

PROBLEMY NIEKONWENCJONALNYCH UKŁADÓW ŁOŻYSKOWYCH

Łódź 09-10 maja 1995 roku

Jan Burcan, Andrzej Jezierski
(*Politechnika Łódzka*)

AUTOMATYCZNA REGULACJA UKŁADU ZASILANIA ŁOŻYSKA WZDŁUŻNEGO

SŁOWA KLUCZOWE

stabilność położenia, sterowanie łożyskiem aktywnym, estymacja szczeliny łożyska aktywnego

STRESZCZENIE

Omówiono pracę układu regulacji analogowej magnetycznego aktywnego łożyska wzdłużnego. Zadaniem układu jest dobieranie i utrzymywanie wielkości szczeliny łożyskowej odpowiadającej stanom równowagi podczas przenoszenia obciążeń. Podano opisy układu i wyniki badań.

REGULACJA UKŁADU ZASILANIA ŁOŻYSKA WZDŁUŻNEGO

Zadaniem układu automatycznej regulacji zasilania łożyska aktywnego jest wygenerowanie takich prądów w cewkach elektromagnesów, które wytworzą siły przeciwstawiające się wypadkowej sile działającej na łożysko. Jeżeli siły wzdłużne działające na wałek nie równoważą się, wówczas porusza się on ruchem określonym równaniem:

$$P_w = ma = m \ddot{x} \quad (1)$$

Układ sterowania ma za zadanie przeprowadzenie systemu ze stanu początkowego określonego położeniem początkowym x_0 i prędkością początkową \dot{x}_0 do stanu, w

którym dla zadanego położenia x_k prędkość i przyspieszenie są równe zero ($\dot{x}_k = \ddot{x}_k = 0$).

Wypadkowa siła działająca na wałek składa się z następujących głównych składników:

- zewnętrznych sił o stałej lub prawie stałej wartości,
- sił zewnętrznych o charakterze przypadkowym, często o nieznanym rozkładzie wartości, - sił zależnych np. od położenia, prędkości przemieszczania się wałka,
- sił celowo wytwarzanych w układzie elektromagnesów łożyska.

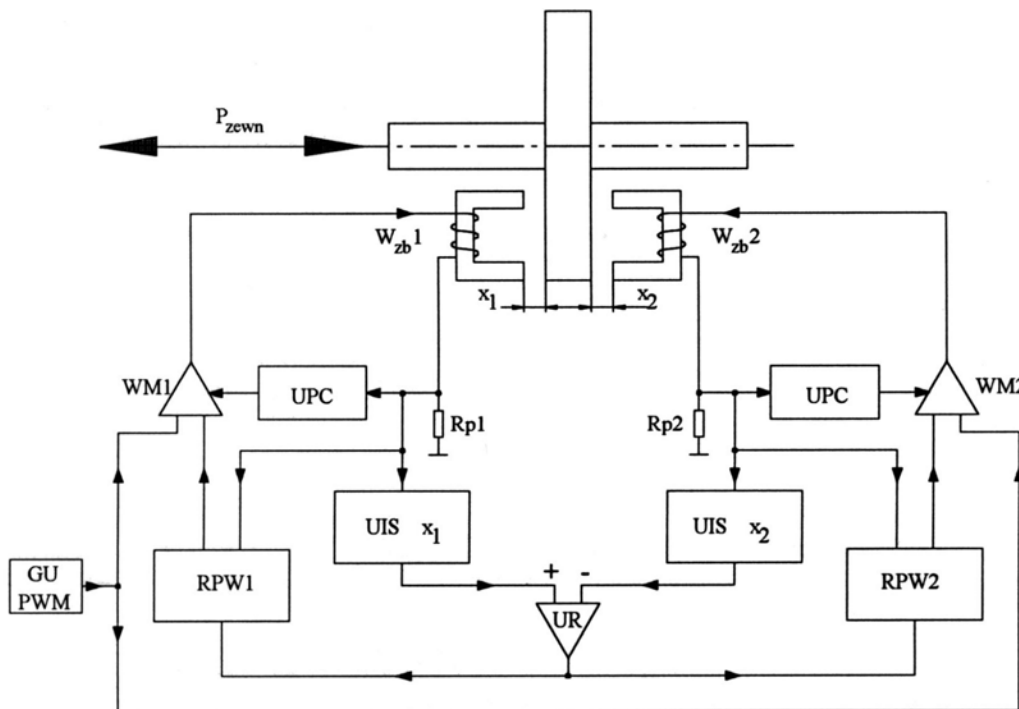
Kontrolowanie chwilowych wartości położenia, prędkości i przyspieszenia wałka wymaga określania chwilowych wartości sił wytwarzanych w łożyskach przez elektromagnesy. Siły w łożyskach elektromagnetycznych są w przybliżeniu proporcjonalne do kwadratów prądów przez nie płynących i odwrotnie proporcjonalne do kwadratów szczelin

powietrznych ich obwodów magnetycznych. Sterując prądami cewek elektromagnesów steruje się siłą przez nie wytwarzaną, a tym samym siłą wypadkową, działającą na wałek. Kontrolując położenie wałka i jego prędkość można wytłumić jego drgania. Wówczas układ sterowania powinien szybko reagować na zmienne siły zewnętrzne. Czynnikiem podlegającym kontroli w tym przypadku jest wartość szczeliny powietrznej, pomiędzy wirującym czopem i elektromagnesem.

ANALOGOWY UKŁAD REGULACJI

W Zakładzie Geometrii Wykreślnej i Rysunku Technicznego Instytutu Konstrukcji Maszyn Politechniki Łódzkiej został zbudowany układ sterowania aktywnym łożyskiem magnetycznym [1]. Schemat blokowy układu przedstawia rysunek I.

Tarcza łożyska umieszczona jest między wzbudnikami W_{zb1} i W_{zb2} pracującymi różnicowo. Wzbudniki te zasilane są z dwóch wzmacniaczy mocy $WM1$ i $WM2$.



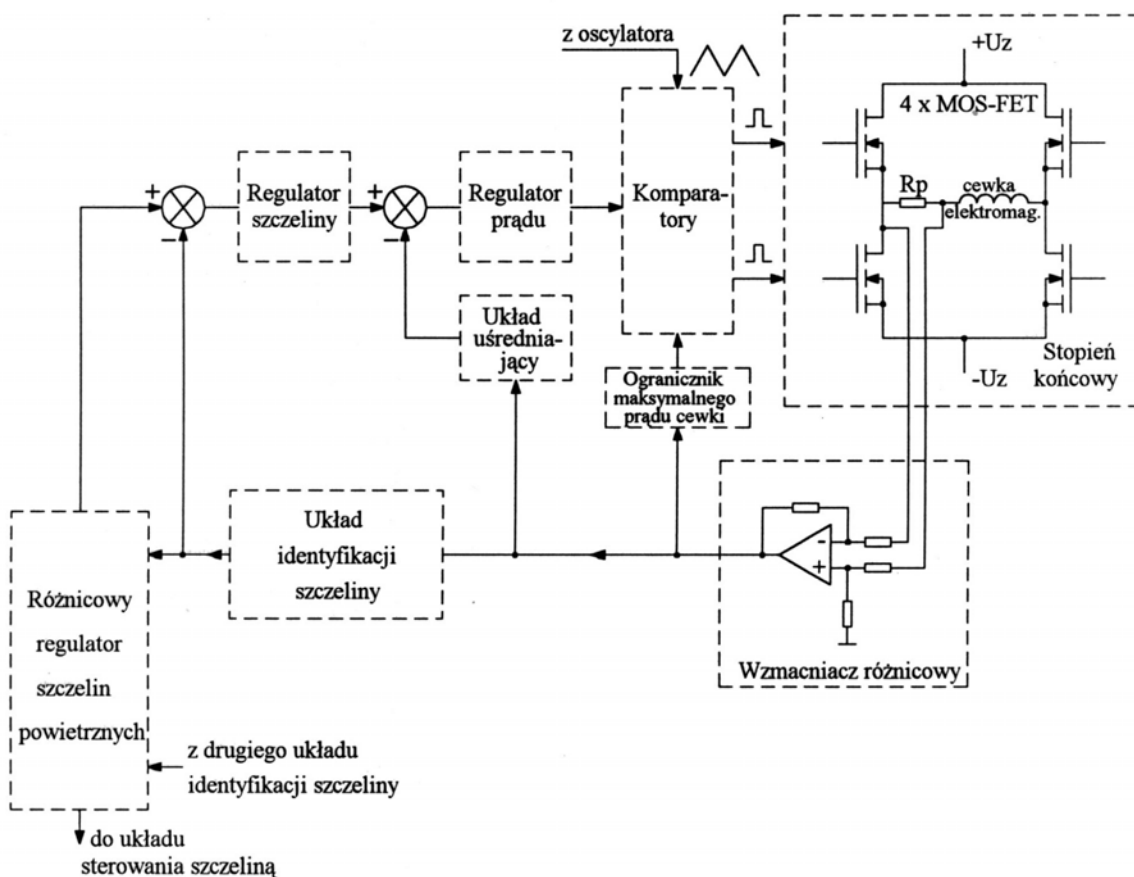
Rys. 1. Schemat blokowy układu sterowania pracą łożyska wzdłużnego [1]

- WM1, WM2 - Wzmacniacz mocy
- UPC - Układ ograniczenia prądu cewki
- GU PWM - Generator układu PWM (modulacji szerokości impulsów)
- RPW 1, RPW2 - Regulator prądu wzbudnika
- UIS - Układ identyfikacji szczeliny

Każdy ze wzmacniaczy mocy sterowany jest trzema sygnałami: - sygnałem wyjściowym regulatora prądu wzbudnika,
 - sygnałem z układu kontrolującego dopuszczalną wartość prądu wzbudnika,
 - sygnałem z generatora sterującego pracą wzmacniacza z modulacją szerokości impulsów (PWM).

Rysunek 2 przedstawia dokładny schemat blokowy układu regulacji prądu w cewkach. Zadaniem układu kontroli dopuszczalnego prądu wzbudnika jest zabezpieczenie uzwojenia elektromagnesu przed przegrzaniem, w przypadku wystąpienia niedopuszczalnego

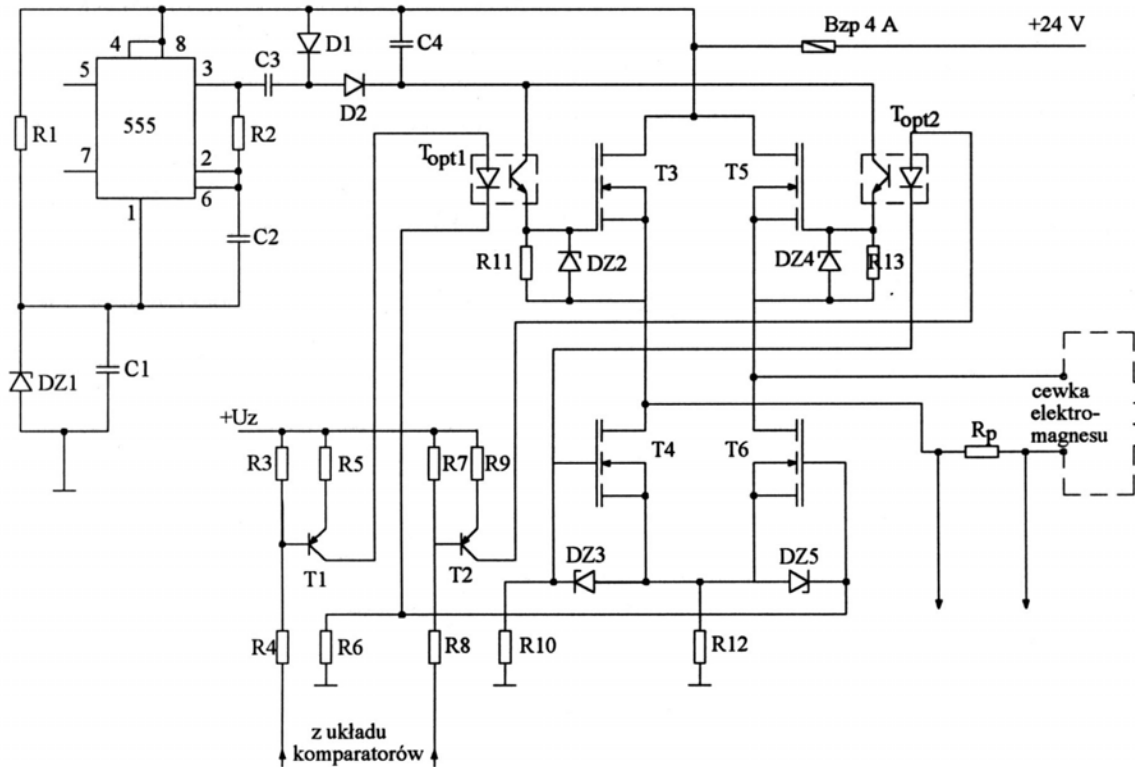
przyrostu prądu cewki. Sygnały o prądach płynących w cewkach są zbierane z oporników R_{p1} i R_{p2} . Sygnały te podawane są także na dwa inne układy, tj. układy regulatorów prądu RP_{w1} i RP_{w2} oraz na układy identyfikacji długości szczelin powietrznych w obrębie obwodu magnetycznego elektromagnesów. Zadaniem układów identyfikacji szczelin powietrznych jest ustalenie aktualnego położenia tarczy łożyska względem elektromagnesów. Do identyfikacji wartości szczelin wykorzystuje się informację zawartą w przebiegu impulsów prądowych elektromagnesów łożyska. Sygnały o wartości obu szczelin podawane są na układ różnicowy. Jeżeli sygnały te są równe, to na wyjściu układu różnicowego wartość napięcia wynosi zero, zaś regulatory prądu elektromagnesów generują impulsy o ustalonej szerokości. Jeżeli wartości szczelin powietrznych obu elektromagnesów są różne, na wyjściu układu różnicowego pojawia się sygnał. Sygnał ten po przekazaniu do regulatorów prądu wywołuje zmianę prądu w każdym z elektromagnesów, korygując położenie tarczy łożyska.



Rys. 2. Schemat blokowy wzmacniacza mocy z zespołem identyfikacji przerwy powietrznej i układami regulatorów: prądu, szczelin

Schemat wzmacniacza mocy został przedstawiony na rysunku 3. Cewka elektromagnesu łożyska L wraz z opornikiem pomiarowym R_p podłączona jest do przekątnej mostka utworzonego z czterech tranzystorów *MOS-FET*. Bramki górnych tranzystorów mostka sterowane są z tranzystorów T_{opt1} i T_{opt2} . Bramki dolnych tranzystorów mostka sterowane są napięciami odkładającymi się na rezystorach połączonych z kolektorami tranzystorów *n-p-n* poprzez diody tranzystorów. Sterowanie bramkami tranzystorów *MOS-FET* układu mostkowego jest tak zrealizowane, że w stan przewodzenia są wprowadzone parami kolejne: górny-lewy i dolny-prawy oraz górny-prawy i dolny-lewy tranzystor. W ten sposób elektromagnes łożyska zasilany jest pełnym napięciem $\pm 24V$.

Zadaniem układu zbudowanego z elementu 555 jest wytworzenie napięcia wyższego od napięcia zasilania mostka, potrzebnego do pełnego wysterowania bramek górnych tranzystorów *MOS-FET*. Układ 555 generuje falę prostokątną o częstotliwości określonej przez elementy RC podłączone do zacisków o numerach 3, 2, 6. Fala prostokątna w układzie podłączonym do wyjścia 3, zbudowanym z dwóch diod i dwóch kondensatorów, przetwarzana jest na napięcie stałe dodające się do napięcia zasilania.

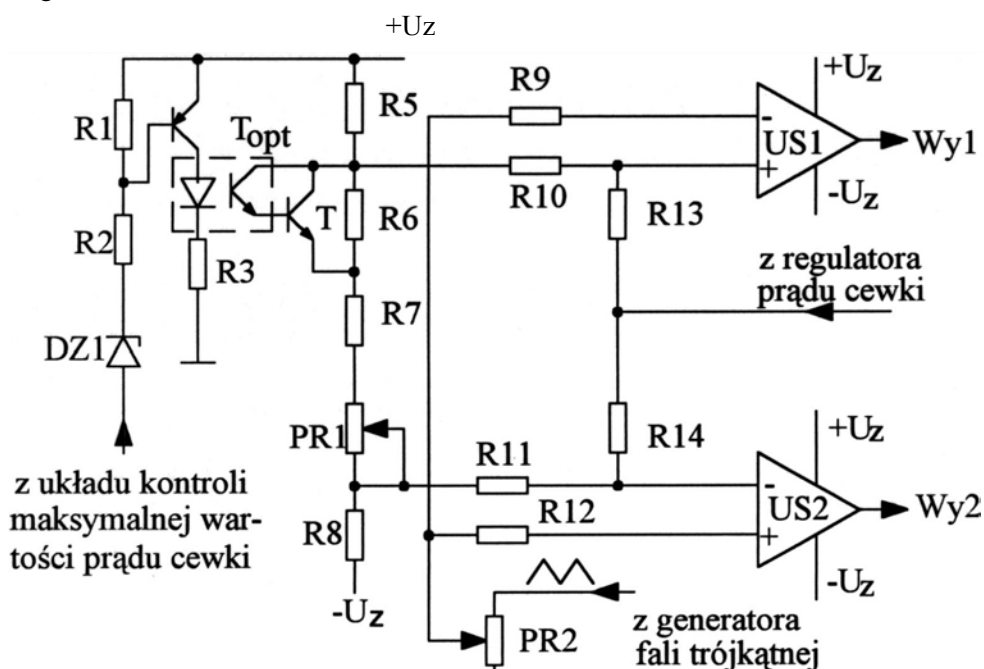


Rys. 3. Ideowy schemat układu zasilania elektromagnesu

Sygnalami sterującymi wzmacniaczem mocy są impulsy przychodzące z układu komparatorów. Schemat układu komparatorów przedstawiony został na rysunku 4. Na wejście "minus" górnego komparatora, oraz na wejście "plus" dolnego komparatora podawana jest z generatora fala trójkątna. Na wejściu dodatnim górnego komparatora sumowane są sygnały z układu wstępnej polaryzacji i regulatora prądu cewki elektromagnesu. Natomiast, na wejściu ujemnym komparatora dolnego następuje podobne sumowanie lecz na poziomie ujemnym. Górny komparator porównuje wypadkowe napięcie z falą trójkątną przy dodatnich półoknach fali trójkątnej, a dolny - przy ujemnych. W ten sposób są generowane impulsy sterujące przemienną pracą mostka mocy. Sygnał pochodzący z regulatora prądu cewki zmienia szerokość generowanych impulsów, zmniejszając lub zwiększając prąd cewki elektromagnesu.

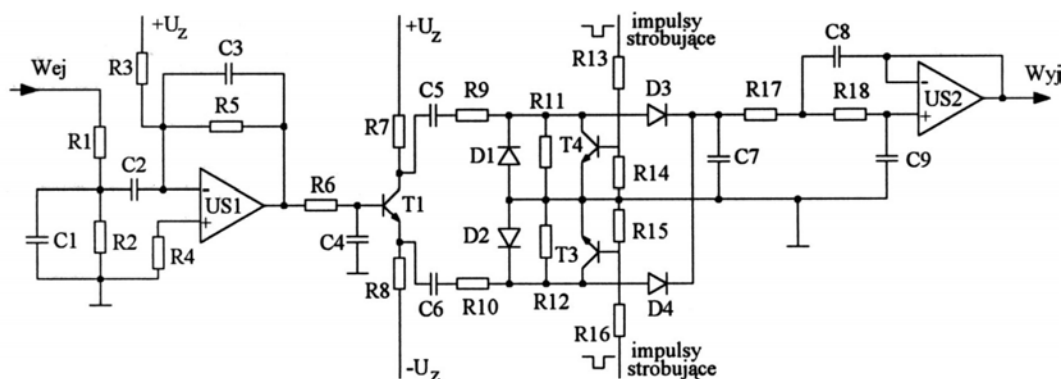
Do układu wstępnej polaryzacji podłączony jest tranzystor T, sterowany przez tranzoptor T_{opt} . Tranzoptor ten jest sterowany układem kontroli maksymalnej wartości prądu cewki. W przypadku gdy prąd cewki nie przekracza wartości dopuszczalnej, tranzystor T jest w stanie nasycenia. Zwarty jest wówczas jeden z oporników układu wstępnej polaryzacji komparatorów. Gdy prąd w cewce elektromagnesu nadmiernie wzrośnie, wówczas tranzystor ten przechodzi w stan odcięcia, powodując zmianę napięcia odniesienia w każdym z komparatorów. Uzyskuje się w ten sposób *mniejsze wypełnienie*

impulsów sterujących mostek mocy, a tym samym obniżenie prądu płynącego w cewce elektromagnesu.



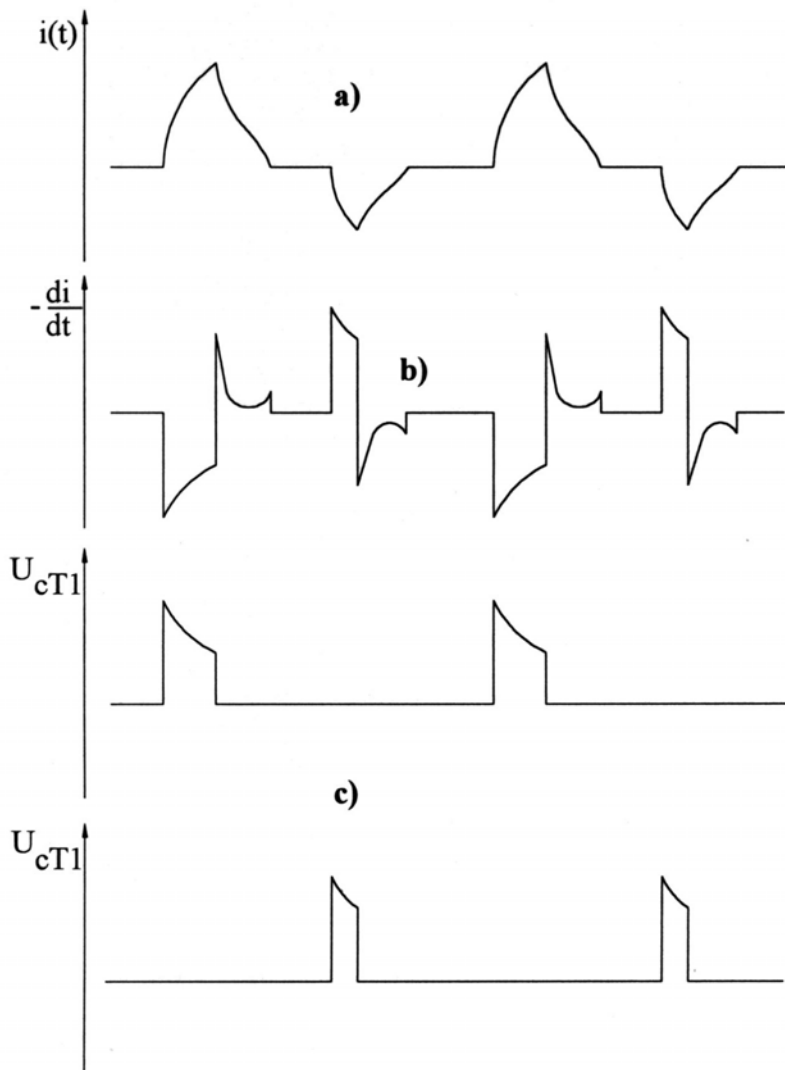
Rys. 4. Ideowy schemat układu komparatorów

Na rysunku 5 przedstawiony został układ identyfikacji wartości szczeliny powietrznej. Sygnałem wejściowym do tego układu jest prąd z cewki elektromagnesu, zgodny z przebiegiem przedstawionym na rysunku 6 a. Dzielnik oporowy $R1, R2$ ustala odpowiedni poziom tego sygnału na wejściu układu różniczkującego. Układ różniczkujący zbudowany jest ze wzmacniacza $US1$ i elementów R_3C_2 .



Rys. 5. Ideowy schemat układu identyfikującego wartość szczeliny powietrznej
Przebiegi sygnału na wyjściu układu różniczkującego przedstawia rysunek 6 b. Zróżniczkowany sygnał prądowy podawany jest na bazę tranzystora T_1 . Zadaniem tranzystora T_1 jest wygenerowanie dwóch przebiegów pochodnej prądu cewki o przeciwnych fazach. Otrzymane w ten sposób przebiegi są następnie strobowane sygnałami wytworzonymi przez układ komparatorów. Dzięki temu uzyskuje się wydzielenie przebiegów pochodnych prądu w cewce elektromagnesu (rys. 6 c). Prąd przechodzący przez diody D_3, D_4 ładuje kondensator C_7 . Otrzymane pulsujące napięcie jest następnie wygładzane przez filtr

dolnoprzepustowy, zbudowany z elementów: $US2$, C_8 , C_9 , R_{17} , R_{18} . Napięcie na wyjściu z tego filtra zawiera informację o aktualnej wartości szczeliny.

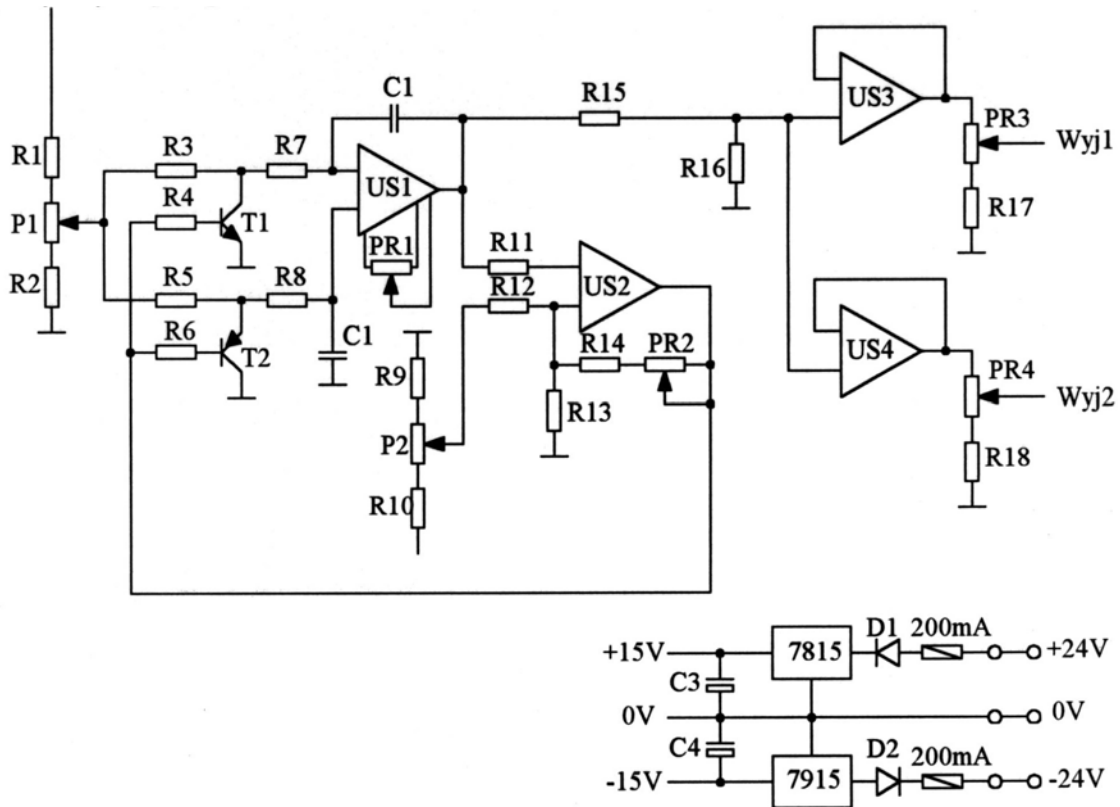


Rys. 6. Przebieg sygnału elektrycznego w układzie identyfikacji wartości szczeliny powietrznej elektromagnesu, a) prądu cewki, b) sygnału na wyjściu z układu różniczkującego, c) impulsów po strobowaniu

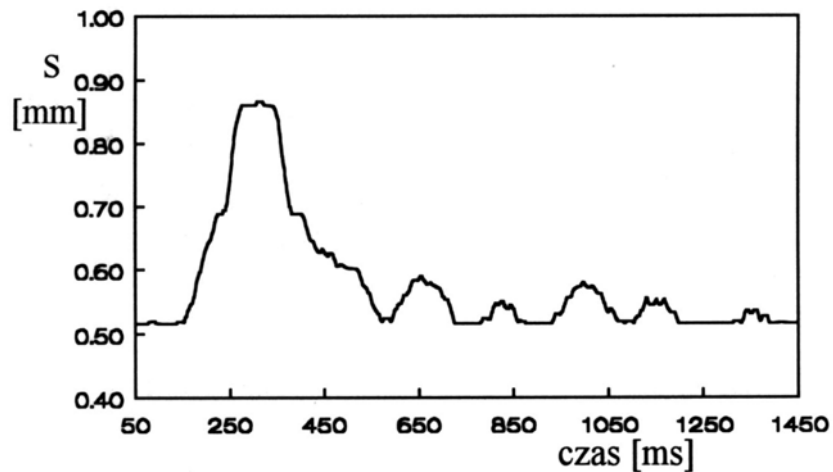
Schemat układu generatora przebiegów trójkątnych i prostokątnych przedstawiony został na rysunku 7. Wzmacniacz operacyjny $US1$ pracuje jako różnicowy integrator. Całkuje on sygnał napięciowy z potencjometru P_1 . Drugi ze wzmacniaczy, tj. $US2$ jest komparatorem z histerezą o szerokości ustawianej potencjometrem PR_2 . Sygnał wyjściowy z tego komparatora podawany jest na tranzystory T_1 i T_2 . Tranzystory te zwierają kolejno oba wejścia integratora różnicowego wywołując na jego wyjściu liniowe narastanie i opadanie sygnału. Wzmacniacze operacyjne $US3$ i $US4$, pracujące jako wtórniki napięciowe, separują układ generatora od dwóch wzmacniaczy mocy łożyska.

Analogowe układy sterowania łożyskami magnetycznymi mają dość sztywną konfigurację wzajemnych powiązań podzespołów elektronicznych regulatorów. W technice analogowej trudno jest zrealizować wielowariantowe systemy sterowania. Zwykle zmiana koncepcji sterowania wymaga przebudowy układu. Z tego względu analogowymi układami sterowania są głównie konwencjonalne regulatory typu PID lub PD [3]. Jednak znacznie niższy koszt regulatorów analogowych, w porównaniu z cyfrowymi, sprawia, że

znajdują one wciąż duże zastosowanie w układach sterowania magnetycznymi łożyskami aktywnymi [2, 3].



Rys. 7. Schemat układu generatora przebiegów trójkątnych i prostokątnych



Rys. 8. Przykładowy przebieg zmian wartości szczeliny w czasie przy dochodzenia do stanu równowagi po impulsie zakłócającym [1]

WNIOSKI

Podczas prowadzenia badań stwierdzono występowanie interakcji pomiędzy zidentyfikowaną wartością szczeliny a wartością prądu płynącego w uzwojeniach cewek zasilających. Zjawisko to niekiedy nie przeszkadza w regulacji. Najczęściej jednak nosi ono

cechy negatywne. W dalszych badaniach przewiduje się modyfikacje układu identyfikującego szczelinę w celu zminimalizowania tego zjawiska

Uzyskane podczas badań charakterystyki przebiegów czasowych regulacji szczeliny potwierdzają wyniki uzyskane na drodze analitycznej

LITERATURA

[1]. J. Burcan (1994): Modelowe badania łożyskowań wspomaganych magnetycznie, *Sprawozdanie z Projektu Badawczego KBN nr 3 0016 91 01*.

[2]. J. Satoh, J. Nagahiro, Ch. Murakami, A. Nakajima (1988): Vibration and Control in Outer Rotor Type Magnetic Bearings, *Proceedings of the First International Symposium ETH Zurich, Switzerland, June 6-8, 1988, Springer-herlag Berlin-Heidelberg-New YorkLondon Paris-Tokyo, s. 169-176*,

[3]. G. Schweitzer (1988): Magnetic Bearings, *Proceedings of the First International Symposium ETH Zurich, Switzerland, June 6-8, 1988, Springer-Verlag BerlinHeidelberg New York London-Paris-Tokyo*.

AUTOMATIC REGULATION OF THE GAP DISPLACEMENT CONTROL SYSTEMS IN AXIAL BEARINGS

SUMMARY

A solution to the gap displacement control systems in magnetic bearings is presented. The magnets are driven by constant voltage pulse width modulated signal (PWM). The currents in magnetic coils are the functions of the self - inductances, which are the functions of the gap displacements. These signals are put into a detecting circuits to produce the feedback signals. The feedback signals are used to control the gap distances.

Recenzja: prof. dr inż. Zbigniew Lawrowski