ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1969
Seria: ELEKTRYKA z. 25 Nr kol. 239

TADEUSZ RODACKI
Katedra Napędu Elektrycznego

PORÓWNANIE WŁAŚCIWOŚCI DYNAMICZNYCH UKŁADU LEONARDA ZE SPRZĘŻENIEM PRĘDKOŚCIOWYM UJEMNYM I NAPIĘCIOWYM UJEMNYM

Streszczenie. W pracy przeanalizowano i porównano właściwości dynamiczne układu Leonarda z ujemnym prędkościowym i ujemnym napięciowym sprzężeniem zwrotnym dla takich samych efektów statycznych w oparciu o rzeczywisty układ pracujący z amplidyną jako wzbudnicą generatora.

Analizę stanów przejściowych przeprowadzono przy założeniu pewnych uproszczeń teoretycznie metodą h - funkcji oraz na maszynie analogowej, a otrzymane wyniki porównano z wynikami otrzymanymi z pomiarów. Niniejsza praca jest również porównaniem metod analizowania dynamiki układów automatycznej regulacji.

1. Wstęp

Zastosowanie otwartego układu Leonarda w nowoczesnych układach napędowych jest ograniczone ze względu na szereg wad:

- bardzo miękka charakterystyka mechaniczna,
- istnienie magnetyzmu szczątkowego,
- mała dokładność i mały zakres sterowania prędkości obrotowej.

Wymienione okoliczności ograniczają całkowity zakres regulacji prędkości w zwykłym układzie Leonarda do 1:30. Obecnie w wielu układach wymagamy aby zakres zmienności prędkości wynosił przynajmniej 1:100. Jest to możliwe w układzie zamkniętym przy zastosowaniu sprzężeń usztywniających charakterystykę i gaszących strumień pochodzący od magnetyzmu szczątkowego.

Do takich sprzężeń między innymi należą:

- ujemne sprzężenie napięciowe,
- ujemne sprzężenie prędkościowe.

Sprzężenia te pozwalają jeszcze na silne forsowanie wzbudzenia przy rozruchu, a co za tym idzie skręcają czas trwania przebiegów przejściowych.

Celem niniejszych rozważań jest porównanie właściwości dynamicznych układu Leonarda z wymienionymi sprzężeniami dla takich samych efektów statycznych oraz pokazanie w jakim stopniu przeliczenia dokonane przy założeniu pewnych uproszczeń znajdują potwierdzenie w zjawiskach zachodzących w rzeczywistym układzie.

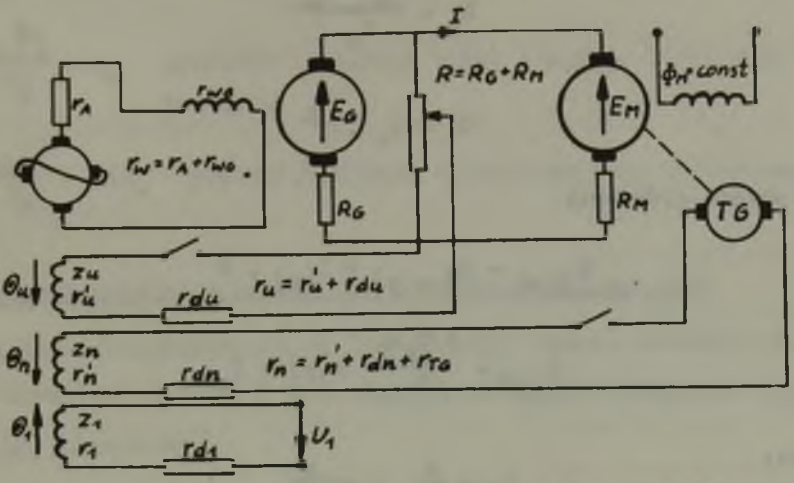
W rozważaniach analitycznych przyjęto następujące uproszczenia:

- pominięto wpływ prądów wirowych i histerezy,
- założono idealne skompensowanie maszyn,
- założono pracę na prostoliniowej części charakterystyk magnesowania prądnicy i amplidyny,
- pominięto elektromagnetyczną stałą czasową obwodu głównego Leonarda
- pominięto wpływ wewnętrznych sprzężeń w amplidynie.

Uzyskany materiał porównawczy powinien dać pewne wskazówki co do wyboru odpowiedniego sprzężenia w zależności od warunków pracy oraz obrazuje przydatność zastosowanych metod analizy i maszyny analogowej do projektowania parametrów sprzężeń zwrotnych w układach automatycznej regulacji.

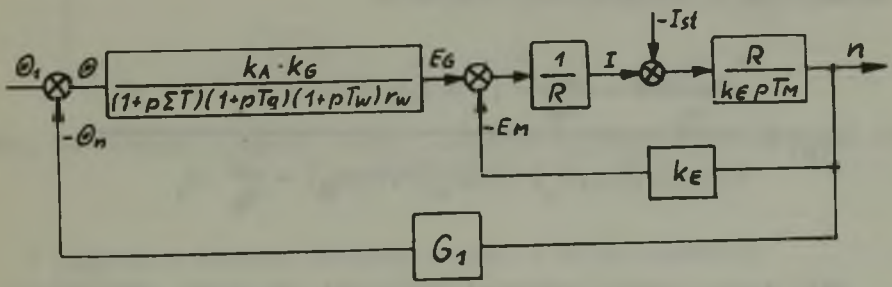
2. Funkcja przejścia układu ze sprzężeniem prędkościowym

Rozważania przeprowadzone są dla rozruchu układu Leonarda obciążonego momentem czynnym i przy pominięciu napięć remanentu (zerowe warunki początkowe).



Rys. 1. Schemat ideowy układu i oznaczenia użyte w tekście

Schemat blokowy układu ułożono w oparciu o schemat ideowy (rys. 1) i ogólne zasady budowy schematów blokowych.



Rys. 2. Schemat blokowy układu Leonarda z ujemny sprzężeniem prędkościowym

Na podstawie rys. 2 można napisać

$$E_{G(p)} = \frac{K_o\left[\theta_{1(p)} - n_{(p)} G_1\right]}{(1+p\Sigma T)(1+pT_q)(1+pT_w)} \qquad (1)$$

gdzie:

$$K_o = \frac{K_A \cdot K_G}{r_w}$$

$$G_1 = k_n \cdot \frac{z_n}{r_n}$$

dla obwodu głównego:

$$E_{G(p)} = k_E\, n(p) + I_{(p)} \cdot R \tag{2}$$

$$I_{(p)} = \frac{p\, T_M k_E}{R}\, n(p) + I_{st} \tag{3}$$

gdzie:

$$T_M = \frac{\pi}{30}\, J\, \frac{R}{k_M\, k_E}$$

Po wstawieniu (1) i (3) do (2) i przekształceniu otrzymano funkcję przejścia układu Leonarda ze sprzężeniem prędkościowym gdzie parametrem wyjściowym jest prędkość.

$$n_{(p)} = \frac{\frac{K_o\, \Theta_{1(p)}}{k_E} - \frac{I_{st}\, R}{k_E}\,(1 + p\Sigma T)(1 + pT_q)(1 + pT_w)}{(1+p\Sigma T)(1+pT_q)\,(1+pT_w)\,(1+pT_M) + \frac{K_o}{k_E}\, G_1} \tag{4}$$

Stąd łatwo uzyskać równanie prędkości dla stanu ustalonego. Podstawiając p = 0 otrzymujemy charakterystykę statyczną:

$$n = \frac{\frac{K_o\, \Theta_1}{k_E} - \frac{I_{st}\, R}{k_E}}{1 + \frac{k_o}{k_E}\, G_1} \tag{5}$$

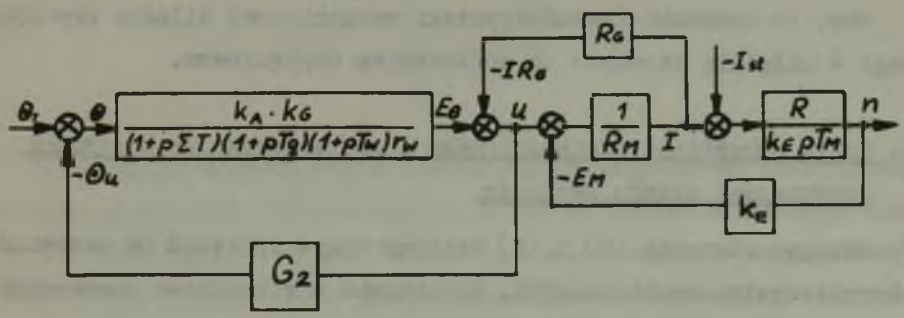
W równaniu 5 oznaczają:

$\frac{K_o \Theta_1}{k_E} = n_o$ prędkość idealnego biegu jałowego otwartego układu Leonarda,

$\frac{I_{st} R}{k_E} = \Delta n_o$ spadek prędkości w otwartym układzie Leonarda.

3. Funkcja przejścia układu ze sprzężeniem napięciowym

Rozważania przeprowadzone są dla rozruchu układu Leonarda obciążonego momentem czynnym i przy pominięciu napięć remanentu (zerowe warunki początkowe).



Rys. 3. Schemat blokowy układu Leonarda z ujemnym sprzężeniem napięciowym

W oparciu o schemat blokowy z rys. 3 można napisać:

$$E_{g(p)} = \frac{K_o\left[\Theta_{1(p)} - n_{(p)} \cdot k_E \cdot G_2 - I_{(p)} \cdot R_M \cdot G_2\right]}{(1+p\Sigma T)\,(1+pT_q)\,(1+pT_w)} \qquad (6)$$

gdzie:

$$G_2 = k_u \frac{z_u}{r_u}$$

Skorzystano z równań (2) i (3) i po odpowiednim przekształceniu otrzymano funkcję przejścia układu Leonarda ze sprzężeniem napięciowym dla prędkości jako parametru wyjściowego

$$n_{(p)} = \frac{\frac{K_o \Theta_{1(p)}}{k_E} - \frac{I_{st} R}{k_E}\left[K_o \frac{R_M}{R} G_2 + (1+p\Sigma T)(1+pTq)(1+pT_w)\right]}{(1+p\Sigma T)(1+pTq)(1+pT_w)(1+pT_M) + pT_M K_o \frac{R_M}{R} G_2 + K_o G_2} \tag{7}$$

Dla stanu ustalonego po podstawieniu p = 0 otrzymano:

$$n = \frac{\frac{K_o \Theta_1}{k_E}}{1+K_o G_2} - \left(\frac{R_G}{1+K_o G_2} + R_M\right)\frac{I_{st}}{k_E} \tag{8}$$

Jest to równanie charakterystyki mechanicznej silnika pracującego w układzie Leonarda ze sprzężeniem napięciowym.

4. Wpływ sprzężenia prędkościowego i napięciowego na statyczne właściwości układu Leonarda

Porównując równania (5) i (8) widzimy wpływ sprzężeń na sztywność charakterystyk mechanicznych. Sprzężenie prędkościowe kompensuje spadek napięcia na oporności całego obwodu głównego, natomiast sprzężenie napięciowe tylko na oporności generatora ewentualnie przewodach łączących. Oczywiście niemożliwa jest całkowita kompensacja. Praktycznie ze względu na dopuszczalną obciążalność uzwojeń sterujących amplidyny oraz ze względu na moc tachoprądnicy można uzyskać maksymalne usztywnienie charakterystyk

- dla sprzężenia napięciowego

$$\frac{\Delta n_o}{\Delta n_u} \approx 2$$

przy współczynniku forsowania $\alpha_f = 10$ (układ stabilny)

- dla sprzężenia prędkościowego

$$\frac{\Delta n_o}{\Delta n_n} = 10$$

przy współczynniku forsowania $\alpha_f = 10$ (układ wymaga stabilizacji)
Współczynnik forsowania graniczny, przy którym układ Leonarda ze sprzężeniem prędkościowym staje się niestabilny wynosi około 6

$$\Delta n_u = \left(\frac{R_G}{1+K_o G_2} + R_M\right) \frac{I_{st}}{k_E}$$

$$\Delta n_n = \frac{R}{1+\frac{K_o}{k_E} G_1} \cdot \frac{I_{st}}{k_E}$$

Sprzężenia te zmniejszają również wpływ magnetyzmu szczątkowego na charakterystyki mechaniczne, a co za tym idzie zwiększają dokładność sterowania. Lepsze efekty daje tu sprzężenie napięciowe, które działa również przy zahamowanym silniku skutecznie obniżając prąd remanentu (2).

Do analizy stanów nieustalonych jako kryterium porównawcze przyjęto takie same efekty statyczne. Dla sprzężenia napięciowego założono maksymalne wykorzystanie przeciążalności prądowej uzwojenia sterującego amplidyny. Współczynnik forsowania, który dla tego sprzężenia można zdefiniować jako

$\alpha_f = 1 + K_o \; G_1$ wynosi 10,8

Dla sprzężenia prędkościowego aby uzyskać taką samą charakterystykę statyczną współczynnik forsowania zdefiniowany jako:

$\alpha_f = 1 + \frac{K_o}{k_E} G_2$ wynosi tylko 1,6

Przy tak dobranych parametrach sprzężeń w modelowym układzie uzyskano przy obciążeniu znamionowym spadek prędkości $\Delta n = 9\%$ (w otwartym układzie $\Delta n = 16\%$)

5. Analiza stanów dynamicznych

W celu uproszczenia obliczeń analizę stanów dynamicznych przeprowadzono przy założeniu idealnego biegu jałowego.

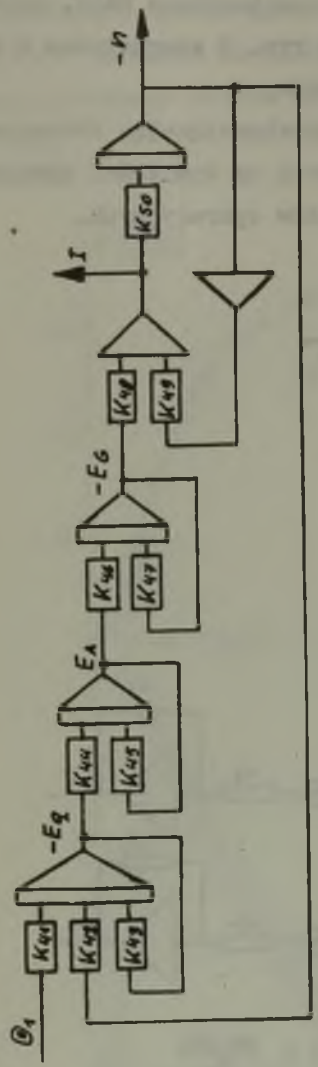
Obliczenia metodą h - funkcji

Wzory 4 i 7 przedstawiają operatorową funkcję przejścia zamkniętego układu regulacji. Przez podstawienie $p = j\omega$ otrzymano charakrakterystyki amplitudowo-fazowe i następnie po przekształceniu rzeczywiste charakterystyki częstotliwościowe. Charakterystyki te zastąpiono linią łamaną składającą się z odcinków prostych i w rezultacie otrzymano kilka charakterystyk trapezowych, dla których odpowiednie krzywe czasowe wykreślono korzystając z tablic h - funkcji. Algebraiczna suma rzędnych tych krzywych daje szukany przebieg stanu nieustalonego [3].

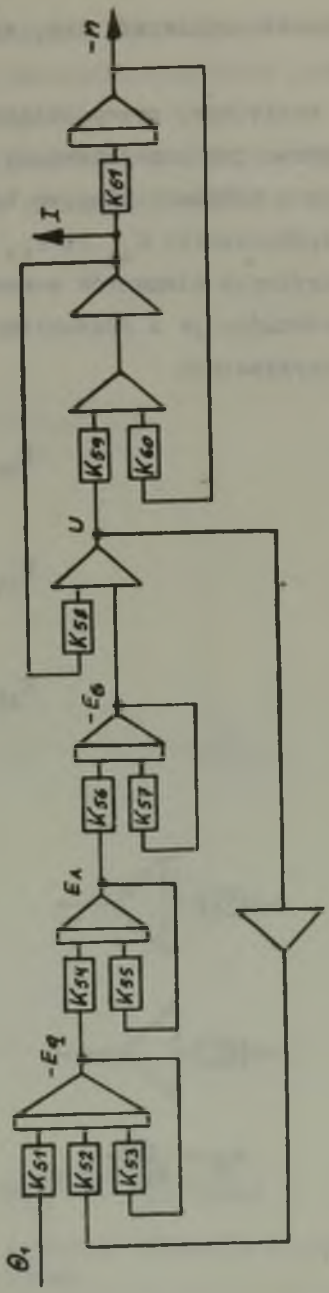
Wyniki otrzymane tą metodą przedstawiają rys. 7 i rys. 8. Należy zaznaczyć, że dokładność tej metody jest zależna głównie od dokładności z jaką zamieniono charakterystykę częstotliwościową na sumę trapezów.

Obliczenia na maszynie analogowej

W maszynie analogowej wielkości zmienne odnoszące się do rzeczywistego układu zostają zamienione na odpowiednie napięcia stanowiące zmienne maszynowe. Powiązania między wielkościami rzeczywistymi, a maszynowymi uzyskuje się przez odpowiednie dobranie współczynników skalowych. Rzeczywisty czas "t" zastępuje się czasem maszynowym "τ" stanowiącym zmienną niezależną. Współczynniki skalowe



Rys. 4. Schemat modelowy badanego układu ze sprzężeniem prędkościowym



Rys. 5. Schemat modelowy badanego układu ze sprzężeniem napięciowym

"a" należy dobierać tak, aby żaden z wzmacniaczy nie nasycił się.

W niniejszej pracy obliczeń dokonano na maszynie MA-2. Schematy operacyjne przedstawione na rys. 4 i rys. 5 sporządzono w oparciu o schematy blokowe badanych układów.

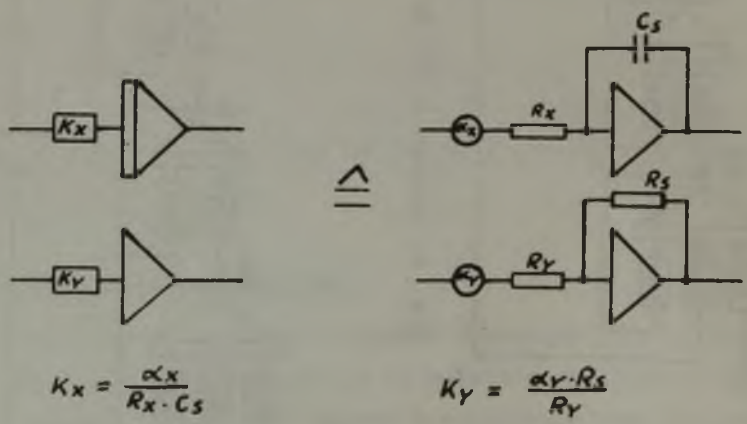
Współczynniki K_{41} do K_{61} obliczono przekształcając równania poszczególnych elementów schematów blokowych na wielkości maszynowe i porównując je z równaniami dla schematów operacyjnych.

Przykładowo:

$$K_{46} = \frac{K_G \, a_{BG}}{T_w \, a_{BA} \, a_t}$$

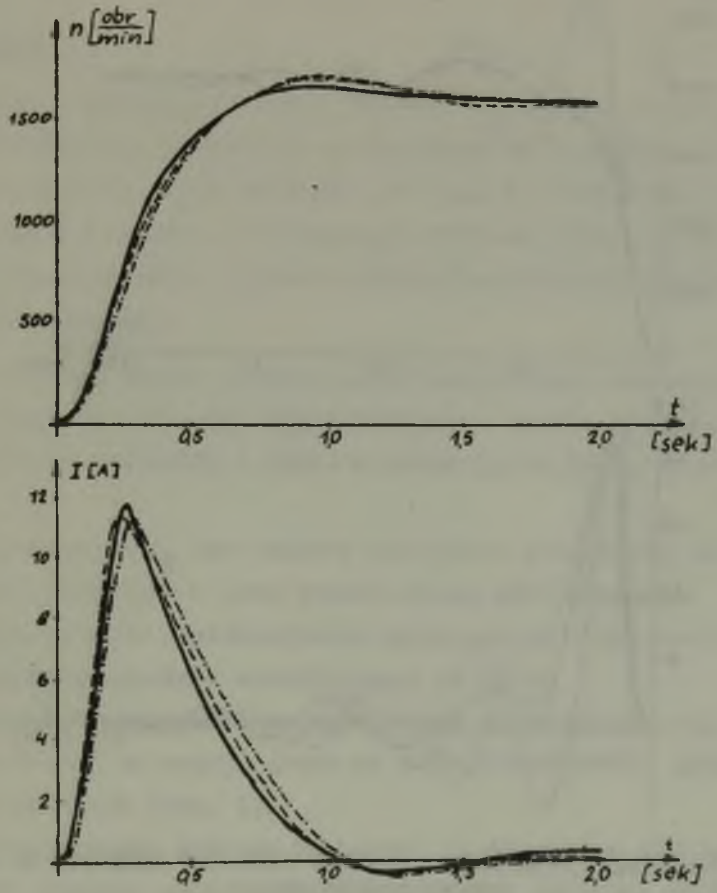
$$K_{47} = \frac{1}{T_w \, a_t}$$

$$K_{48} = \frac{1 \, a_I}{R \, a_{BG}}$$



Rys. 6.

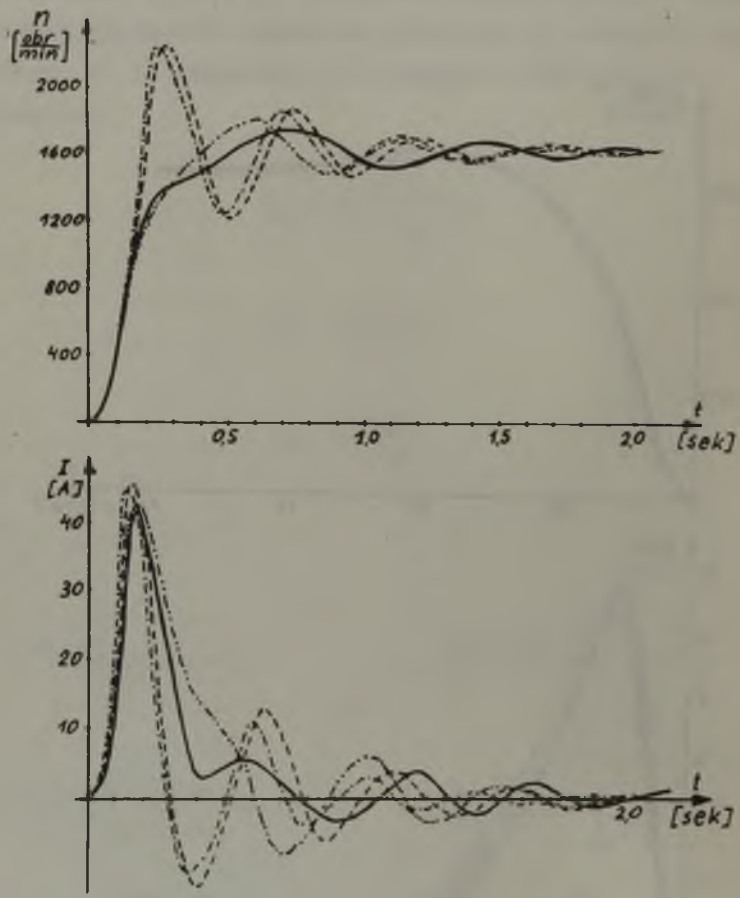
Sporządzając schematy operacyjne oznaczono jak na rys. 6. Przebiegi prędkości i prądu w obu układach będące rozwiązaniem podanych schematów operacyjnych przedstawiają rys. 7 i rys. 8
W układzie Leonarda ze sprzężeniem napięciowym w stanach nieustalonych wykraczamy daleko powyżej kolana na charakterystyce magne-



Rys. 7. Przebiegi prędkości i prądu w układzie Leonarda ze sprzężeniem prędkościowym

—— rzeczywisty – – – – obliczony metodą h-funkcji – · – · – obliczony na maszynie analogowej

sowania dlatego też dla porównania ten układ rozwiązano również uwzględniając wpływ nieliniowości amplidyny i generatora na ich współczynniki wzmocnień. Charakterystyki magnesowania modelowano linearyzując je odcinkami. Rozwiązania przedstawia rys. 8.



Rys. 8. Przebiegi prędkości i prądu w układzie Leonarda ze sprzężeniem napięciowym

——— rzeczywisty - - - - obliczony metodą h-funkcji, -·-·- obliczony na maszynie analogowej przy założeniu liniowości charakterystyk -··-··- obliczony na maszynie analogowej z uwzględnieniem nieliniowości

Rozbieżności między tym rozwiązaniem, a przebiegiem w rzeczywistym układzie wynikają między innymi stąd, że nie uwzględniono wpływu nasycenia na stałe czasowe. Jest to zagadnienie dosyć skomplikowane i wymagające odpowiedniej aparatury. W większości wypadków do analizy stanów dynamicznych i doboru parametrów sprzężeń w zupełności wystarczą wyniki uzyskane przy uwzględnieniu tylko wpływu nieliniowości na współczynniki wzmocnień.

6. Wnioski

Analizując i porównując wyniki obliczeń zestawione na rys. 7 i rys. 8 z rzeczywistymi przebiegami dynamicznymi w modelowym układzie można sformułować kilka wniosków dotyczących właściwości dynamicznych układów Leonarda ze sprzężeniem prędkościowym i napięciowym oraz dotyczących metod analizy stanów nieustalonych układów automatycznej regulacji:

a) Przy tych samych efektach statycznych układ Leonarda ze sprzężeniem prędkościowym jest korzystniejszy z punktu widzenia dynamiki. Oscylacje prędkości i prądu w stanach przejściowych są mniejsze.

b) Zwiększenie T_M nie zmienia charakteru przebiegów, zwiększa natomiast opóźnienie i czas trwania stanu nieustalonego.

c) Nieliniowość charakterystyk magnesowania i opory statyczne ruchu działają wyraźnie stabilizująco na układ.

d) Liniowe metody analizy właściwości dynamicznych dają zadowalające wyniki w wypadku pracy na charakterystykach zbliżonych do liniowych (rys. 7).

e) Wykorzystanie maszyny analogowej do tego typu obliczeń pozwala przy znacznie mniejszym nakładzie pracy osiągnąć wystarczająco dokładne wyniki, jak również dobrać optymalne parametry układu z uwzględnieniem nieliniowości występujących elementów.

f) Pominięcie pewnych czynników nie wywierających istotnego wpływu na działanie układu znacznie ułatwia analizę i nie oddziaływuje na końcowy wynik.

Rękopis złożono w redakcji w maju 1968.

LITERATURA

[1] Gabryś Wiesław: Uwagi o sporządzaniu schematów blokowych dla UAR. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Elektryka 17. Gliwice 1964.

[2] Gabryś Wiesław: Analiza obwodów sprzężeń zwrotnych układu Leonarda z amplidyną napędzającego maszynę wyciągową. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Elektryka 19 Gliwice 1964 r.

[3] Siwiński Jerzy: Automatyka Napędu Elektrycznego. Warszawa 1960. PWT

[4] Scott Norman R.: Tiechnika anałogowych i cifrowych wyczislitielnych maszin.

СОПОСТАВЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СИСТЕМЫ ЛЕОНАРДА С ОТРИЦАТЕЛЬНЫМИ ОБРАТНЫМИ СВЯЗЯМИ ПО СКОРОСТИ И ПО НАПРЯЖЕНИЮ

Р е з ю м е

В разработке проведено анализ и сопоставлено динамические свойства системы Леонарда с отрицательными обратными связями по скорости и напряжению для таких же статических эффектов на основании действительной системы, работающей с амплидином как возбудителем генератора. Анализ переходных состояний проведен теоретически, принимая в основу некоторые упрощения методом - функции и на аналоговой машине, а полученные результаты сопоставлено с результатами, полученными путем измерений. Настоящая разработка является также сопоставлением различных методов проведения анализа по динамике систем автоматической регулировки.

THE COMPARISION OF THE LEONARD SYSTEM THE DYNAMIC PROPERTIES WITH SPEED NEGATIVE FEED-BACK AND VOLTAGE NEGATIVE FEED-BACK

S u m m a r y

In this elaboration was reanalyzed and compared the dynamical properties of Leonard system negative speed and negative voltage feed-back for the same statical effects based ont the real system which works with amplidyne as the generator exciter.

The transient state analysis was made, at theoretical assumption of the some simplifications, by the h-function method and by means of the analog machine.

The results were compared with results obtained from measurements.

The present elaboration compares also the analysis method of automatic control systems dynamics.