



„EUROELEKTRA”
Ogólnopolska Olimpiada Wiedzy Elektrycznej i Elektronicznej
Rok szkolny 2016/2017

Zadania z elektroniki na zawody III stopnia
z rozwiązaniami

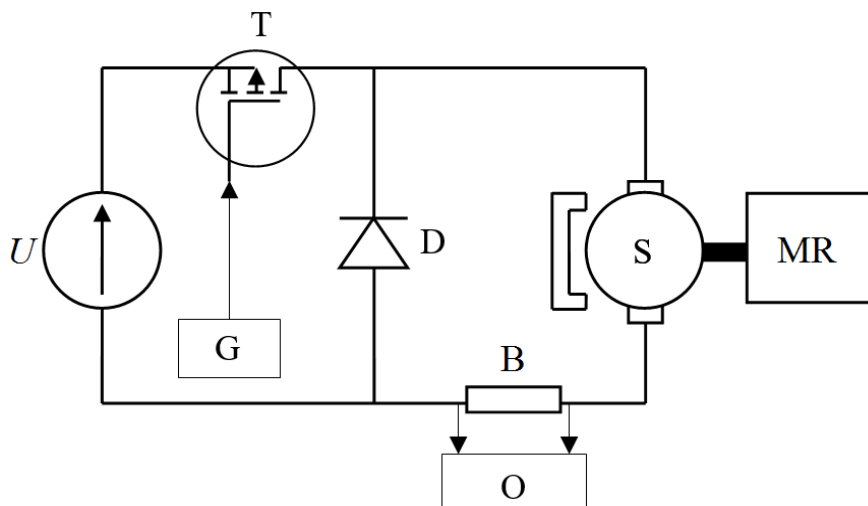
Instrukcja dla zdającego

1. Czas trwania zawodów: 120 minut.
2. III stopień olimpiady zawiera 4 zadania otwarte.
3. Należy podać poprawną odpowiedź wraz tokiem rozwiązania.
4. Za każdą prawidłową odpowiedź uzyskuje się maksymalnie 10 punktów. Maksymalna liczba punktów za 4 zadania do zdobycia to 40 punktów.
5. Można korzystać z przyborów do pisania, rozdawanych kart czystopisu i brudnopisu, kalkulatorów i tablic matematycznych. Korzystanie z notebooków, telefonów komórkowych itp. jest zabronione.

Życzymy powodzenia!

Zadanie 1

W celu określenia indukcyjności twornika silnika komutatorowego S ze wzbudzeniem od magnesów trwałych, zestawiono układ pomiarowy pokazany na rysunku. Składa się on ze źródła napięcia stałego U o wartości 48 V i o zanedbywalnie małej rezystancji wewnętrznej, a pomiędzy tym źródłem i silnikiem zastosowano elementy, tworzące przerywacz prądu stałego o strukturze obniżającej napięcie: tranzystor T (kluczowany sygnałem z generatora G impulsów prostokątnych o stałej częstotliwości i stałym wypełnieniu) oraz diodę D. Silnik jest obciążony maszyną roboczą MR. Wykorzystując bezindukcyjny bocznik B i podłączony do niego oscyloskop O, zarejestrowano i wyskalowano przebieg prądu twornika. Okazało się, że podczas jednego okresu kluczkowania tranzystora prąd twornika narasta praktycznie liniowo od wartości 5 A do wartości 6 A w czasie 25 μ s, a następnie praktycznie liniowo maleje do wartości 5 A w czasie 45 μ s. Określić wartość indukcyjności twornika. Przyjąć, że spadek napięcia na przewodzącym tranzystorze T i na przewodzącej D są sobie równe. Zaniechać wpływ pulsacji prądu twornika na pulsacje spadku napięcia na rezystancjach, przez które płynie ten prąd, a także wpływ pulsacji prądu twornika na pulsacje prędkości silnika.



Rozwiązanie

Spadek napięcia na indukcyjności twornika wyraża się wzorem: $u_L = L \cdot \frac{di}{dt}$,

gdzie:

L – indukcyjność twornika;

i – wartość chwilowa prądu płynącego przez twornik.

Zarówno podczas procesu narastania prądu (tranzystor T załączony), jak i jego opadania (tranzystor T wyłączony), prąd zmienia się praktycznie liniowo. Zatem z dobrym przybliżeniem różniczkę można zastąpić ilorazem różnicowym:

$$u_L = L \cdot \frac{di}{dt} = L \cdot \frac{\Delta i}{\Delta t}.$$

Przy załączonym tranzystorze T, prąd narasta, płynąc w oczku: źródło-tranzystor-silnik-bocznik. Na podstawie drugiego prawa Kirchhoffa można dla tego oczka napisać równanie:

$$U - U_T - E - L \cdot \frac{i_{\max} - i_{\min}}{t_T} - (R_t + R_B) \cdot I = 0,$$

gdzie:

U – napięcie źródła;

U_T – spadek napięcia na przewodzącym tranzystorze T;

E – SEM indukowana w tworniku, gdy wirnik się obraca; jeśli się nie obraca, wtedy $E = 0$ V;

$i_{\max} = 6$ A;

$i_{\min} = 5$ A;

$t_T = 25 \mu s = 0,000025$ s;

R_t – rezystancja twornika silnika;

R_B – rezystancja bocznika;

I – wartość średnia prądu twornika.

Przy wyłączonym tranzystorze T, prąd maleje, płynąc w oczku: dioda-silnik-bocznik. Na podstawie drugiego prawa Kirchhoffa, można dla tego oczka napisać równanie:

$$-U_D - E - L \cdot \frac{i_{\min} - i_{\max}}{t_D} - (R_t + R_B) \cdot I = 0,$$

gdzie:

U_D – spadek napięcia na przewodzącej diodzie D;

$t_D = 45 \mu s = 0,000045$ s.

Odejmując stronami równanie oczka dla wyłączzonego tranzystora T od równania oczka dla załączonego tranzystora T, uzyskuje się:

$$U - U_T + U_D - L \cdot \frac{i_{\max} - i_{\min}}{t_T} + L \cdot \frac{i_{\min} - i_{\max}}{t_D} = 0.$$

Uwzględniając, że $U_T = U_D$ i przekształcając, otrzymuje się ostatecznie:

$$L = \frac{U}{(i_{\max} - i_{\min}) \cdot \left(\frac{1}{t_T} + \frac{1}{t_D}\right)} = \frac{48}{(6 - 5) \cdot \left(\frac{1}{0,000025} + \frac{1}{0,000045}\right)} = 0,000771 \text{ H} = 771 \mu\text{H}$$

Zadanie 2

Pojazd elektryczny napędzany silnikiem indukcyjnym klatkowym ma przewieźć ładunek po pochyłej, równomiernie wznoszącej się drodze. Długość tej drogi wynosi 80 m, a różnica wysokości, którą ma pokonać pojazd, wynosi 5 m. Masa pojazdu, wraz z ładunkiem, wynosi 500 kg. Dane znamionowe silnika: moc 3 kW, napięcie 24,0 V, prędkość 1435 obr/min, stosunek momentu rozruchowego do momentu znamionowego silnika $\lambda_r = 2,3$. Silnik napędza dwa koła pojazdu, każde o średnicy 0,33 m, przez przekładnię o sprawności równej 92% i o przełożeniu równym $i = 5,00$. Oznacza to, że koła pojazdu mają prędkość obrotową mniejszą pięć razy od prędkości obrotowej silnika. Moment bezwładności elementów pojazdu wprawianych w ruch obrotowy, sprowadzony do wału silnika, wynosi $0,08 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$, przy czym na 25% tej wartości wpływ mają elementy na wejściu przekładni, czyli wirujące z prędkością silnika. Jaka będzie wartość przyspieszenia pojazdu w chwili ruszania? Rozruch pojazdu polega na zasileniu silnika napięciem o częstotliwości znamionowej i o wartości skutecznej równej 26,0 V, a po wytworzeniu przez silnik momentu rozruchowego następuje zwolnienie mechanicznego hamulca postojowego. Przyjąć, że prędkość jest przekazywana przez przekładnię bezstratnie, a moment strat przekładni nie zależy od prędkości silnika. Siła wynikająca z oporów ruchu (opory toczenia kół i opory powietrza) przy zerowej prędkości pojazdu jest równa 160 N.

Rozwiązanie

Wszelkie opory natury mechanicznej, które musi pokonać silnik podczas rozruchu, zaleca się sprowadzić do jednego miejsca układu napędowego. W proponowanym rozwiązaniu miejscem tym jest wał silnika, ale może to być też na przykład punkt styku kół i drogi. Ponieważ wał silnika wykonuje ruch obrotowy, wszelkie opory mechaniczne należy wyrazić jako momenty mechaniczne obciążające ten wał. Na moment obciążający wał mają wpływ cztery składniki:

1) Moment niezbędny do pokonania siły grawitacji oddziałującej na masę pojazdu wraz z ładunkiem:

$$\begin{aligned} T_g &= \frac{F_g \cdot r_K}{\eta_p \cdot i} = (m \cdot g \cdot \sin \alpha) \cdot \frac{d_K}{2 \cdot i \cdot \eta_p} = (m \cdot g \cdot \frac{h}{l}) \cdot \frac{d_K}{2 \cdot i \cdot \eta_p} = \\ &= 500 \cdot 9,81 \cdot \frac{5}{80} \cdot \frac{0,33}{2 \cdot 5 \cdot 0,92} = 10,99 \text{ N}\cdot\text{m}, \end{aligned}$$

gdzie:

F_g – składowa siły grawitacji, która przy ruszaniu/jeździe pod górę jest przeciwna do kierunku ruchu pojazdu. Składowa ta jest równa iloczynowi ciężaru pojazdu oraz sinusa kąta α pochylenia drogi, czyli jest równa iloczynowi masy m pojazdu, przyspieszenia ziemskiego g i stosunku różnicy wysokości h do długości drogi l ;

r_K – promień napędzanych kół pojazdu, równy połowie średnicy d_K każdego z kół;

i – przełożenie przekładni;

η_p – sprawność przekładni. Ponieważ założono, że prędkość jest przekazywana przez przekładnię bezstratnie oraz że moment strat przekładni nie zależy od prędkości silnika, dlatego wszelkie straty w przekładni dotyczą wyłącznie zmniejszenia przekazywanego przez nią momentu, a na wartość tego zmniejszenia nie ma wpływu prędkość. W związku z tym, moment strat w przekładni jest taki sam zarówno przy nieruchomych, jak i przy wirujących elementach przekładni.

2) Moment niezbędny do pokonania oporów ruchu (oporów toczenia i oporów powietrza):

$$T_o = \frac{F_o \cdot r_K}{\eta_p \cdot i} = \frac{F_o \cdot d_K}{2 \cdot \eta_p \cdot i} = 160 \cdot \frac{0,33}{2 \cdot 0,92 \cdot 5} = 5,74 \text{ N}\cdot\text{m},$$

gdzie:

F_o – siła wynikająca z oporów ruchu, przy zerowej prędkości pojazdu.

3) Moment dynamiczny, niezbędny do wprowadzenia masy pojazdu w ruch liniowy i wprowadzenia w ruch obrotowy wszystkich wirujących części pojazdu. Jego wartość wynika z drugiej zasady dynamiki Newtona. Pierwsza część momentu dynamicznego, związana z ruchem liniowym pojazdu, wyniesie:

$$T_{dv} = \frac{m \cdot a \cdot r_K}{\eta_p \cdot i} = \frac{m \cdot a \cdot d_K}{2 \cdot \eta_p \cdot i} = 500 \cdot a \cdot \frac{0,33}{2 \cdot 0,92 \cdot 5} = 17,93 \cdot a \text{ N} \cdot \text{m},$$

gdzie:

a – szukana wartość przyspieszenia pojazdu w chwili ruszania.

4) Druga część momentu dynamicznego, niezbędnego do wprowadzenia w ruch obrotowy wirujących elementów pojazdu (wirnik silnika, wały i koła przekładni, wszystkie osie i koła pojazdu) wynika ze wzoru:

$$T_{d\omega} = J \cdot \frac{d\omega}{dt},$$

gdzie:

J – moment bezwładności elementów pojazdu wprawianych w ruch obrotowy, sprowadzony do wału silnika;

ω – prędkość kątowa wału silnika;

$\frac{d\omega}{dt}$ – przyspieszenie kątowe wału silnika.

Ze względu na to, że prędkość jest przekazywana przez przekładnię bezstratnie, to przy braku poślizgu kół prędkość kątowa wału silnika jest powiązana z prędkością liniową pojazdu v zależnością:

$$\omega = \omega_K \cdot i = \frac{v \cdot i}{r_K} = \frac{2 \cdot v \cdot i}{d_K} = \frac{2 \cdot 5 \cdot v}{0,33} = 30,3 \cdot v \text{ rad/s},$$

gdzie:

ω_K – prędkość kątowa napędzanych kół pojazdu.

Ponieważ na 25% momentu bezwładności elementów wirujących mają wpływ elementy na wejściu przekładni, moment dynamiczny wywołany przez te działa bezpośrednio na wał silnika. Natomiast pozostała część momentu bezwładności, czyli 75%, odnosząca się do elementów na wyjściu przekładni, wywołuje moment dynamiczny, przenoszony na wał silnika przez przekładnię. Musi on być powiększony o straty w przekładni.

Ostatecznie:

$$T_{d\omega} = J \cdot \frac{d\omega}{dt} = (0,25 \cdot 0,08 + \frac{0,75 \cdot 0,08}{0,92}) \cdot \frac{d}{dt} (30,3 \cdot v) = 2,582 \cdot \frac{dv}{dt} = 2,582 \cdot a \text{ N} \cdot \text{m}.$$

Ze względu na zasilanie silnika podwyższonym napięciem oraz zależność momentu rozruchowego silnika indukcyjnego od kwadratu wartości skutecznej napięcia zasilającego, moment napędowy T_{Sr} , wytwarzany przez silnik na początku rozruchu, będzie równy:

$$T_{Sr} = \lambda_r \cdot T_{Sn} \cdot \left(\frac{U}{U_n} \right)^2 = 2,3 \cdot 19,96 \cdot \left(\frac{26}{24} \right)^2 = 53,9 \text{ N} \cdot \text{m},$$

gdzie:

λ_r – krotność momentu rozruchowego silnika;

T_{Sn} – moment znamionowy silnika, obliczany z jego danych znamionowych:

$$T_{Sn} = \frac{60}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{P_n}{n_n} = \frac{60 \cdot 3000}{2 \cdot \pi \cdot 1435} = 19,96 \text{ N} \cdot \text{m}.$$

Ostatecznie, równanie ruchu układu napędowego będzie miało postać:

$$T_{Sr} = T_g + T_o + T_{dv} + T_{d\omega},$$

a po podstawieniu danych liczbowych:

$$53,9 = 10,99 + 5,74 + 17,93 \cdot a + 2,582 \cdot a.$$

Stąd poszukiwana wartość przyspieszenia pojazdu w chwili ruszania: $a = 1,812 \text{ m/s}^2$

Zadanie 3

Określ wielkość rocznych, jałowych strat energii w trójfazowej linii elektroenergetycznej prądu przemiennego o napięciu znamionowym 10 kV (uwaga: napięcia znamionowe sieci elektroenergetycznych są napięciami międzyfazowymi). Do obliczeń przyjąć: współczynnik strat dielektrycznych izolacji kabli $\text{tg } \delta = 0,003$, pojemność jednostkową linii kablowych $C' = 0,39 \frac{\mu\text{F}}{\text{km}}$, częstotliwość napięcia sieci $f = 50 \text{ Hz}$, długość linii kablowej $l = 7 \text{ km}$.

Rozwiązanie

1) Roczny czas pracy linii:

$$T_R = 365 \cdot 24 \text{ h} = 8760 \text{ h}.$$

2) Pojemność linii:

$$C = C' \cdot l = 0,39 \cdot 10^{-6} \cdot 7 = 2,73 \mu\text{F}.$$

3) Susceptancja linii:

$$B = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 2,73 \cdot 10^{-6} = 8,58 \cdot 10^{-4} \text{ S}.$$

4) Konduktancja poprzeczna linii:

$$G = \text{tg } \delta \cdot B = 0,003 \cdot 8,58 \cdot 10^{-4} = 2,573 \mu\text{S}.$$

5) Moc strat na konduktancji poprzecznej:

$$\Delta P = U^2 \cdot G = (10 \cdot 10^3)^2 \cdot 2,573 \cdot 10^{-6} = 257,3 \text{ W}.$$

6) Roczne straty energii linii elektroenergetycznej:

$$\Delta E = \Delta P \cdot T_R = 257,3 \cdot 8760 = 2,254 \text{ MWh}.$$

A zatem roczne straty energii w izolacji linii wyniosą 2,254 MWh.

Zadanie 4

Bęben wirówki jest bezpośrednio napędzany trójfazowym silnikiem indukcyjnym klatkowym o danych znamionowych: moc 1,1 kW, prędkość 2880 obr/min, napięcie 400 V, prąd 2,35 A, współczynnik mocy 0,84, moment bezwładności wirnika 0,0013 kg·m². Moment bezwładności bębna wirówki wynosi 0,0500 kg·m². Moment strat mechanicznych elementów wirujących, spowodowany tarcieniem w łożyskach maszyny indukcyjnej i wirówki oraz oporami powietrza, zależy liniowo od wartości prędkości, przy czym przy prędkości równej i bliskiej zeru wynosi 0,2 N·m, a przy prędkości znamionowej maszyny indukcyjnej wynosi 1,5 N·m. Silnik zasilany jest z falownika napięciowego PWM (wykorzystującego modulację szerokości impulsów), którego część silnoprądową tworzy klasyczna mostkowa konfiguracja sześciu tranzystorów, a do każdego z tranzystorów przyłączona jest w sposób odwrotnie-równoległy dioda. Na wejściu tego falownika, w obwodzie pośredniczącym prądu stałego, znajduje się kondensator o pojemności 2,2 mF. Obwód pośredniczący zasilany jest przez trójfazowy prostownik sieciowy, mostkowy z sieci trójfazowej 3 × 230/400 V. Opisany układ napędowy stanie ustalonym zapewnia wirowanie bębna z prędkością równą prędkości znamionowej silnika indukcyjnego. W pewnej chwili rozpoczyna się proces liniowego zmniejszenia do zera częstotliwości harmonicznej podstawowej napięcia wyjściowego falownika, który trwa przez 6,00 s. Obliczyć wartość napięcia na kondensatorze po zakończeniu tego procesu. Przyjąć, że w chwili rozpoczęcia opisanego procesu falownik przestaje pobierać energię z prostownika sieciowego. Przyjąć też, że napięcie zasilające prostownik sieciowy ma kształt idealnie sinusoidalny. Spadki napięcia na diodach prostownika sieciowego oraz na tranzystorach i na diodach w falowniku można zaniedbać. Należy też przyjąć, że sprawność przemiany energii przez silnik indukcyjny podczas opisanego procesu ma wartość stałą i równą sprawności znamionowej silnika.

WSKAZÓWKA: $E_s = \int x^n \cdot dt = \frac{x^{n+1}}{n+1} + C$, przy czym $n \neq -1$.

Rozwiązanie

Obliczenia wstępne silnika indukcyjnego:

– znamionowa prędkość kątowa silnika: $\omega_n = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_n}{60} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 2880}{60} = 302 \text{ rad/s}$,

gdzie: n_n – znamionowa prędkość obrotowa silnika.

– sprawność znamionowa maszyny: $\eta_n = \frac{P_n}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_n \cdot \cos \varphi_n} = \frac{1100}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 2,35 \cdot 0,84} = 0,804$,

gdzie: P_n , U_n , I_n , $\cos \varphi_n$ – parametry znamionowe maszyny.

Zmniejszanie częstotliwości zasilania maszyny indukcyjnej spowoduje zmniejszanie się prędkości elementów wirujących. Możliwe są tu dwa przypadki:

1) Zmniejszanie częstotliwości będzie na tyle powolne, że nie wystąpi hamowanie elektryczne. Wystąpi wtedy jedynie hamowanie wybiegiem, a cała energia kinetyczna zgromadzona w masach wirujących rozproszy się w postaci ciepła w łożyskach i wskutek oporów powietrza. W takiej sytuacji nie wystąpi doładowywanie kondensatora w obwodzie pośredniczącym wskutek braku przepływu energii od strony silnika (falownika). Prostownik sieciowy naładuje kondensator jedynie do wartości amplitudy międzyfazowego napięcia sieciowego, gdyż falownik w trakcie hamowania przestanie pobierać energię z prostownika sieciowego.

2) Zmniejszanie częstotliwości będzie na tyle szybkie, że poza hamowaniem wybiegiem wystąpi również hamowanie elektryczne, w którym część energii zgromadzonej w masach wirujących zostanie przekazana przez silnik elektryczny, pracujący jako prądnica, do falownika pracującego jako prostownik dzięki metodzie PWM stosowanej do sterowania tranzystorów. Prostownik PWM może podwyższać swoje napięcie wyjściowe w szerokich granicach w porównaniu ze zwykłym prostownikiem diodowym, a także może wytwarzać energię bierną niezbędną do wytworzenia pola magnetycznego w silniku indukcyjnym. Prostownik ten przekazuje energię elektryczną wytworzoną przy hamowaniu do kondensatora w obwodzie pośredniczącym. Energia ta, ze względu na

możliwość jedynie jednokierunkowego przepływu prądu i mocy przez prostownik sieciowy, a więc niemożność przekazania energii do sieci, spowoduje konieczność przyjęcia przez kondensator w obwodzie pośredniczącym energii elektrycznej pochodzącej z hamowania, co w konsekwencji spowoduje podwyższenie napięcia tego kondensatora ponad wartość amplitudy międzyfazowego napięcia sieciowego.

Aby sprawdzić który z powyższych przypadków ma miejsce przy danych z treści zadania, należy porównać ilość energii kinetycznej E_w zgromadzonej w masach wirujących, z energią E_s straconą w postaci ciepła w procesie hamowania, w łożyskach i wskutek oporów powietrza.

Energia kinetyczna zgromadzona w masach wirujących wyraża się wzorem:

$$E_w = (J_B + J_M) \cdot \frac{\omega_n^2}{2} = (0,0500 + 0,0013) \cdot \frac{302^2}{2} = 2339 \text{ J},$$

gdzie:

J_B, J_M – moment bezwładności odpowiednio bębna oraz wirnika silnika indukcyjnego.

Aby określić energię E_s straconą w postaci ciepła w łożyskach i wskutek oporów powietrza podczas trwania hamowania, należy najpierw określić, jak zależą od czasu: prędkość $\omega(t)$ i moment strat $T_s(t)$, wynikający z wymienionych wyżej oporów mechanicznych.

Ponieważ prędkość synchroniczna maszyny indukcyjnej liniowo zależy od częstotliwości harmonicznej podstawowej napięcia zasilającego maszynę, z dobrym przybliżeniem można przyjąć, że prędkość zespołu napędowego podczas procesu hamowania będzie się liniowo zmniejszać od prędkości ω_n do zera w czasie hamowania t_h , który będzie równy czasowi, w którym częstotliwość zmniejszyła się do zera. Przybliżenie to jest słuszne przy założeniu, że podczas hamowania nie przekroczono momentu krytycznego maszyny indukcyjnej, które to założenie sprawdzono pod koniec rozwiązania.

Na tej podstawie, można zapisać równania słuszne dla przedziału czasu $t \in \langle 0, t_h \rangle$:

$$\omega(t) = \omega_n \cdot \left(1 - \frac{t}{t_h}\right) \text{ rad/s},$$

$$T_s(t) = 1,5 - (1,5 - 0,2) \cdot \frac{t}{t_h} = 1,5 - 1,3 \cdot \frac{t}{t_h} \text{ N} \cdot \text{m}.$$

Moc strat $P_s(t)$, wydzielona w postaci ciepła w czasie hamowania wskutek wymienionych oporów mechanicznych, wyniesie:

$$P_s(t) = \omega(t) \cdot T_s(t) = \omega_n \cdot \left(1 - \frac{t}{t_h}\right) \cdot \left(1,5 - 1,3 \cdot \frac{t}{t_h}\right) = \omega_n \cdot \left(1,5 - 2,8 \cdot \frac{t}{t_h} + 1,3 \cdot \frac{t^2}{t_h^2}\right) \text{ W},$$

natomiast odpowiadająca temu przebiegowi mocy wartość energii tracona w czasie $t \in \langle 0, t_h \rangle$ wyniesie:

$$\begin{aligned} E_s &= \int_0^{t_h} P_s(t) \cdot dt = \int_0^{t_h} \omega_n \cdot \left(1,5 - 2,8 \cdot \frac{t}{t_h} + 1,3 \cdot \frac{t^2}{t_h^2}\right) \cdot dt = \int_0^6 302 \cdot \left(1,5 - 2,8 \cdot \frac{t}{6} + 1,3 \cdot \frac{t^2}{6^2}\right) \cdot dt = \\ &= \left[302 \cdot \left(1,5 \cdot t - 2,8 \cdot \frac{t^2}{2 \cdot 6} + 1,3 \cdot \frac{t^3}{3 \cdot 6^2}\right) \right]_0^6 = 302 \cdot \left(1,5 \cdot 6 - 2,8 \cdot \frac{6}{2} + 1,3 \cdot \frac{6}{3}\right) = 966 \text{ J}. \end{aligned}$$

Oczywiście powyższą całkę oznaczoną można też wyznaczyć w sposób numeryczny za pomocą kalkulatora naukowego. Całkowaniu podlega następujące wyrażenie w granicach od 0 do 6:

$$E_s = \int \left(302 \cdot \left(1,5 - \frac{2,8}{6} \cdot x + \frac{1,3}{36} \cdot x^2\right), 0, 6\right) = 966 \text{ J}.$$

Wynik oczywiście będzie identyczny z wynikiem uzyskanym na drodze analitycznej.

Jak widać, energia E_w jest większa od E_s , a więc różnica $E_w - E_s$ zostanie przekazana do silnika indukcyjnego, pracującego jako prądnica, i dalej przekazania przez "falownik", pracujący jako prostownik PWM (mogący podwyższać prostowane napięcie wyjściowe w porównaniu z prostownikiem diodowym), do obwodu pośredniczącego prądu stałego, doładowując kondensator.

Jeżeli zaniedbane będą straty w tranzystorach i diodach "falownika" oraz przyjęte uproszczenie, dotyczące stałej wartości sprawności silnika indukcyjnego podczas hamowania (równej wartości znamionowej sprawności), energia doładowująca kondensator będzie równa:

$$E_C = \eta_n \cdot (E_w - E_s) = 0,804 \cdot (2339 - 966) = 1104 \text{ J.}$$

Ponieważ: $E_C = 0,5 \cdot C \cdot (U_k^2 - U_p^2)$, otrzymuje się: $U_k = \sqrt{\frac{E_C}{0,5 \cdot C} + U_p^2}$,

gdzie:

C – pojemność kondensatora;

U_k – szukana wartość końcowa napięcia na kondensatorze po zakończeniu hamowania;

U_p – wartość początkowa napięcia na kondensatorze. Ponieważ w momencie rozpoczęcia hamowania falownik przestał pobierać energię z kondensatora, to kondensator został w ciągu kilkadziesiąt milisekund doładowany przez prostownik sieciowy do wartości maksymalnej napięcia sieci. Dlatego, zakładając sinusoidalny kształt napięcia sieci i zaniedbując spadki napięć na diodach prostownika sieciowego można obliczyć wartość początkową napięcia na kondensatorze:

$$U_p = \sqrt{2} \cdot 400 = 566 \text{ V.}$$

Ostatecznie:

$$U_k = \sqrt{\frac{1104}{0,5 \cdot 0,0022} + 566^2} = 1151 \text{ V.}$$

Jak widać wartość końcowa napięcia na kondensatorze około 2-krotnie większa od wartości typowego napięcia w obwodzie pośredniczącym prądu stałego. W rzeczywistym układzie grozi to uszkodzeniem zarówno kondensatora, jak i elementów energoelektronicznych w prostowniku sieciowym oraz w falowniku. Rozwiązaniem tego problemu jest albo znaczne wydłużenie czasu hamowania (zwiększy to E_s), albo zastosowanie tzw. rezystora hamującego, rozładowującego kondensator w obwodzie pośredniczącym przy przekroczeniu określonego napięcia w obwodzie pośredniczącym. Możliwe jest też zastosowanie przekształtnika sieciowego o dwukierunkowym przepływie energii zamiast zwykłego diodowego, co umożliwi przekazanie energii hamowania z obwodu pośredniczącego do sieci zasilającej.

UWAGA

Przy określaniu zależności $\omega(t)$ założono, że podczas hamowania nie przekroczono momentu krytycznego silnika indukcyjnego. Założenie to można zweryfikować, porównując moment oddziałujący na wał maszyny z momentem krytycznym maszyny. Zgodnie z równaniem ruchu układu napędowego moment oddziałujący na wał maszyny T_o to suma momentu strat T_s i moment dynamiczny układu T_d :

$$T_o = T_s + T_d = T_s + (J_B + J_M) \cdot \frac{d\omega}{dt}.$$

Przy założeniu liniowego zmniejszania prędkości od ω_n do zera w czasie t_h :

$$T_o = T_s + (0,05 + 0,0013) \cdot \frac{0 - 302}{6} = T_s - 2,579 \text{ N} \cdot \text{m.}$$

Ponieważ T_s zawiera się w granicach od $0,2 \text{ N} \cdot \text{m}$ do $1,5 \text{ N} \cdot \text{m}$, zatem moment T_o będzie się zawierał w granicach od $-2,379 \text{ N} \cdot \text{m}$ do $-1,079 \text{ N} \cdot \text{m}$.

Moment znamionowy maszyny indukcyjnej jest równy:

$$T_n = \frac{P_n}{\omega_n} = \frac{1100}{302} = 3,64 \text{ N} \cdot \text{m.}$$

Jak widać, wartość bezwzględna momentu T_o przy dowolnej prędkości z przedziału $\omega \in \langle \omega_n, 0 \rangle$ jest mniejsza od momentu znamionowego maszyny, a więc tym bardziej jest ona mniejsza od momentu krytycznego tej maszyny. Zatem przyjęte na wstępie założenie było prawidłowe.

□