

Kazimierz GIERLOTKA

Instytut Podstawowych Problemów
Elektrotechniki i Energoelektroniki
Politechniki Śląskiej

ANALIZA UKŁADU REGULACJI NAPĘDU Z POŁĄCZENIEM SPRĘŻYSTYM
Z DODATKOWYM SPRĘŻENIEM ZWROTNYM OD PRĘDKOŚCI ω_2 ZA ELEMENTEM SPRĘŻYSTYM

Streszczenie. W artykule przeprowadzono analizę napędu prądu stałego z połączeniem sprężystym, pracującego w zamkniętym układzie regulacji ze sprzężeniami zwrotnymi od prędkości ω_1 i ω_2 . Podano wykresy i wzory do doboru parametrów regulatora prędkości i sprzężeń zwrotnych. Artykuł jest kontynuacją zagadnień przedstawionych w pracy [1].

1. WPROWADZENIE

W artykule [1] przeprowadzono analizę przekształtnikowego układu napędowego prądu stałego, w którym występuje połączenie sprężyste w układzie mechanicznym. Dla typowego układu regulacji z nadrzędną pętlą regulacji prędkości i sprzężeniem od prędkości silnika ω_1 podano wykresy do doboru nastaw regulatora prędkości, dla których tłumienie oscylacji w układzie jest maksymalne. Tłumienie oscylacji zależne jest wtedy od wartości współczynnika zdefiniowanego w pracy [1] jako

$$\beta = \sqrt{\frac{J_1 + J_2}{J_1}}$$

gdzie:

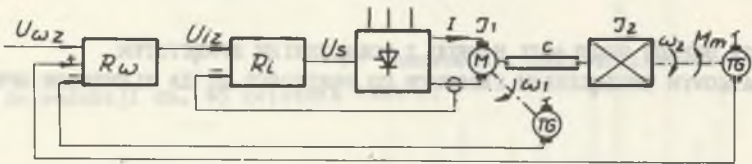
J_1, J_2 - momenty bezwładności przed i za elementem sprężystym.

Niekorzystne właściwości dynamiczne (małe tłumienie oscylacji) wykazuje taki układ regulacji, jeżeli moment bezwładności J_2 jest mniejszy od J_1 ($\beta < \sqrt{2}$). Poprawę tłumienia w takim przypadku można uzyskać przez wprowadzenie

dzenie dodatkowej pętli sprzężenia zwrotnego od prędkości ω_2 na wejście regulatora prędkości.

2. UKŁAD REGULACJI Z DODATKOWYM SPRZEŻENIEM ZWROTNYM OD PRĘDKOŚCI ω_2

Schemat analizowanego układu przedstawiony jest na rys. 1. Na wejście regulatora prędkości R_ω poprowadzono oprócz ujemnego sprzężenia zwrotnego od prędkości ω_1 , dodatkowe sprzężenie zwrotne dodatnie od prędkości ω_2 za



Rys. 1. Schemat układu ze sprzężeniami zwrotnymi od prędkości ω_1 i ω_2

elementem sprzężystym. Przy pominięciu luzów, tłumienia wewnętrznego i masy elementu sprzężystego układ opisany jest następującymi równaniami w postaci operatorowej:

$$\left[U_{\omega z}(s) - k_1 \omega_1(s) + k_2 \omega_2(s) \right] G_{R\omega}(s) = U_{1z}(s) \quad (1)$$

$$\left[U_{1z}(s) - k_1 I(s) \right] G_{R1}(s) = U_s(s) \quad (2)$$

$$U_s(s) \frac{K_{DT}}{1 + sT_0} - K_e \omega_1(s) = I(s) R_g (1 + sT_g) \quad (3)$$

$$K_M I(s) = J_1 s \omega_1(s) + M_s(s) \quad (4)$$

$$J_2 s \omega_2(s) + M_m(s) = M_s(s) \quad (5)$$

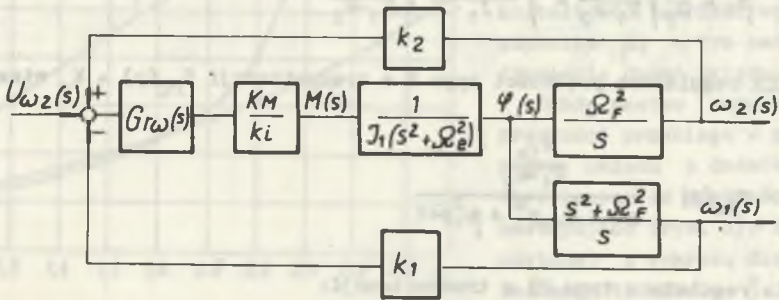
$$M_s(s) = c \frac{1}{s} [\omega_1(s) - \omega_2(s)] = c \psi(s) \quad (6)$$

gdzie:

K_{pT} , T_0 - wzmacnienie i stała czasowa przekształtnika tyrystorowego,
 k_1 , k_2 , k_i - wzmacnienie w torach pomiaru prędkości i prądu,

- $G_{r\omega}(s), G_{r1}(s)$ - transmitancje operatorowe regulatorów,
 M_g - moment w elemencie sprężystym,
 c, φ - współczynnik sztywności i kąt skręcenia elementu sprężystego.

Podobnie jak w pracy [1] założono, że przedmiotem analizy są układy o stosunkowo niskiej wartości pulsacji drgań własnych - o okresie drgań mechanicznych o wiele większym od czasu τ_0 . Nastawy regulatora prądu można wtedy dobrać np. z kryterium modułowego Kesslera i do dalszej analizy przyjmując, że zamknięty obwód regulacji prądu jest członem bezinercyjnym o transmitancji $G_{z1}(s) = \frac{1}{k_1}$.



Rys. 2. Uproszczony schemat blokowy układu

Dla tak przyjętych założeń upraszczających schemat blokowy układu przedstawiono na rys. 2. Na schemacie oznaczono:

$$\Omega_F = \sqrt{\frac{c}{J_2}}; \quad \Omega_e = \sqrt{\frac{c(J_2 + J_2')}{J_1 J_2}}$$

Transmitancja operatorowa zamkniętego układu regulacji prędkości jest równa:

$$G_{z\omega}(s) = \frac{\omega_2(s)}{U_{\omega_2}(s)} = \frac{G_{r\omega}(s) \frac{K_M}{k_1 J_1} \Omega_F^2}{s(s^2 + \Omega_e^2) + G_{r\omega}(s) \frac{K_M k_1}{k_1 J_1} [s^2 + \Omega_F^2 (1 - \frac{k_2}{k_1})]} \quad (7)$$

Po przekształceniach transmitancji (7) i zmianie skali czasu przez podstawienie

$$p = \frac{s}{\Omega_F} \sqrt{\frac{k_1}{k_1 - k_2}} \quad (8)$$

otrzymujemy:

$$G_{z\omega}(p) = \frac{G_{r\omega}(p) \frac{K_M}{k_1 J_1 \Omega_F} \left(\frac{k_1}{k_1 - k_2} \right)^{\frac{3}{2}}}{p(p^2 + \beta_1^2) + G_{r\omega}(p) \frac{K_M k_1}{k_1 J_1 \Omega_F} \sqrt{\frac{k_1}{k_1 - k_2}} (p^2 + 1)} \quad (9)$$

gdzie:

$$\beta_1 = \frac{\Omega_e}{\Omega_F} \sqrt{\frac{k_1}{k_1 - k_2}} = \sqrt{\frac{J_1 + J_2}{J_1} \cdot \frac{k_1}{k_1 - k_2}} \quad (10)$$

Dla regulatora prędkości typu P o transmitancji $G_{r\omega}(p) = K_n$ otrzymujemy:

$$G_{z\omega}(p) = \frac{\frac{K_{1b}}{k_1 - k_2}}{p^3 + K_{1b} p^2 + \beta_1^2 p + 1} \quad (11)$$

a dla regulatora typu PI o transmitancji:

$$G_{r\omega}(p) = K_n \left(1 + \frac{1}{p T_{c1}} \right)$$

otrzymujemy:

$$G_{z\omega}(p) = \frac{\frac{K_{1b}}{k_1 - k_2} \left(p + \frac{1}{T_{c1}} \right)}{p^4 + K_{1b} p^3 + \left(\beta_1^2 + \frac{K_{1b}}{T_{c1}} \right) p^2 + K_{1b} p + \frac{K_{1b}}{T_{c1}}} \quad (12)$$

gdzie:

$$K_{1b} = \frac{K_n K_M k_1}{k_1 J_1 \Omega_F} \sqrt{\frac{k_1}{k_1 - k_2}} \quad (13)$$

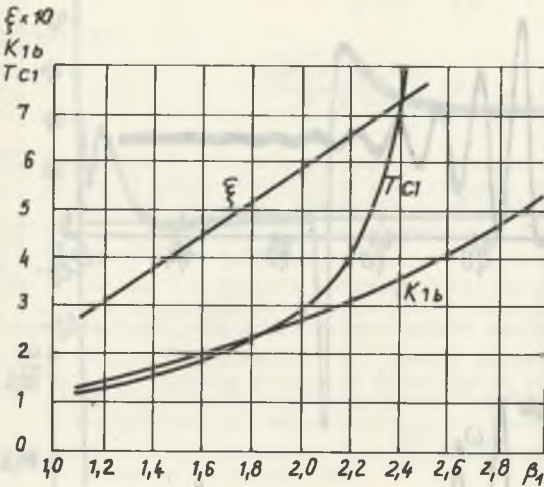
Transmitancje (11) i (12) są identyczne jak odpowiednie transmitancje dla układu ze sprzężeniem tylko od prędkości ω_1 , przedstawione w pracy [1]. Jedynie współczynniki β_1 i K_{1b} opisane zależnościami (10) i (13) różnią się od analogicznych współczynników podanych w pracy [1] uwzględniając wpływ dodatkowego sprzężenia od prędkości ω_2 .

Przy doborze nastaw regulatora prędkości układu z dodatkowym sprzężeniem od prędkości ω_2 można się więc posługiwać wykresami zamieszczonymi w pracy [1]. O ile dla układu ze sprzężeniem od prędkości ω_1 tłumienie oscylacji zależy wtedy tylko od stosunku momentów bezwładności J_1 i J_2 (dla $k_2 = 0$,

$$\beta_1 = \sqrt{\frac{J_1 + J_2}{J_1}} \text{ i jest małe,}$$

jeżeli J_2 jest nieduży w stosunku do J_1 , to przy wprowadzeniu dodatkowego sprzężenia od prędkości ω_2 można w dowolny sposób kształtować wartość współczynnika β_1 a tym samym i tłumienie drgań układu.

Dobór nastaw regulatora prędkości przebiega w przypadku układu z dodatkowym sprzężeniem od prędkości ω_2 następująco (rys. 3). Z odczytanej z wykresu dla założonego tłumienia ξ wartości współczynnika β_1 można z zależności (10) obli-



Rys. 3. Wykresy do doboru nastaw regulatora prędkości

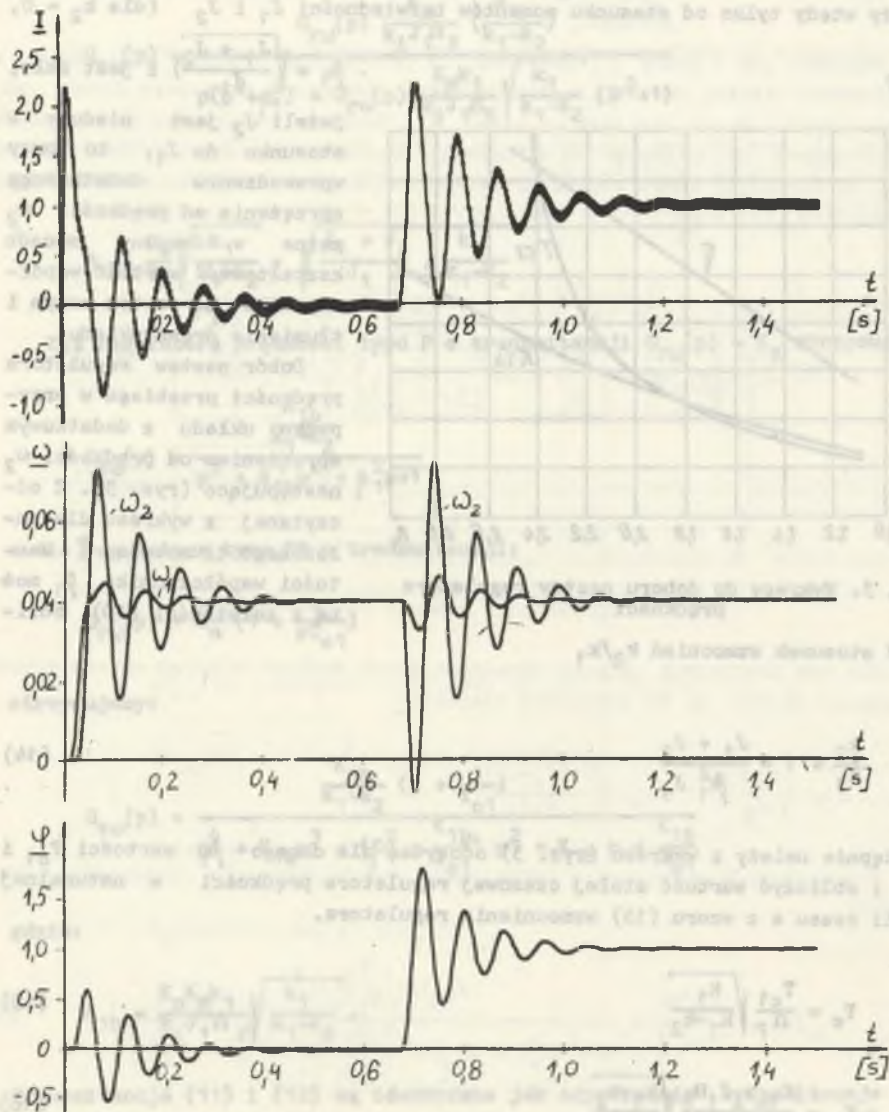
czyć stosunek wzmoceń k_2/k_1

$$\frac{k_2}{k_1} = 1 - \frac{J_1 + J_2}{\beta_1^2 J_1} \tag{14}$$

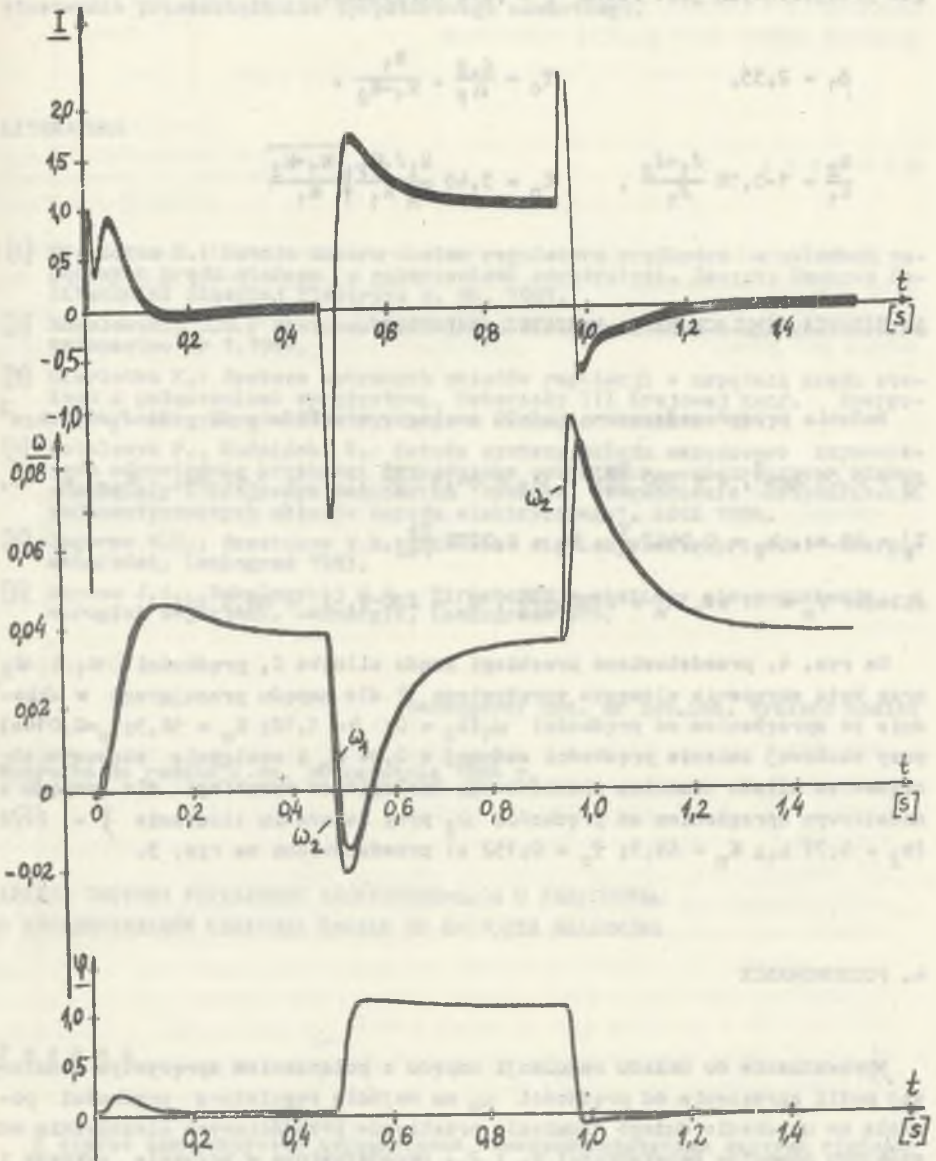
Następnie należy z wykresu (rys. 3) odczytać dla danego β_1 wartości T_{c1} i K_{1b} i obliczyć wartość stałej czasowej regulatora prędkości w naturalnej skali czasu a z wzoru (13) wzmożenie regulatora.

$$T_c = \frac{T_{c1}}{\Omega_F} \sqrt{\frac{k_1}{k_1 - k_2}} \tag{15}$$

$$K_n = \frac{K_{1b} k_1 J_1 \Omega_F}{K_M k_1} \sqrt{\frac{k_1 - k_2}{k_1}} \tag{16}$$



Rys. 4. Przebiegi w układzie ze sprzężeniem od prędkości ω_1 ($k_2 = 0$) przy zmianach prędkości zadanej i momentu obciążenia



Rys. 5. Przebiegi w układzie ze sprzężeniami od prędkości ω_1 i ω_2 ($k_2 = 0,77 k_1$) przy skokowych zmianach prędkości zadanej i momentu obciążenia

W przypadku szczególnym, przy założeniu że w zamkniętym układzie regulacji prędkości z dodatkowym sprzężeniem od prędkości ω_2 , tłumienie przebiegów przejściowych jest równe $\xi = \sqrt{2}/2$ otrzymamy:

$$\beta_1 = 2,35, \quad T_c = \frac{6,2}{\Omega_F} \cdot \frac{k_1}{k_1 - k_2},$$

$$\frac{k_2}{k_1} = 1 - 0,18 \frac{J_1 + J_2}{J_1}, \quad K_n = 3,45 \frac{k_1 J_1 \Omega_F}{K_M k_1} \sqrt{\frac{k_1 - k_2}{k_1}}$$

3. BADANIA SYMULACYJNE NA MASZYNIE ANALOGOWEJ

Badania przeprowadzono na modelu analogowym układu o danych: $J_1 = 0,2 \text{ kgm}^2$, $J_2 = 0,05 \text{ kgm}^2$, $c = 360 \frac{\text{Nm}}{\text{rad}}$, $\Omega_F = 84,8 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$, $\tau_o = 1,67 \text{ ms}$, $K_{pT} = 40$, $T_g = 60 \text{ ms}$, $k_1 = 0,0462 \frac{\text{V}}{\text{A}}$, $k_1 = 0,0275 \frac{\text{Vs}}{\text{rad}}$, silnik: $P_n = 17 \text{ kW}$, $n_n = 2780 \frac{\text{obr}}{\text{min}}$, $U_n = 220 \text{ V}$, $I_n = 86,5 \text{ A}$.

Na rys. 4. przedstawiono przebiegi prądu silnika I , prędkości ω_1 i ω_2 oraz kąta skręcenia elementu sprężystego φ dla napędu pracującego w układzie ze sprzężeniem od prędkości ω_1 ($k_2 = 0$; $\beta = 1,12$; $K_n = 56,5$; $T_c = 0,014 \text{ s}$) przy skokowej zmianie prędkości zadanej o $0,04 n_n$ i następnie skokowym obciążeniem układu momentem znamionowym. Analogiczne przebiegi dla napędu z dodatkowym sprzężeniem od prędkości ω_2 przy założeniu tłumienia $\xi = \sqrt{2}/2$ ($k_2 = 0,77 k_1$; $K_n = 69,3$; $T_c = 0,152 \text{ s}$) przedstawiono na rys. 5.

4. PODSUMOWANIE

Wprowadzenie do układu regulacji napędu z połączeniem sprężystym dodatkowej pętli sprzężenia od prędkości ω_2 na wejście regulatora prędkości pozwala na uzyskanie dużego tłumienia przebiegów przejściowych niezależnie od stosunku momentów bezwładności J_1 i J_2 . Przedstawione w artykule wykresy i wzory pozwalają w prosty sposób dobrać parametry regulatora prędkości i sprzężeń zwrotnych. Z przeprowadzonych badań na maszynie analogowej wynika, że do szybkiego wytłumienia oscylacji (lub niedopuszczenia do ich powstania) niezbędne jest w niektórych stanach pracy prądu wytworzenie przez sil-

nik momentu hamującego (ujemna wartość prądu na rys. 5 przy skoku momentu obciążenia). Dla osiągnięcia dużego tłumienia oscylacji konieczne jest więc stosowanie przekaźnika tyrystorowego nawrotnego.

LITERATURA

- [1] Gierlotka K.: Metoda doboru nastaw regulatora prędkości w układach napędowych prądu stałego z połączeniami sprzężystymi. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej Elektryka z. 84, 1983.
- [2] Sokolowski G.G.: Sistema upravlenia elektroprivodom s uprugostju. Electriczestwo Nr 1, 1984.
- [3] Gierlotka K.: Synteza wybranych układów regulacji w napędach prądu stałego z połączeniami sprzężystymi. Materiały III Krajowej Konf. Energoelektroniki, Napędu Elektrycznego i Trakcji. Warszawa 1984.
- [4] Ostalczyk P., Kuźmiński K.: Metoda syntezy układu napędowego zapewniająca odpowiednie przebiegi przejściowe wszystkich współrzędnych stanu. -Materiały I Krajowego Seminarium "Wybrane zagadnienia optymalizacji zautomatyzowanych układów napędu elektrycznego". Łódź 1984.
- [5] Jegorow W.N., Szestakow W.M.: Dinamika sistem elektroprivoda. -Energoatomizdat, Leningrad 1983.
- [6] Borcow J.A., Sokolowski G.G.: Tiristornyje sistemy elektroprivoda s uprugimi swjazjami. - Energia, Leningrad 1979.

Recenzent: doc. dr hab.inż. Ryszard Kozioł

Wpłynęło do redakcji dn. 20 kwietnia 1984 r.

АНАЛИЗ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ С УПРУГОСТЬЮ
С ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ ПО СКОРОСТИ МЕХАНИЗМА

Резюме

В статье анализируется двухмассовая электромеханическая система стабилизации скорости, в которой введены обратные связи по скорости двигателя ω_1 и механизма ω_2 . Приведены диаграммы и формулы для расчёта регулятора скорости и коэффициентов усиления обратных связей.

ANALYSIS OF A CONTROL SYSTEM WITH ADDITIONAL SPEED FEED-BACK FOR DC ELECTRIC DRIVES WITH ELASTIC CONNECTION

Summary

Control system with ω_1 and ω_2 speed feed-backs for DC electric drives with elastic connection in mechanical system is analyzed in the paper. The principles of calculation of the speed regulator and the speed-backs parameters are given.