of transmission shafts and gear trains. Electrical and mechanical circuits, *Przegląd Elektrotechniczny*, 92 NR 12/2016, 137-140