

# Badania silnika liniowego solenoidalnego

## Experimental research on linear solenoid motor

JAN KOSMOL\*

DOI: 10.17814/mechanik.2015.10.515

Prezentowano wybrane wyniki badań eksperymentalnych liniowego silnika solenoidalnego. Zaprezentowano zależność błędów pozycjonowania od wysuwu suwaka i od prędkości silnika, a także zależność siły napędowej od prędkości ruchu silnika. Otrzymane wyniki badań porównano z danymi katalogowymi silnika – stwierdzono występowanie znaczących różnic w zakresie właściwości eksploatacyjnych takich napędów.

**SŁOWA KLUCZOWE:** silnik liniowy solenoidalny, błąd pozycjonowania, siła napędowa

*The paper presents some selected results of experimental tests carried out on linear solenoid motor. Occurrence of positioning errors is shown against motor speed and extension of motor rod. Also explained is the relation between driving force and motor speed. It is positively found out that obtained test data are considerably varying from those specified in the catalogue.*

**KEYWORDS:** linear solenoid motor, positioning, driving force

Rozwój mechatroniki nie byłby możliwy bez postępu w rozwoju napędów, zwłaszcza że rzadko spotyka się urządzenia mechatroniczne, w których nic się nie porusza. Co więcej, miniaturyzacja takich urządzeń wymaga także małogabarytowych napędów.

W [2+6] przedstawiono powszechnie spotykane napędy elektryczne, często znajdujące zastosowanie w urządzeniach mechatronicznych. Wspólnymi cechami tych napędów są: stosunkowo duże gabaryty, zazwyczaj duże moce (rzędu kilkuset W i więcej), obrotowy ruch napędowy (z wyjątkiem silników liniowych), wysoka cena (w przypadku możliwości sterowania prędkością w szerokim zakresie).

Niewiele jest natomiast napędów liniowych, które pozwalają na realizowanie stosunkowo niedużych, lecz precyzyjnych ruchów (przemieszczeń), mają moc rzędu kilkudziesięciu W i nadają się do małogabarytowych urządzeń mechatronicznych (gdzie wymagana jest stosunkowo wysoka precyzja pozycjonowania). Przykładem takiego napędu jest silnik liniowy solenoidalny. Wydaje się on idealnym rozwiązaniem, gdy maksymalne przemieszczenia mieszczą się w przedziale od kilku do kilkudziesięciu mm, maksymalne prędkości liniowe wynoszą do 1 m/s, a dokładność pozycjonowania pozostaje na poziomie setnych części mm. Należy jednak zauważyć, że siły napędowe są stosunkowo małe – rzędu kilkunastu do kilkudziesięciu N.

### Silnik solenoidalny

Przedmiotem artykułu są badania właściwości eksploatacyjnych silnika solenoidalnego. Silniki solenoidalne należą do grupy napędów elektromagnetycznych, w których wykorzystuje się pole magnetyczne wytworzone przez prąd przemienny przepływający przez uzwojenia cewki o indukcyjności  $L$ . Natężenie tego pola jest wprost proporcjonalne do wielkości prądu (jego amplitudy) i liczby zwojów cewki, a odwrotnie proporcjonalne do reluktancji cewki:

$$\phi(t) = BS = \frac{\mu Ni}{l} S = \frac{Ni}{X_L(l_x)} \quad (1)$$

gdzie:  $\phi(t)$  – strumień magnetyczny wytworzony przez cewkę,  $B$  – indukcja magnetyczna wewnątrz cewki,  $S$  – pole przekroju poprzecznego cewki,  $i$  – natężenie prądu przemiennego płynącego przez uzwojenia cewki,  $N$  – liczba uzwojeń cewki,  $l$  – długość cewki,  $\mu$  – przenikalność magnetyczna wewnątrz cewki,  $X_L$  – reluktancja obwodu zamkniętego cewki.

Na rys. 1 przedstawiono schemat klasycznego silnika solenoidalnego. Strumień magnetyczny  $\phi$  wytworzony przez prąd płynący przez uzwojenia cewki zamyka się przez zworę i szczelinę powietrzną  $l_x$ , której opór magnetyczny ma decydujący wpływ na reluktancję  $X_L(l_x)$  cewki i tym samym na wielkość prądu.

W wyniku przepływu prądu przez cewkę i wytworzenia strumienia magnetycznego na zworę silnika działa – zgodnie z prawem Maxwella – siła elektromagnetyczna  $F$ :

$$F = f [i, N, X_L(x, \mu), T] \quad (2)$$

gdzie:  $F$  – siła elektromagnetyczna,  $T$  – temperatura (wpływa na reluktancję cewki).

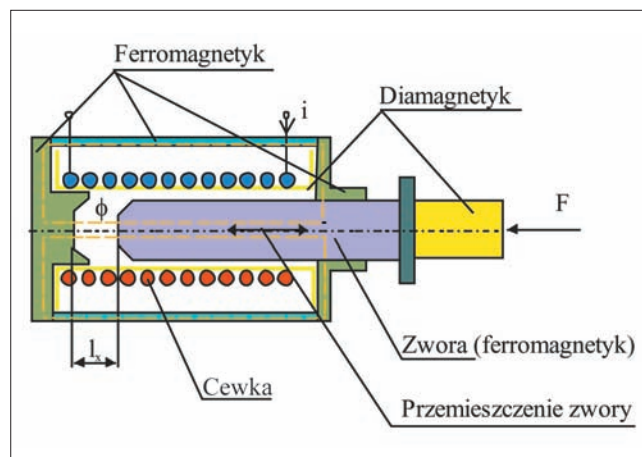
Siłę elektromagnetyczną dla omawianego silnika solenoidalnego można w przybliżeniu wyznaczyć z zależności [1]:

$$F(l_x, i) = 0,5 \mu_0 \frac{N^2 S}{l_x^2} i^2 \quad (3)$$

gdzie  $\mu_0$  – przenikalność magnetyczna próżni.

Wielkością siły elektromagnetycznej można więc sterować przez zmianę amplitudy prądu przemiennego, natomiast czułością (współczynnikiem wzmocnienia) – przez zmianę szczeliny  $l_x$  (jej zmniejszenie pozwala uzyskać większą siłę dla tej samej amplitudy prądu).

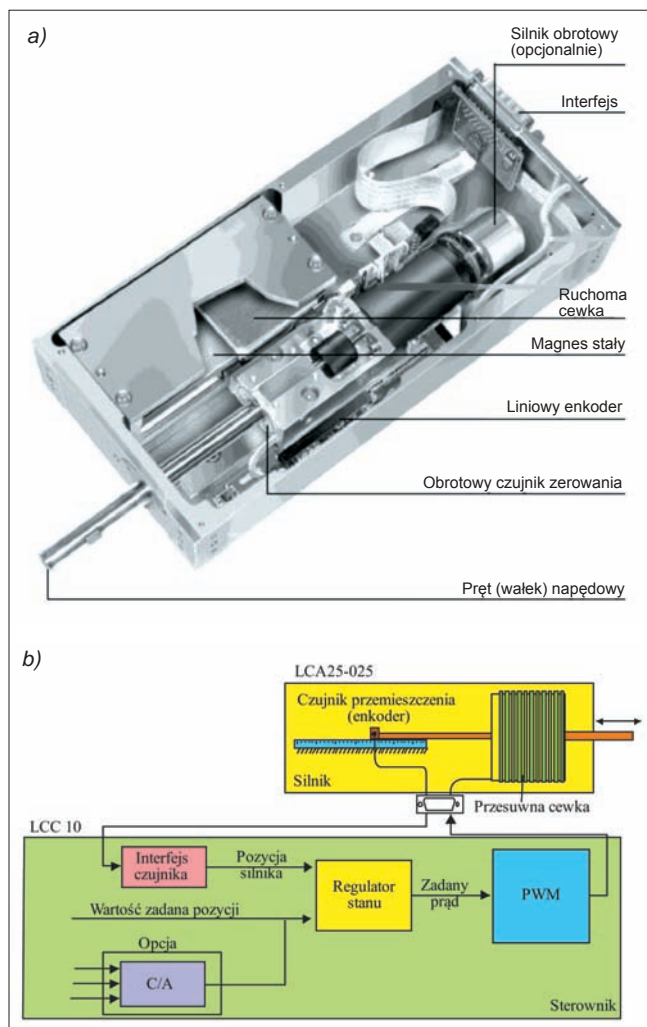
Prezentowany na rys. 1 schemat silnika solenoidalnego liniowego jest jednym z możliwych rozwiązań konstrukcyjnych. Istnieją również silniki solenoidalne z odwróconą zasadą działania, tzn. mające nieruchome rdzeń i ruchomą cewkę. Do ich zalet należy przede wszystkim zaliczyć dużo lepsze właściwości dynamiczne, wynikające stąd, że masa cewki jest na ogół mniejsza od masy ruchomego rdzenia.



Rys. 1. Schemat silnika solenoidalnego z ruchomym rdzeniem [1]

\* Prof. dr hab. inż. Jan Kosmol (jan.kosmol@polsl.pl) – Politechnika Śląska

Takich cewek może być więcej i wtedy siła napędowa jest odpowiednio większa. Silnik solenoidalny liniowy typu SMAC LCA25-025 [10], będący przedmiotem badań, ma dwie ruchome cewki (rys. 2).



Rys. 2. Silnik solenoidalny typu SMAC LCA25-025 z ruchomą cewką: a) widok silnika, b) schemat silnika wraz z układem sterowania [9]

### Opis przedmiotu badań [8]

Parametry eksploatacyjne silnika typu SMAC LCA25-025 są następujące:

- maksymalna siła elektromagnetyczna – do 9,2 N,
- składowa stała siły elektromagnetycznej – do 3,6 N,
- maksymalny skok silnika – do 25 mm,
- najmniejszy możliwy skok – 5  $\mu$ m,
- rozdzielczość enkodera – 5  $\mu$ m,
- stała silnika – 3 N/A,
- maksymalny prąd – do 3 A,
- masa ruchomych elementów – 0,08 kg,
- napięcie zasilające – 48 V.

Silnik solenoidalny może działać w układzie otwartym, jednak na ogół pracuje w układzie zamkniętym ze sprzężeniem zwrotnym. Z silnikiem LCA25-025 zintegrowany jest liniowy enkoder do pomiaru przemieszczeń suwaka napędowego. Dzięki rozdzielczości enkodera wynoszącej 5  $\mu$ m pozycjonowanie teoretycznie może się odbywać z dokładnością do 5  $\mu$ m. Zasilanie i sterowanie silnika wymagają odpowiedniego sterownika – w tym przypadku sterownika typu SMAC LLC 10, charakteryzującego się:

- jednoosiowym wzmacniaczem LCA25-025, umożliwiającym zasilanie i sterowanie silnikiem,
- możliwością pracy w trybie sterowania przemieszczeniem, prędkością lub siłą napędową,

- komunikacją z silnikiem i nadrzędnym komputerem PC przez RS232,
  - interfejsami wyjściowymi IEEE 802.3 (Ethernet),
  - maksymalnym prądem wyjściowym wynoszącym 2 A.
- Badania podstawowych charakterystyk tego silnika przeprowadził – w ramach pracy dyplomowej – Błasiński [7, 8].

### Schemat stanowiska badawczego

Na rys. 2b pokazano schematycznie silnik solenoidalny i jego sterowanie. W układzie sterowania występuje klasyczny regulator, natomiast sterowanie prądem silnika odbywa się za pośrednictwem modułu PWM (*power width modulation*), czyli przez sterowanie szerokością impulsów prądowych.

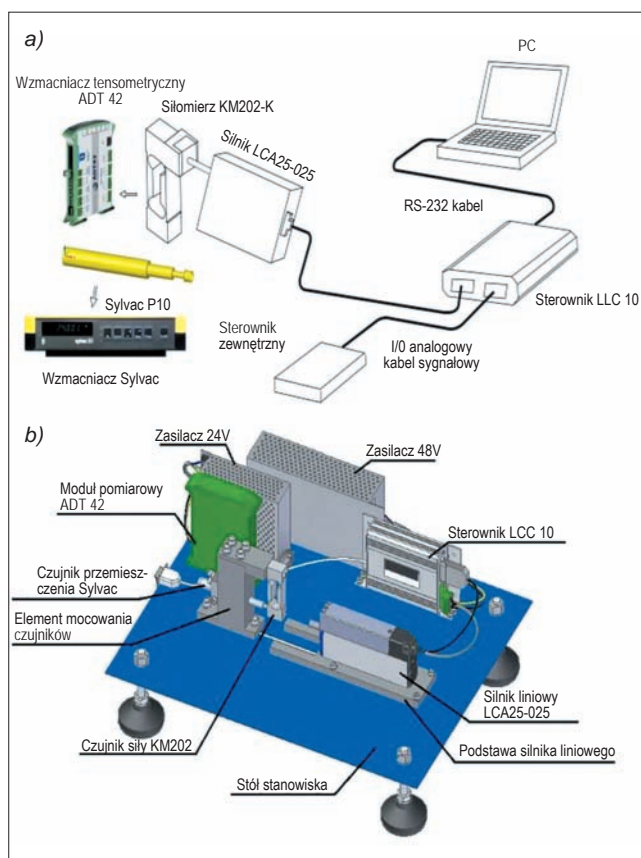
Schemat stanowiska badawczego przedstawia rys. 3a. Składa się ono z:

- silnika LCA25-025,
- sterownika LLC 10,
- komputera sterującego PC,
- czujnika siły typu KM202-K 10 N,
- wzmacniacza tensometrycznego typu ADT 42,
- indukcyjnego czujnika przemieszczenia Sylvac P10,
- wzmacniacza Sylvac.

Ponadto do sterowania pracą silnika można użyć, wykorzystując wejścia i wyjścia sterownika LLC 10, zewnętrznego sterownika.

Podczas badań wyznaczano m.in. charakterystykę silnika w układzie „siła zadana – siła rzeczywista”, dlatego na schemacie stanowiska badawczego zaznaczono także siłomierz tensometryczny typu KM202-K o zakresie pomiarowym do 10 N, który posłużył do pomiaru siły rzeczywistej.

Gdy suwak silnika naciska bezpośrednio na belkę siłomierza, wywołuje jej odkształcenie oraz zmianę oporności naklejonych na niej tensometrów. Tensometry połączone w układzie mostka są zasilane ze wzmacniacza typu ADT 42, z którego sygnał wyjściowy (sygnał napięciowy) stanowi miarę odkształceń tensometrów i tym samym miarę siły wytwarzanej przez silnik.



Rys. 3. Stanowisko badawcze: a) schemat [9], b) techniczna realizacja [8]

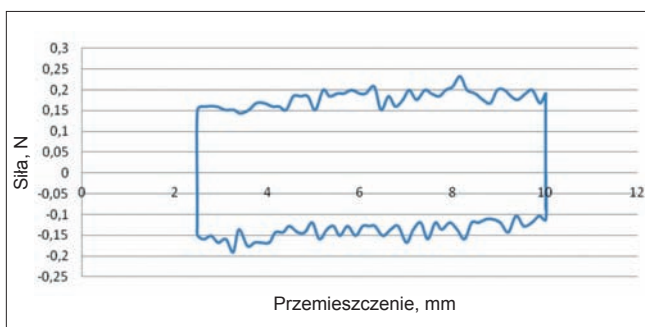
Aby móc zrobić użytek z takiego pomiaru siły, konieczna jest znajomość stałej siłomierza – w omawianym przypadku wynosi ona 1,0279 mV/V. Przed wykonaniem pomiarów przeprowadzono jednak dwupunktową kalibrację siłomierza, tzn. obciążano go dwoma znanymi siłami, odczytano wskazania na jego wyjściu i wyznaczono rzeczywistą stałą siłomierza (wyrażoną w N/V) jako iloraz różnic sygnałów (sił zmierzonych i zadanych).

Ponadto wyznaczono charakterystykę sterowania silnika – jako zależność przemieszczenia zadanego od faktycznie zrealizowanego. Do pomiaru rzeczywistego przemieszczenia można było wykorzystać wewnętrzny enkoder liniowy, który pełni rolę sprzężenia zwrotnego położeniowego (zob. rys. 2), jednak jego czułość pomiarowa wynosi zaledwie 5  $\mu\text{m}$ . Z tego względu wykorzystano zewnętrzny, indukcyjny czujnik przemieszczenia Sylvac P10 (pokazany na rys. 3) o rozdzielczości sięgającej 1  $\mu\text{m}$ , pozwalający na znacznie dokładniejsze wyznaczenie charakterystyki sterowania.

### Wyniki badań silnika solenoidalnego [7, 8]

■ **Badanie siły tarcia.** W wyniku przemieszczania się niektórych elementów silnika (m.in. suwaka) powstaje w nim siła tarcia – jej wartość pozwala na ocenę możliwej do uzyskania siły napędowej. Jej zmierzenie jest możliwe poprzez pomiar poboru prądu przez silnik (trzeba znać jego stałą prądową).

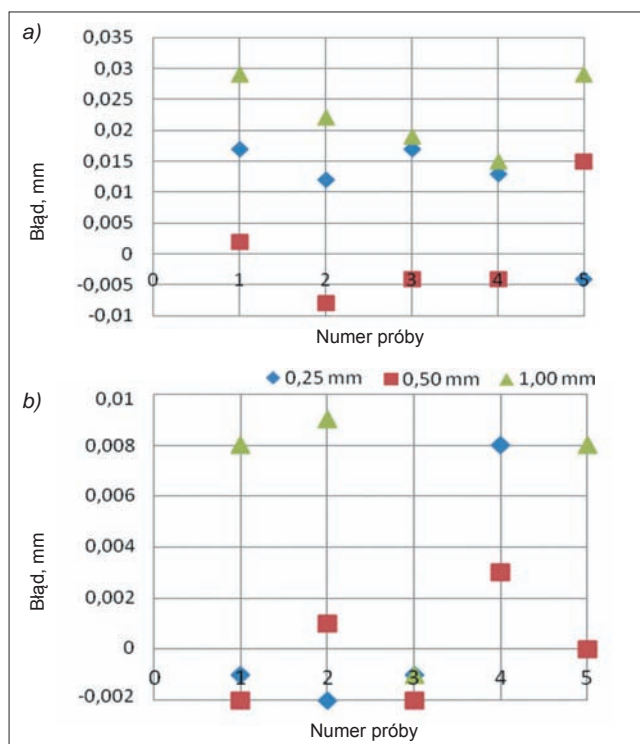
Na rys. 4 przedstawiono przykładowy przebieg siły tarcia podczas ruchu suwaka w obie strony ze stałą prędkością 2,5 mm/s. Można zauważyć, że podczas zmiany kierunku ruchu suwaka następuje skokowa zmiana wartości siły (o ok. 0,3 N), co jest charakterystyczne dla zjawiska tarcia. Jak widać, siła tarcia wzrasta w miarę wysuwania się suwaka silnika.



Rys. 4. Przebieg siły tarcia podczas ruchu suwaka w obie strony z prędkością 2,5 mm/s

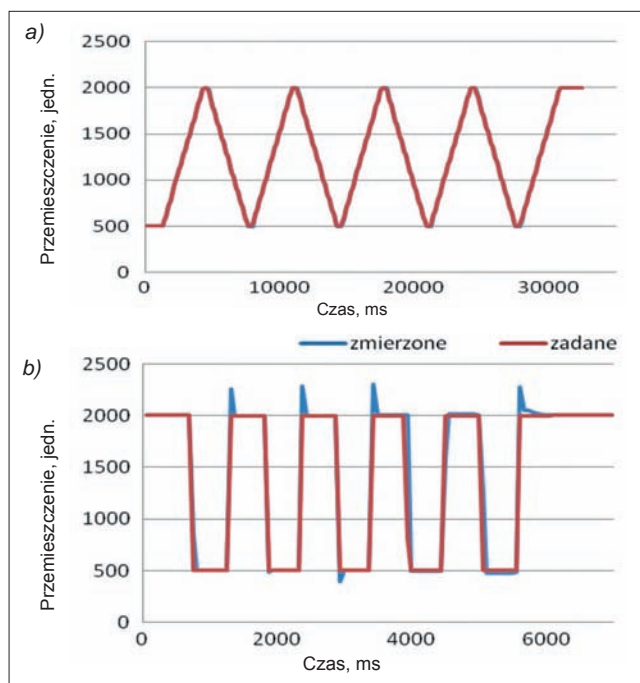
■ **Badanie dokładności pozycjonowania.** Badanie to polegało na ocenie osiągnięcia zadanej pozycji (testy przeprowadzono dla trzech zadanych pozycji: 0,25 mm, 0,5 mm i 1 mm), dla ruchu umownie nazwanego ruchem w prawo (dla wysunięcia suwaka) i dla ruchu w lewo (ruchu powrotnego). Pozycjonowanie odbywało się z użyciem zabudowanego enkodera, natomiast do kontroli dokładności pozycjonowania wykorzystano czujnik przemieszczeń Sylvac.

Na rys. 5 pokazano błędy pozycjonowania na odcinkach 0,25 mm, 0,5 mm i 1 mm. W tym przypadku błąd jest rozumiany jako różnica wskazań czujnika Sylvac (przyrządu wzorcowego) i wskazań enkodera zabudowanego w silniku solenoidalnym. Podczas wysuwania się suwaka największy błąd pozycjonowania nie przekraczał 30  $\mu\text{m}$ , a średni błąd z pięciu pomiarów nie był większy niż 23  $\mu\text{m}$ . W przypadku ruchu powrotnego maksymalny błąd nie przekraczał 8  $\mu\text{m}$ , a średni – 3  $\mu\text{m}$ . Zważywszy, że enkoder pozwala na pomiar z rozdzielczością 5  $\mu\text{m}$ , średni błąd pozycjonowania podczas wysuwania się suwaka jest równy 4–5-krotności rozdzielczości enkodera (a więc jest stosunkowo duży), a podczas wsuwania się suwaka – mieści się w zakresie rozdzielczości enkodera (zatem jest akceptowalny).



Rys. 5. Błąd pozycjonowania na drodze 0,25 mm, 0,5 mm, 1 mm dla pięciu testów: a) podczas wysuwania się suwaka, b) podczas wsuwania się suwaka

■ **Badanie wpływu prędkości na dokładność pozycjonowania.** Na dokładność pozycjonowania suwaka silnika istotny wpływ ma również prędkość ruchu. W tym celu pomiary opisane w poprzednim punkcie powtórzono dla prędkości z zakresu 2,5÷2500 mm/s. Obok pomiarów przemieszczeń za pomocą czujnika Sylvac i enkodera rejestrowano czasowy przebieg siły napędowej (w rzeczywistości mierzono prąd silnika i odpowiednio go przeliczano na wielkość siły). Na rys. 6 pokazano przebiegi przemieszczenia dla dwóch prędkości: 2,5 i 2500 mm/s. Wniosek płynący z analizy tych wykresów jest jednoznaczny: wzrost prędkości prowadzi do przeregulowań (przekraczania) zadanej pozycji, co nie w każdym przypadku jest dopuszczalne.

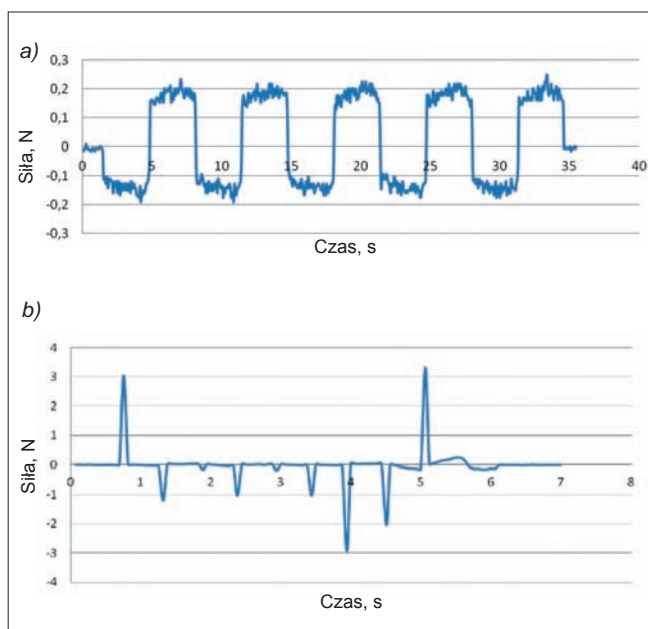


Rys. 6. Przykładowe przebiegi przemieszczenia (1 jednostka przemieszczenia odpowiada 0,005 mm) dla prędkości: a) 2,5 mm/s, b) 2500 mm/s

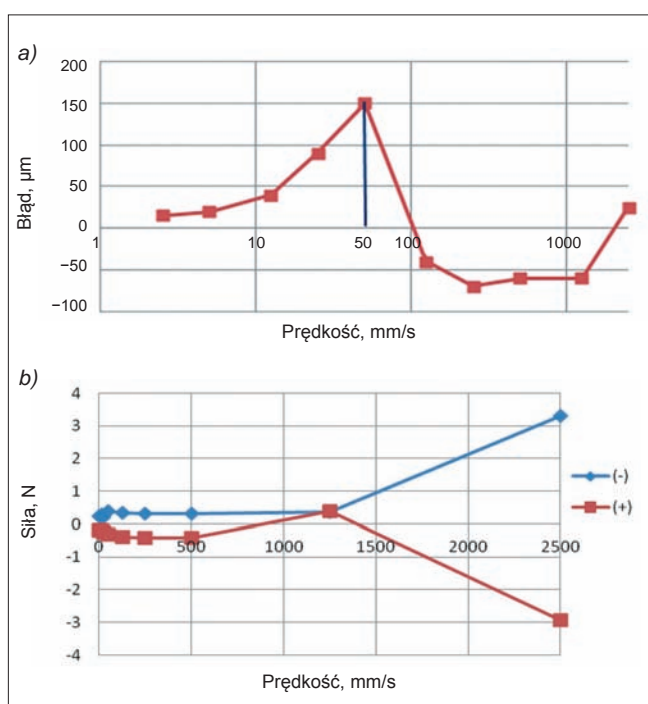


Na rys. 7 przedstawiono z kolei przykładowe przebiegi siły napędowej dla prędkości 2,5 i 2500 mm/s, wyjaśniające przyczyny błędów pozycjonowania uwidocznione na rys. 6b. W stanach przejściowych, przy zmianach pozycji, siły napędowe znacząco wzrastają, aby pokonać siły masowe (bezwładności). Przyspieszenie ruchu osiąga bardzo duże wartości i wówczas zatrzymanie poruszającego się suwaka silnika jest utrudnione.

Na rys. 8 zobrazowano wpływ prędkości ruchu silnika solenoidalnego na błąd pozycjonowania i siłę napędową. Wniosek, jaki się nasuwa, jest zaskakujący: dla prędkości nieprzekraczającej ok. 50 mm/s błąd pozycjonowania rośnie wraz ze wzrostem prędkości, a następnie maleje i zmienia znak na przeciwny. Natomiast maksymalna wartość siły (w pikie) do prędkości 1250 mm/s zachowuje wartość stałą (ok.  $0,17 \pm 0,18$  N), a następnie gwałtownie rośnie.



Rys. 7. Przykładowe przebiegi siły napędowej podczas ruchu z prędkościami: a) 2,5 mm/s, b) 2500 mm/s

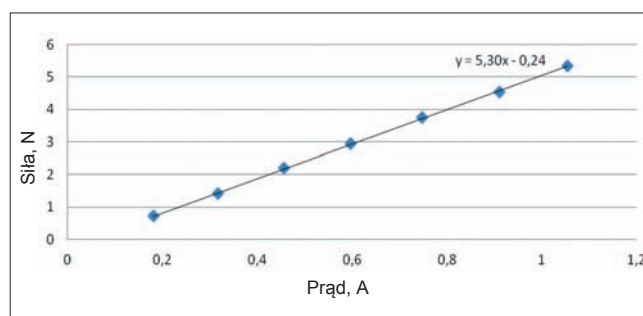


Rys. 8. Wpływ prędkości na: a) błąd pozycjonowania, b) siłę napędową

■ **Badanie charakterystyki siłowej.** Producent silnika solenoidalnego w swoich katalogach [10] podaje m.in. stałą siłową rozumianą jako iloraz siły napędowej i wartości prądu. Taka stała pozwala na zadawanie w sposób programowy określonej siły napędowej na drodze sterowania wartością prądu. W przypadku badanego silnika wartość katalogowa stałej siłowej wynosi 3 N/A. Celem badań było określenie jej rzeczywistej wartości.

Badania polegały na zadawaniu określonej siły, a mianowicie: 25%, 50%, 75%, 100%, 125%, 150% i 175% wartości znamionowej silnika (wartość znamionowa siły silnika wynosi 3 N) i pomiarze siły rzeczywistej za pomocą siłomierza KM202-K. Pomiarzy powtarzano dla kilku wysunięć suwaka silnika (od 1,25 do 10 mm), ponieważ wysunięcie to może wpływać na charakterystykę silnika. Przykładową charakterystykę siłową silnika dla minimalnego wysunięcia suwaka (pozycja 0), jako zależność siły napędowej od prądu, pokazano na rys. 9.

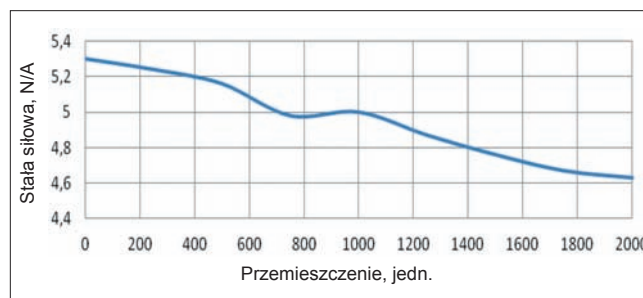
Ponieważ otrzymane charakterystyki były funkcjami liniowymi, wyznaczono proste regresji, a współczynniki kierunkowe potraktowano jako stałe siłowe silnika. Stała siłowa odczytana z rys. 9 wynosi 5,30 N/A, a więc istotnie różni się od wartości katalogowej.



Rys. 9. Przykładowa charakterystyka siłowa silnika dla minimalnego wysuwu suwaka

Zbiorcze zestawienie wyników badań w postaci zależności współczynników kierunkowych (stałych siłowych) od wysunięcia suwaka przedstawia rys. 10. Analiza tego wykresu prowadzi do następujących wniosków:

- stała siłowa silnika mocno zależy od wysunięcia suwaka silnika i maleje wraz ze wzrostem tego wysunięcia,
- wartości stałej siłowej dla wysunięcia w zakresie do 10 mm mieszczą się w przedziale  $5,30 \pm 4,65$  N/A,
- wyznaczona doświadczalnie stała siłowa różni się znacząco od wartości katalogowej.



Rys. 10. Zależność współczynnika kierunkowego prostych regresji (stałych siłowych) od wysunięcia suwaka silnika (1 jednostka przemieszczenia odpowiada 0,005 mm)

## Podsumowanie

W artykule przedstawiono wyniki badań doświadczalnych silnika solenoidalnego typu SMAC LCA25-025 z ruchomą cewką. Celem tych badań było zweryfikowanie niektórych

charakterystyk eksploatacyjnych silnika. Stwierdzono, że ruch suwaka silnika obciążony jest siłą tarcia i dla silnika bez obciążenia zewnętrznego wynosi ona ok.  $\pm 0,15$  N (w zależności od kierunku ruchu), co stanowi ok. 5% wartości znamionowej (katalogowej) siły napędowej silnika.

Wykazano także, że błąd pozycjonowania istotnie zależy od kierunku ruchu suwaka silnika. Podczas wysuwu suwaka błąd ten jest nawet trzykrotnie większy niż podczas ruchu powrotnego i w zależności od wysuwu osiąga nawet 30  $\mu\text{m}$ , a więc ponad 5-krotnie przekracza wartość rozdzielczości enkodera zainstalowanego w silniku. Podczas ruchu powrotnego błąd ten jest znacznie mniejszy (poniżej 10  $\mu\text{m}$ ) i nie przekracza dwukrotnej wartości rozdzielczości enkodera.

Bardzo silny wpływ na błąd pozycjonowania ma prędkość ruchu suwaka. Wzrost prędkości do 50 mm/s zwiększa błąd pozycjonowania i to znacząco – ponad 15-krotnie (do ok. 150  $\mu\text{m}$ ). Z kolei dla prędkości przekraczającej 50 mm/s błąd pozycjonowania maleje, a powyżej prędkości 100 mm/s przyjmuje wartości ujemne i utrzymuje się mniej więcej na stałym poziomie – ok.  $-60$   $\mu\text{m}$ .

Prędkość ruchu silnika determinuje generowane w nim siły, a w zasadzie siły pojawiające się podczas rozruchu i hamowania. W zakresie prędkości do ok. 1200 mm/s maksymalne wartości siły podczas rozruchu lub hamowania są prawie stałe i równe sile tarcia. Dla prędkości przekraczającej 1200 mm/s siły dynamiczne gwałtownie rosną (nawet kilkudziesięciokrotnie).

Podana w katalogu stała siłowa silnika (stosunek siły do prądu) nie jest niezmienna, ale istotnie zależy od wysuwu suwaka. W zakresie wysuwu do 10 mm jej wartość maleje nawet o 12% w stosunku do wartości odpowiadającej suwakowi całkowicie schowanemu. Ponadto w zależności od wysuwu rzeczywista wartość stałej siłowej różni się od wartości katalogowej o ok.  $50 \div 70\%$ .

#### LITERATURA

1. Kosmol J. „Napędy mechatroniczne”. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2013: s. 342.
2. Kosmol J. „Mechatroniczne napędy maszyn i urządzeń technologicznych. Cz. I”. *Mechanik*. Nr 1 (2014): s. 5÷7.
3. Kosmol J. „Mechatroniczne napędy maszyn i urządzeń technologicznych. Cz. II”. *Mechanik*. Nr 2 (2014): s. 73÷78.
4. Kosmol J. „Mechatroniczne napędy maszyn i urządzeń technologicznych. Cz. III”. *Mechanik*. Nr 3 (2014): s. 145÷151.
5. Kosmol J. „Mechatroniczne napędy maszyn i urządzeń technologicznych. Cz. IV”. *Mechanik*. Nr 4 (2014): s. 249÷253.
6. Kosmol J. „Mechatroniczne napędy maszyn i urządzeń technologicznych. Cz. V”. *Mechanik*. Nr 5–6 (2014): s. 325÷331.
7. Błasiński K. „Badania rozpoznawcze stanowiska do badania charakterystyk silnika liniowego”. Praca dyplomowa. Gliwice: Politechnika Śląska, Katedra Budowy Maszyn, 2014.
8. Kosmol J., Lis K., Błasiński K. „Badania rozpoznawcze liniowego silnika solenoidalnego”. *Prace Naukowe Katedry Budowy Maszyn*. Nr 1 (2014): s. 31÷42.
9. Kosmol J., Lis K. „Laboratorium z napędów mechatronicznych”. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2014: s. 223.
10. Strona internetowa: [www.smac-mca.com](http://www.smac-mca.com). ■