OPEN ACCESS

PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY

Kacper HATŁAS[1], Krzysztof KLUSZCZYŃSKI[2], Sebastian BARTEL[3]
ORCID: [1]0009-0001-9249-6394, [2]0000-0002-3685-3756, [3]0000-0003-4313-0289
DOI: 10.15199/48.2025.11.12

Porównawcze badania pomiarowe algorytmów bezczujnikowego sterowania liniowym silnikiem cylindrycznym

Comparative measurement studies of sensorless control algorithms in a linear cylindrical motor

[1] mgr inż. Kacper Hatłas, Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki, WIEiK, Katedra Infotroniki i cyberbezpieczeństwa E-3, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków, e-mail: kacper.hatlas@pk.edu.pl
[2] prof. dr hab. inż. Krzysztof Kluszczyński, Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki, WIEiK, Katedra Infotroniki i cyberbezpieczeństwa E-3 ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków, e-mail: krzysztof.kluszczeński@pk.edu.pl
[3] dr inż. Sebastian Bartel, Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki, WIEiK, Katedra Infotroniki i cyberbezpieczeństwa E-3, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków E-mail: sebastian.bartel@pk.edu.pl

Adres do korespondencji: kacper.hatlas@pk.edu.pl

Streszczenie: Celem artykułu jest porównanie różnych algorytmów bezczujnikowego sterowania liniowym silnikiem cylindrycznym. Proponowane algorytmy zakładają wykorzystanie, prócz pojedynczych cewek wzbudzenia, również większej ich liczby np. dwóch lub trzech. Opisano metodykę doboru długości podstawowego kroku sterowania, która wymaga znajomości granicy poprawnej realizacji zadanej liczby cykli oraz granicy ruchu płynnego. Dokonano porównania wszystkich algorytmów sterowania z punktu widzenia zakresu regulacji prędkości biegnika.

Słowa kluczowe: liniowy silnik cylindryczny z magnesem trwałym, regulacja prędkości liniowej, algorytmy sterowania bezczujnikowego

Abstract: The purpose of this paper is to compare various algorithms for sensorless control of a linear cylindrical motor. The proposed algorithms assume the use, in addition to single excitation coils, also a larger number of them, for example, two or three. The methodology for selecting the length of the basic control step, which requires knowledge of the limit of correct execution of the set number of cycles and the limit of smooth motion, is described. A comparison of all control algorithms was made from the point of view of the speed control range of the runner.

Keywords: linear cylindrical motor with permanent magnet, linear speed control, sensorless control algorithms

Wstęp

Rozwojowi technologii magnesów trwałych i systematycznemu wzrostowi ich energii towarzyszy coraz bardziej dynamiczny rozwój nowych konstrukcji maszyn elektrycznych z magnesami trwałymi. Dotyczy to nie tylko maszyn obrotowych, ale również maszyn o ruchu liniowym. W odniesieniu do maszyn liniowych prowadzone są badania, zarówno nad maszynami synchronicznymi [18], jak też maszynami indukcyjnymi [7]. Prowadzone są też badania nad liniowymi silnikami skokowymi z magnesami trwałymi [13] oraz silnikami liniowymi hybrydowymi [6][8][9]. Rozważane są zarówno ich konstrukcje cylindryczne (tubowe), jak też konstrukcje z płaską bieżnią [10] lub też – z podwójna płaską bieżnią (nazywaną też bieżnią szynową) [11]. Interesującym przykładem silnika liniowego jest również silnik łukowy (VCM Voice Control Motor), opisany w [4]

Ciągle są proponowane nowe zastosowania silników z liniowych magnesami trwałymi. Najszersze pole zastosowań wiąże się z ich wykorzystywaniem jako napędu pomp tłokowych [1][2][3]. Ciekawe rozwiązania dotyczą silników przeznaczonych do zastosowań medycznych, mających za zadanie wspomaganie pracy serca [1][3][4][12][15]. Rozważane są również możliwości wykorzystania silników liniowych cylindrycznych o ruchu posuwisto-zwrotnym jako napędu pomp membranowych, w których silniki te zastępują napęd korbowy [16]. Inne ciekawe rozwiązania dotyczą mechanizmów napędowych w układach wymiany rdzeni w reaktorach jądrowych [17]. Szereg ostatnio opublikowanych artykułów dotyczy

liniowych generatorów cylindrycznych z magnesami trwałymi, przeznaczonych do wytwarzania energii elektrycznej dla gospodarstw domowych [14].

Celem niniejszego artykułu jest porównanie różnych możliwych algorytmów sterowania liniowym silnikiem cylindrycznym z magnesem trwałym jako biegnikiem [5]. Analiza ta została dokonana na podstawie wyników badań pomiarowych zaprojektowanego i skonstruowanego prototypu takiego silnika. Dla przeprowadzenia badań zbudowano stanowisko pomiarowe z układem wizyjnym (szybką kamerą).

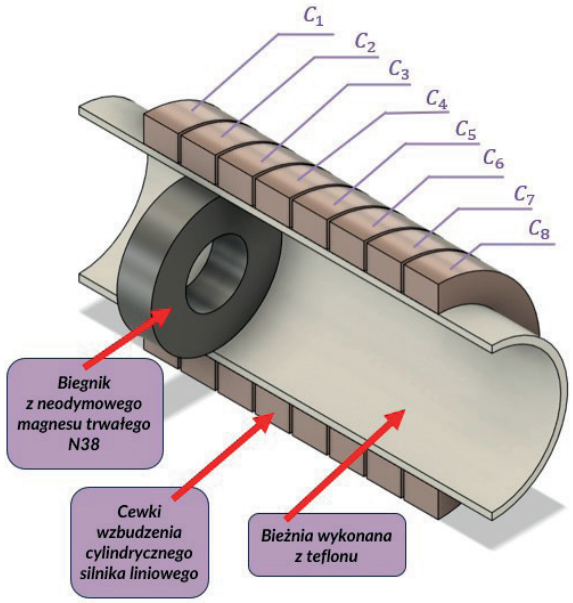
Proponowane przez autorów algorytmy sterowania zakładają jednoczesne wykorzystanie w układzie napędowym biegnika dwóch, a nawet trzech cewek wzbudzenia.

Istotnym wyróżnikiem tych algorytmów jest również to, że nie wymagają one stosowania sensorów, określających aktualne położenie biegnika (algorytmy te należą więc do grupy tzw. algorytmów sterowania bezczujnikowego). Artykułów dotyczących możliwości bezczujnikowego sterowania takimi silnikami liniowymi jest niewiele ostatnia z prac ukazała się w 2025 roku. [18]

Budowa prototypu liniowego silnika cylindrycznego

Prototyp elektrycznego silnika liniowego cylindrycznego z magnesem trwałym jako biegnikiem (rys. 1.) jest zbudowany z 8 cewek, umiejscowionych obok siebie (na cylindrze, wykonanym z teflonu) w możliwie najmniejszej odległości, podyktowanej względami konstrukcyjnymi i technologicznymi oraz z biegnika (będącego wysoko energetycznym magnesem trwałym), poruszającego się wewnątrz cylindra (bieżni). Dla zmniejszenia masy biegnika przyjęto magnes o kształcie pierścieniowym. Cewki są ponumerowane od C1 do C8, zgodnie ze schematem na rysunku 1. Magnes trwały jest wykonany z materiału neodymowego N38 (stop Nd2Fe14B), który charakteryzuje się wysoką wartością indukcji remanentu Br ≈1,21 [T] oraz wysoką wartością natężenia pola magnetycznego koercji (zawartą w przedziale $H_C \in$ od 876 [kA/m] do 955 [kA/m]). Dzięki zastosowaniu powłoki z niklu i miedzi magnes trwały jest chroniony przed krótkotrwałym odziaływaniem na wilgoci.

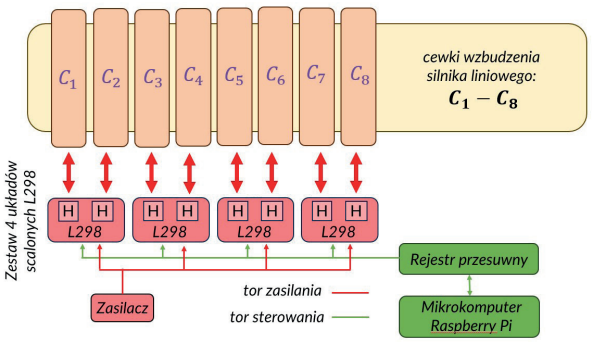
Ruch biegnika jest wynikiem oddziaływania pola magnetycznego, wytwarzanego przez cewki wzbudzenia z polem magnetycznym, wytwarzanym przez magnes trwały. Uzyskanie ruchu liniowego (postępowego) biegnika wymaga wzbudzania kolejnych cewek. Cewki są wzbudzane według zadanej kolejności (zgodnie z przyjętą strategią sterowania) przez układ



Rys. 1. Rysunek poglądowy budowy prototypu silnika liniowego cylindrycznego z magnesem trwałym jako biegnikiem

zasilania i sterowania, którego schemat ideowy jest przedstawiony na rysunku 2.

Układ sterowania zawiera jako jednostkę sterującą Mikrokomputer Raspberry Pi 4 model B, który charakteryzuje się możliwością współpracy z szerokim wachlarzem różnych urządzeń peryferyjnych oraz pozwala na generowanie przebiegów prostokątnych wykorzystywanych w układzie zasilania cewek wzbudzenia. Mikrokontroler współdziała poprzez rejestr przesuwny z zestawem 4 układów scalonych L298. Każdy z nich zawiera 2 mostki tyrystorowe typu H. Mostki H zasilają w sposób niezależny (autonomiczny) poszczególne cewki wzbudzenia silnika liniowego. Źródłem energii jest zasilacz o napięciu maksymalnym 30V i prądzie maksymalnym 2A. W mikrokomputerze są implementowane w języku Python różne algorytmy sterowania, określające strategie zasilania układu cewek wzbudzenia.



Rys. 2. Schemat ideowy układu zasilania i sterowania silnika liniowego

Biegnik silnika wykonuje ruch posuwisto-zwrotny. Przejście biegnika od lewego położenia skrajnego do prawego położenia skrajnego, a następnie powrót do

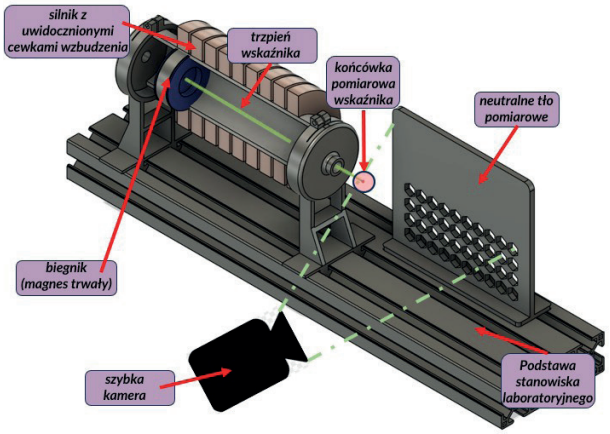
lewego położenia skrajnego, to – według przyjętej terminologii – jeden cykl pracy silnika liniowego. Cykl obejmuje dwa półcykle. W obrębie każdego półcyklu pracy biegnik porusza się kolejno: ruchem przyśpieszonym, ruchem o stałej prędkości oraz ruchem opóźnionym. Pozwala to nam wyróżnić w obrębie pojedyńczego cyklu pracy: fazę przyśpieszania, fazę pracy ustalonej, fazę hamowania i ponownego przyśpieszenia czyli fazę tzw. nawrotu, fazę pracy ustalonej i na zakończenie całego cyklu – ponownie fazę hamowania. Jak widać, biegnik porusza się ruchem zmiennym w czasie, cyklicznie powtarzającym się, co wymaga wprowadzenia pojęcia średniej prędkości, która jest związana z czasem potrzebnym na przebycie przez biegnik dwóch długości bieżni (tam i z powrotem) czyli na wykonanie przez biegnik jednego pełnego cyklu pracy.

Układ pomiarowy liniowego silnika cylindrycznego

Układ pomiarowy silnika liniowego umożliwia określenie liczby wykonanych cykli, czasów potrzebnych na wykonanie poszczególnych cykli oraz średnich prędkości biegnika dla poszczególnych cykli.

Wizualizację zaprojektowanego stanowiska pomiarowego przedstawiono na rysunku 3. Biegnik umieszczony wewnątrz nieprzeźroczystego cylindra, jest niewidoczny.

Stąd też dla uwidocznienia jego ruchu, biegnik został wyposażony we wskaźnik, złożony z trzpienia (trwale połączonego z biegnikiem) oraz końcówkę pomiarową, która – dzięki temu, że długość trzpienia jest większa od długości bieżni – porusza się na zewnątrz silnika na tle ekranu. Ruch końcówki pomiarowej jest rejestrowany za pomocą szybkiej kamery, która jest zlokalizowana w odpowiednio dobranej odległości na statywie naprzeciwko ekranu. Silnik wraz z układem pomiarowym ruchu biegnika jest umiejscowiony na podstawie wykonanej z aluminiowych profili o przekroju 12x1,5cm i długości 50cm. Kamera wykorzystywana na stanowisku pomiarowym to kamera typu 10Mpix samsung S901 (wbudowana w telefon Samsung s22), która pozwala na nagrywanie obrazów z szybkością 240 klatkach na sekundę. Nagrywanie przy tej częstotliwości klatek pozwala na wyemitowanie nagrania w jakości FHD (1920 x 1080 pikseli). Kamera – dla uniezależnienia się od drgań wywoływanych przez działający silnik – jest umieszczona na oddzielnej podstawie. Obraz zarejestrowany przez kamerę pozwala określić liczbę cykli wykonanych przez silnik, czas realizacji pojedyńczego cyklu oraz średnią prędkość biegnika dla każdego cyklu.



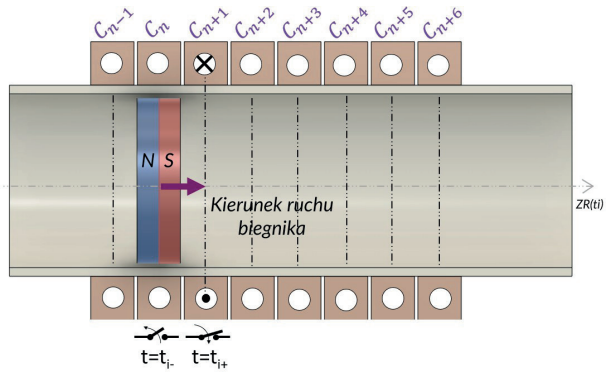
Rys. 3. Wizualizacja układu pomiarowego wraz z cylindrycznym silnikiem liniowym jako obiektem badań

Prędkość średnią biegnika dla i-tego cyklu $V_{śri}$ określa się poprzez podzielenie przebytej przez biegnik w *i*-tym cyklu drogi *s* (równej podwójnej długości bieżni) przez czas trwania *i*-tego cyklu T_i:

$$v_{śri} = \frac{s}{T_i} \tag{1}$$

Opis badanych algorytmów sterowania

Sposób napędzania biegnika w liniowym silniku cylindrycznym ilustruje rysunek 4. Jego ruch odbywa się pod wpływem siły przyciągania wytwarzanej przez kolejno aktywowane cewki wzbudzania.



Rys. 4. Położenia biegnika w chwili przełączenia cewek wzbudzenia

Siła napędzająca, wytworzona przez cewkę *i*-tą, działa na biegnik do chwili czasowej, w której znajdzie się on w jej środku. W tym momencie cewka *i*-ta jest dezaktywowana, a cewka *(i+1)*-sza – aktywowana. Gdyby cewka *i*-ta nie została w tej właśnie chwili wyłączona, to po minięciu przez biegnik jej środka, cewka wytwarzałaby siłę hamującą. Po dezaktywowaniu cewki *i*-tej dalszy ruch biegnika odbywa się pod wpływem siły przyciągania, wytworzonej przez cewkę *(i+1)*-szą. Gdy biegnik osiągnie środek

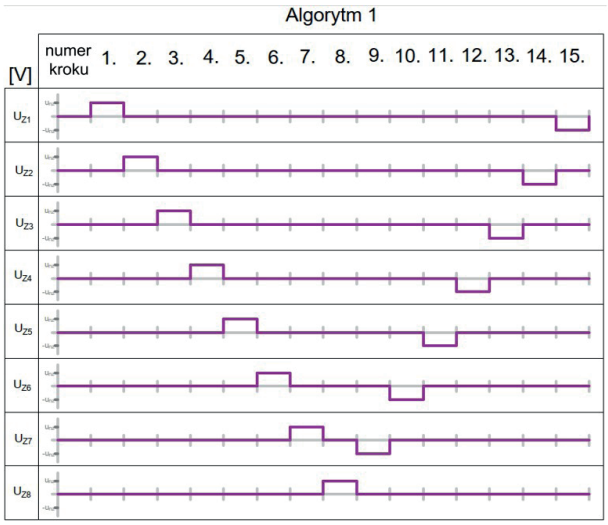
geometryczny cewki (*i+1)*-szej, następuje dezaktywowanie cewki (*i+1)*-szej oraz aktywacja cewki (*i+2)*-ej. Ta sytuacja powtarza się, aż do osiągnięcia przez biegnik końca bieżni, gdzie dokonuje on nawrotu (kończy pierwszą połowę cyklu pracy) i rozpoczyna ruch powrotny. Napędzanie biegnika w drugiej połowie cyklu pracy ma identyczny charakter.

Jak widać, przy napędzaniu biegnika według przyjętej strategii jest pożądana znajomość chwil czasowych, w których biegnik mija środki kolejnych cewek (na rysunku 5 zaznaczonych linią przerywaną). Informacje te są dostarczane przez sensory (np. magnetyczne lub optyczne). Sygnały pochodzące z tych sensorów decydują o chwilach, w których kolejne cewki są zasilane i wyłączane) [2][18]. Cechą charakterystyczną tego sposobu sterowania (wymagającego znajomości chwil czasowych, w których biegnik mija środki kolejnych cewek) jest to, że sygnały sterujące, podawane na kolejne cewki, mają różną długość trwania (określoną na podstawie informacji otrzymywanych z układu sensorów.

Celem mniejszego artykułu jest opracowanie algorytmów sterowania liniowym silnikiem cylindrycznym, które nie wymagają stosowania sensorów. Algorytmy te, należące do kategorii tzw. algorytmów sterowania bezczujnikowego, są formułowane bez znajomości chwil czasowych, w których biegnik mija środki kolejnych cewek. Bazują one na pojęciu przewidywanych (innymi słowy – domniemanych) położeń biegnika.

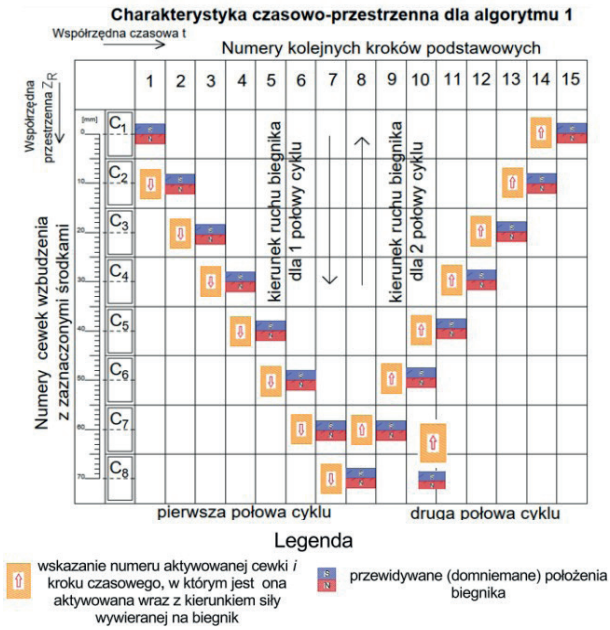
Proponowana przez autorów graficzna metoda pozwala na opracowywanie koncepcji nowych algorytmów sterowania na podstawie przewidywanych (oczekiwanych) położeń biegnika są tzw. charakterystyki czasowo-przestrzenne algorytmów sterowania.

Zaproponowano 3 różne algorytmy sterowania. Pierwszy z nich, najprostszy i podstawowy (opisany jako algorytm sterowania 1), zakłada aktywowanie kolejnych cewek prostokątnymi sygnałami napięciowymi o jednakowej długości trwania. Sposób aktywowania kolejnych cewek zilustrowano za pomocą cyklogramu na rysunku 5, przedstawiającym przebiegi czasowe poszczególnych napięć podawanych na kolejne cewki, począwszy od cewki C1, aż do cewki C8. Długość sygnału sterującego występującego w algorytmie sterowania 1 będziemy nazywać dalej krokiem podstawowym i oznaczać przez Δt (krok podstawowy to – innymi słowy – przedział czasowy o długości czasu trwania Δt). Wprowadzone pojęcie kroku podstawowego Δt będzie wykorzystywane dalej w opisie pozostałych, bardziej złożonych, algorytmów sterowania.



Rys. 5. Cyklogram dla algorytmu sterowania 1 – wartości napięć na cewkach w kolejnych krokach

Sposobowi aktywowania cewek, przedstawionemu na rysunku 5, odpowiada charakterystyka czasowo-przestrzenna uwidoczniona na rysunku 6.

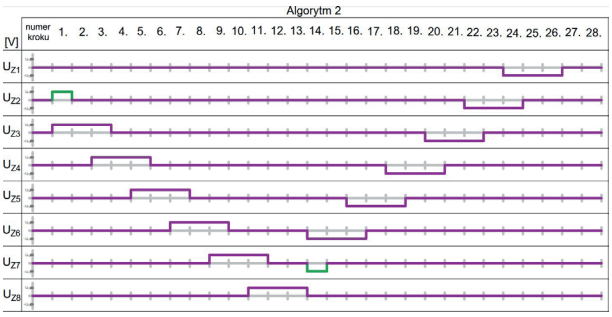


Rys. 6. Charakterystyka czasowo-przestrzenna dla algorytmu sterowania 1

Wiersze charakterystyki odpowiadają kolejnym cewkom wzbudzenia (od cewki C1 do cewki C8). Poszczególne kolumny są związane z numerami kolejnych kroków podstawowych. Liczba kroków podstawowych w algorytmie sterowania 1 wynosi 15. Lewa część charakterystyki odpowiada pierwszej połowie cyklu, zaś prawa połowa – drugiej połowie cyklu. Przy pomocy pomarańczowych prostokątów wskazano, która z cewek (numer wiersza) i w którym kroku (numer kolumny) ma być aktywowana. Strzałki kierunkowości siły (umieszczone w środkach poszczególnych prostokątów pomarańczowych)

są odniesione do kierunku ruchu biegnika. Domniemane (spodziewane) położenia środka biegnika w stosunku do środków poszczególnych uzwojeń wzbudzenia w chwilach przełączeń cewek wzbudzenia są oznaczone niebiesko-czerwonym symbolem magnesu trwałego. Legenda towarzysząca charakterystyce czasowo-przestrzennej algorytmu sterowania 1 z rysunku 6 będzie stosowana dalej w opisie kolejnych proponowanych algorytmów sterowania: algorytmu sterowania 2 i algorytmu sterowania 3.

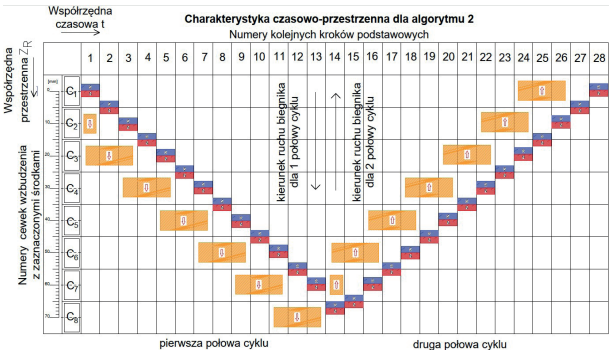
Na podstawie wyników uzyskanych dla algorytmu sterowania 1 (wyniki dla wszystkich 3 proponowanych algorytmów sterowania zostaną omówione wspólnie w kolejnym rozdziale) opracowano algorytm sterowania 2, który zakłada aktywowanie cewek wzbudzenia „na zakładkę” czyli aktywowanie cewki (*i+1*)-szej w trakcie trwania sygnału sterującego dla cewki *i*-tej. Cyklogram ten został przedstawiony na rysunku 7.



Rys. 7. Cyklogram dla algorytmu sterowania 2 – wartości napięć na cewkach w kolejnych krokach

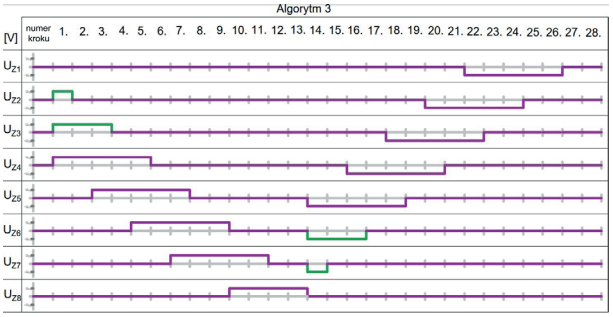
W algorytmie tym liczba kroków podstawowych ulega zwiększeniu do 26. Długość głównego sygnału sterowania w algorytmie sterowania 2 została 3-krotnie wydłużona w stosunku do długości kroku podstawowego. Na początku pierwszego półcyklu oraz na początku drugiego półcyklu pojawiają się dodatkowo sygnały sterujące o długości równej krokowi podstawowemu, które będą określane odpowiednio terminami: sygnałem rozruchu i sygnałem nawrotu (oznaczone kolorem zielonym). Charakterystykę czasowo-przestrzenną przedstawia rysunku 8.

Jak widać na charakterystyce czasowo-przestrzennej, w niektórych krokach czasowych biegnik jest napędzany (wciągany) przez jedną cewkę wzbudzenia, a w niektórych – jednocześnie przez dwie cewki wzbudzenia. Przykładowo, w pierwszym półcyklu biegnik jest napędzany jednocześnie przez dwie cewki wzbudzenia w trakcie trwania kroków podstawowych o numerach 1, 3, 5, 7, 9 i 11. Domniemane (spodziewane) charakterystyczne położenia biegnika wiążą się ze środkami kolejnych cewek oraz ich końcami (końce cewek pokrywają się praktycznie z początkami cewek kolejnych). Wyróżniona liczba położeń biegnika wynosi 28.



Rys. 8. Charakterystyka czasowo-przestrzenna dla algorytmu sterowania 2

W kolejno zaproponowanym algorytmie sterowania 3 dochodzi do sytuacji, w której równocześnie są zasilane 3 cewki: *i-ta*, (*i+1)-sza*, (*i+2)-a*. Wyraźnie widać to na cyklogramie dla algorytmu sterowania 3 przedstawionym na rysunku 9.

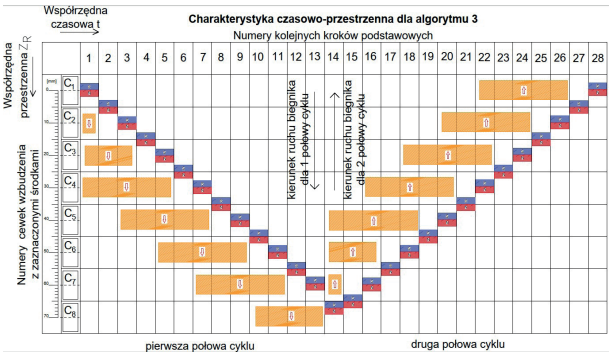


Rys. 9. Cyklogram dla algorytmu sterowania 3- wartości napięć na cewkach w kolejnych krokach

Długość głównego impulsu sterującego w algorytmie sterowania 3 jest 5-krotnie dłuższa od kroku podstawowego. Sygnały sterujące rozruchu i nawrotu o długościach równych odpowiednio długości kroku podstawowego i potrojonego kroku podstawowego, oznaczono kolorem zielonym. Charakterystyka czasowo-przestrzenna, odpowiadająca cyklogramowi dla algorytmu sterowania 3 z rysunku 9, jest przedstawiona na rysunku 10.

W tych krokach podstawowych, w których równocześnie są zasilane 3 cewki, na biegnik oddziałują siły napędzające (wciągające) pochodzące od różnych 3 cewek wzbudzenia. W pozostałych krokach podstawowych biegnik jest napędzany przez dwie cewki wzbudzenia lub – podczas nawrotów – przez jedną cewkę. Liczba kroków podstawowych w algorytmie sterowania 3 wynosi 26. Wyróżnionych jest 28 charakterystycznych spodziewanych (domniemanych) położeń biegnika.

W kolejnym rozdziale zostaną zaprezentowane wyniki badań pomiarowych wszystkich trzech zaproponowanych algorytmów sterowania.



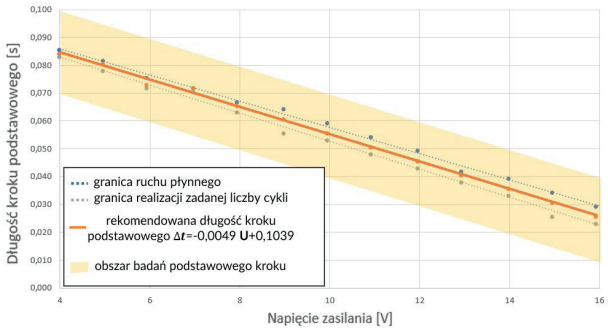
Rys. 10. Charakterystyka czasowo-przestrzenna dla algorytmu sterowania 3

Badania pomiarowe algorytmów sterowania i ich porównanie

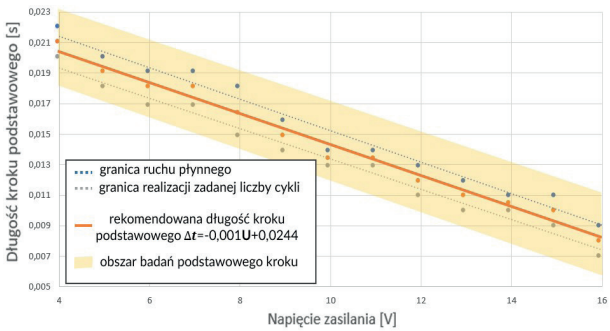
Omówione w poprzednim rozdziale 3 algorytmy sterowania zaimplementowano w układzie sterowania prototypowego liniowego silnika cylindrycznego, opisanego w rozdziale 1. Postanowiono poddać badaniom wszystkie 3 proponowane algorytmy przy amplitudach napięć zasilających, zmieniających się od wartości 4V do wartości 16V, co 1V. Każdy algorytm przy każdej przyjętej wartości amplitudy napięcia zasilającego badano, zmieniając w szerokich granicach długość kroku podstawowego Δt.

Do układu sterowania liniowego silnika cylindrycznego wpisano zadaną (jednakową dla wszystkich algorytmów) liczbę cykli równą 30 (n=30). Po uruchomieniu każdego algorytmu śledzono z pomocą układu pomiarowego (wyposażonego w szybką kamerę) ruch biegnika. Po zakończeniu realizacji algorytmu z założonym krokiem podstawowym o długości Δt sprawdzano w pierwszej kolejności to, czy silnik zrealizował zadaną liczbę kroków wynoszącą 30. Jeśli liczba ta była mniejsza od 30 i wynosiła np. 28 lub 29 cykli, uznawano, że przy przyjętej długości kroku algorytm nie może być wykorzystany. Próbę powtarzano kilkakrotnie. Jeśli przy realizacji algorytmu przy określonym kroku Δt ruch biegnika tracił płynność (pojawiały się duże nierównomierności prędkości biegnika i efekt „szarpania" biegnikiem) również uznawano, że przy przyjętej długości kroku algorytm nie może być zakwalifikowany do wykorzystania (płynność lub brak płynności biegnika oceniano wzrokowo na obiekcie rzeczywistym oraz dodatkowo na podstawie analizy zarejestrowanego obrazu – jest oczywiste, że ocena ta ma charakter subiektywny i musi być w przyszłości sformalizowana i zobiektywizowana).

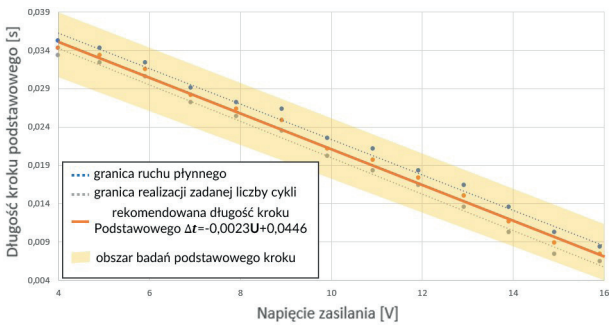
Wyniki przeprowadzonych badań dla algorytmów sterowania: algorytmu sterowania 1, algorytmu sterowania 2, algorytmu sterowania 3 oraz dla wszystkich 13 rozpatrywanych amplitud napięć zasilania (U=4V, 5V, 6V … 14V, 15V, 16V) są przedstawione odpowiednio na rysunkach 11, 12 i 13.



Rys. 11. Wyniki badań pomiarowych dla algorytmów sterowania 1 przy różnych napięciach zasilania



Rys. 12. Wyniki badań pomiarowych dla algorytmów sterowania 2 przy różnych napięciach zasilania



Rys. 13. Wyniki badań pomiarowych dla algorytmów sterowania 3 przy różnych napięciach zasilania

Każda otrzymana krzywa pokazuje zależność długości kroku podstawowego od napięcia zasilania. Obszar przeprowadzonych badań długości podstawowego kroku zaznaczono kolorem żółtym. Dolna granica satysfakcjonujących prób (wyróżniona kolorem szarym) to granica poprawnej realizacji zadanej liczby cykli (czyli wykonania 30 zadanych cykli). Górna granica (wyróżniona kolorem niebieskim) to granica ruchu płynnego. Rekomendowaną długość kroku podstawowego wyznaczono jako średnią z długości kroków podstawowych przy danym napięciu, leżących na granicy poprawnej realizacji zadanej liczby cykli oraz granicy ruchu płynnego. Łącząc te punkty otrzymano linie proste, które można opisać analitycznie funkcjami liniowymi.

Rekomendowana długość kroku podstawowego w algorytmie sterowania 1 w zależności od amplitudy napięcia zasilania U opisana jest wzorem:

(2) $$\Delta t = -0{,}0049U + 0{,}1039$$

Odpowiednio dla algorytmu sterowania 2 otrzymujemy wzór:

(3) $$\Delta t = -0{,}001U + 0{,}0244$$

zaś dla algorytmu sterowania 3 – wzór:

(4) $$\Delta t = -0{,}0023U + 0{,}0446$$

Jak wynika z rysunków 11, 12 i 13, im wyższe napięcie, tym mniejsza długość kroku podstawowego. Długości rekomendowanych kroków w funkcji amplitudy napięcia zasilania zestawiono razem na rysunku 14. Kąty nachylenia prostych dla algorytmów 1, 2, 3 to odpowiednio: $\alpha = 28°$, 13° i 6°.

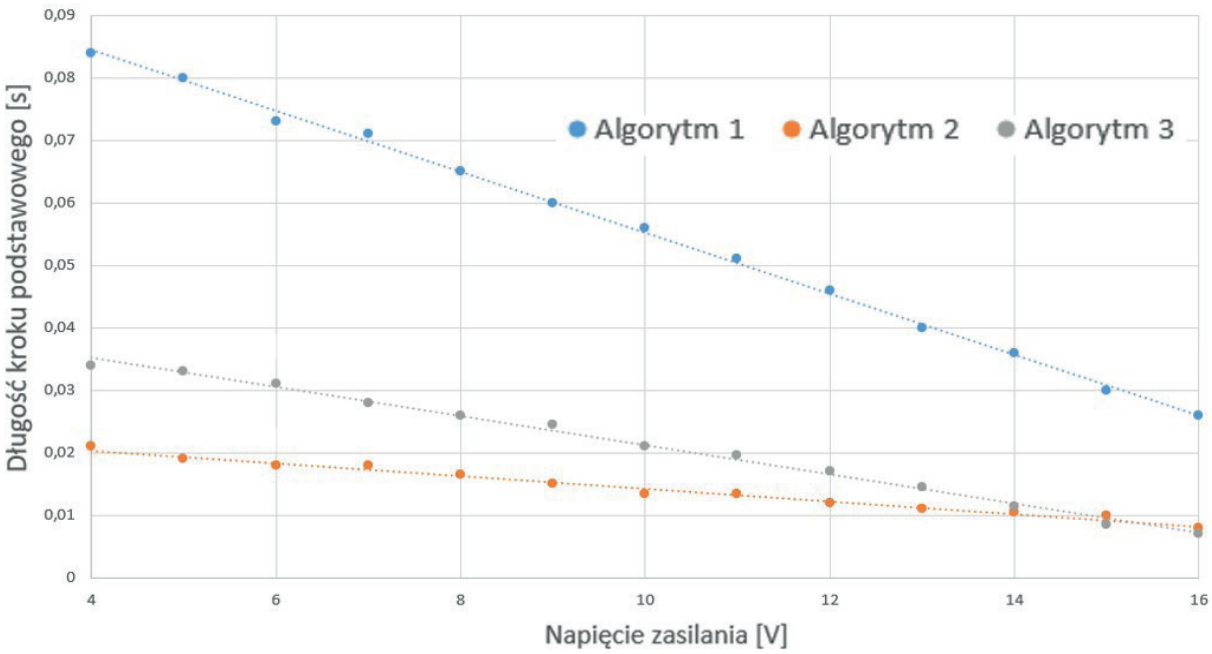
Należy zwrócić uwagę, że przeprowadzone badania były realizowane na biegu jałowym silnika, a więc przy biegniku nieobciążonym siłą użyteczną. Obciążenie biegnika stanowi wyłącznie moment tarcia i moment oporu aerodynamicznego (moment ten oszacowano na około 0.12N). W toku dalszych prac badawczych funkcje opisujące krok rekomendowany dla poszczególnych algorytmów, będą musiały być uzupełnione o dodatkowy składnik sumy, zależny od użytecznego momentu obciążenia. Wstępne badania wskazują na to, że długości kroków podstawowych mogą ulec wydłużeniu do około 30% przy pełnym obciążeniu.

Wszystkie wyniki badań zestawiono dodatkowo w Tabeli 1, w której dla każdego algorytmu i każdej amplitudy zasilania podano długość rekomendowanego kroku podstawowego Δt_r oraz średni czas trwania pojedynczego cyklu pracy $T_{śr}$ i średnią prędkość ruchu biegnika $V_{śr}$.

Zakres regulacji dla podstawowego (najprostszego) algorytmu sterowania 1 jest najwęższy i wynosi od 0,11[m/s] do 0,36[m/s]. Z rysunku 16 wynika również, że w zakresie prędkości od 0,36[m/s] do 0,65[m/s] możliwe jest wykorzystanie zarówno algorytmu sterowania 1, jak i algorytmu sterowania 2. W zakresie prędkości od 0,25[m/s] do 0,36[m/s] możliwe jest sterowanie silnikiem przy pomocy każdego z proponowanych algorytmów. Oczywiście, algorytmy te będą wykorzystywały różne zakresy napięć: dla algorytmu sterowania 1 będzie to zakres od 11V do 16V, dla algorytmu sterowania 2 – od 4V do 7V, zaś dla algorytm sterowania 3 – od 5,5V do 7,5V.

Na podstawie danych zawartych w Tabeli 1 sporządzono wykresy średnich prędkości biegnika $V_{śr}$ w funkcji napięcia zasilania cewek wzbudzenia U, uzyskiwanych przy rekomendowanej długości kroku podstawowego $\Delta V_{śr}$.

Jak widać na rysunku 15, uzyskiwane zakresy prędkości biegnika są różne przy różnych algorytmach sterowania i wynoszą: $\Delta n_1 \in (0{,}11;\ 0{,}36)$[m/s] dla algorytmu sterowania 1, $\Delta n_2 \in (0{,}25;\ 0{,}65)$[m/s] dla algorytmu sterowania 2 oraz $\Delta n_3 \in (0{,}17;\ 0{,}83)$[m/s] dla



Rys. 14. Zestawienie funkcji długości rekomendowanych kroków w zależności od amplitudy napięcia zasilania dla algorytmów 1, 2 i 3

Tabela 1 Krok podstawowy *Δt*, *okres T oraz prędkość średnia* $V_{śr}$ dla algorytmów 1, 2 i 3 przy różnych napięciach zasilania cewek wzbudzania

	Algorytm sterowania 1			Algorytm sterowania 2			Algorytm sterowania 3		
Napięcie zasilania [V]	**Krok podstawowy** *Δt* **[s]**	*Okres T* **[s]**	*Prędkość średnia* $V_{śr}$ **[m/s]**	**Krok podstawowy** *Δt* **[s]**	*Okres T* **[s]**	*Prędkość średnia* $V_{śr}$ **[m/s]**	**Krok podstawowy** *Δt* **[s]**	*Okres T* **[s]**	*Prędkość średnia* $V_{śr}$ **[m/s]**
16	0,026	0,390	0,3590	0,008	0,216	0,6481	0,007	0,168	0,8333
15	0,030	0,450	0,3111	0,010	0,270	0,5185	0,009	0,204	0,6863
14	0,036	0,540	0,2593	0,011	0,284	0,4938	0,012	0,276	0,5072
13	0,040	0,600	0,2333	0,011	0,297	0,4714	0,015	0,348	0,4023
12	0,046	0,690	0,2029	0,012	0,324	0,4321	0,017	0,408	0,3431
11	0,051	0,765	0,1830	0,013	0,365	0,3841	0,020	0,468	0,2991
10	0,056	0,840	0,1667	0,014	0,365	0,3841	0,021	0,504	0,2778
9	0,060	0,900	0,1556	0,015	0,405	0,3457	0,025	0,588	0,2381
8	0,065	0,975	0,1436	0,017	0,446	0,3143	0,026	0,624	0,2244
7	0,071	1,065	0,1315	0,018	0,486	0,2881	0,028	0,672	0,2083
6	0,073	1,095	0,1279	0,018	0,486	0,2881	0,031	0,744	0,1882
5	0,080	1,200	0,1167	0,019	0,513	0,2729	0,033	0,792	0,1768
4	0,084	1,260	0,1111	0,021	0,567	0,2469	0,034	0,816	0,1716

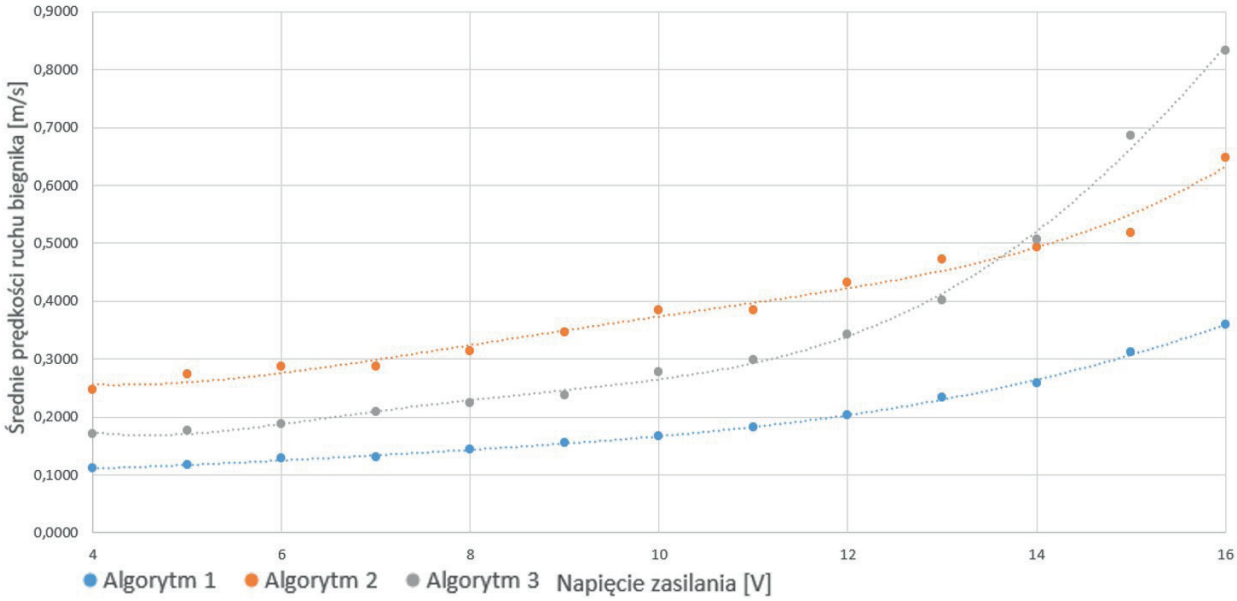
algorytmu sterowania 3. Te zakresy regulacji zestawiono razem w sposób graficzny na rysunku 16.

Algorytm sterowania 3 oferuje najszerszy zakres regulacji, obejmujący przedział od 0,17[m/s] do 0,83[m/s]. Zakres regulacji dla algorytmu sterowania 2 obejmuje przedział od 0,25[m/s] do 0,65[m/s].

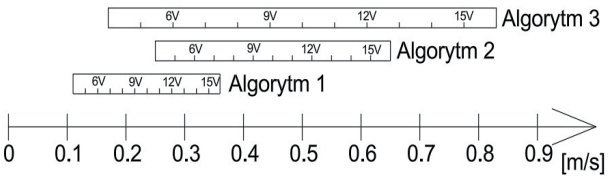
Podsumowanie

Zaprojektowano i zbudowano prototyp liniowego silnika cylindrycznego z magnesem trwałym jako biegnikiem, jak też opracowano dla niego i uruchomiono układ sterowania i zasilania z mikrokomputerem Raspberry Pi 4 model B i czterema układami scalonymi L298. Badania silnika były prowadzone na stanowisku pomiarowym wyposażonym w system wizyjny (szybką kamerę).

Głównym celem artykułu było porównanie różnych algorytmów bezczujnikowego sterowania liniowym silnikiem cylindrycznym. Proponowane algorytmy zakładają wykorzystanie w procesie sterowania pojedynczych cewek wzbudzenia, jak też równocze-



Rys. 15. Uzyskiwane prędkości ruchu biegnika przy różnych wartościach napięć zasilania cewek wzbudzenia (zmienianych od 4V do 16V) dla algorytmów sterowania 1, 2 i 3



Rys. 16 Zakresów regulacji prędkości biegnika dla algorytmów sterowania 1, 2 i 3

snego wykorzystania dwóch lub trzech cewek wzbudzenia. Opisano metodykę doboru długości podstawowego kroku sterowania, która wymaga znajomości granicy poprawnej realizacji zadanej liczby cykli oraz granicy ruchu płynnego. Dokonano porównania wszystkich algorytmów sterowania z punktu widzenia zakresu regulacji prędkości biegnika. Opracowano oryginalną graficzną metodę opisu działania poszczególnych algorytmów w postaci tak zwanych charakterystyk czasowo-przestrzennych. Charakterystyki te są bardzo użyteczne przy opracowywaniu nowych algorytmów sterowania.

Analiza porównawcza zostało przeprowadzona na podstawie wyników badań pomiarowych, na przykładzie zaprojektowanego i skonstruowanego prototypu silnika liniowego.

Przyjęto: 30.09.2025, **zaakceptowano:** 24.10.2025, **opublikowano:** 24.11.2025

LITERATURA

[1] Bartel S., Algorytm sterowania napędu mikropompy pulsacyjnej,. Informat. Autom. Pomiary Gosp. Ochr. Środ., (2016) z. 3, s. 60-63.
[2] Bartel S., Elektromagnetyczna pompa o programowalnej charakterystyce wydajności z synchronicznym silnikiem liniowym o magnesach trwałych, rozprawa doktorska, promotor – prof. dr hab. inż. K. Kluszczyński, Politechnika Krakowska, (2023) Kraków.
[3] Bartel S., Modeling of the artificial blood chamber and the micropumps pulsatile drive for blood transfusion, Informat. Autom. Pomiary Gosp. Ochr. Środ. (2017) 7, no. 4 s. 79-81, DOI:10.5604/01.3001.0010.7367.
[4] Bartel S., Pilch Z., Trawiński T., Field modelling of several electromagnetic drive variants of the micropump blood transfusion device, Innovations in biomedical engineering. Springer International Publishing, (2018) s. 141-149.
[5] Bartel S., Kluszczyński K. Analytical model of a cylindrical linear modul with permanent magnet based on approximation functions, Archives of electrical engineering (2025) vol. 74(1).
[6] Chengjun L., Jianfei S., Yifei Z., Jing Sh., Theoretical Analysis and Structural Optimization of Ultrathin Permanent Magnet Linear Array Motor. International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). (2023) IEEE
[7] Chuibing H., Zhaolong S., Yinhao M., Guangyong J., Rongtao Z., Anmin D., Wei L.. Parameter Calculation Method of Large Thrust Short Primary Linear Induction Motor. China International Electrical and Energy Conference (CIEEC). (2022) IEEE.
[8] Di J., Chen H., Chen H., Fletcher J. E., Meng L., Design of Line-Start Permanent Magnet Linear Synchronous Motors With Transient Optimisation IEEE transactions on industry applications (2025) vol. 61, no. 1.
[9] Domin J., Kluszczyński K. , Hybrid pneumatic-electromagnetic launcher - general concept, mathematical model and results of simulation, Prz. Elektrot. (2013) R. 89 nr 12
[10] Fengpi L., Hui C., Zhigang J., Yijing Z., Magnetic and force performance analysis of tubular linear motor with two halbach topologies, Chinese Control and Decision Conference (CCDC). (2016)IEEE.
[11] Jiang Z.. Research on normal force of linear induction motor based on Ansoft, 3rd International Conference on Energy and Electrical Power Systems (ICEEPS) (2024) IEEE.
[12] Klupa T., Szewczyk A., Leczenie osobistą pompą insulinową, PZWL Wydawnictwo Lekarskie,. (2015) ISBN: 9788320049749.
[13] Li J., Zuo Z., Zuo Z., Jia B., Feng H., Mei B., Smallbone A., Roskilly A. P.. Operating characteristics and design parameter optimization of permanent magnet linear generator applied to free-piston energy converter, Energy (2024) 287, 129687.
[14] Li M., Ngwaka U., Korbekandi R. M., Baker N., Wu D., Tsolakis A..A closed-loop linear engine generator using inert gases: A performance and exergy study. Energy (2023) 281, 128278.
[15] Pareek A., Pulsacyjny system podawania leków, KS Omni-Scriptum Publishing,. (2021)EAN:9786203065718.
[16] Tofilski P., Kluszczyński K. Koncepcja i budowa laboratoryjnego modelu pompy wyposażonej w elastyczną membranę ferromagnetyczną napędzaną za pomocą wzbudnika elektromagnetycznego. Prz. Elektrot. (2024) R100 nr 8
[17] Xu N., Tianda Y., Lu Z., Qingzhao L., Siyu H., Yanting L., Hao W., Yuan T.. Research on Cylindrical Linear Induction Motor for Drive Mechanism. International Symposium on Linear Drives for Industry Applications (LDIA). (2023) IEEE
[18] Yong-Lin K., Pin-Lin Ch.. Precision Position Control of a Permanent Magnet Linear Synchronous Motor Using Advanced PID Control, International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC). (2025) IEEE.