

Grzegorz Kamiński, Adam Biernat, Andrzej Herbst  
Politechnika Warszawska

## POMIAR PRZYSPIESZENIA W BADANIACH SILNIKÓW LINIOWYCH

### MEASUREMENTS OF ACCELERATION IN RESEARCH OF LINEAR MOTORS

**Abstract:** This paper describes problem of measurement of linear accelerations in research of linear motors. First part of the article describes possible problems which can occur during testing of linear motors. Next part takes into consideration a few possible solutions. In the next two paragraphs author describes usage of the integrated accelerometer as a best way. The linear acceleration measurements system with an infrared transmission is shown. Results of the acceleration measurement of a real linear motor are described in last paragraph.

#### 1. Wstęp

Silniki liniowe są maszynami posiadającymi pewne wady. Sprawność tego typu maszyn nigdy nie osiągnie poziomu maszyn wirujących. Główne przyczyny są następujące: szczelina powietrzna między wzbudnikiem a bieźnikiem jest co najmniej kilkakrotnie większa niż w przypadku maszyn wirujących, „efekt krańcowy” generuje siły pasożytnicze. Jednak w niektórych przypadkach zastosowanie silników liniowych jest celowe i przynosi wymierne korzyści. Rezygnujemy z przekładni, które zamieniają ruch obrotowy na posuwisty, a co zatem idzie zwiększamy niezawodność układu napędowego, co w wielu przypadkach ma kluczowe znaczenie. Ważną cechą silników liniowych jest możliwość umieszczenia bieźnika, czyli części ruchomej w oddzielnym od otoczenia układzie np. w hermetycznym zbiorniku, podczas gdy wzbudnik jest cały czas dostępny dla obsługi. Nie trzeba więc martwić się o szczelność przepustów kablowych oraz ewentualne iskrzenie wewnątrz zamkniętego układu.

Silniki liniowe stwarzają jednak pewne problemy – szczególnie dla konstruktorów. Sprawdzone metody projektowania silników wirujących nie do końca bowiem dają się przekształcić do obliczeń elementów silników liniowych. Jeszcze gorzej sytuacja wygląda w przypadku badań silników liniowych. W wypadku badań silników wirujących wystarczy zwykle układ składający się z badanego silnika oraz sprzężonej z nim drugiej maszyny pracującej jako obciążenie. W takim układzie jesteśmy w stanie badać silnik we wszystkich stanach pracy – od zwarcia czyli zatrzymania poprzez stany obciążenia, aż do pracy na biegu

jałowym. Zbudowanie podobnego układu dla silników liniowych jest technicznie niewykonalne. Silniki liniowe mogą posiadać bardzo zróżnicowaną konstrukcję: wzbudnik może być znacznie dłuższy od bieźnika lub odwrotnie. Zatem badanie stanów dynamicznych silnika przy użyciu konwencjonalnych metod jest trudne do realizacji.

#### 2. Pomiar przyspieszenia

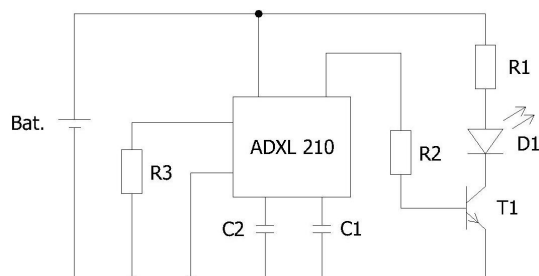
Rozwiązanie tego problemu jest proste. Bardzo dobre efekty daje zastosowanie czujników elektronicznych. Od kilku lat dostępne są na rynku układy zwane scalonymi przyspieszaniemierzami. Charakteryzują się wymiarami rzędu kilku milimetrów, dokładnością pomiaru rzędu  $1\div 2\%$ , mają bardzo szerokie pasmo przenoszenia – aż do kilku kHz oraz zakres pomiarowy do 100 g - mogą być zatem z powodzeniem stosowane do pomiaru przyspieszenia jakiego poddawany jest bieźnik w polu wzbudnika. Zasada działania takiego układu polega na rejestracji ugięcia nano-sprężyny pod działaniem przyspieszenia. Dostępne układy dzielą się na dwie grupy: czujniki mierzące tę wartość na zasadzie zmiany rezystancji mostków tensometrycznych naniesionych na sprężynę, drugą grupę stanowią czujniki w których układem pomiarowym jest kondensator w którym jedna z okładek jest umieszczona na sprężynie. Szczegóły budowy nie są jednak bardzo ważne. Zainteresowani z łatwością znajdą w Internecie obszernie artykuły z zakresu budowy nano-czujników różnych wielkości fizycznych.

### 3. Nadajnik

Przy doborze czujnika warto wiedzieć, że sygnał wyjściowy może być dostarczany w dwóch postaciach: sygnału analogowego gdzie poziom napięcia jest proporcjonalny do poziomu mierzonej wielkości fizycznej lub w formie „cyfrowej” – na wyjściu otrzymuje się sygnał prostokątny o dobranej przez użytkownika częstotliwości natomiast nośnikiem informacji jest wypełnienie tegoż sygnału.

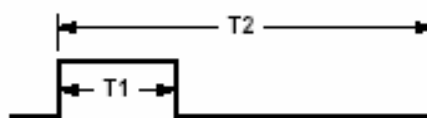
W obu przypadkach sygnały już wewnątrz układu scalonego są kompensowane termicznie i linearyzowane. Czujniki z wyjściem „cyfrowym” mają jednak kilkukrotnie mniejsze pasmo przenoszenia. W układzie pomiarowym który zostanie dokładniej opisany został użyty czujnik o wyjściu sygnału ze zmiennym wypełnieniem czyli „cyfrowy”. Mimo, iż w tym typie czujnika pasmo przenoszenia badanego przyspieszenia jest ograniczone do około 500÷700 Hz to jest to zupełnie wystarczająca częstotliwość do badań powszechnie spotykanych silników liniowych. Zmiany przyspieszeń nie są na tyle szybkie aby zafałszować wynik pomiaru. Przyjrzyjmy się bliżej budowie układu. Jako, że jest to pierwszy prototyp, ilość elementów jest zminimalizowana. Cały system składa się z trzech części: nadajnika umieszczonego na bieźniku, odbiornika oraz układ akwizycji i obróbki zebranych danych. Transmisja sygnału między nadajnikiem a odbiornikiem jest realizowana za pomocą podczerwieni. Jedynym elementem mającym kontakt z bieźnikiem jest nadajnik. Wykonano go ze stalowej rury tak aby ekranować układy elektroniczne od wpływu pola elektromagnetycznego pochodzącego od bieźnika i stojana. Jednocześnie obudowa ta jest dzięki temu bardzo wytrzymała mechanicznie. Wewnątrz nadajnika znajduje się scalony przyspieszeniometer o zakresie pomiarowym +/- 10 g, tranzystor sterujący fotodiody, fotodiody nadawcza, kilka elementów biernych oraz bateria litowa typu CR2. Największym elementem układu jest sama bateria. Jednak jej pojemność 800 mAh zapewnia ciągłą pracę układu przez kilkadziesiąt godzin. Z racji tego że wymagane napięcie układu scalonego wynosi 3 V można się pokusić o zasilanie nadajnika z niewielkiej baterii zegarkowej. Czas pracy układu będzie znacznie krótszy

jednak wymiary obudowy znacznie się zmniejszą, a co za tym idzie – nadajnik będzie można zainstalować na bieżnikach niewielkich silników liniowych. Schemat nadajnika pokazany jest na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat akcelometru

Widać zatem, że do poprawnej pracy przyspieszeniometera wystarczy naprawdę niewielka ilość elementów. Niezbędnymi z punktu widzenia układu scalonego są rezystor R3 który określa częstotliwość nośnego sygnału prostokątnego oraz kondensatory C1 i C2 które ograniczają z góry pasmo przenoszenia mierzonego przyspieszenia. Sposób wyznaczania wartości tych parametrów jest w przystępny sposób opisany w notcie aplikacyjnej wspomnianego przyspieszeniometera zatem nie warto jej przytaczać. Elementy R1, R2, T1 oraz dioda nadawcza podczerwona stanowią prosty nadajnik ze wzmacniaczem. Warto wspomnieć w tym miejscu o zmianie wypełnienia sygnału w takt zmian przyspieszenia. W opisywanym układzie pomiarowym zastosowano przyspieszeniometer o zakresie pomiarowym +/- 10 g. Producent przyspieszeniometera podaje, że czułość wynosi 4% wypełnienia na 1 g. Na rysunku 2 jest pokazany fragment sygnału oraz jego parametry, z których oblicza się przyspieszenie.



Rys. 2. Sygnał z akcelometru

Wzór do obliczenia przyspieszenia znając następujące dane dotyczące sygnału:

$T_2$  – jest to czas trwania okresu,

$T_1$  – jest to czas trwania wysokiego stanu,

zatem przyspieszenie równe jest:

$$a = \left( \frac{T1}{T2} - 0,5 \right) \cdot 0,04 \quad (1)$$

Przyspieszenie nie jest jednak zmienną którą interesuje konstruktora silnika. Jest nią siła. Jednak znając przyspieszenie nietrudno jest obliczyć siłę. Wystarczy jedynie znajomość masy bieźnika oraz drugiej zasady dynamiki Newtona:

$$F = m a \quad (2)$$

gdzie  $m$  jest wspomnianą masą bieźnika.

#### 4. Odbiornik

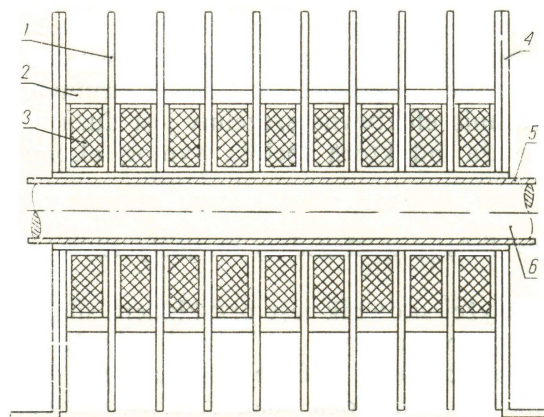
Odbiornik zbudowany jest w oparciu o technikę analogową. Elementem odbierającym sygnał z nadajnika jest fotodioda PIN. Jej zaletą są bardzo krótko trwające zbocza sygnału. Czas narastania i opadania sygnału jest rzędu 100 ns, co w porównaniu do ok. 2-4  $\mu$ s dla fototranzystora jest dużą zaletą. Jednak z powodu niskiej czułości należało zastosować aż trzy stopnie wzmocnienia. Wzmocniony sygnał nie cechuje jednak zbyt szybkim opadaniem i narastaniem napięcia wyjściowego – czasy zboczy trwają ok. 1.5  $\mu$ s. Może to powodować błędy pomiarowe w czasie próbkowania takiego sygnału. Zastosowano więc układ z wejściem pojemnościowym, który wychwytuje jedynie stromy początek i koniec sygnału. W dalszej części sygnał jest prostowany i podawany na przerzutnik, który „odbudowuje” sygnał prostokątny. Teraz już cechujący sygnał charakteryzuje się czasem trwania zboczy ok. 20 ns. Taki sygnał może być próbkowany przy pomocy karty zbierania danych. Aby pomiar był możliwie dokładny należy stosować częstotliwość próbkowania rzędu 500 kHz – 1 MHz. Na tak zebrany sygnał dokonywane są obliczenia zgodnie ze wzorem (1). Procedurę liczącą przyspieszenie można napisać w popularnych programach takich jak LAB View lub Matlab.

#### 5. Wyniki pomiarów

Przyjrzyjmy się teraz przykładowym wynikom, jakie daje zastosowanie opisanego systemu pomiarowego. Do testów systemu posłużyło stanowisko laboratoryjne wyposażone w dwa silniki indukcyjne liniowe tubowe pracujące w układzie nawrotnym. Silniki użyte w stanowisku pokazane są na rysunku 3.

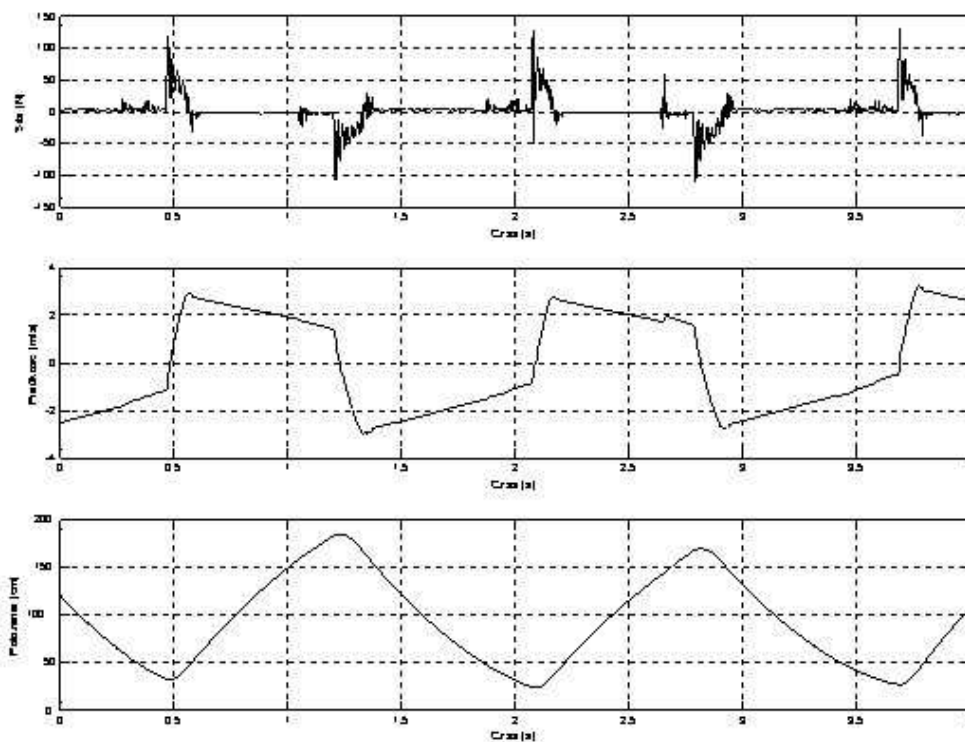
Długość toru między silnikami wynosi ok. 1,5 m. Cykliczna praca nawrotna została zrealizowana dzięki zastosowaniu sterownika

specjalnie zaprojektowanego dla tego stanowiska. Dla zasilania napięciem o częstotliwości 50 Hz prędkość synchroniczna bieźnika wynosi 9 m/s. Z racji tego, że charakterystyka siły w funkcji prędkości jest silnie opadająca maksymalne prędkości bieźnika na torze dochodzą do około 3 m/s. Przy masie bieźnika równej 1,15 kg maksymalne przyspieszenie dochodzi do 9 g. Akwizycja danych z układu pomiarowego odbywała się dla kilku okresów ruchu. Na rysunku 4 pokazano przebieg trzech wielkości: siły, prędkości i położenia bieźnika. Wyniki badań przekonują co do rzeczywistych możliwości czujnika. Czułość jak i szybkość „próbkowania” jest bardzo dobra i w zupełności wystarczająca. W przebiegu zauważyć można pulsowanie siły w takt zmian napięcia zasilania. Przy użyciu konwencjonalnych metod badań silników liniowych zebranie takich informacji nie było możliwe. W wyniku przeprowadzenia kilku pomiarów dla różnych prędkości bieźnika przy wejściu do silnika oraz badań statycznych można wygenerować płaszczyznę siły silnika w funkcji prędkości oraz zagłębienia bieźnika w silniku. Czyli otrzymać charakterystykę mechaniczną silnika w funkcji dwóch zmiennych. Obraz tej charakterystyki pokazany jest na rysunku 5.

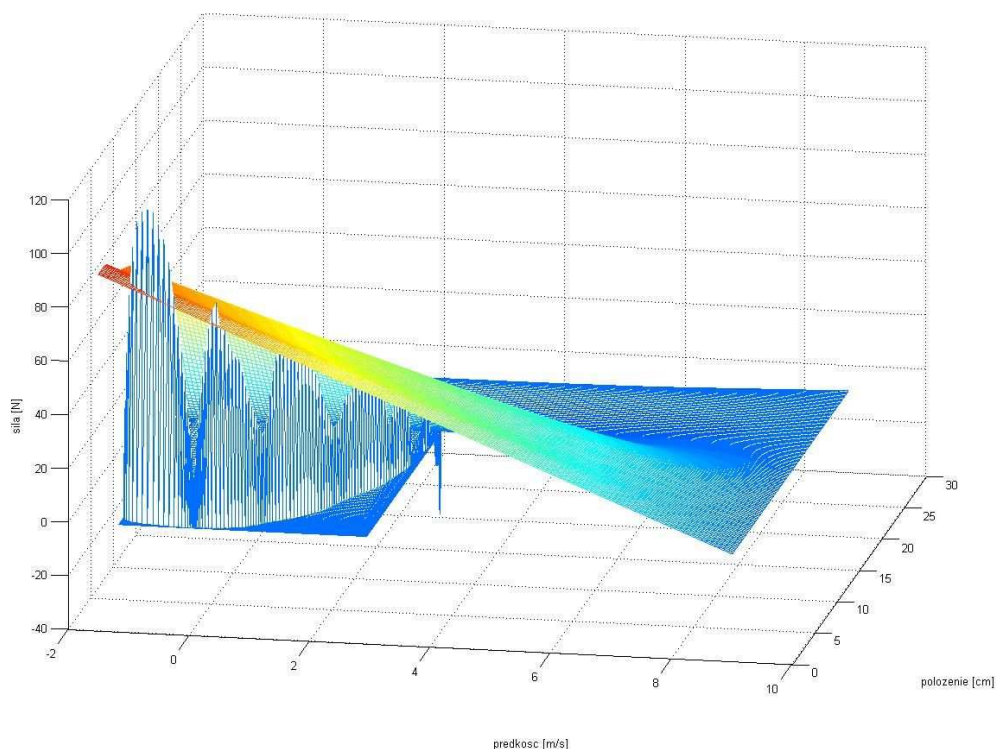


Rys. 3. Silnik liniowy tubowy:

1. żebro chłodzące, 2. jarzmo stojane,
3. uzwojenie koncentryczne, 4. żebro zamykające, 5. płaszczyzna bieźnika, 6. bieźnik



Rys. 4. Wyniki pomiarów



Rys. 5. Krzywe siły

## 6. Podsumowanie

Dzięki pomiarom przy pomocy opisywanego układu w prosty sposób można było przekonać się, że dla badanego silnika właśnie w zakresie ujemnych prędkości siła jest największa. Jest to

cechą silników indukcyjnych o dużej szczelinie powietrznej.

System do pomiaru przyspieszenia liniowego jest bardzo uniwersalnym a jednocześnie dokładnym narzędziem pomiarowym.

Z powodzeniem może zastąpić nie zawsze dokładne obliczenia. Na koniec warto wspomnieć o cenie całego systemu. Sam akcelerometr to wydatek kilkudziesięciu złotych. Cena reszty elementów jest bardzo niska. Najdroższą część systemu stanowi wspomniana karta zbierania danych. Jednak możliwość badań silników liniowych w stanach dynamicznych jest warta tych nakładów.

### **Bibliografia**

- [1] Herbst A.: *Układ sterowania dla pary silników liniowych (tubowych) pracujących w układzie nawrotnym*. Praca dyplomowa, Wydział Elektryczny PW, 2007 r.  
[2] *Conference Publication Number 120*.

Conference on linear electric machines, 1974 r.  
[3] *Application note for ADXL 210*.  
Analog Devices, 1999 r.

### **Autorzy**

prof. dr hab. inż. Grzegorz Kamiński  
e-mail: [g.kaminski@ime.pw.edu.pl](mailto:g.kaminski@ime.pw.edu.pl), tel: 22 234-73-35  
dr inż. Adam Biernat  
e-mail: [a.biernat@ime.pw.edu.pl](mailto:a.biernat@ime.pw.edu.pl), tel: 22 234-76-81  
mgr inż. Andrzej Herbst  
e-mail: [blaupunkt@poczta.onet.pl](mailto:blaupunkt@poczta.onet.pl), tel: 502-06-33-09  
Zakład Maszyn Elektrycznych Politechniki Warszawskiej,  
Plac Politechniki 1, 00-661 Warszawa

### **Recenzent**

*Prof. dr hab. inż. Tadeusz Glinka*