

ANTONI NIEDERLIŃSKI

Katedra Napędu Elektrycznego

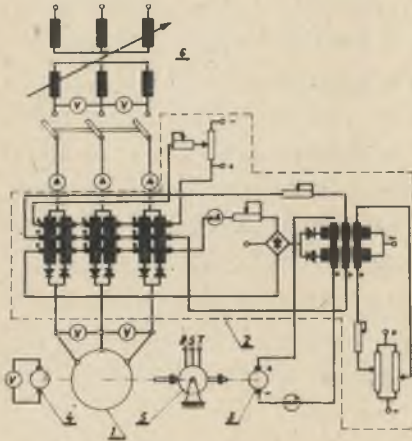
NIELINIOWE OSCYLACJE SILNIKA ASYNCHRONICZNEGO
REGULOWANEGO ZA POMOCĄ WZMACNIACZY MAGNETYCZNYCH
ZE SAMOWZBUDZENIEM BEZPOŚREDNIM

Streszczenie: Omówiono dane doświadczalne otrzymane w wyniku badań dynamiki pewnego układu regulacji silnika asynchronicznego za pomocą wzmacniaczy magnetycznych ze samowzbudzeniem bezpośrednim. Zaproponowano uproszczony model matematyczny umożliwiający analizę dynamiki układu metodą płaszczyzny fazowej. Przeprowadzono metodą płaszczyzny fazowej analizę procesu przejściowego wywołanego zrzutem momentu obciążenia.

Przedmiotem rozważań jest układ regulacji prędkości obrotowej silnika asynchronicznego za pomocą wzmacniaczy magnetycznych ze samowzbudzeniem bezpośrednim. Schemat modelu laboratoryjnego omawianego układu przedstawiono na rys. 1. Rys. 2 i rys. 3 przedstawiają oscylogramy przebiegów nieustalonych prądu silnika i prędkości obrotowej przy skokowej zmianie momentu obciążenia ($\Delta M_{obc} = 0,85$) i napięcia zadającego ($\Delta U_z = 0,2$). Charakterystyczną cechą tych przebiegów jest nieliniowość występujących w stanie nieustalonym drgań. Jak wynika z przebie-

gu prądu stojana, w stanie nieustalonym układu można wyraźnie wyróżnić trzy okresy:

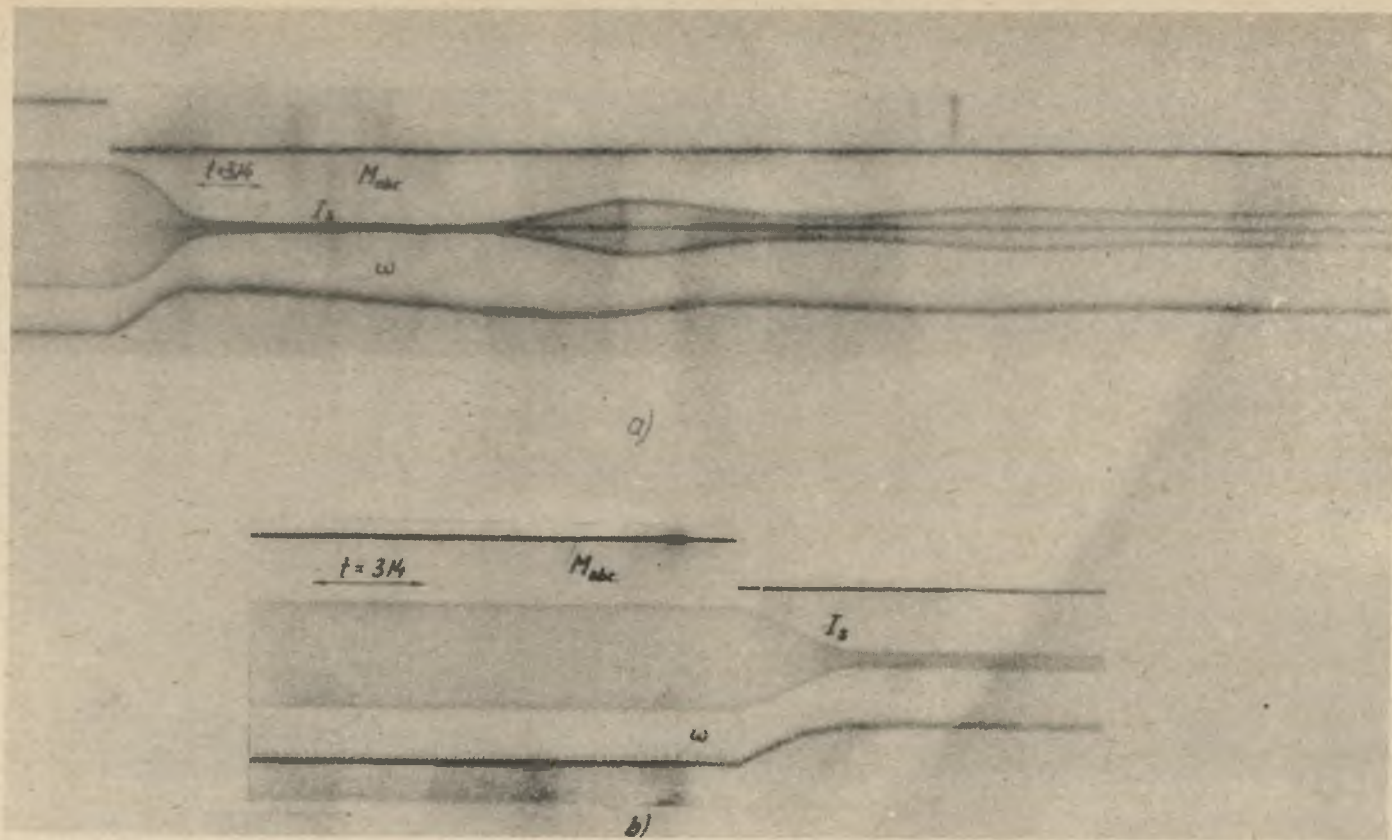
- a) okres początkowy obejmujący przedział od momentu skokowej zmiany wielkości wymuszającej do momentu zaniku prądu stojana,
- b) okres "bezprądowej" pracy układu,
- c) okres końcowy obejmujący przedział od momentu pojawienia się prądu stojana do momentu zakończenia się stanu nieustalonego.



Rys. 1. Schemat modelu laboratoryjnego układu regulacji silnika asynchronicznego za pomocą wzmacniaczy magnetycznych; 1. Silnik asynchroniczny regulowany; 2. Dwustopniowy regulator magnetyczny; 3. Tachogenerator regulacyjny; 4. Tachogenerator pomiarowy; 5. Dynamometr elektromaszynowy; 6. Transformator trójfazowy regulowany.

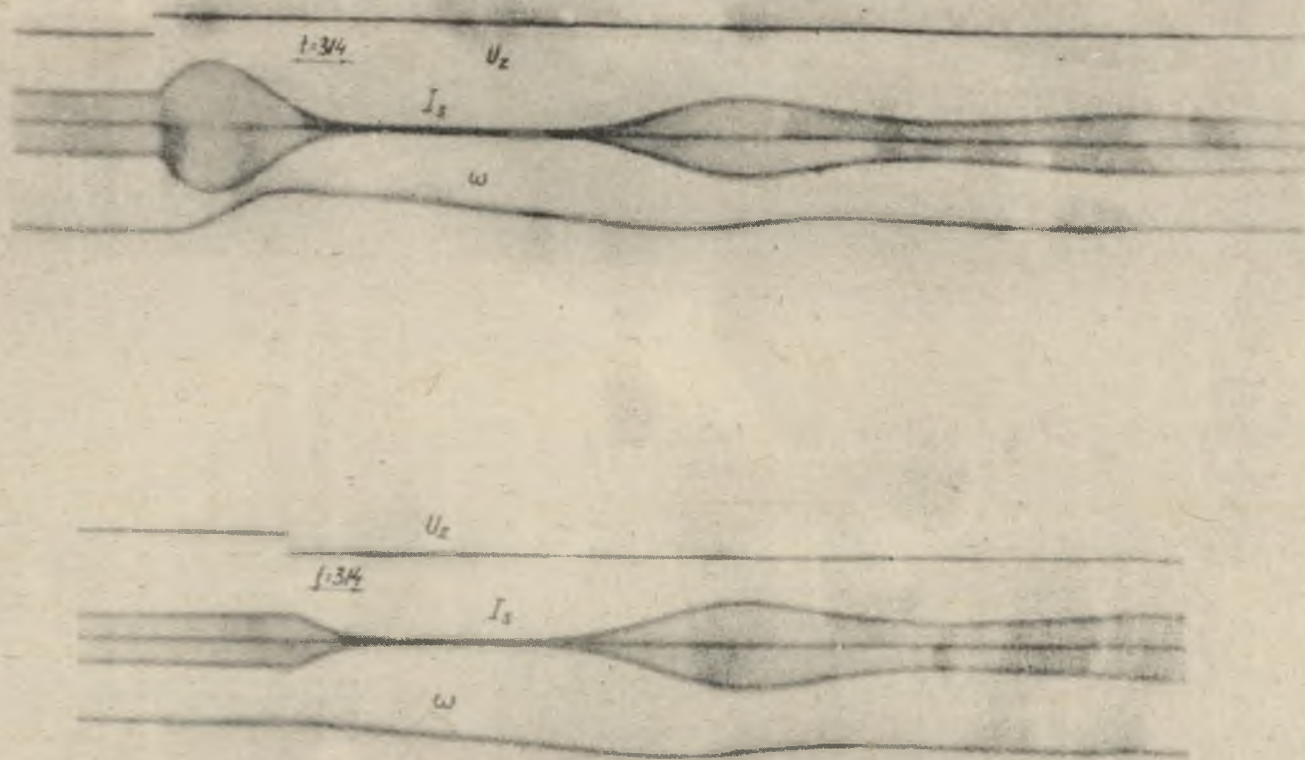
Przyczyną nieliniowego charakteru drgań układu jest nieciągły przepływ prądu stojana, w wyniku którego w "bezprądowym" okresie stanu nieustalonego silnik jest hamowany tylko mechanicznie. Zjawisko nieciągłego przepływu prądu stojana można wyjaśnić następująco: rozpatrzmy zrzut momentu obciążenia (por. oscylogram z rys. 2). Zrzut momentu obciążenia prowadzi do gwałtownego wzrostu prędkości obrotowej, w wyniku którego silnie maleje wypadkowy sygnał sterujący wzmacniaczy magnetycznych i punkt pracy układu na charakterystyce statycznej wzmacniaczy magnetycznych (por. rys. 4) przesunięty zostaje głęboko w odcinek "dolnego nasycenia" tej charakterystyki, co prowadzi

praktycznie do odłączenia silnika od sieci i zaniku prądu stojana. Od tego momentu począwszy silnik jest hamowany momentem tarcia, prędkość obrotowa silnika maleje powoli i przy pewnej jej wartości punkt pracy



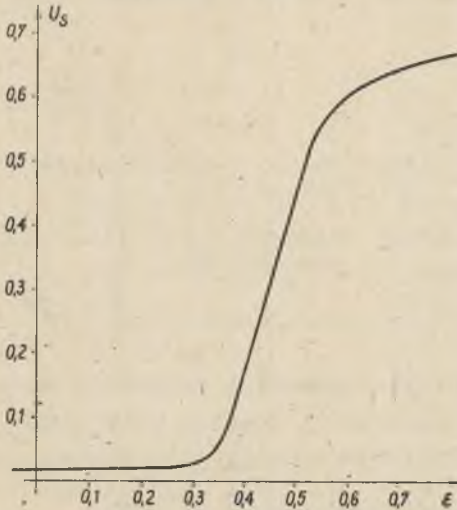
Rys. 2. Osylogram prądu stojana i prędkości obrotowej silnika przy zrzucie momentu obciążenia dla

a) silnika regulowanego, b) silnika nieregulowanego



Rys. 3. Oscylogramy prądu stojana i prędkości obrotowej silnika przy skokowej zmianie napięcia zadającego

układu wychodzi z odcinka "dolnego nasycenia" w obszar dużych wartości napięcia stojana, co prowadzi do ponownego "przyłączenia" silnika do sieci i pojawienia się prądu stojana. Jak



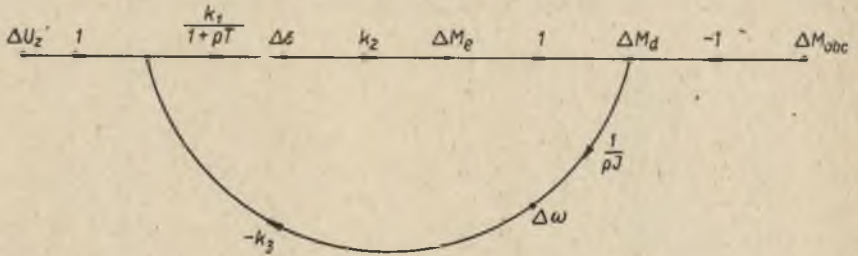
Rys.4. Charakterystyka stycznika regulatora magnetycznego
 U_s - napięcie stojana silnika; ϵ - błąd regulacji

wykazały przeprowadzone doświadczenia przy bardzo małych zmianach wielkości zaburzających proces przejściowy odbywa się przy ciągłym przepływie prądu stojana, jednak występujące wówczas zmiany prędkości obrotowej są tak niewielkie, że giną w szumie generowanym na komutatorze tachogeneratora pomiarowego.

Analiza metodą płaszczyzny fazowej nieliniowego procesu przejściowego wywołanego zrzutem momentu obciążenia przeprowadzona zostanie przy następujących założeniach upraszczających:

- a) pomija się elektromagnetyczne procesy przejściowe w silniku asynchronicznym,
- b) zakłada się, że regulator magnetyczny jest elementem inercyjnym pierwszego rzędu o działaniu ciągłym.

Przy powyższych założeniach dla pierwszego okresu stanu niustalonego można posłużyć się wykresem przepływu sygnałów z rys. 5.



Rys.5. Wykres przepływu sygnałów dla I i III okresu stanu nieustalonego

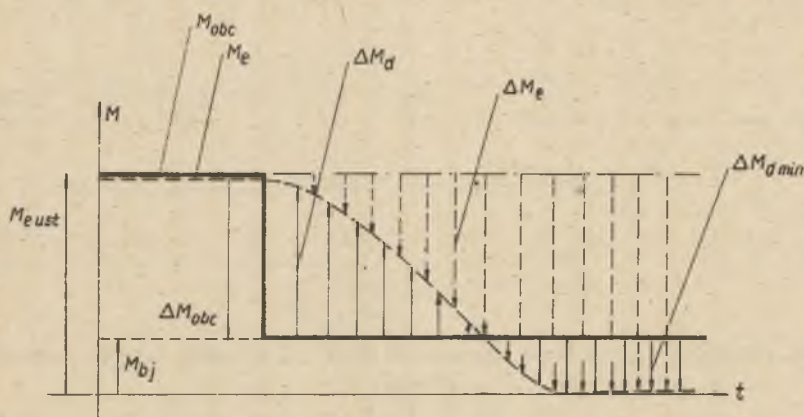
gdzie:

- T - stała czasowa regulatora magnetycznego,
- J - moment bezwładności zespołu wirującego,
- k_1 - współczynnik wzmocnienia regulatora,
- k_2 - współczynnik wzmocnienia silnika,
- k_3 - współczynnik wzmocnienia techogeneratora regulacyjnego,
- ΔM_e - zmiana momentu elektrycznego silnika,
- ΔM_d - zmiana momentu dynamicznego,
- ΔM_{obc} - zmiana momentu obciążenia,
- $\Delta \omega$ - zmiana prędkości obrotowej,
- $\Delta \epsilon$ - zmiana błędu regulacji,
- ΔU_z - zmiana napięcia zadającego.

Wykres 5 opisuje stan nieustalony układu do momentu zaniku prądu stojana silnika, a więc dla momentów dynamicznych $\Delta M_d \geq \Delta M_{d.min}$, gdzie wielkość $\Delta M_{d.min}$ zależy od punktu pracy regulatora w stanie ustalonym przed zrzutem momentu obciążenia. Znając ten punkt można określić zmianę momentu elektrycznego - ΔM_e , dla której można uważać silnik asynchroniczny za praktycznie odłączony od sieci,

$$-\Delta M_e = M_{e.ust.}$$

gdzie $M_{e.ust.}$ jest momentem obciążenia silnika przed zrzutem momentu. Stąd można określić (por. rys.6):



Rys. 6. Przebiegi czasowe momentów i zmian momentów w I i II okresie stanu nieustalonego wywołanego zrzutem momentu obciążenia

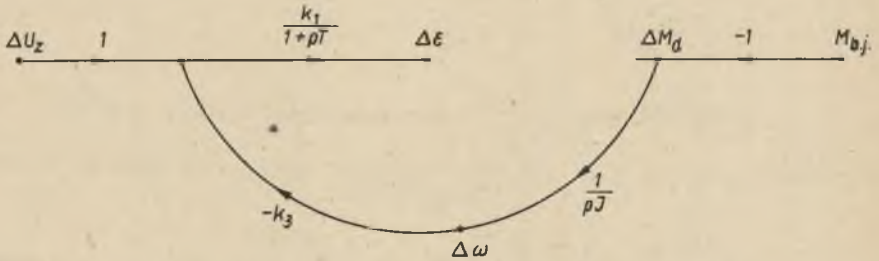
$$\Delta M_{d.min} = \Delta M_e - \Delta M_{obc} = -M_{e.ust.} - \Delta M_{obc}$$

gdzie $\Delta M_{obc} < 0$ jest wielkością zrzuconego momentu obciążenia.

W drugim okresie stanu nieustalonego moment elektryczny jest równy zeru i silnik jest hamowany momentem biegu jałowego $M_{D.J}$ układu. Stąd wykres przepływu sygnałów przedstawiony na rys.7.

Drugi okres stanu nieustalonego kończy się z chwilą, gdy prędkość silnika zmaleje tak że nastąpi wysterowanie regulatora magnetycznego i pojawi się prąd stojana. Zakłada się że nastąpi to wówczas gdy po pierwszym przeregulowaniu wartość błęd regulacji $\Delta\delta$ będzie po raz pierwszy równa wartości odpowiadającej nowemu stanowi ustalonemu układu. Od tego momentu począwszy proces przejściowy będzie opisywany wykresem przepływu sygnałów odpowiadającemu pierwszemu okresowi stanu nieustalonego.

Na podstawie wykresu przepływu sygnałów dla pierwszego okresu stanu nieustalonego można napisać:



Rys. 7. Wykres przepływu sygnałów dla II okresu stanu nieustalonego

$$\frac{d\Delta\omega}{dt} = \frac{1}{J} \Delta M_d \quad (1)$$

$$\frac{d\Delta M_d}{dt} = -\frac{1}{T} (K \cdot \Delta\omega + \Delta M_d + \Delta M_{obc}) \quad (2)$$

gdzie $K = k_1 k_2 k_3$

Stąd równanie izoklin płaszczyzny fazowej

$$m = \frac{d\Delta M_d}{d\Delta\omega} = -\frac{J}{T} \frac{K \cdot \Delta\omega + \Delta M_d + \Delta M_{obc}}{\Delta M_d} \quad (3)$$

Dla drugiego okresu stanu nieustalonego

$$\frac{d\Delta\omega}{dt} = -\frac{M_{obj}}{J} = \text{const}$$

Błąd regulacji zmienia się więc zgodnie z funkcją

$$\begin{aligned} \Delta \varepsilon &= -k_1 k_3 \frac{M_{b.g.j.e}}{J} \int_0^t (1 - e^{-\frac{t}{T}}) dt + \Delta \varepsilon_0 = \\ &= -k_1 k_3 \frac{M_{b.g.j.e}}{J} (t + T e^{-\frac{t}{T}}) + \Delta \varepsilon_0 \end{aligned} \quad (5)$$

Dla $t = 0$ (początek hamowania mechanicznego) $\Delta \varepsilon = \Delta \varepsilon_1$
a stąd

$$\Delta \varepsilon = -k_1 k_3 \frac{M_{b.g.j.e}}{J} [t - T(1 - e^{-\frac{t}{T}})] + \Delta \varepsilon_1 \quad (6)$$

Dla dużych wartości t można przyjąć, że

$$\Delta \varepsilon \approx -k_1 k_3 \frac{M_{b.g.j.e}}{J} (t - T) + \Delta \varepsilon_1 \quad (7)$$

czyli wartość $\Delta \varepsilon$ odpowiadająca statycznie danej wartości $\Delta \omega$ wystąpi z powodu inercji regulatora dopiero wtedy gdy wartość $\Delta \omega$ zmaleje dodatkowo o $\frac{M_{b.g.j.e}}{J} T$. Stąd w chwili gdy $\Delta \varepsilon = 0$ wartość $\Delta \omega$ będzie o $\frac{M_{b.g.j.e}}{J} T$ mniejsza od wartości $\Delta \omega$ odpowiadającej statycznie wartości $\Delta \varepsilon = 0$.

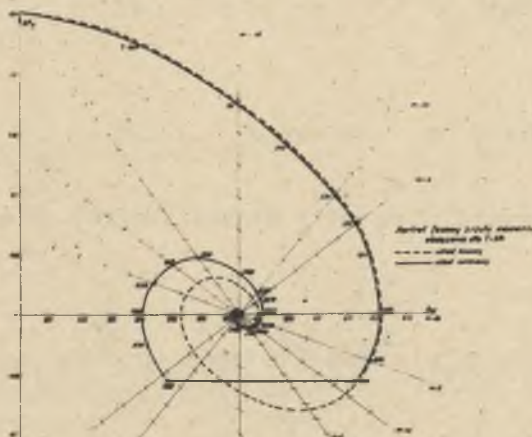
Na wykresach z rys. 8 i rys. 9 przedstawiono portrety fazowe w jednostkach względnym zrzutu momentu obciążenia dla przypadku

$$J = 568$$

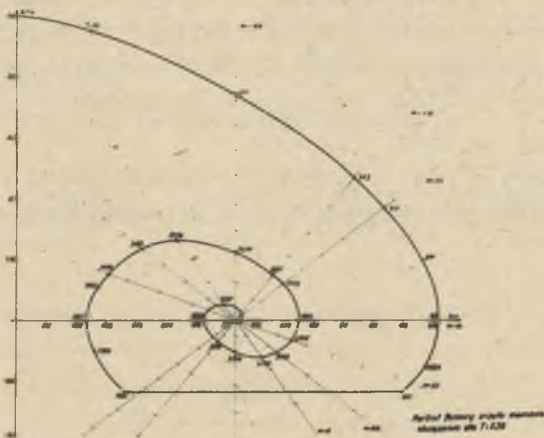
$$K = k_1 k_2 k_3 = \frac{\Delta M_e}{\Delta \omega} = 3,4$$

Portret fazowy z rys. 8 odpowiada przypadkowi $T = 314$, portret fazowy z rys. 9 przypadkowi $T = 628$. Na rys. 8 przedsta-

wiono dodatkowo linią przerywaną portret fazowy zrzutu momentu obciążenia w układzie liniowym.

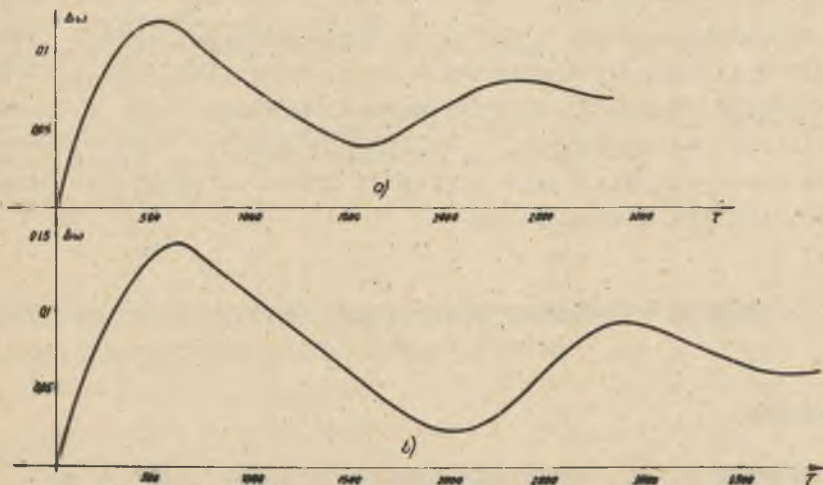


Rys. 8. Portret fazowy zrzutu momentu obciążenia dla $T = 314$
 ----- układ liniowy
 ————— układ nieliniowy



Rys. 9. Portret fazowy zrzutu momentu obciążenia dla $T = 628$

Rys. 10 przedstawia przebiegi czasowe prędkości obrotowej obliczone na podstawie portretów fazowych układu nieliniowego z rys. 8 i 9. Z przebiegów tych widać że stała czasowa regula-



Rys. 10. Przebiegi czasowe prędkości obrotowej przy zrzucie momentu obciążenia: a) obliczony na podstawie portretu fazowego z rysunku 8; b) obliczony na podstawie portretu fazowego z rysunku 9

torą posiada decydujący wpływ na czas trwania czysto mechanicznego hamowania. Ponieważ w drugim okresie stanu nieustalonego następuje przesterowanie wzmacniacza magnetycznego z obszaru ujemnych wewnętrznych sprzężeń zwrotnych w obszar dodatnich wewnętrznych sprzężeń zwrotnych, a więc wzmacniacz zachowuje się w tym okresie jak element inercyjny wysokiego rzędu, stąd w rzeczywistości stosunek czasu narastania prędkości obrotowej w pierwszym okresie stanu nieustalonego do czasu opadania prędkości w drugim okresie stanu nieustalonego (por. oscylogramy) jest mniejszy niż to wynikało z przybliżonej analizy metodą płaszczyzny fazowej.

Porównanie przebiegu nieustalonego wywołanego zrzutem momentu obciążenia w układzie regulacji silnika asynchronicznego za

pomocą wzmacniaczy magnetycznych ze samowzbudzeniem bezpośrednim z odpowiednim przebiegiem otrzymanym dla silnika nieregulowanego (por. oscylogram z rys. 2) prowadzi do wniosku, że dynamika silnika regulowanego jest znacznie gorsza od dynamiki silnika nieregulowanego. Pogorszenie właściwości dynamicznych jest spowodowane m.in. istnieniem "bezprądowego" okresu pracy układu. Możliwość wyeliminowania tego okresu istnieje w nawrotnym układzie regulacji silnika asynchronicznego za pomocą wzmacniaczy magnetycznych, w którym w miejscu "bezprądowego" okresu stanu nieustalonego występuje okres intensywnego hamowania silnika przeciwwłączeniem.

Rękopis złożono w redakcji w styczniu 1964 r.

LITERATURA

- [1] Cosgriff R.L.: "Nonlinear Control Systems" McGraw-Hill Book Co, N. York 1958.
- [2] Cunningham W.J.: "Analiza układów nieliniowych" WNT Warszawa 1962.
- [3] Paszek Wł.: "Wzmacniacze elektromaszynowe i transduktory" Gliwice, 1963.
- [4] Rozenblat M.A.: "Magnitnye usiliteli" Sovetskoe Radio, Moskwa 1961.

НЕЛИНЕЙНЫЕ ОСЦИЛЛЯЦИИ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ, РЕГУЛИРУЕМОГО ПРИ ПОМОЩИ МАГНИТНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ С ПРЯМЫМ САМОВОЗБУЖДЕНИЕМ

Резюме

В статье рассмотрены опытные данные, полученные в результате исследования динамики некоторой системы регулировки асинхронного двигателя при помощи магнитных усилителей с прямым самовозбуждением. Предложена упрощенная алгебраическая модель, дающая возможность произвести анализ динамики системы при помощи метода фазовой плоскости. Произведено при помощи метода фазной плоскости анализ переходного процесса, вызванного сбросом момента нагрузки.

NONLINEAR TRANSIENTS OF THE ASYNCHRONOUS MOTOR CONTROLLED BY MAGNETIC AMPLIFIERS WITH SELF-SATURATION

Summary

Some experimental data obtained by testing a magnetic amplifier controlled induction motor have been discussed. A simplified mathematical model which makes possible a phase-plane solution of the speed transients has been proposed. The phase-plane solutions of speed transients obtained by a step change of the motor load have been calculated.