

Ćwiczenie 14

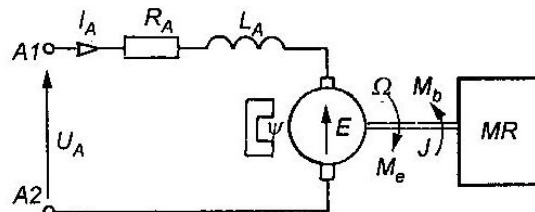
UKŁAD NAPĘDOWY Z SILNIKIEM PRĄDU STAŁEGO STEROWANYM IMPULSOWO

14.1. PROGRAM ĆWICZENIA

- Równania silnika prądu stałego sterowanego impulsowo.
- Schematy układów z silnikiem sterowanym impulsowo.
- Omówienie zasady pracy układu napędowego.
- Charakterystyki mechaniczne układu napędowego bez sprzężeń i ze sprzężeniami zwrotnymi.

14.2. WIADOMOŚCI PODSTAWOWE

Coraz częściej silniki prądu stałego są konstruowane ze wzbudzeniem uzyskiwanym od magnesów trwałych. Takie silniki są stosowane jako elementy wykonawcze w napędach serwomechanizmów. Schemat zastępczy takiego silnika przedstawia rys. 14.1.



Rys. 14.1. Schemat zastępczy silnika prądu stałego

Uwzględniając oznaczenia zawarte w ćwiczeniu 1 oraz biorąc pod uwagę strumień wzbudzenia o stałej wartości, uzyskany od magnesów trwałych, stałą silnika można oznaczyć jako

$$C\Psi = K \left[\frac{\text{V}\cdot\text{s}}{\text{rad}} \right]; \left[\frac{\text{N}\cdot\text{m}}{\text{A}} \right] \quad (14.1)$$

przy uwzględnieniu której zależność na prędkość silnika w warunkach ustalonych przedstawia się wzorem

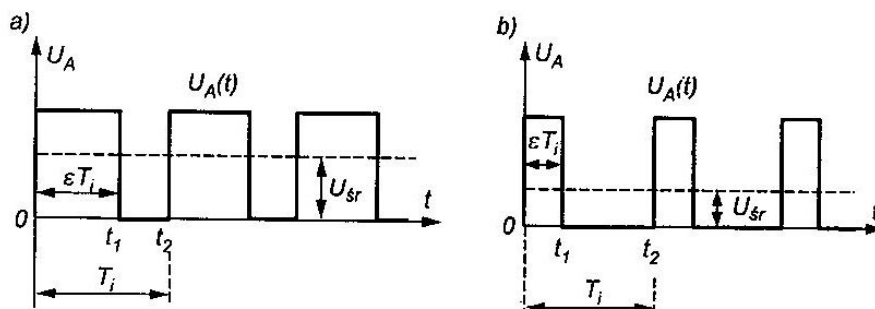
$$\Omega = \frac{U_A - R_A I_A}{K} = \frac{U_A}{K} - \frac{R_A}{K^2} M_e \quad (14.2)$$

Z wielu znanych sposobów uzyskiwania regulowanego napięcia U_A zasilającego obwód twornika, na uwagę zasługują układy z impulsatorami (tzw. czopery).

Zasada sterowania impulsowego polega na okresowym przyłączaniu i odłączaniu stałego napięcia zasilającego obwód twornika silnika. Średnia wartość napięcia na zaciskach silnika może być regulowana przez zmianę szerokości impulsów przy stałej częstotliwości impulsowania f_i lub przez zmianę tej częstotliwości przy stałej szerokości impulsów. Można też zmieniać jednocześnie częstotliwość impulsowania i szerokości impulsów.

Amplituda impulsów jest stała i równa napięciu zasilania U (jeśli pominąć spadek napięcia na impulsatorze).

Na rysunku 14.2ab jest przedstawiony przebieg napięcia wyjściowego z impulsatora przy różnym wypełnieniu ϵ .



Rys. 14.2. Przebieg impulsowego napięcia zasilającego silnik: a) przy dużej wartości ϵ ; b) przy małej wartości ϵ

Średnią wartość napięcia wyjściowego można obliczyć w następujący sposób

$$U_{sr} = \frac{1}{T_i} \int_0^{T_i} U(t) dt = \frac{t_1}{t_2} U = \epsilon U \quad (14.3)$$

przy oznaczeniu:

$$T_i = \frac{1}{f_i} \quad - \text{okres impulsowania} \quad (14.4)$$

$$\epsilon = \frac{t_1}{t_2} = \frac{t_1}{T_i} \quad - \text{względny czas załączania zwany wypełnieniem} \quad (14.5)$$

Zakres zmian wypełnienia wynosi

$$0 < \epsilon < 1 \quad (14.6)$$

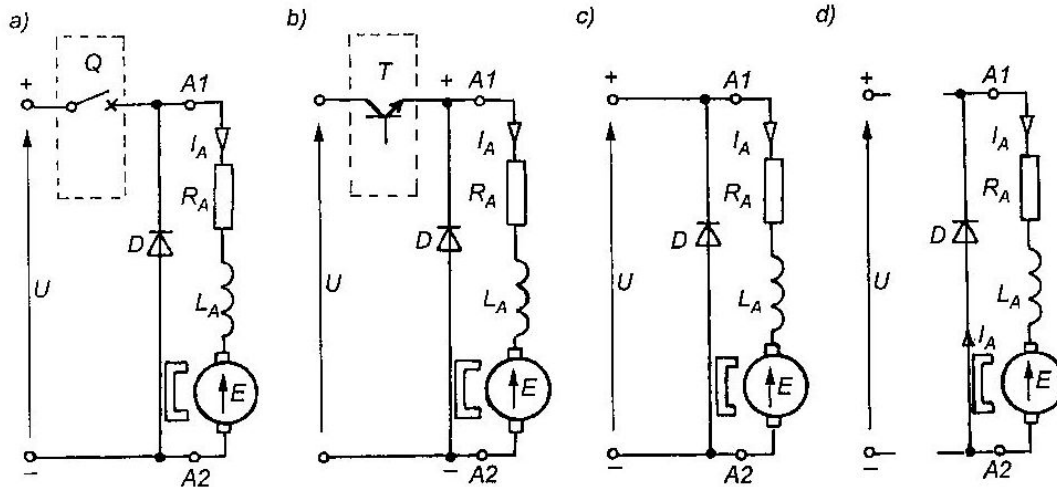
co pociąga za sobą nierówność

$$0 < U_{sr} < U \quad (14.7)$$

Realizacja techniczna impulsatora opiera się na wykorzystaniu układów tyrystorowych i tranzystorowych.

Układy tranzystorowe są coraz częściej stosowane w układach napędowych z silnikiem o mocy od najmniejszych wartości do kilkudziesięciu kW. Dla największych mocy buduje się układy tyrystorowe. W stanowisku laboratoryjnym impulsator jest zbudowany z tranzystorów.

Na rysunku 14.3 przedstawiono schemat ideowy jednokierunkowego napędu z impulsatorem. Łącznik mocy Q (rys. 14.3a) okresowo zostaje załączony i wyłączony, dzięki czemu obwód twornika jest zasilany napięciem o przebiegu podanym na rys. 14.2. Rolę łącznika Q może spełniać tranzystor mocy (rys. 14.3b). Dzięki takiemu zasilaniu można wyróżnić dwa podstawowe stany pracy napędu. W czasie $0 + t_1$ obwód silnika jest przyłączony do źródła napięcia U (rys. 14.3c), a w czasie od t_1 do t_2 jest odłączony i zwarty przez diodę rozładowczą D (rys. 14.3d). Dioda rozładowcza pozwala na przepływ prądu pod wpływem siły elektromotorycznej indukowanej w indukcyjności L_A od zanikającego prądu w obwodzie twornika.



Rys. 14.3. Schemat ideowy jednokierunkowego napędu z silnikiem prądu stałego zasilanego z impulsatora, dla różnych stanów jego pracy

Na podstawie zależności podanych w ćwiczeniu 1, stany pracy silnika przy zasilaniu impulsowym można opisać równaniami

$$U_A = R_A I_A(t) + L_A \frac{dI_A(t)}{dt} + E(t) \quad \text{dla} \quad 0 \leq t \leq t_1 \quad (14.8)$$

$$U_A = 0 = R_A I_A(t) + L_A \frac{dI_A(t)}{dt} + E(t) \quad \text{dla} \quad t_1 \leq t \leq t_2 \quad (14.9)$$

$$M_e(t) = M_b(t) + J \frac{d\Omega(t)}{dt} \quad (14.10)$$

$$E(t) = K\Omega(t) \quad (14.11)$$

$$M_e(t) = KI_A(t) \quad (14.12)$$

Jeżeli w tworniku płynie prąd ciągły I_A (rys. 14.4a), tzn.

$$I_1(0) = I_2(t_2), I_1(t_1) = I_2(t_1) \quad (14.13)$$

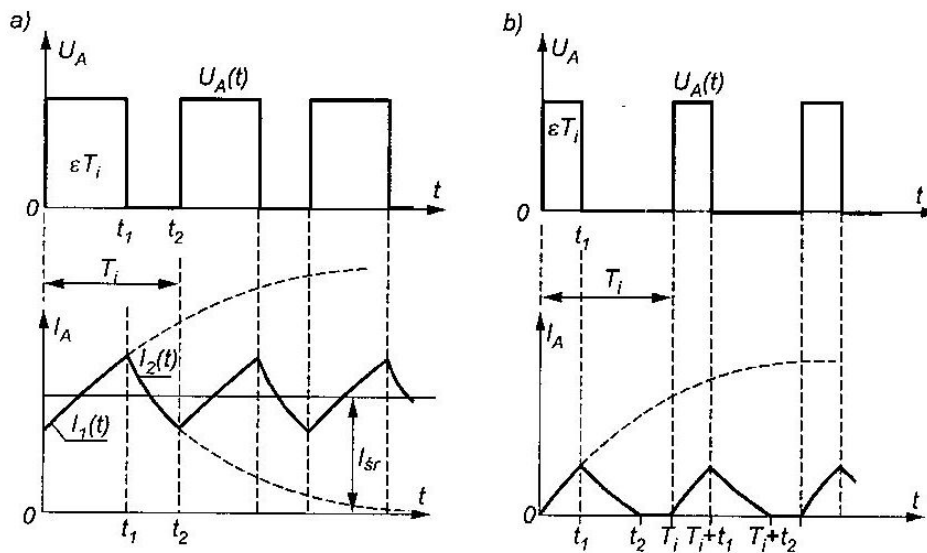
oraz zostanie pominięta pulsacja prędkości kątowej $\Delta\Omega = 0$, tzn.

$$\Omega(t_1) \approx \Omega(t_2) = \Omega \quad (14.14)$$

$$E(t_1) \approx E(t_2) = E \quad (14.15)$$

to średnia wartość prądu twornika

$$I_A = I_{sr} = \frac{1}{t_2} \left(\int_0^{t_1} I_A(t) dt + \int_{t_1}^{t_2} I_A(t) dt \right) \quad (14.16)$$



Rys. 14.4. Przebiegi napięcia i prądu w obwodzie twornika silnika prądu stałego zasilanego z czopera, przy prądzie ciągłym (a) i przerywanym (b)

Rozwiązując równania (14.8) i (14.9) przy powyższych założeniach oraz przy założeniu, że $U_A(t) = U$, otrzymuje się

$$I_{sr} = \frac{U t_1}{R_A t_2} - \frac{E}{R_A} \quad (14.17)$$

Uwzględniając

$$E = K\Omega \quad (14.18)$$

i (14.5) otrzymuje się zależność na charakterystykę mechaniczną silnika przy prądzie ciągłym

$$\Omega = \frac{\varepsilon U - R_A I_{sr}}{K} \quad (14.19)$$

Pulsację prądu ΔI twornika określaną jako

$$\Delta I = \frac{1}{2} [I_A(t_1) - I_A(t_2)] \quad (14.20)$$

wyraża się wzorem przybliżonym

$$\Delta I = \frac{U}{L_A f_i} \varepsilon (1 - \varepsilon) \quad (14.21)$$

Największa wartość pulsacji występuje przy $\varepsilon = 0,5$

$$\Delta I_{\max} = \frac{U}{4L_A f_i} [\text{A}] \quad (14.22)$$

W rzeczywistości, na skutek pulsacji prądu twornika występuje pulsacja prędkości kątowej $\Delta \Omega$.

Rozwiązując układ równań (14.8) ÷ (14.12) przy założeniu braku obciążenia, tzn.

$$M_b(t) = 0 \quad (14.23)$$

oraz określając pulsację prędkości kątowej $\Delta \Omega$ jako

$$\Delta \Omega = \frac{1}{2} [\Omega(t_1) - \Omega(t_2)] \quad (14.24)$$

stwierdza się, że osiąga ona największą wartość dla $\varepsilon = 0,5$

$$\Delta \Omega_{\max} = \frac{U K T_i^2}{16 L_A J} \quad (14.25)$$

Jeżeli przebieg prądu twornika nie jest ciągły (rys. 14.4b), to wówczas

$$t_2 < T_i \quad (14.26)$$

Oznaczając

$$\tau = t_2 T_i \quad (14.27)$$

otrzymuje się

$$t_2 = \tau T_i \quad (14.28)$$

τ – względny czas przepływu prądu

$$0 < \tau \leq 1 \quad (14.29)$$

Rozwijając układ równań (14.6) i (14.7) i postępując podobnie jak przy wyznaczaniu charakterystyki mechanicznej dla prądu ciągłego lecz przy założeniach

$$I_A(0) = I_A(t_2) = 0 \quad (14.30)$$

otrzymuje się zależność $\Omega = f(I_{sr})$ dla prądu nieciągłego

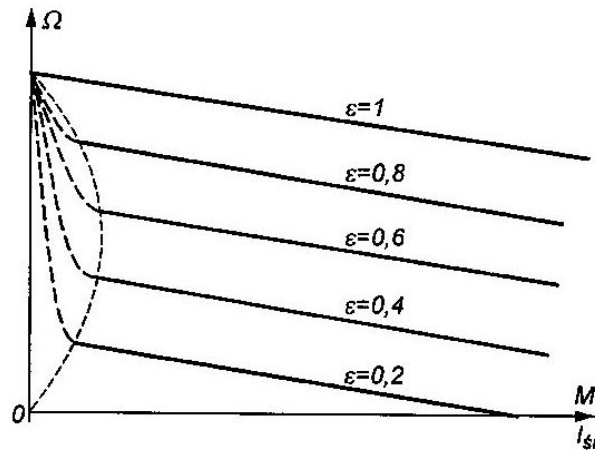
$$\Omega = \frac{\varepsilon U - R_A I_{sr}}{\tau K} \quad (14.31)$$

Ponieważ

$$M = KI_A = KI_{sr} \quad (14.32)$$

więc równanie (14.31) opisuje charakterystykę mechaniczną silnika dla prądu nieciągłego, (14.19) – dla prądu ciągłego.

Na rysunku 14.5 są przedstawione charakterystyki mechaniczne silnika prądu stałego zasilanego impulsami napięcia o stałej amplitudzie U i częstotliwości f_i ($f_i = \frac{1}{T_i}$) i różnych wartościach wypełnienia ε .



Rys. 14.5. Charakterystyka mechaniczna napędu jednokierunkowego z silnikiem prądu stałego zasilanego z impulsatora

Graniczną średnią wartość prądu I_{AC} twornika, przy której przewodzenie staje się ciągłe (linia przerywana), oblicza się ze wzoru

$$I_{AC} = \frac{U}{R_A} \left(\varepsilon - \frac{e^{\varepsilon\gamma} - 1}{e^\gamma - 1} \right) \quad (14.33)$$

przy czym

$$\gamma = \frac{T_i}{T_A} \quad (14.34)$$

$$T_A = \frac{L_A}{R_A} \quad (14.35)$$

Maksymalna wartość tego prądu występuje przy

$$\varepsilon = \frac{1}{\gamma} \ln \frac{e^\gamma - 1}{\gamma} \quad (14.36)$$

W układach napędowych obszar nieciągłego prądu powinien być jak najmniejszy. Dobiera się więc częstotliwość impulsowania na tyle dużą, aby

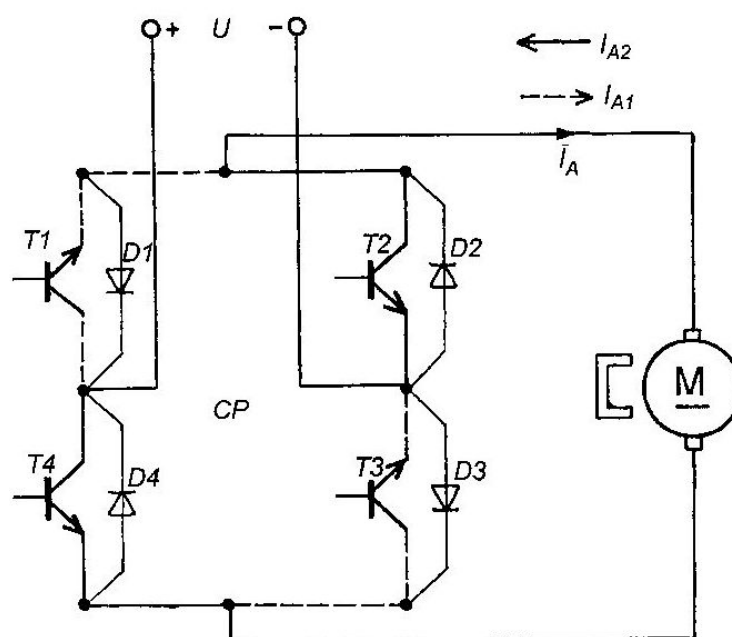
$$T_i \ll T_A \quad (14.37)$$

co nie tylko zmniejsza obszar prądu nieciągłego ale równocześnie obniża wartość pulsacji prądu twornika (14.22) i pulsacji prędkości kątowej (14.25).

Mała wartość pulsacji prądu twornika – to mniejsza wartość skuteczna tego prądu i mniejsze straty. Ale równocześnie ze wzrostem częstotliwości impulsowania rosną straty mocy w impulsatorze (czoperze). Wartość dobranej częstotliwości jest kompromisem uwzględniającym opisane zjawiska.

Układy impulsowego sterowania silnika pozwalają na hamowanie generatorowe, dynamiczne i przeciwwłoczeniem. W ćwiczeniu wykorzystuje się hamowanie przeciwwłoczeniem.

Obwód główny tranzystorowego czopera (wykorzystywany w ćwiczeniu) jest przedstawiony na rys. 14.6.



Rys. 14.6. Schemat ideowy nawrotnego napędu z czoperem

Podczas pracy czopera (CP) kluczują zawsze dwa tranzystory (pozostałe dwa są blokowane) – $T1$ i $T3$ lub $T2$ i $T4$. Np. jeżeli równocześnie kluczują tranzystory $T1$ i $T3$, to obwód dla prądu I_{A1} przedstawia się następująco: $+U$, $T1$, twornik M , $T3$, $-U$. Równoczesne kluczowanie tranzystorów $T2$ i $T4$ tworzy obwód dla prądu I_{A2} : $+U$, $T4$, twornik M , $T2$, $-U$.

Diody $D1 \div D4$ są diodami zwrotnymi tranzystorów i silnika. Taka struktura obwodu głównego czopera zapewnia nawrót silnika. Przy przejściu z kluczowania jednej pary tranzystorów do drugiej (nawrót) istnieje zwłoka czasowa niezbędna do odzyskania właściwości blokujących półprzewodników.

W czasie przejścia z jednego kierunku wirowania silnika na drugi występuje hamowanie przeciwwłoczeniowe.