

Układ, sposób i produkt komputerowy do pozyskiwania energii elektrycznej z drgań mechanicznych

Przedmiotem wynalazku jest układ i sposób pozyskiwania energii elektrycznej z drgań mechanicznych. Przedmiotem wynalazku jest również produkt komputerowy realizujący sposób z wykorzystaniem tego układu.

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 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 wzmacniacza przemieszczenia liniowego, którego zadaniem jest transformacja niewielkiego przemieszczenia w przemieszczenie, które będzie w stanie uruchomić układ odzyskiwania energii elektrycznej.

W technice znanych i stosowanych jest kilka sposobów określania pozycji położenia pozycji kątovej. Do podstawowych należą enkodery optyczne absolutne, których zasada działania przedstawiona jest m.in. w artykule „Investigations of Rotor Shaft Position Sensor Signal Processing in Electric Drive Train Systems”. Oprócz enkoderów optycznych stosowane są również układy enkoderów magnetycznych, rewolwerów oraz czujników indukcyjnych, których działanie jest przedstawione m.in. w artykule “Benchmark of Rotor Position Sensor Technologies for Application in Automotive Electric Drive Trains”. Wspólną cechą tych czujników jest możliwość określenia położenia kątowego wału względem położenia referencyjnego czujnika, co przy znajomości budowy obracającego się układu z magnesami trwałymi oraz nieruchomego układu cewek elektromagnetycznych umożliwia określenie ich wzajemnego położenia z dokładnością wynikającą z rozdzielczości użytego czujnika.

Problemem technicznym do rozwiązania jest sterowanie układem elektronicznym tak, aby znając pozycję elementu magnetycznego względem uzwojenia, w którym indukowane jest napięcie możliwe było pozyskanie maksymalnej ilości energii oraz kontrola oddziaływania na parametry elektromechaniczne całego układu.

Dotychczas znane sposoby pozyskiwania energii elektrycznej z drgań mechanicznych zakładają swobodny ruch układu magnetycznego po torze prostoliniowym i indukowanie w nawiniętej cewce napięcia. Konieczność zapewnienia swobodnego poruszania się elementu magnetycznego po torze sprawia, że niezbędne staje się zastosowanie szczeliny powietrznej pomiędzy magnesem, a cewką, która to szczelina jest jednocześnie powiększana przez cylindryczną ściankę toru

5 prowadzącego magnes. Kontrola pozycji magnesu jest możliwa jedynie poprzez analizę wartości i kształtu napięcia generowanego w uzwojeniu, co jest o tyle trudne, że zależą one również od amplitudy i częstotliwości drgań. W układach transformujących przemieszczenie liniowe na przemieszczenie kątowe brak jest wzmacniacza przemieszczenia kątowego, jak również nie jest stosowany układ kontroli  
10 położenia elementów magnetycznych względem cewek, w których generowane jest napięcie. W obu tych typach urządzeń nieznaną pozycję magnesu względem cewki utrudnia optymalne sterowanie procesem pozyskiwania energii, a brak elementu wzmacniającego przemieszczenie kątowe prowadzi do konieczności budowania urządzeń o niekorzystnym stosunku uzyskanej mocy maksymalnej do wielkości urządzenia, a co za tym idzie znacznego podniesienia kosztów inwestycyjnych.

15 Celem wynalazku jest odzyskiwanie energii elektrycznej z drgań mechanicznych z określeniem pozycji układu magnetycznego i zwiększenie efektywności pozyskiwania energii oraz uzyskanie kontroli oddziaływania pomiędzy poszczególnymi elementami systemu.

20 Przedmiotem wynalazku jest układ i sposób pozyskiwania energii elektrycznej z drgań mechanicznych. Przedmiotem wynalazku jest również produkt komputerowy realizujący ten sposób z wykorzystaniem tego układu.

Istotą układu do pozyskiwania energii elektrycznej z drgań mechanicznych posiadający element  
25 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. Korzystnie układ określający położenie  
30 elementów magnetycznych składa się zwłaszcza z drugiego elementu magnetycznego oraz czujnika Halla albo z perforowanej tarczy i elementu fotooptycznego.

Istotą sposobu pozyskiwania energii elektrycznej z drgań mechanicznych z wykorzystaniem  
35 układu jest to, że za pomocą układu określającego położenie elementów magnetycznych odczytuje się kąt  $\theta$  pomiędzy polem elektromagnetycznym wirnika a uzwojeniem stojanu, który przekazuje się do układu 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.

Istotą produktu komputerowego jest to, że zawiera oprogramowanie zawarte w układzie sterującym  
40 realizujące sposób za pomocą układu, przy czym w produkcie tym: sygnał i pochodzący z przewodów prądnico silnika wprowadzany jest do pierwszego wejścia pomiarowego układu sterującego i odczytywana jest jego wartość oraz transformowana na składowe  $i\alpha$ ,  $i\beta$ , które przesyłane są do bloku obliczania. składowych  $i_d$ ,  $i_q$  prądu, a także kąt  $\theta$  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  $i_d$ ,  $i_q$  prądu, tudzież napięcie u pochodzący z przewodów prądniczo silnika wprowadzany jest do trzeciego wejścia pomiarowego układu sterującego i odczytywana jest jego wartość rzeczywista, która porównywana jest z zadaną wartością referencyjną  $u_{ref}$  w regulatorze napięcia wyjściowego składowych referencyjnych  $i_{qref}$ ,  $i_{dref}$ . Przy czym z bloku obliczania składowych  $i_d$ ,  $i_q$  przesyłany jest sygnał  $i_d$  do regulatora składowej  $i_d$ , a także przesyłany jest sygnał  $i_q$  do regulatora składowej  $i_q$ . Z regulatora napięcia wyjściowego składowych referencyjnych  $i_{qref}$ ,  $i_{dref}$  przesyłany jest sygnał referencyjny  $i_{dref}$  do regulatora składowej  $i_d$ , a także przesyłany jest sygnał referencyjny  $i_{qref}$  do regulatora składowej  $i_q$ , natomiast w regulatora składowej  $i_d$  obliczany jest sygnał  $i_{dgen}$ , który przekazywany jest do bloku generacji sygnałów sterujących, zaś w regulatora składowej  $i_q$  obliczany jest sygnał  $i_{qgen}$ , który przekazywany jest do bloku generacji sygnałów sterujących. Przy czym do bloku generacji sygnałów sterujących dostarczany jest również kąt  $\theta$ , a w bloku generacji sygnałów sterujących na podstawie dostarczonych sygnałów  $i_{dref}$ ,  $i_{qref}$  i kąt  $\theta$  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 określenie pozycji elementu magnetycznego względem uzwojeń prądniczo-silnika, co znacząco zwiększa możliwości odpowiedniego sterowania procesem pozyskiwania energii elektrycznej przez układy elektroniczne. Zastosowanie przekładni mechanicznej oraz dźwigni umożliwia dostosowanie parametrów mechanicznych źródła drgań do parametrów mechanicznych prądniczo-silnika tak, aby jego możliwości pracy generatorowej były optymalne. Możliwość zastosowania mniejszych elementów układu znacząco obniża koszty jego budowy.

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 wyposażonego 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. Prądniczo-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).

5 Sposób pozyskiwania energii elektrycznej z drgań mechanicznych realizowany za pomocą urządzenia przedstawionego w przykładzie wykonania i wykorzystujący produkt komputerowy polegał na tym, że za pomocą układu 6 określającego położenie elementów magnetycznych 5.1 – układ AS 5047n, wejście CCt, odczytywano kąt  $\theta$  pomiędzy polem elektromagnetycznym wirnika a uzwojeniem stojana, który przekazywano z wykorzystaniem magistrali szeregowej SPI do układu elektronicznego kontrolującego proces generowania energii elektrycznej 8 – mikrokontrolera 10 STM32F302 i w nim generowano z wykorzystaniem modułu TIM1 mikrokontrolera STM32F302, techniki PWM oraz wartości zmierzonej prądu i na pierwszym wejściu pomiarowym CCI układu sterującego, przebieg prądu w uzwojeniach prądnico-silnika 5, który wytwarza odpowiednio zorientowany względem strumienia generowanego przez elementy magnetyczne wirnika strumień elektromagnetyczny w zakresie od -100% do + 100% wartości znamionowej silnika, oddziałujący na wał 3 przez co hamuje 15 ruch wału 3. Wprawiono w naprzemienny ruch obrotowy wał 3 przekładni 4 z wykorzystaniem układu wymuszającego 1 opartego o serwonapęd z osią liniową. Następnie dokonano obserwacji przebiegów wygenerowanego napięcia u mierzac amplitudę wygenerowanego napięcia.

Zadaniem produktu komputerowego w przykładzie było wyznaczenie wartości chwilowych prądów  $i_q$  oraz  $i_d$  na podstawie zmierzonych przez przetwornik 12-bitowy na pierwszym wejściu CCI 20 pomiarowym układu sterującego prądu i oraz danych z magistrali SPI z drugiego wejścia CCt pomiarowym układu sterującego odczytu wartości położenia kąta  $\theta$ , a następnie w zależności od wartości zadanej  $u_{ref}$  i wartości zmierzonej  $u$  przez przetwornik 12-bitowy na trzecim wejściu pomiarowym CCu układu sterującego obliczenie wartości referencyjnych  $i_{qref}$  oraz  $i_{dref}$  tak, aby regulatory o strukturze PI składowych odpowiedzialnych za strumień magnetyczny uzwojeń silnika -  $i_d$  25 oraz  $i_q$  wyznaczyły wartości zadane  $i_{dgen}$ ,  $i_{qgen}$  oraz współczynników wypełnienia  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$ ,  $e$ ,  $f$  dla tranzystorów T. 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  $i_\alpha$ ,  $i_\beta$ , które przesyłane są do bloku obliczania 8.1 składowych  $i_d$ ,  $i_q$  prądu. Kąt  $\theta$  pochodzący z układu określającego położenie elementów 30 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  $i_d$ ,  $i_q$  prądu. Napięcie  $u$  pochodzące z przewodów elektrycznych 7 prądnico silnika 5 wprowadzane jest do trzeciego wejścia pomiarowego CCu układu sterującego 8 i odczytywana jest jego wartość rzeczywista, która porównywana jest z zadaną wartością referencyjną  $u_{ref}$  w regulatorze 35 napięcia wyjściowego 8.2 składowych referencyjnych  $i_{qref}$ ,  $i_{dref}$ . Z bloku obliczania 8.1 składowych  $i_d$ ,  $i_q$  przesyłany jest sygnał  $i_d$  do regulatora składowej  $i_d$  8.3, a także przesyłany jest sygnał  $i_q$  do regulatora składowej  $i_q$  8.4. Z regulatora napięcia wyjściowego 8.2 składowych referencyjnych  $i_{qref}$ ,  $i_{dref}$  przesyłany jest sygnał referencyjny  $i_{dref}$  do regulatora składowej  $i_d$  8.3, a także przesyłany jest sygnał referencyjny  $i_{qref}$  do regulatora składowej  $i_q$  8.4. W regulatorze

składowej id 8.3 obliczany jest sygnał idgen, który przekazywany jest do bloku generacji sygnałów sterujących 8.5. W regulatorze składowej iq 8.4 obliczany jest sygnał iqgen, który przekazywany jest do bloku generacji sygnałów sterujących 8.5. Do bloku generacji sygnałów sterujących 8.5 dostarczany jest również kąt  $\theta$ . W bloku generacji sygnałów sterujących 8.5 na podstawie dostarczonych 5 sygnałów ider, iqer i kąt  $\theta$  generowane są sygnały współczynnika wypełnienia a, b, c, d, e, f dla tranzystorów T.

Kolejno zmieniano parametr zadany iqref stwierdzając wpływ zadanych parametrów sterowania 10 tranzystorów T na amplitudę napięcia wyjściowego układu przy niezmienionych parametrach ruchu wymuszającego tak aby ta amplituda osiągnęła wartość zbliżoną do napięcia akumulatora – w przybliżeniu 12 V. Wyniki umieszczone w tabeli 1 przedstawiają wpływ sposobu sterowania na 15 amplitudę napięcia indukowanego w uzwojeniach. Zastosowanie metody połowo-zorientowanej w procesie określania współczynników wypełnienia a, b, c, d, e, f tranzystorów T, analogicznie, jak w przypadku zastosowania jej w silnikach przy hamowaniu rekuperacyjnym, pozwala na zwiększenie amplitudy napięcia generowanego podczas pracy przy niskich prędkościach do poziomu 15 umożliwiającego przyjęcie energii przez magazyn. We wszystkich przykładach pomimo zmiennej prędkości uzyskano założoną amplitudę w przybliżeniu 12 V.

RZECZNIK PATENTOWY

*Maciej Nowicki*  
mgr inż. Maciej Nowicki  
Nr wp. 3476

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

Prędkość obrotowa	Amplituda zadana napięcia uref	Amplituda napięcia U	iqref- wart RMS	iq- wart RMS	idref- wart RMS	id- wart RMS
[obr./min]	[V]	[V]	[A]	[A]	[A]	[A]
250	12	12,1	-0,70	-0,68	0	0,1
240	12	12,0	-0,67	-0,65	0	-0,05
230	12	12,1	-0,70	-0,70	0	0
220	12	12,0	-0,73	-0,72	0	0,1
200	12	11,9	-0,82	-0,87	0	0,05
180	12	11,9	-1,01	-1,03	0	-0,05
170	12	11,8	-1,08	-1,07	0	0,1
160	12	11,8	-1,11	-1,08	0	0,05
150	12	11,7	-1,22	-1,25	0	0,05
140	12	11,7	-1,34	-1,30	0	0
130	12	11,6	-1,50	-1,47	0	-0,05

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 $i_d$ , $i_q$
8.2	regulator napięcia wyjściowego składowych referencyjnych $i_{qref}$ , $i_{dref}$
8.3	regulator składowej $i_d$
8.4	regulator składowej $i_q$
8.5	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
CCu	trzecie wejście pomiarowe układu sterującego