

Maria Brodziak-Bojarska  
Instytut Metrologii  
i Maszyn Elektrycznych

## LINEARYZACJA CHARAKTERYSTYK CZUJNIKÓW MAGNETOSPŔĘŻYSTYCH

**Streszczenie.** W artykule wykazano, że linearyzację charakterystyk wyjściowych czujników magnetospŔężystych można uzyskać przez: dobór przepływu uwzwojenia magnesującego czujnika, zastosowanie w obwodzie pomiarowym czujnika filtru korekcyjnego oraz prostownika fazoczułego.

W wielu procesach przemysłowych istnieje potrzeba stosowania przyrządów mierzących takie parametry mechaniczne, jak siły i momenty. Eksploatacja i doświadczenia ruchowe mierników różnych typów wykazały, że czujniki zawierające elementy magnetospŔężyste posiadają takie zalety, jak:

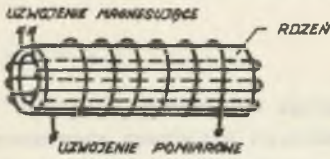
- niezawodność działania,
- duża moc wyjściowa (dostateczna do bezpośredniego uruchomienia przemysłowego wskaźnika),
- duży zakres pomiarowy,
- mała czujność na zmiany temperatury,
- duża trwałość mechaniczna,
- mała wrażliwość na wpływy eksploatacyjne (wstrząsy, uderzenia mechaniczne, zmiany wilgotności).

Główną wadą tych czujników jest niezadawalająca liniowość ich naturalnych charakterystyk wyjściowych. Istnieją jednak możliwości poprawienia liniowości charakterystyk. Niektóre ze sposobów linearyzacji zostały omówione w niniejszym artykule.

### 1. Zasada działania czujników magnetospŔężystych skretnych

Czujniki magnetospŔężyste można podzielić na takie, w których element magnetospŔężysty jest ściskany (czujniki dławikowe, transformatorowe) i czujniki z elementem magnetospŔężystym skręcanym (czujniki magnetospŔężyste skretnie).

Do wykonania pomiarów wykorzystano czujniki skretne. Zasada ich działania jest następująca: siły ściskające lub rozciągające się zamieniane na moment skręcający rdzeń ferromagnetyczny czujnika, który jest wykonany w postaci rury. Moment skręcający, wywierany przez parę sił przyłożoną na



Rys. 1. Sposób nawinięcia uzwojeń czujnika skrętnego

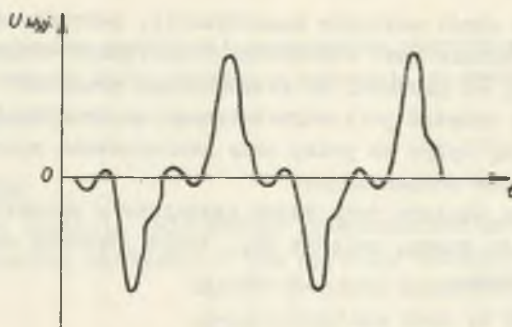
końcach rdzenia, wynosi  $M=Fl$ , gdzie  $F$  oznacza wartość siły ściskającej względnie rozciągającej. Dwa uzwojenia czujnika, magnesujące i pomiarowe, nawinięte są tak, jak to pokazano na rys. 1. Przy braku działającej siły, strumień magnetyczny wytworzony przez uzwojenie magnesujące zamyka się w przekroju rury, czyli leży w płaszczyźnie uzwojenia pomiarowego. W uzwojeniu pomiarowym nie indukuje się siła elektromotoryczna. Po przyłożeniu momentu skręcającego występuje składowa strumienia prostopadła do uzwojenia pomiarowego, która powoduje indukowanie w tym uzwojeniu siły elektromotorycznej, której wartość jest w zakresie pomiarowych proporcjonalna do przyłożonej siły. Przedstawiony mechanizm działania czujnika wynika z teorii domen Weissa [1], [2], [3], [5].

## 2. Charakterystyka naturalna czujnika

Charakterystyka naturalna czujnika, czyli zależność między napięciem uzwojenia pomiarowego (mierzonym przyrządem o dużej rezystancji wewnętrznej) a przyłożoną siłą, przy stałej wartości przepływu magnesującego, jest nieliniowa (rys. 2). W zakresie  $0 \div 0,1 P_n$  ( $P_n$ -siła znamionowa) charakterystyka ta jest silnie nieliniowa. Uwarunkowane jest to odchyleniami technologicznego procesu przygotowania elementu magnetosprężystego. Dla stanu bez obciążenia występuje napięcie początkowe  $U_0$ . Ze zwiększaniem obciążenia napięcie wyjściowe zmniejsza się do określonej wartości i potem rośnie. Punkt przegięcia leży, jako reguła, w przedziałach  $0 \div 0,1 P_n$  [7]. Taki charakter zmian charakterystyki wyjściowej można wyjaśnić zmianę faz i amplitud składowych harmonicznych napięcia wyjściowego, przy czym charakter zmian fazy każdej składowej nie zależy od zmian fazy pozostałych składowych. Obwód magnetyczny zwykle pracuje w strefie nasycenia, w związku z czym krzywa napięcia wyjściowego odbiega od sinusoidy. Jak widać na rys. 3, przebieg ten charakteryzuje się dużą zawartością trzeciej i piątej harmonicznej. Amplitudy tych harmonicznych ze tych wzrostem siły przyłożonej do czujnika rosną nieproporcjonalnie. Odnosi się to do przypadku zasilania uzwojenia magnesującego prądem zmiennym o częstotliwości 50 Hz.

Rys. 2. Charakterystyka naturalna czujnika skrętnego

Charakterystyka naturalna czujnika, czyli zależność między napięciem uzwojenia pomiarowego (mierzonym przyrządem o dużej rezystancji wewnętrznej) a przyłożoną siłą, przy stałej wartości przepływu magnesującego, jest nieliniowa (rys. 2). W zakresie  $0 \div 0,1 P_n$  ( $P_n$ -siła znamionowa) charakterystyka ta jest silnie nieliniowa. Uwarunkowane jest to odchyleniami technologicznego procesu przygotowania elementu magnetosprężystego. Dla stanu bez obciążenia występuje napięcie początkowe  $U_0$ . Ze zwiększaniem obciążenia napięcie wyjściowe zmniejsza się do określonej wartości i potem rośnie. Punkt przegięcia leży, jako reguła, w przedziałach  $0 \div 0,1 P_n$  [7]. Taki charakter zmian charakterystyki wyjściowej można wyjaśnić zmianę faz i amplitud składowych harmonicznych napięcia wyjściowego, przy czym charakter zmian fazy każdej składowej nie zależy od zmian fazy pozostałych składowych. Obwód magnetyczny zwykle pracuje w strefie nasycenia, w związku z czym krzywa napięcia wyjściowego odbiega od sinusoidy. Jak widać na rys. 3, przebieg ten charakteryzuje się dużą zawartością trzeciej i piątej harmonicznej. Amplitudy tych harmonicznych ze tych wzrostem siły przyłożonej do czujnika rosną nieproporcjonalnie. Odnosi się to do przypadku zasilania uzwojenia magnesującego prądem zmiennym o częstotliwości 50 Hz.



Rys. 3. - Krzywa napięcia wyjściowego czujnika przy częstotliwości zasilania 50 Hz

Następny odcinek charakterystyki (powyżej  $0,1P_n$ ) wykazuje mniejszą nieliniowość. Do pewnej wartości naprężenia ściskającego (w przypadku pokazanej charakterystyki około 700 N) czułość napięciowa elementu magnetosprężystego jest większa, a potem obniża się wartość. Pokazana zmiana czułości magnetosprężystego elementu może być objaśniona w oparciu o teorię domenowej budowy ferromagnetyków. Wartość napięcia pomiarowego zależy od położenia wypadkowego wektora magnetyzacji domen. Istnieją dwa czynniki determinujące położenie tego wektora: energia uwarunkowana mechanicznym naprężeniem oraz energia pochodząca od pola magnetycznego wytworzonego przez uzwojenie magnesujące czujnika.

Dla natężeń pola magnetycznego mniejszych od  $800 \frac{A}{m}$  [7] na orientację wektorów magnetyzacji ma większy wpływ energia uwarunkowana mechanicznym naprężeniem. Pole magnetyczne stara się ustawić wektory magnetyzacji w kierunku działania natężenia pola  $H$ . Natomiast naprężenia ściskające (dla materiałów o dodatniej magnetostrykcji) dążą do ustawienia wektorów magnetyzacji domen prostopadle do kierunku działania tych naprężeń. Naprężenia rozciągające ustawiają wektory magnetyzacji domen zgodnie z kierunkiem działania tych naprężeń (magnetostrykcja dodatnia). W skręcanej rurze naprężenia ściskające i rozciągające osiągają największe wartości w przekrojach nachylonych do osi rury pod kątem  $45^\circ$ . Znaczący to, że pomiędzy kierunkami tych naprężeń a kierunkiem pola magnetycznego  $H$  wystąpi również kąt  $45^\circ$ . Pole magnetyczne i naprężenia przeciwdziałają sobie w tendencji ustawienia wektorów magnetyzacji. W stanie beznapięciowym wektory magnetyzacji przyjmują kierunek zbliżony do kierunku pola  $H$ . Przy małych naprężeniach mechanicznych wektory magnetyzacji, zorientowane słabo polem magnetycznym wytworzonym przez prąd uzwojenia magnesującego, obracają się o stosunkowo duży kąt (tak, by ustawić się prostopadle do naprężeń ściskających, co jest równoznaczne z ustawieniem się w kierunku działania naprężeń rozciągających). Efektem tego jest duża czułość napięciowa elementu. Dla większych naprężeń mechanicznych czułość ta zmniejsza się

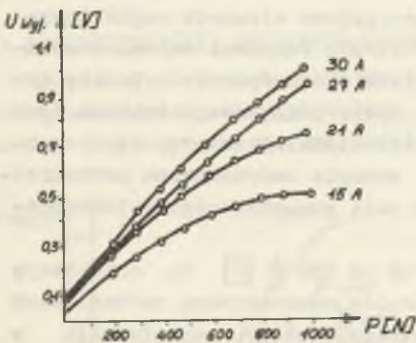
wskutek tego, że obrót wektorów magnetyzacji, uwarunkowany naprężeniem mechanicznym praktycznie jest zakończony i następuje wzajemne przemieszczanie granic domen, co prowadzi do nieznacznego przyrostu napięcia.

Dla większych natężeń pola magnetycznego na orientację wektorów magnetyzacji ma większy wpływ to pole, przy zmniejszeniu wpływu energii uwarunkowanej naprężeniem mechanicznym.

Wraz ze zmianą udziału tych dwóch czynników w procesie orientacji wektorów magnetyzacji domen, zmienia się, także przebieg charakterystyk wyjściowych przetwornika.

### 3. Dobór przepływu magnesującego

Jak wykazano w punkcie 2, związek pomiędzy napięciem a siłą przyłożoną do czujnika magnetosprężystego zależy w dużym stopniu od wartości natężenia pola magnetycznego, wytworzonego przez uzwojenia magnesujące.



Rys. 4. Charakterystyki wyjściowe czujnika dla różnych wartości przepływu magnesującego

Przebieg charakterystyk wyjściowych dla różnych wartości przepływu magnesującego jest pokazany na rys. 4.

Napięcie wyjściowe mierzono miliwoltomierzem tranzystorowym czułym na wartość średnią wyprostowaną, lecz wyskalowanym w wartościach skutecznych dla przebiegu sinusoidalnego.

Żadna z krzywych nie przedstawia zależności liniowej pomiędzy napięciem wyjściowym a przyłożoną siłą. Dla małej wartości przepływu magnesującego charakterystyki mają przebieg silnie nieliniowy, lecz wraz z jego wzrostem liniowość się polepsza. Wzrasta także wartość napięcia wyjściowego. Po przekroczeniu pewnej optymalnej wartości przepływu liniowość znów ulega pogorszeniu. Ta optymalna wielkość przepływu występuje dla natężenia pola magnetycznego zawartego w przedziale  $720-800 \frac{A}{m}$  [7]. Wtedy wpływ pola magnetycznego i energii uwarunkowanej naprężeniem mechanicznym na orientację wektorów magnetyzacji jest w przybliżeniu jednakowy. Czułość magnetosprężystego elementu jest praktycznie stała i zależność napięcia wyjściowego od przyłożonej siły ma charakter najbardziej zbliżony do liniowego. W przypadku badanej serii czujników optymalną wartością przepływu jest 27 A i dla charakterystyki odpowiadającej tym warunkom błąd nieliniowości wyznaczony z relacji

$$\frac{\Delta y_{\max \text{ lin}}}{y_{\max} - y_{\min}} 100\%$$

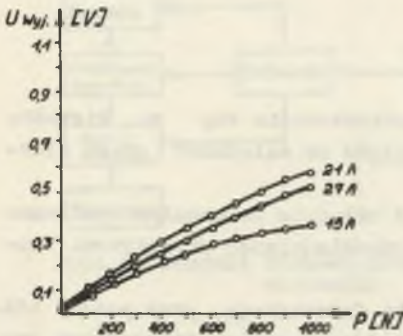
wynosi 2,5%, gdzie

$\Delta y_{\max \text{ lin}}$  - maksymalne odchylenie bezwzględne charakterystyki rzeczywistej od linii prostej w zakresie przetwarzania

$y_{\max} - y_{\min}$  - zakres przetwarzania.

#### 4. Filtry korekcyjne

Przebieg czasowy napięcia wyjściowego przedstawiono na rys. 3. Oprócz podstawowej harmonicznej występuje w nim wyraźnie trzecia i piąta harmoniczna. Ponieważ harmoniczne te rosną nie proporcjonalnie wraz ze wzrostem siły przyłożonej do czujnika, są one jedną z przyczyn nieliniowości charakterystyki przetwarzania. Aby uniknąć wpływu wyższych harmonicznych, na wyjściu czujnika (uzwojenie pomiarowe) można zastosować filtr dolnoprzepustowy, dla którego wyższe harmoniczne leżą poza pasmem przepuszczania, i w ten sposób wydzielić harmoniczną podstawową. Wprawdzie maleje wtedy wartość napięcia wyjściowego, ale uzyskujemy lepszą liniowość charakterystyki przetwarzania (rys. 5). Błąd nieliniowości dla krzywej o wartości przepływu 27A wynosi 1,9%.



Rys. 5. Przebieg podstawowej harmonicznej dla różnych wartości przepływu magnesującego

#### 5. Prostownik fazoczuły

Układ prostownika fazoczułego zastosowany w obwodzie uzwojenia pomiarowego przetwornika, w porównaniu ze zwykłym prostowaniem np. w układzie Graetza, daje znaczne korzyści dla linearyzacji charakterystyk czujnika.

- A. Pomocnicze źródło napięcia w prostowniku fazoczułym (przy czym napięcie to powinno być dużo wyższe od napięcia mierzonego) pozwala na pracę w obszarze liniowych zależności na charakterystyce diody. Natomiast w układzie Graetza dla małych wartości sygnału mierzonego, diody pracują na początkowym, nieliniowym odcinku charakterystyki prądowo-napięciowej, a więc przy małych wartościach współczynnika prostowania.
- B. Ze względu na znaczne różnice w wartościach napięć pomocniczego i mierzonego  $U_p \gg U_x$ , w okresach przewodzenia diody działają przepustowo dla sygnału pomiarowego  $U_x$  bez względu na jego biegunowość. Pozwala to na zmniejszenie wpływu wyższych harmonicznych nieparzystych i wyeliminowanie harmonicznych parzystych, gdyż prąd miernika magnetoelektrycznego na wyjściu prostownika fazoczułego jest określony następującą relacją

$$I_m = \frac{c}{2n} U_{xn} (1 - \cos n\phi) \cos \phi$$

- c - stała zdeterminowana przez oporności obwodu prostownika, nachylenie charakterystyki diody oraz współczynnik kształtu sinusoidy,  
 n - numer harmonicznej,  
 $U_{xn}$  - wartość skuteczna n-tej harmonicznej,  
 $\cos \phi$  - kosinus kąta przesunięcia między napięciem mierzonym a pomocniczym.

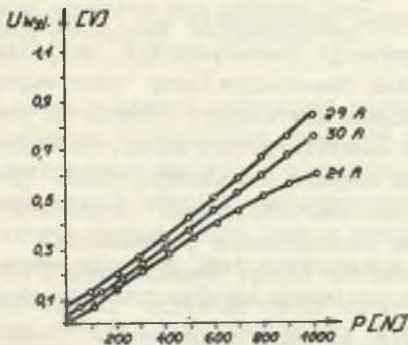
Relacja ta jest prawdziwa dla stosunku częstotliwości napięć mierzonego i pomocniczego

$$\frac{f_x}{f_p} = \frac{n}{1}$$

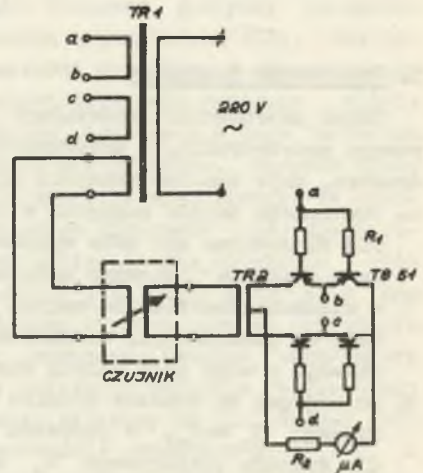
C. Prostownik fazoczuły pozwala także na zorientowanie się w kierunku zmian fazowych sygnału mierzonego ze względu na zależność prądu mierznika od  $\cos \phi$ .

Charakterystyki wyjściowe czujnika zdjęte w układzie fazoczułym pokazano na rys. 6. Błąd nieliniowości dla krzywej odpowiadającej przepływowi magnetycznemu o wartości 30 A wynosi 0,7%.

Na rys. 7. przedstawiono schemat prostownika fazoczułego, przy pomocy którego zdejmowano charakterystyki. Zamiast diod zastosowano tranzystory, pracujące jako elementy przełączające.



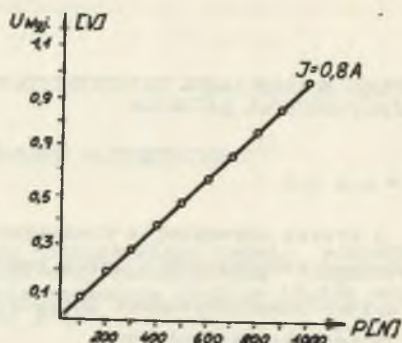
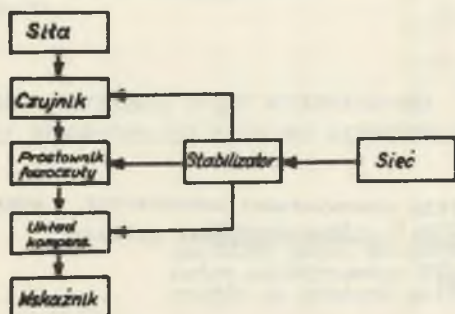
Rys. 6. Charakterystyki wyjściowe czujnika zdejmowane w układzie fazoczułym



Rys. 7. Schemat układu prostownika fazoczułego

## 6. Podsumowanie

Z rozpatrzonych przyczyn nieliniowości charakterystyk przetwarzania czujników magnetośprężystych oraz sposobów ich eliminacji wynika, że przy zastosowaniu odpowiednich układów w obwodach zasilającym i pomiarowym czujnika, charakterystyka wyjściowa może mieć przebieg liniowy.



Rys. 8. Schemat blokowy układu pomiarowego

Rys. 9. Charakterystyka wyjściowa czujnika zdjęta w układzie jak na rys. 8

Przykładowy schemat blokowy układu pomiarowego pokazano na rys. 8. Układ kompensujący służy do skompensowania sygnału początkowego czujnika. Stabilizator napięcia sieci ogranicza zmiany napięcie zasilającego, zmniejszając w rezultacie uchyby pomiarowe powstałe z tej przyczyny.

Rys. 9 przedstawia charakterystykę przetwarzania czujnika zdjętą w układzie podanym na rys. 8, przy dobranym optymalnym prądzie magnesującym ( $I = 0,8 \text{ A}$ ). Przebieg charakterystyki jest liniowy.

Tak więc podstawowa wada czujników magnetośprężystych, nieliniowość charakterystyki przetwarzania, może być wyeliminowana, co przy pozostałych zaletach tych czujników stawia je w rzędzie najbardziej dogodnych do eksploatacji przemysłowej.

## LITERATURA

1. Biełow K.P.: Zjawiska w materiałach magnetycznych, PWN, Warszawa 1962
2. Dahle O.: The torductor and the pressductor, ASEA Research Laboratory, Vasteras, Sweden 7421 E
3. Gumaniuk M.N.: Czujniki magnetośprężyste w automatyce, WNT, Warszawa 1967
4. Lion K.S.: Przyrządy do badań naukowych, WNT, Warszawa 1962
5. Łapiński M. Włodarki W.: Miernictwo elektryczne wielkości nieelektrycznych, WNT, Warszawa 1970
6. Pflifer P.M.: Pomiar elektryczny wielkości mechanicznych, PWT, Warszawa 1953

7. Radczenko K.M. Lauer W.W. Gołowan E.W.: Magnitouprugije izmiritieli usilij dla połosowych stanow, Technika, Kijów 1970
8. Stołbun M.J.: Puti powyszenija czuwstwielnosti magnitouprugich datczikow transformatornowo typu, Izmiritielnaja technika 1965, nr 6.
9. Svedebbrand R.: Elektronisches Wiegen in Industriebetrieben, ASEA Zeitschrift 1964, nr 2.

#### МЕТОДЫ ЛИНЕАРИЗАЦИИ ХАРАКТЕРИСТИК МАГНИТОУПРУГИХ ДАТЧИКОВ

#### Резюме

В статье описываются следующие методы линеаризации зависимости между выходным напряжением и силой действующей на магнитоупругий датчик:

- подбор намагничивающих ампер-витков;
- корректирующие фильтры,
- фазочувствительный выпрямитель.

#### THE LINEARITY IMPROVEMENT OF THE MAGNETIC STRESS - GAUGES CHARACTERISTICS

#### Summary

The following ways, helpful in obtaining the linear relationship between the output voltage and the force applied to the magnetics stress-gauge are mentioned in this article:

- selection of magnetizing ampere-turns,
- application of harmonic filter indicator in measuring circuit,
- phase-sensitive rectifier.