

Henryk KOŁODZIEJ

Instytut Podstawowych Problemów
Elektrotechniki i Energoelektroniki
Politechniki Śląskiej

SYNTEZA STRUKTUR STEROWANIA SILNIKÓW ASYNCHRONICZNYCH W OPARCIU O ZALEŻNOŚCI STATYCZNE

Streszczenie. W artykule zaproponowano podział układów sterowania silnika asynchronicznego na układy pośrednie i bezpośrednie. Przedstawiono metody syntezy struktur sterowania na podstawie opisu własności statycznych silnika asynchronicznego. Podano podstawowe własności dynamiczne tych struktur w wyniku analizy uproszczonych transmitancji operatorowych.

1. Wprowadzenie

Układy napędowe z silnikami asynchronicznymi zasilanymi z przemienników częstotliwości znajdują w chwili obecnej coraz powszechniejsze zastosowanie, mimo ciągle jeszcze wyższej ceny w stosunku do układów z silnikami prądu stałego. W odróżnieniu od napędów prądu stałego istnieje duża różnorodność rozwiązań układów sterowania i regulacji silnika asynchronicznego. Można w ogólności zaproponować podział układów sterowania silnikiem asynchronicznym na dwie grupy:

- grupę pierwszą tworzą układy o sterowaniu pośrednim, to jest takie, w których moment elektromagnetyczny silnika formowany jest bez pomiaru wielkości wewnętrznych decydujących o szybkości sterowania momentem, tzn. sygnału proporcjonalnego do momentu elektromagnetycznego, lub kąta położenia wirującego wektora prądu względem wirującego wektora strumienia głównego silnika,
- drugą grupę tworzą układy o sterowaniu bezpośrednim, do których zaliczyć należy te układy, w których moment elektromagnetyczny formowany jest w oparciu o pomierzony moment elektromagnetyczny bądź też pomierzony kąt położenia wirującego wektora prądu względem wirującego wektora strumienia głównego silnika.

Zaproponowana klasyfikacja układów częstotliwościowego sterowania silników asynchronicznych jest oczywiście dyskusyjna, pozwala jednak w sposób jednoznaczny przyporządkować dowolny układ sterowania silnika. W artykule przedmiotem rozważań są zagadnienia związane z syntezą i analizą

własności dynamicznych struktur o sterowaniu pośrednim, syntetyzowanych na podstawie zależności opisujących własności statyczne silnika asynchronicznego.

2. Układy sterowania silników asynchronicznych zasilanych z przemienników częstotliwości o charakterze źródła napięcia

Syntezę pośrednich struktur sterowania silnika asynchronicznego zasilanego z przemiennika częstotliwości o charakterze źródła napięcia można przeprowadzić wychodząc z równań silnika zapisanych we współrzędnych synchronicznych:

$$\begin{aligned} \underline{u}_s &= r_s \underline{i}_s + \frac{d \underline{\psi}_s}{dt} + j \underline{\psi}_s \omega_s \\ 0 &= r_r \underline{i}_r + \frac{d \underline{\psi}_r}{dt} + j \underline{\psi}_r \omega_r \\ m_s &= \operatorname{Im}(\underline{\psi}_s^* \underline{i}_s). \end{aligned} \quad (1)$$

- wszystkie wielkości wyrażono w układzie wartości względnych [4].

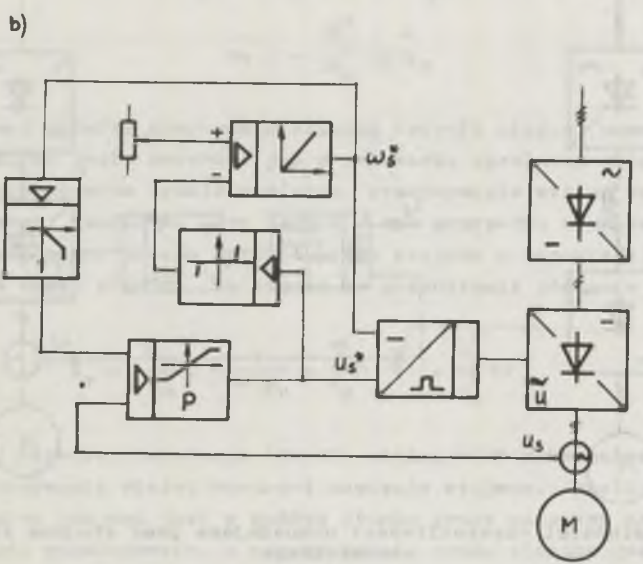
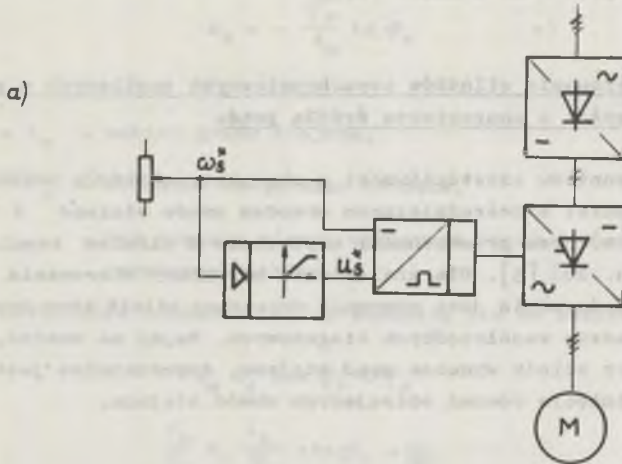
W układach napędowych z silnikiem asynchronicznym sterowanie w pierwszej strefie (strefa stałego momentu maksymalnego) odbywa się najczęściej przy stałej wartości strumienia głównego. Wartość strumienia przeważnie zbliżona jest do znamionowej. W tej strefie sterowania obowiązuje więc prawo sterowania o postaci:

$$\frac{|\underline{u}_s - r_s \underline{i}_s|}{\omega_s} = |\underline{\psi}_s| = \text{const} \quad (2)$$

Prawo sterowania (2) obowiązuje dla częstotliwości mniejszych od znamionowej częstotliwości napięcia zasilającego. Dla większych częstotliwości napięć zasilających utrzymywana jest stała wartość napięcia stojana, co wiąże się z osłabieniem strumienia głównego zgodnie z zależnością:

$$|\underline{u}_s - \underline{i}_s r_s| = |\underline{\psi}_s| \omega_s = \text{const} \approx |\underline{u}_s| \quad (3)$$

Z relacji (2) i (3) wynikają wprost struktury układów sterowania silnikiem asynchronicznym zasilanym z przemiennika o charakterze źródła napięcia. Na rys. 1a przedstawiono najprostszy z możliwych układów sterowania. Jest to układ otwarty, w którym niedopuszczalne są szybkie zmiany sygnału częstotliwości zadanej. Wprowadzenie obwodu napięciowego sprzężenia zwrotnego oraz członu ograniczającego szybkość zmian sygnału częstotliwości zadanej prowadzi do uzyskania struktury przydatnej do zastosowań praktycznych [4].

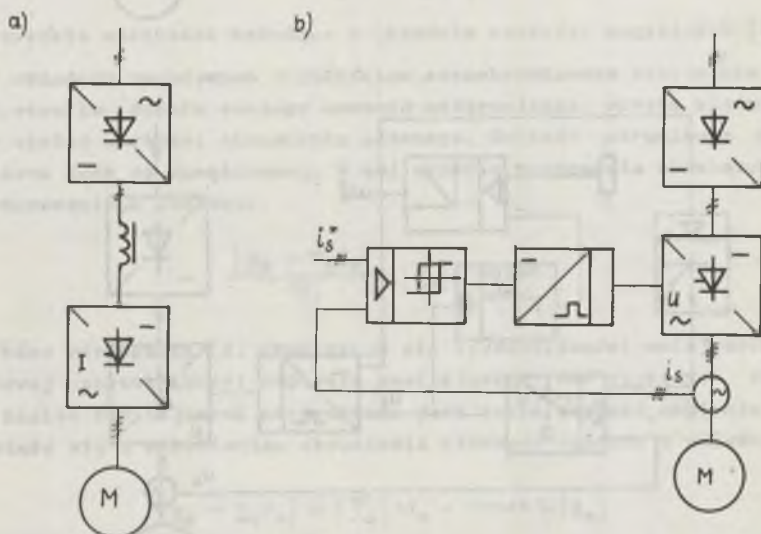


Rys. 1. Przykładowe układy sterowania silnika asynchronicznego zasilanego z falownika napięcia z pośredniozującym obwodem napięcia stojana
 a - układ otwarty, b - układ z napięciowym sprzężeniem zwrotnym (gwiazdka oznaczało wielkości zadane)

W bardziej rozbudowanych układach sterowania, wprowadza się również dodatkowe obwody kompensujące spadek napięcia na rezystancji uzwojeń stojana (równanie (2)) przy małych prędkościach obrotowych silnika (mniejszych od około 0,2 prędkości znamionowej).

3. Układy sterowania silników asynchronicznych zasilanych z przemienników częstotliwości o charakterze źródła prądu

Do przemienników częstotliwości o charakterze źródła prądu zaliczyć należy przemienniki z pośredniozającym obwodem prądu stałego i falownikiem prądu (rys. 2a) oraz przemienniki napięciowe z układem regulacji prądów fazowych (rys. 2b) [5]. Dla znalezienia struktury sterowania silnikiem w tym przypadku dogodnie jest równania opisujące silnik asynchroniczny przedstawić w układzie współrzędnych biegunowych. Mając na uwadze, że przemiennik zasilający silnik wymusza prąd stojana, dopuszczalne jest (dla celów syntezy) pominięcie równań opisujących obwód stojana.



Rys. 2. Przekształtniki częstotliwości wymuszające prąd stojana silnika asynchronicznego

a - przemiennik z pośredniozającym obwodem prądu stałego i falownikiem prądu, b - przemiennik napięciowy z układem regulacji chwilowej wartości prądów fazowych

$$\frac{d\psi_r}{dt} = \frac{x_m}{x_r} r_r i_s \cos \varphi_r - \frac{r_r}{x_r} \psi_r \quad (a) \quad (4)$$

$$\frac{d\varphi_r}{dt} = \frac{x_m}{x_r} r_r \frac{i_s}{\psi_r} \sin \varphi_r - \omega_r \quad (b)$$

$$m_e = - \frac{\psi_r^2}{x_m} \operatorname{tg} \varphi_r \quad (c)$$

gdzie:

$\underline{i}_r = |\underline{i}_r| = i_r$ - wektor prądu stojana,

$\underline{\psi}_r = \psi_r e^{-j\varphi_r}$ - strumień skojarzony wirnika,

φ_r - kąt zawarty między wektorami prądu i strumienia skojarzonego wirnika.

Dla stanu ustalonego równania (4) upraszczają się do postaci:

$$x_m i_s \cos \varphi_r = \psi_r$$

$$\frac{x_m}{x_r} r_r \frac{i_s}{\psi_r} \sin \varphi_r = \omega_r \quad (5)$$

$$m_e = - \frac{\psi_r^2}{x_m} \operatorname{tg} \varphi_r$$

W pierwszej strefie sterowania silnika (strefa stałego momentu maksymalnego) możliwe jest, podobnie jak w przypadku zasilania silnika z przeziennika o charakterze źródła napięcia, utrzymywanie stałej wartości strumienia głównego. Konieczne jest jednak w tym przypadku wyznaczenia prawa sterowania wiążącego zadaną wartość prądu stojana z odpowiadającą mu częstotliwością prądu wirnika. Zależność tę przedstawia równanie (6):

$$i_s = \frac{\psi_r}{x_m} \cdot \frac{1}{\cos \varphi_r} = \frac{\psi_r}{x_m} \sqrt{1 + \frac{x_r^2}{x_m^2} \omega_r^2} \quad (6)$$

W drugiej strefie sterowania (strefa stałej mocy maksymalnej) konieczne jest utrzymywanie stałej wartości napięcia stojana. Jeżeli założyć, że prąd maksymalny stojana jest w każdym stanie pracy mniejszy od dwukrotnej wartości prądu znamionowego, a częstotliwość prądu wirnika jest mniejsza od krytycznej to na podstawie wyników zawartych w pracy [2] można napisać:

$$|\psi_r| \approx |\psi_s| \quad (7)$$

Biorąc pod uwagę zależność (3) oraz równania (6) i (7) można znaleźć relację wiążącą prąd stojana z odpowiadającą jego wartości częstotliwością prądu wirnika w drugiej strefie sterowania:

$$i_s = \frac{\Psi}{\omega_s x_m} \sqrt{1 + \frac{x_r^2}{r_r^2} \omega_r^2} \quad (8)$$

gdzie:

Ψ_s - wartość strumienia głównego w pierwszej strefie sterowania.

Z równania (8) wynika, że dla utrzymania w drugiej strefie sterowania stałej mocy maksymalnej, czyli stałej wartości prądu maksymalnego (przy stałym napięciu stojana), konieczny jest wzrost częstotliwości prądu wirnika ω_r wraz ze wzrostem częstotliwości prądu stojana zgodnie z zależnością:

$$\frac{\omega_{r2}}{\omega_{r1}} = \sqrt{\frac{\frac{i_m^2}{\Psi_r^2} x_m^2 \omega_s^2 - 1}{\frac{i_m^2}{\Psi_r^2} x_m^2 - 1}} \quad (9)$$

gdzie:

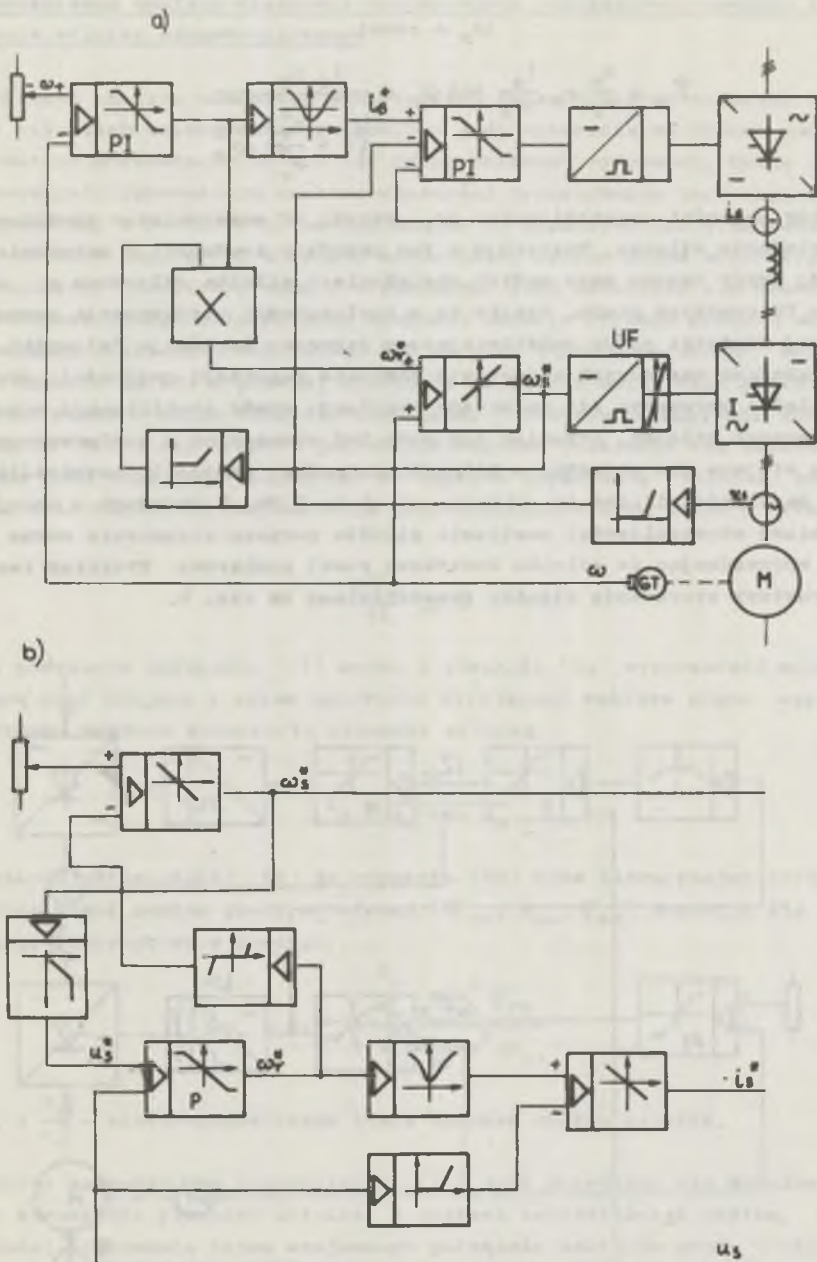
ω_{r2} - częstotliwość prądu w obwodzie wirnika w drugiej strefie sterowania,

ω_{r1} - częstotliwość prądu wirnika w pierwszej strefie sterowania (dla tej samej wartości prądu stojana).

Przykładowe realizacje struktur sterowania silnika asynchronicznego zasilanego z przemiennika częstotliwości o charakterze źródła prądu przedstawiono na rys. 3. Na rys. 3a przedstawiono podstawową strukturę sterowania silnika zasilanego z falownika prądu. Sygnał wyjściowy z regulatora prędkości podawany jest poprzez człon realizujący zależność (6) na wejście regulatora prądu. Ten sam sygnał wprowadzany jest poprzez element mnożący na wejście sumatora wyznaczającego częstotliwość prądu wyjściowego przemiennika. W drugiej strefie sterowania zadana częstotliwość prądu wirnika jest zwiększana zgodnie z zależnością (9) jako wynik mnożenia napięcia wyjściowego z regulatora prędkości z sygnałem będącym funkcją częstotliwości prądu zasilającego stojan. W drugiej strefie sterowania włącza się obwód sprzężenia napięciowego, który oddziałując na wejście regulatora prądu umożliwia sterowanie wartością prądu stojana zgodnie z zależnością (8).

Na rys. 3b zaprezentowano sposób wprowadzenia sprzężenia napięciowego również w pierwszej strefie sterowania silnika. Własności tego układu sterowania zbliżone są do uzyskiwanych w układzie sterowania przedstawionym na rys. 1b.

Można się spotkać w literaturze z układami, w których utrzymywany jest nie stały strumień główny silnika, ale stała częstotliwość prądu wirnika [5]. W tym przypadku dla stanu ustalonego obowiązuje zależność:



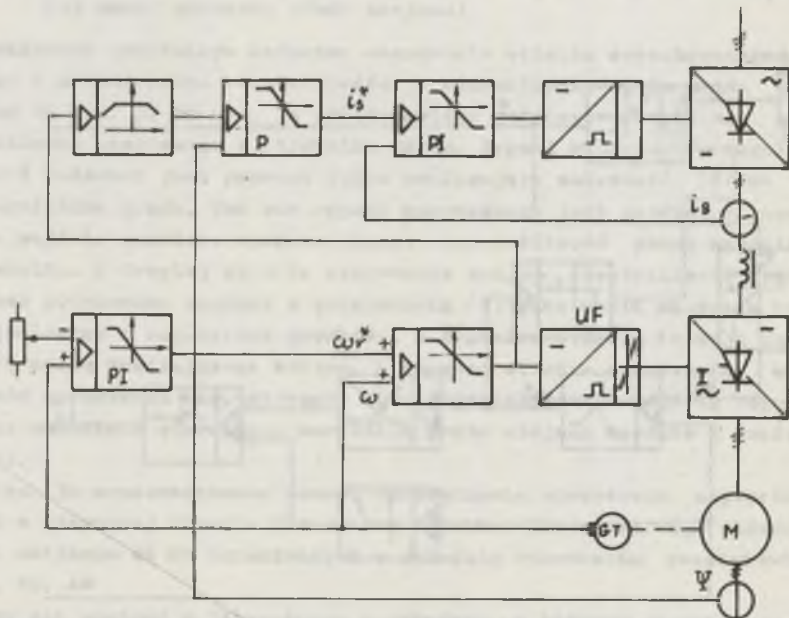
Rys. 3. Układy sterowania silnika asynchronicznego zasilanego z przetwornika prądowego
 a - układ ze sprzężeniem prędkościowym, b - układ ze sprzężeniem napięciowym

$$\omega_r = \text{const}$$

$$\Psi_r = \frac{x_m}{x_r} r_r \frac{1}{\omega_r} \sin \varphi_r = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{x_r^2}{r_r^2} \omega_r^2}} \quad (10)$$

Dobór wartości częstotliwości ω_r zależy od maksymalnego spodziewanego obciążenia silnika. Występują w tym układzie trudności z uzyskaniem poprawnej pracy napędu przy małych obciążeniach silnika zwłaszcza w układach z falownikiem prądu. Wynika to z konieczności utrzymywania pewnej minimalnej wartości prądu umożliwiającego poprawną komutację falownika.

W układach napędowych o szerokim zakresie regulacji prędkości obrotowej silnika wprowadza się do układu regulacji obwód stabilizacji strumienia głównego silnika. Strumień ten może być wyznaczony z pomierzonego napięcia stojana dla układów, w których minimalne wartości częstotliwości prądu zasilania silnika są większe od około 3 Hz. W układach o mniejszej minimalnej częstotliwości zasilania silnika pomiaru strumienia można dokonać wprowadzając do silnika dodatkowe cewki pomiarowe. Przykład tego typu struktury sterowania silnika przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Układ sterowania silnika asynchronicznego z obwodem regulacji strumienia głównego

4. Uproszczona analiza własności dynamicznych rozważanych struktur sterowania silnika asynchronicznego

Dokładna analiza własności dynamicznych prezentowanych struktur sterowania silnikiem asynchronicznym możliwa jest wyłącznie za pomocą analogowych maszyn matematycznych lub też drogą obliczeń cyfrowych. Można jednak przeprowadzić uproszczoną analizę własności dynamicznych tego typu struktur wychodząc z równań silnika zapisanych we współrzędnych biegunowych.

W układach napędowych w sposób najbardziej ogólny można scharakteryzować własności dynamiczne napędu wyznaczając czas ustalania się momentu elektromagnetycznego silnika przy skokowej zmianie sygnału momentu zadanego z układu sterowania silnikiem. Dla silnika asynchronicznego szybkość zmian momentu zależy w głównej mierze od szybkości zmian kąta położenia wirującego wektora prądu względem wirującego wektora strumienia głównego (równanie (4c)). Aby ocenić, jak szybko ten kąt położenia się zmienia, konieczne jest przyjęcie założenia, że wartość strumienia silnika zmienia się na tyle wolno, że dopuszczalne jest pominięcie tych zmian w równaniu (4a):

$$\frac{d\psi_r}{dt} \approx 0 \tag{11}$$

Na podstawie założenia (11) można z równania (4a) wyprowadzić zależność wiążącą prąd stojana z kątem położenia wirującego wektora prądu względem wirującego wektora strumienia głównego silnika.

$$i_s = \frac{\psi_r}{x_m \cos \varphi_r} \tag{12}$$

Wstawiając zależność (12) do równania (4b) oraz linearyzując otrzymane równanie wokół punktu pracy ustalonej $(\psi_{r0}, i_{s0}, \varphi_{r0})$ uzyskuje się transmitancję przyrostową o postaci:

$$\Delta\varphi_r = \Delta\omega_r \frac{\frac{x_r}{r_r} \cos^2 \varphi_{r0}}{1 + pT_2 \cos^2 \varphi_{r0}} \tag{13}$$

$T_2 = \frac{x_r}{r_r}$ - elektromagnetyczna stała czasowa obwodu wirnika.

Należy zauważyć, że transmitancja (13) jest prawdziwa dla dowolnej wartości strumienia głównego silnika. Z postaci transmitancji wynika, że o szybkości sterowania kątem wzajemnego położenia wektorów prądu i strumienia głównego decyduje sposób zadawania częstotliwości prądu wirnika. W przedstawionych w rozdziałach 2,3 układach sterowania wartość zadawanej częstotliwości wirnika w stanach przejściowych wynika z równań wyprowadzonych dla stanów ustalonych. Zmiany kąta położenia wzajemnego wektorów stru-

mienia i prądu, a tym samym i momentu elektromagnetycznego, będą więc stosunkowo wolne, gdyż układy sterowania nie zawierają żadnych układów kompensujących stałą czasową mianownika transmitancji przyrostowej (13). Najdłuższe czasy narastania momentu wystąpią przy małych obciążeniach silnika oraz dla przypadku zmiany kierunku momentu elektromagnetycznego, gdyż wówczas stała czasowa mianownika transmitancji (13) jest zbliżona do wartości elektromagnetycznej stałej czasowej wirnika T_2 . Wartość tej stałej czasowej zależy od wielkości silnika i wynosi od około 0,2s dla silnika o mocy kilkunastu kW do 1s dla silnika o mocy kilkuset kW.

W układach sterowania silnika asynchronicznego przedstawionych na rys. 1b, 3, 4 wprowadzono do układu sterowania obwody regulacji strumienia głównego silnika poprzez stabilizację napięcia stojana lub bezpośrednio strumienia.

Aby ocenić jakość regulacji strumienia głównego silnika lub napięcia stojana, należy znaleźć transmitancje wiążące strumień główny oraz napięcie z prądem stojana. Transmitancje te można wyprowadzić zakładając, że wartość kąta położenia wirujących wektorów prądu i strumienia jest w trakcie zmian wartości strumienia prawie stała.

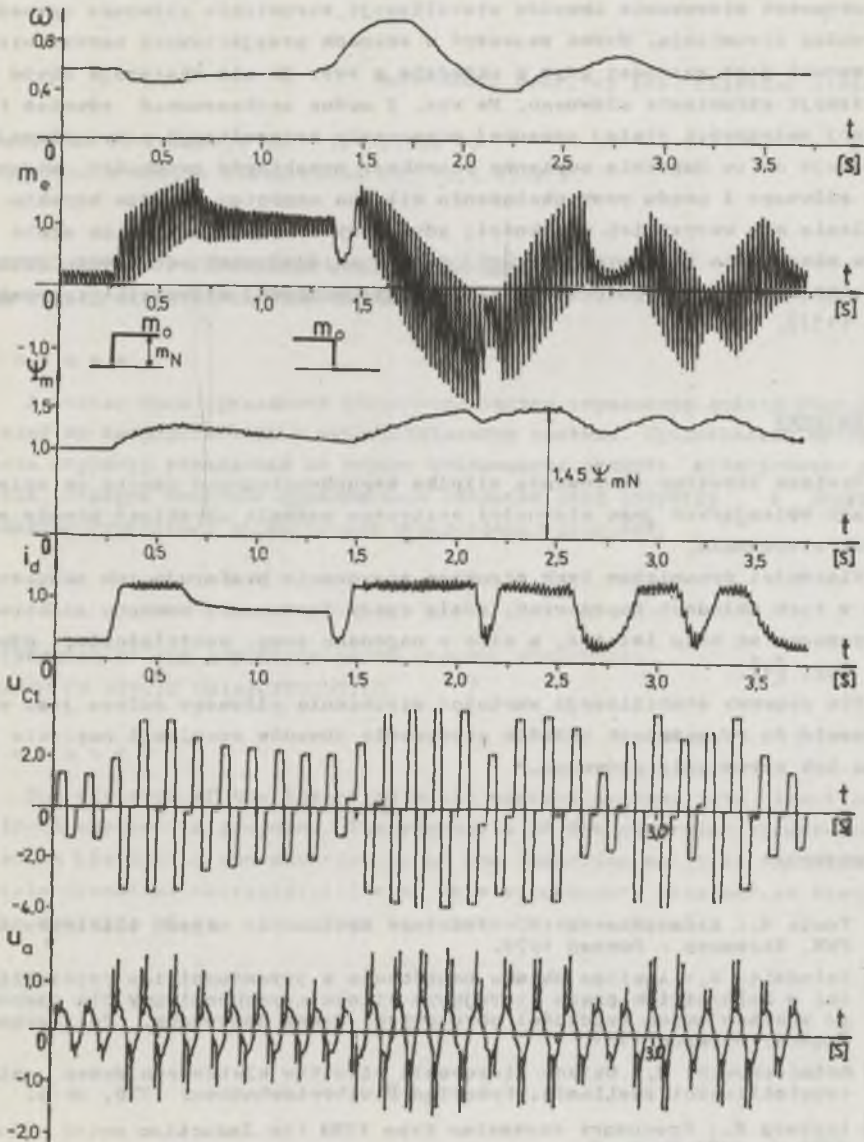
$$\Delta \psi_r = \Delta i_s \frac{x_m \cos \varphi_{ro}}{1 + p T_2} \quad (14a)$$

$$\Delta u_s = \Delta i_s \frac{\omega x_m \cos \varphi_{ro}}{1 + p T_2} \quad (14b)$$

Z postaci transmitancji przyrostowych (14) wynika, że prąd stojana oddziałuje na wartość strumienia głównego poprzez inercję pierwszego rzędu zarówno wtedy, gdy w układzie sterowania wprowadzony jest obwód regulacji napięcia stojana, jak i wtedy, gdy regulowany jest bezpośrednio strumień główny. W układach tych utrzymywanie stałej wartości strumienia głównego jest więc stosunkowo proste i poprawne własności obwodu regulacji strumienia zapewnia regulator typu proporcjonalnego o dostatecznie dużym wzmocnieniu. Należy tu jednak zaznaczyć, iż uzyskanie dostatecznej dokładności regulacji strumienia w układach z obwodem regulacji napięcia stojana jest utrudnione przy małych częstotliwościach prądu stojana. Zachodzi w tym przypadku konieczność uzyskiwania dużych wzmocnień regulatora napięcia, gdyż wartość modułu transmitancji (14b) jest funkcją częstotliwości prądu zasilania silnika.

Wnioski dotyczące własności dynamicznych omawianych struktur sterowania silnika asynchronicznego potwierdzają zarówno badania laboratoryjne, jak i wyniki obliczeń na maszynie analogowej [2].

Przykładowe przebiegi wybranych wielkości silnika i zasilającego go falownika w układzie sterowania z rys. 3a przedstawiono na rys. 5. Przebiegi, zwłaszcza momentu elektromagnetycznego, potwierdzają niekorzystne własności dynamiczne rozpatrywanych struktur sterowania. W szczególności na-



Rys. 5. Przebiegi prędkości obrotowej momentu elektromagnetycznego strumienia głównego silnika, prądu w obwodzie pośredniczącym, napięcia na kondensatorze komutacyjnym napięcia fazowego stojana dla skokowych zmian momentu obciążenia silnika (wartości w jednostkach względnych) w układzie sterowania z rys. 3a

leży zwrócić uwagę na długie czasy narastania i, rewersji momentu elektromagnetycznego silnika, mimo szybkich zmian wartości prądu stojana (na rys. 5 prądu w obwodzie pośredniczącym). Celowość wprowadzania w omawianych strukturach sterowania obwodów stabilizacji strumienia głównego uzasadnia przebieg strumienia. Można zauważyć w stanach przejściowych bardzo wyraźny wzrost jego wartości gdyż w układzie z rys. 3a nie występuje obwód stabilizacji strumienia głównego. Na rys. 5 można zaobserwować również fakt silnej zmienności stałej czasowej mianownika transmitacji przyrostowej (13). Wskazuje na to zupełnie odmienny charakter przebiegów prędkości, strumienia głównego i prądu przy obciążeniu silnika momentem (bardzo szybkie ustalanie się wszystkich wielkości, gdyż przy obciążeniu silnika stała czasowa mianownika transmitacji (13) szybko maleje) oraz odciążeniu silnika (odciążenie silnika powoduje wzrost stałej czasowej mianownika transmitacji (13)).

5. Wnioski

Synteza struktur sterowania silnika asynchronicznego oparta na zależnościach opisujących jego własności statyczne pozwala uzyskiwać proste struktury sterowania.

Własności dynamiczne tych struktur sterowania preferują ich zastosowanie w tych układach napędowych, gdzie czasy formowania momentu elektromagnetycznego są mało istotne, a więc w napędach pomp, wentylatorów, dźwignic itp. [4].

Dla poprawy stabilizacji wartości strumienia głównego celowe jest wprowadzenie do rozważanych układów sterowania obwodów regulacji napięcia stojana lub strumienia głównego.

LITERATURA

- [1] Tunia H.; Kaźmierkowski M.: Podstawy automatyki napędu elektrycznego. PWN, Warszawa - Poznań 1978.
- [2] Kołodziej H.: Analiza układu napędowego z przemiennikiem częstotliwości z falownikiem prądu sterującym silnik asynchroniczny dla szerokiego zakresu zmian prędkości obrotowych. Praca doktorska, Politechnika Śląska, Gliwice 1981.
- [3] Kaźmierkowski M.: Układy sterowania silników klatkowych przez zmianę częstotliwości zasilania. Przegląd Elektrotechniczny 1976, nr 6.
- [4] Lidberg K.: Frequency converter type YRRA for Induction motor drives ASEA J. 1981 Nr 5, 6.

- [5] Baranecki A., Smirnow A.: Częstotliwościowa regulacja prędkości obrotowej silników prądu przemiennego zasilanych z falowników tranzystorowych, II Ogólnopolska Konferencja Energoelektroniki. Kazimierz n. Wisłą 1980.

Recenzent: prof. dr inż. Bolesław Winiarski

Wpłynęło do redakcji dn. 19.VI.1982 r.

Ostateczna wersję dostarczono dn. 19.X.1982 r.

СИНТЕЗ СТРУКТУР УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ СТАТИЧЕСКИХ ЗАВИСИМОСТЕЙ

Резюме

В статье было предложено разделение систем управления асинхронных двигателей на посредственные и непосредственные системы. Представлены методы синтеза структур управления на основе статических свойств асинхронного двигателя. Указаны основные динамические свойства этих структур в результате анализа упрощенных операторных передаточных функций.

SYNTHESIS OF THE INDUCTION MOTOR CONTROL STRUCTURES BASED ON STATIC CHARACTERISTICS

Summary

The division of the induction motor control systems into direct and indirect systems is proposed. The synthesis of the controlled structures based on the static characteristics of the induction motor is presented. The basic dynamical characteristics of this structures, obtained, as result of the analysis of the simplified transmittances are given.