

Układ, sposób i produkt komputerowy do minimalizacji amplitudy zadanej częstotliwości drgań mechanicznych

5 Przedmiotem wynalazku jest układ, sposób i produkt komputerowy do minimalizacji amplitudy zadanej częstotliwości drgań mechanicznych.

Dotychczas z artykułów „A Comprehensive Study on Technologies of Tyre Monitoring Systems and Possible Energy Solutions” oraz „Energy harvesting from a magnetic levitation system” a także zgłoszenia patentowego [US2020373824A1](#) znany jest układ i aparatura do pobierania energii. Układ oparty jest o przemieszczający się pod wpływem drgań magnes, który podczas ruchu indukuje w cewce 10 nawiniętej osiowo do toru przemieszczania się magnesu, napięcie, które po odpowiedniej transformacji w układach elektrycznych może posłużyć np. do zasilenia elementów magazynujących energię (akumulatorów). Z opisu zgłoszenia patentowego [US2020403485A1](#) znany jest układ transformujący przemieszczenie osiowe bezpośrednio w ruch obrotowy elementu odzyskującego energię elektryczną. Znany jest również z opisów zgłoszeń patentowych [WO2018124352A1](#) oraz [KR20180070419A](#) układ 15 wzmacniacza przemieszczenia liniowego, którego zadaniem jest transformacja niewielkiego przemieszczenia w przemieszczenie, które będzie w stanie uruchomić układ odzyskiwania energii elektrycznej.

Dotychczas z artykułów „Novel Active Damping Scheme to Enhance the Performance of PMSM Driven Gearless Elevators by Minimizing their Vertical Vibrations” oraz „Additional internal speed feedback loop for servomechanism residual vibration active damping” a także zgłoszenia patentowego [US2019186480A1](#) znany jest układ i aparatura wpływająca i minimalizacji drgań powstających w układzie 20 napędowym poprzez oddziaływanie na parametry sterowania polowo – zorientowanego. Wykryte przez czujnik prędkości drgania są kompensowane poprzez algorytm modyfikujący wartość zadanego prądu zasilania silnika. Ich ideą jest wytworzenie momentu sumarycznego mogącego zniwelować niekorzystne skutki tętnień momentu oporowego poprzez wytworzenie przeciwnie skierowanego momentu wypadkowego.

W technice znanych i stosowanych jest kilka sposobów sterowania silników elektrycznych. Do podstawowych należą metody sterowania skalarnego i wektorowego przedstawione np. w „Comparative Analysis of Electromagnetic Force Inverter Fed PMSM Drive Using Field Oriented 30 Control (FOC) and Direct Torque Control (DTC)”. Wśród bardziej zaawansowanych metod wektorowych metoda polowo-zorientowana daje zdecydowanie najlepsze rezultaty. Zaletą tej metody jest możliwość wpływania na moment wytwarzany przez silnik napędowy w szerokim zakresie z dużą dynamiką. W artykule „Transfer Mechanism Analysis of Injected Voltage Harmonic and its Effect on Current Harmonic Regulation in FOC PMSM” przedstawiono zależność związaną z doбором parametrów 35 sterowania na zawartość wyższych harmonicznnych w przebiegu momentu napędowego. Możliwe do przeprowadzenia operacje matematyczne pozwalają w tej metodzie określić poszczególne harmoniczne prądów silnika, a co za tym idzie również momentów na jego wale pochodzących od poszczególnych składowych prądów. Wpływając na poszczególne harmoniczne prądów płynących przez uzwojenia

silnika uzyskujemy możliwość zmiany momentów poszczególnych harmonicznymi wartościami momentów napędowych.

5 Problemem technicznym do rozwiązania jest sterowanie układem elektronicznym tak, aby znając pozycję elementu magnetycznego względem uzwojenia, w którym indukowane jest napięcie możliwe było wytworzenie takich parametrów sterowania silnikiem, by wytworzony przez niego moment oddziaływał na źródło drgań jedynie w zakresie zadanych częstotliwości.

10 Dotychczas znane sposoby minimalizacji amplitudy drgań mechanicznych koncentrują się na wykorzystaniu mechanicznych tłumików, których parametry konstrukcyjne są dobrane tak, aby tłumić pożądane zakresy częstotliwości drgań. Składają się zazwyczaj z metalowych elementów mocujących oraz sprężystych elementach tłumiących. Rozwiązanie takie nie ma możliwości zmiany zakresu tłumionych drgań oraz nie ma również możliwości zmiany amplitudy oddziałującego na drgania momentu. Sposoby polegające na zmianie parametrów sterowania silnikiem oddziałują na pojawiające się drgania bez uwzględnienia ich częstotliwości harmonicznymi, co nie pozwala wpływać jedynie na
15 wybrane wartości częstotliwości zaburzenia.

Celem wynalazku jest minimalizacja drgań mechanicznych o określonej częstotliwości z wykorzystaniem aktywnie sterowanego układu silnikiem elektrycznym.

20 Przedmiotem wynalazku jest układ, sposób i produkt komputerowy do minimalizacji amplitudy zadanej częstotliwości drgań mechanicznych.

Istotą układu do minimalizacji amplitudy zadanej częstotliwości drgań mechanicznych posiadający element wymuszający drgania, ramię i prądnice **jest to, że** element wymuszający drgania połączony jest poprzez ramię z wałem przekładni, która to przekładnia jest sprzężona z prądnicą-silnikiem wyposażonym w układ określający położenie elementów magnetycznych względem jego uzwojeń. Prądnica-silnik i układ określający położenie pierwszego elementu magnetycznego względem jego uzwojeń połączone są przewodami elektrycznymi z układem elektronicznym kontrolującym proces generowania energii elektrycznej, który połączony jest do magazynu energii. Układ określający położenie elementów magnetycznych składa się zwłaszcza z drugiego elementu magnetycznego oraz
25 czujnika Halla albo z perforowanej tarczy i elementu fotooptycznego.

Istotą sposobu minimalizacji amplitudy zadanej częstotliwości drgań mechanicznych z wykorzystaniem układu jest to, że za pomocą układu określającego położenie elementów magnetycznych odczytuje się kąt pomiędzy polem elektromagnetycznym wirnika a uzwojeniem stojanu, który mnoży się przez wybrany numer harmonicznymi i przekazuje się wyznaczoną wartość do układu
35 elektronicznego kontrolującego proces generowania energii elektrycznej i w nim generuje się przebieg prądu w uzwojeniach prądnico-silnika, który wytwarza strumień elektromagnetyczny w zakresie od -100% do +100% oddziałujący na wał przez co wspomaga się albo hamuje ruch wału w zakresie wybranej harmonicznymi częstotliwości.

Istotą produktu komputerowego jest to, że zawiera oprogramowanie zawarte w układzie sterującym realizujące sposób za pomocą układu w produkcie tym: sygnał i pochodzący z przewodów prądniczo silnika wprowadzany jest do pierwszego wejścia pomiarowego układu sterującego i odczytywana jest jego wartość oraz transformowana na składowe i_{α} , i_{β} , które przesyłane są do bloku obliczania składowych i_{dn} , i_{qn} prądu n harmonicznej, a także kąt θ pochodzący z układu określającego położenie elementów magnetycznych względem jego uzwojeń wprowadzany jest do drugiego wejścia pomiarowego układu sterującego i odczytywana jest jego wartość, która przekazywana jest do bloku obliczania składowych i_{dn} , i_{qn} prądu n -tej harmonicznej. Z bloku obliczania składowych i_{dn} , i_{qn} przesyłany jest sygnał i_{dn} do regulatora składowej i_{dn} , a także przesyłany jest sygnał i_{qn} do regulatora składowej i_{qn} . W regulatorze składowej i_{dn} obliczana jest wartość zadana i_{dgen} , która przekazywana jest do bloku generacji sygnałów sterujących. W regulatorze składowej i_{qn} obliczana jest wartość zadana i_{qgen} , która przekazywana jest do bloku generacji sygnałów sterujących. Przy czym do bloku generacji sygnałów sterujących dostarczany jest również kąt θ , a w bloku generacji sygnałów sterujących na podstawie dostarczonych sygnałów wartości zadanych i_{dgen} , i_{qgen} i kąt θ generowane są sygnały współczynnika wypełnienia dla tranzystorów.

Przedmiot wynalazku w przykładzie wykonania został przedstawiony na schematycznym rysunku, na którym poszczególne figury przedstawiają:

- fig. 1 – schemat perspektywiczny układu,
- fig. 2 – schemat perspektywiczny układu z przekrojem prądniczo-silnika,
- fig. 3 – schemat blokowy układu,
- fig. 4 – schemat blokowy produktu komputerowego.

Korzystnym skutkiem zastosowania wynalazku jest to, że stosując zaproponowany układ możliwe staje się zmniejszanie wybranych częstotliwości drgań jedynie poprzez wartości zadanych dla algorytmu sterującego pracą silnika/prądniczy. Wykorzystanie wysokosprawnych układów napędowych z magnesami trwałymi oraz polowo-zorientowanego układu sterowania umożliwi prowadzenie takiego działania z dużą sprawnością – silnik podczas swej pracy może działać zarówno jako generator drgań, jak i jako układ je tłumiący. Dodatkowym atutem pracy takiego układu tłumiącego, jest to, że ubocznym jej skutkiem jest powstanie energii elektrycznej, która może zostać wykorzystana do zasilania dodatkowych urządzeń, bądź zmagazynowana.

Przedmiot wynalazku w przykładzie wykonania składa się z elementu wymuszającego drgania 1 w postaci napędu liniowego firmy FESTO typ ESBF-BS-32-100, który połączony jest poprzez ramię 2 z wałem 3 przekładni 4 zębatej 10:1. Wał przekładni 4 sprzężony jest z prądnicą-silnikiem 5 w postaci silnika z magnesami trwałymi Anaheim Automation typ BLY343S-48V-4200 wyposażonym w układ 6 określający położenie elementów magnetycznych względem jego uzwojeń. Układ ten w pierwszej odmianie składa się z drugiego elementu magnetycznego 6.1 oraz czujnika Halla 6.2 - AS5047n firmy AMS AG. W drugiej odmianie podłączono układ perforowanej tarczy 6.3 i elementu fotooptycznego 6.4

– AVAGO AEDB-9340. Prądnica-silnik 5 i układ 6 określający położenie elementów magnetycznych względem jego uzwojeń połączony jest przewodami elektrycznymi 7 z układem elektronicznym 8 kontrolującym proces generowania energii elektrycznej - STM (Nucleo L-0302 + IHM08M1), zawierający sześć tranzystorów T typu MOSFET (STL220N6F7). Ten zaś połączony jest do magazynu energii 9 w postaci akumulatora żelowego (12V 6Ah).

Sposób minimalizacji amplitudy zadanej częstotliwości drgań mechanicznych zrealizowano z wykorzystaniem układu, wykorzystującego produkt komputerowy. Polegał on na tym, że za pomocą urządzenia wprowadzono w naprzemienny ruch obrotowy wał 3 przekładni 4 z wykorzystaniem układu wymuszającego 1 opartego o serwonapęd z osią liniową pracujący z zadaniem momentem maksymalnym i trajektorią, która oprócz harmonicznej podstawowej drgań (1Hz) miała dodaną 15% zawartość harmonicznej 5-go rzędu (5Hz). Za pomocą układu 6 określającego położenie elementów magnetycznych 5.1 (układ AS 5047n, drugie wejście pomiarowe CCt układu sterującego 8) odczytywano kąt θ pomiędzy polem elektromagnetycznym wirnika a uzwojeniem stojana, który przekazywano z wykorzystaniem magistrali szeregowej SPI do układu elektronicznego 8 kontrolującego proces generowania energii elektrycznej – mikrokontrolera STM32F302 i w nim mnożono jego wartość przez numer harmonicznej drgań n . Następnie generowano z wykorzystaniem modułu TIM1 mikrokontrolera STM32F302, techniki PWM oraz wartości zmierzonej prądu i na pierwszym wejściu pomiarowym CCi układu sterującego 8, przebieg prądu w uzwojeniach prądnico-silnika 5, który wytwarza strumień elektromagnetyczny w zakresie od -100% do + 100% wartości znamionowej silnika odpowiednio zorientowany względem strumienia generowanego przez elementy magnetyczne wirnika dla zadanej wartości harmonicznej, oddziałujący na wał 3 przez co hamuje ruch wału 3 jedynie dla wybranej harmonicznej momentu napędowego. Wprowadzono w naprzemienny ruch obrotowy wał 3 przekładni 4 z wykorzystaniem układu 1 opartego o serwonapęd z osią liniową. Następnie dokonano obserwacji przebiegów zmiany położenia wału 3 w funkcji czasu.

W produkcie komputerowym sygnał i pochodzący z przewodów 7 prądnico silnika 5 wprowadzany jest do pierwszego wejścia pomiarowego CCi układu sterującego 8 i odczytywana jest jego wartość oraz transformowana na składowe i_α , i_β , które przesyłane są do bloku obliczania 8.1 składowych i_{dn} , i_{qn} prądu n harmonicznej. Kąt θ pochodzący z układu określającego położenie elementów magnetycznych względem jego uzwojeń 6 wprowadzany jest do drugiego wejścia pomiarowego CCt układu sterującego 8 i odczytywana jest jego wartość, która przekazywana jest do bloku obliczania 8.1 składowych i_{dn} , i_{qn} prądu n -tej harmonicznej. Z bloku obliczania 8.1 składowych i_{dn} , i_{qn} przesyłany jest sygnał i_d do regulatora składowej i_{dn} 8.2, a także przesyłany jest sygnał i_q do regulatora składowej i_{qn} 8.3. W regulatorze składowej i_{dn} 8.2 obliczana jest wartość zadana i_{dgen} , która przekazywana jest do bloku generacji sygnałów sterujących 8.4. W regulatorze składowej i_{qn} 8.3 obliczana jest wartość zadana i_{qgen} , która przekazywany jest do bloku generacji sygnałów sterujących 8.4. Do bloku generacji sygnałów sterujących 8.4 dostarczany jest również kąt θ . W bloku generacji sygnałów sterujących 8.4 na podstawie dostarczonych sygnałów wartości zadanych i_{dgen} , i_{qgen} i kąt θ generowane są sygnały współczynnika wypełnienia a , b , c , d , e , f dla tranzystorów T.

Zadaniem produktu komputerowego w przykładzie było wyznaczenie przebiegów wartości chwilowych prądów i_q oraz i_d na podstawie zmierzonych przez przetwornik 12-bitowy na wejściu CCi pomiaru prądu i oraz danych z magistrali SPI z wejścia CCt odczytu wartości położenia kąta θ , a następnie w zależności od zadanego numeru harmonicznego drgań n obliczenie wartości referencyjnych i_{qref} oraz i_{dref} tak, aby regulatory o strukturze PI składowych odpowiedzialnych za strumień magnetyczny uzwojeń silnika - i_d oraz i_q wyznaczyły wartości zadane sygnału PWM tranzystorów T, które wytworzą moment przeciwnie skierowany jedynie dla zadanej częstotliwości drgań.

Analizę zawartości poszczególnych harmonicznym drgań w przebiegu realizowano z wykorzystaniem oscyloskopu wyposażonego w funkcję analizy FFT zawartości harmonicznym w mierzonym przebiegu – Tektronix DPO 5054.

Wyniki pomiarów zawartości wyższych harmonicznym w analizowanym przebiegu położenia umieszczone w tabeli 1 potwierdzają wpływ sposobu sterowania na zawartość niepożądanego harmonicznego drgań. Zastosowanie metody polowo-zorientowanej w procesie określania współczynników wypełnienia tranzystorów, umożliwia wpływanie na pojedynczą składową drgań, jak również poprzez zaangażowanie większych zasobów procesora obliczeniowego na ich większą liczbę.

Tabela 1 – Wyniki pomiaru wartości napięcia dla zadanych wartości prędkości obrotowej.

Amplituda harmonicznego podstawowej drgań – 1Hz	Amplituda 5-tej harmonicznego drgań	i_{qref}	i_{dref}	Zawartość wyższych harmonicznym drgań
[%]	[%]	[A]	[A]	[%]
85	15	0	0	17,7
85	15	-0,1	0	15,9
85	15	-0,2	0	14,1
85	15	-0,3	0	12,4
85	15	-0,4	0	10,6
85	15	-0,5	0	8,82
85	15	-0,6	0	7,06
85	15	-0,7	0	5,3
85	15	-0,8	0	3,53
85	15	-0,9	0	1,77
85	15	-1,0	0	0,1

RZECZNIK PATENTOWY
Maciej Nowicki
 mgr inż. Maciej Nowicki
 Nr wp. 3476

Wykaz oznaczeń:

1	Element wymuszający drgania
2	Ramię
3	Wał przekładni
4	Przekładnia
5	Prądnica-silnik
5.1	Pierwszy element magnetyczny
6	układ określający położenie elementów magnetycznych względem jego uzwojeń,
6.1	drugi element magnetyczny
6.2	czujnik Halla
6.3	perforowana tarcza
6.4	element fotoptyczny
7	przewód elektryczny
8	układ elektroniczny kontrolujący proces generowania energii elektrycznej
8.1	blok obliczania składowych i_{dn} , i_{qn}
8.2	regulator składowej i_{dn}
8.3	regulator składowej i_{qn}
8.4	blok generacji sygnałów sterujących
9	magazyn energii
a, b, c, d, e, f	współczynniki wypełnienia dla tranzystorów
T	tranzystor
CCi	pierwsze wejście pomiarowe układu sterującego
CCt	drugie wejście pomiarowe układu sterującego