

Waldemar Kempki

Instytut Elektryfikacji
i Automatykacji Górnictwa

OPTIMALIZACJA OBWODU KOMUTACYJNEGO TYRYSTOROWEGO
FALOWNIKA NAPIĘCIOWEGO
DO ZASILANIA SILNIKÓW INDUKCYJNYCH

Streszczenie. Przedstawiono kryterium optymalizacji tyrystorowego Falownika napięciowego z transformatorem komutacyjnym. W oparciu o to kryterium przeprowadzono minimalizację strat komutacyjnych. Zbadano wyniki obliczeń optymalizacyjnych i podano wzory projektowe.

Stosowane obecnie układy napędowe z silnikiem indukcyjnym klatkowym zasilanym z falownika tyrystorowego odznaczają się wysokimi walorami eksploatacyjnymi. Wadą ich jest wysoki koszt falownika. Koszt ten zależy od mocy i układu elektrycznego falownika. Dobre właściwości z punktu widzenia kosztów posiada układ falownika z transformatorem komutacyjnym [1]. Układ ten należy jednak do grupy falowników o zwiększonych stratach własnych. Straty te spowodowane są rozpraszaniem energii komutacyjnej w elementach układu. Aby więc w pełni wyzyskać zalety układu, konieczne jest staranne zaprojektowanie obwodu komutacyjnego. Parametry elementów komutacyjnych winne być tak dobrane, aby zapewnić prawidłową pracę falownika przy minimalnej ilości energii komutacyjnej rozpraszanej w obwodzie. Konieczne jest znalezienie optymalnych wartości parametrów elementów komutacyjnych przy założeniu, że kryterium optymalizacji stanowi energia komutacyjna rozpraszana w elementach układu, a warunkami ograniczającymi są warunki prawidłowej pracy falownika.

Dla prawidłowej pracy falownika konieczne jest, by czas dysponowany na wyłączenie obwodu był większy od czasu odzyskiwania zdolności zaporowych tyrystora. Dodatkowo, tyrystor winien być tak dobrany, by jego dopuszczalny prąd szczytowy był większy od maksymalnej wartości prądu impulsu komutacyjnego.

Przebiegi komutacyjne falownika z transformatorem komutacyjnym zostały wyznaczone w [1]. Na tej podstawie można określić czas dysponowany na wyłączenie oraz maksymalną wartość prądu impulsu komutującego.

Czas dysponowany na wyłączenie odpowiada czasowi zaporowej polaryzacji tyrystora wyłączanego. Napięcie na tyrystorze wyłączanym opisane jest w pracy [1] zależnościami

$$u_{T1}(t) = E - (1+k) U_2(0) \cos \omega_2 t + \frac{1+k}{2} [I_0 + I_2(0)] X_L \sin \omega_2 t$$

$$U_2(0) = \frac{E}{2} + \frac{E}{2} \cos\left(\frac{\omega}{\sqrt{1-k}} \frac{1-k^2}{k} \frac{I_0}{E} L\right)$$

$$I_2(0) = \frac{1}{k} I_0 \quad \omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

W zależnościach tych oznaczono przez

- E - napięcie źródła zasilającego falownik,
- I_0 - prąd obciążenia,
- L - indukcyjność jednego uzwojenia transformatora komutacyjnego,
- k - współczynnik sprzężenia uzwojeń transformatora,
- C - pojemność kondensatora komutacyjnego,
- $X_L = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ - reaktancję rezonansową obwodu komutacyjnego,
- $\omega_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{1}{\sqrt{LC}}$ - pulsację rezonansową obwodu komutacji.

Zaporowa polaryzacja tyrystora trwa do momentu, w którym funkcja napięcia na tyrystorze osiąga zero. Z tego warunku otrzymuje się

$$u_{T1}(\tau_d) = E - (1+k) U_2(0) \cos \omega_2 \tau_d + \frac{1+k}{2} [I_0 + I_2(0)] X_L \sin \omega_2 \tau_d = 0.$$

Wartość τ_d oznacza w tym wzorze czas dysponowany na wyłączenie. Przekształcając równanie otrzymuje się

$$1 - \frac{1+k}{2} \beta \underline{X} \cos\left(\frac{1}{\sqrt{2}} \omega \tau_d\right) + \gamma(1+\delta) \sin\left(\frac{1}{\sqrt{2}} \omega \tau_d\right) = 0$$

gdzie:

$$\underline{X} = X_L \frac{I_0}{E} \quad (1)$$

$$\beta = \frac{1}{\underline{X}} \left(1 + \cos \frac{(1+k) \sqrt{1-k}}{k} \underline{X}\right) \quad (2)$$

$$\delta = \frac{1}{2} (1+k) \beta \underline{X} \quad (3)$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{(1+k)^2}{k} \frac{1}{1+\delta} \underline{X}. \quad (4)$$

Rozwiązując równanie ze względu na ωt_d otrzymuje się

$$\omega t_d = 2\sqrt{2} \operatorname{arc} \operatorname{tg} \left(\sqrt{\gamma^2 - \frac{1-\delta}{1+\delta}} - \gamma \right). \quad (5)$$

Zależność ta jest parametryczną funkcją jednej zmiennej. Parametrem jest współczynnik sprzężenia k , zaś zmienną względną reaktancja rezonansowa X . Na podstawie tej zależności można określić, jak wyrażony w mierze kątowej czas dysponowany na wyłączenie zależy od parametrów obwodu.

Maksymalną wartość prądu impulsu komutującego można wyznaczać z funkcji prądu tyrystora. Prąd ten w pracy [1] opisany jest zależnością

$$i_2(t) = -I_0 + [I_0 + I_2(0)] \cos \omega_2 t + \frac{\sqrt{2} U_2(0)}{X_L} \sin \omega_2 t$$

Z analizy przebiegów komutacyjnych wynika, że prąd komutujący osiąga maksimum w chwili, w której napięcie na kondensatorze komutacyjnym osiąga zero, to znaczy w momencie czasowym

$$t_p = \frac{1}{\omega_2} \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{\sqrt{2} U_2(0)}{[I_0 + I_2(0)] X_L}$$

Podstawiając t_p w miejsce t do równania $i_2(t)$ otrzymuje się

$$I_{2\max} = i_2(t=t_p) = -I_0 + [I_0 + I_2(0)] \cos \omega_2 t_p + \frac{\sqrt{2} U_2(0)}{X_L} \sin \omega_2 t_p$$

a po przekształceniach

$$\frac{I_{2\max}}{I_0} = -1 + \frac{1+k}{k} \cos \alpha + \frac{\beta}{\sqrt{2}} \sin \alpha \quad (6)$$

gdzie

$$\alpha = \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{k}{1+k} \beta \quad (7)$$

Zależność (6) wraz z (7) i (2) jest parametrycznym równaniem jednej zmiennej. Jest to zależność względnej wartości prądu komutującego maksymalnego od parametrów obwodu komutacyjnego.

We wstępie stwierdzono, że działania optymalizacyjne winny iść w kierunku minimalizacji ilości energii komutacyjnej rozpraszanej w obwodzie. Energia jest rozpraszana w elementach obwodu we wszystkich trzech etapach komutacji. Jednakże o ilości energii rozpraszanej w obwodzie w procesie komutacji decydują procesy zachodzące w trzecim etapie. Wynika to z tego, że czas trwania trzeciego etapu komutacji jest o rząd większy od łącznego czasu trwania etapu pierwszego i drugiego [1]. Z tego względu zdecydowano przyjąć, że cała energia komutacyjna jest rozpraszana w trzecim etapie. Założenie takie daje wyniki przybliżone, jednak prowadzi do prostszych wzorów, bardziej przydatnych w praktyce projektowej.

Przyjmując schemat zastępczy obwodu dla trzeciego etapu komutacji podany w pracy [1] można energię rozpraszaną w tym etapie opisać zależnościami:

$$W(X, R) = U_{QD} \int_0^{v_p} i_D(v) dv + U_{QT} \int_0^{v_p} i_2(v) dv + R \int_0^{v_p} i_2^2(v) dv.$$

W zależności tej zgodnie z pracą [1] jest

- U_{QD} - zastępcze napięcie przewodzenia diody,
- U_{QT} - zastępcze napięcie przewodzenia tyrystora,
- R - rezystancja uzwojenia transformatora komutacyjnego,
- $i_D(v)$ - funkcja prądu diody zwrotnej w trzecim etapie komutacji,
- $i_2(v)$ - funkcja prądu tyrystora w trzecim etapie komutacji,
- v_p - czas trwania trzeciego etapu komutacji,

przy czym

$$v_p = \frac{L}{R} \ln \left[1 + \frac{R I_{23}(0)}{U_{QT} + U_{QD}} \right] \quad (8)$$

$$I_{23}(0) = I_{23}(v=0) = i_2(t=\tau_p) = I_2(\tau_p) = I_{2max}$$

$$i_D(v) = I_0 + i_2(v)$$

$$i_2(v) = \left[I_{23}(0) + \frac{U_{QT} + U_{QD}}{R} \right] \exp\left(-\frac{R}{L}v\right) - \frac{U_{QT} + U_{QD}}{R}$$

Rozwiązując funkcję $F(X, R)$ po przekształceniach otrzymuje się

$$W(X, R) = LU_{QD} \frac{I_0}{R} \ln \left[1 + \frac{R I_{23}(0)}{U_{QD} + U_{QT}} \right] + \frac{1}{2} L I_{23}^2(0)$$

i oznaczając

$$U_{QD} \frac{I_0}{R} \ln \left[1 + \frac{R I_{23}(0)}{U_{QD} + U_{QT}} \right] = F(R)$$

dostaje się

$$W(X, R) = L \left[F(R) + \frac{1}{2} I_{23}^2(0) \right]. \quad (9)$$

Energia komutacyjna rozpraszana w obwodzie jest zatem sumą energii opisanej zależnością

$$L F(R)$$

oraz energii zgromadzonej w polu magnetycznym transformatora na końcu drugiego etapu komutacji

$$\frac{1}{2} L I_{23}^2(0).$$

Ponieważ rezystancja R i reaktancja X nie są od siebie zależne, można funkcję energii komutacyjnej badać osobno ze względu na R i osobno ze względu na X , minimalizując kolejno.

Dla określenia minimum $F(R)$ oblicza się

$$\frac{d F(R)}{d R} = \frac{U_{QD} I_0 I_{23}(0)}{R(U_{QD} + U_{QT}) + R^2 I_{23}(0)} - \frac{1}{R^2} U_{QD} I_0 \ln \left[1 + \frac{R I_{23}(0)}{U_{QD} + U_{QT}} \right].$$

Z warunku $\frac{d F(R)}{d R} = 0$ otrzymuje się $R_{01} = 0$, $R_{02} = \infty$.

Wynika z tego, że funkcja $F(R)$ nie ma ekstremum w przedziale $(0, \infty)$. Nie istnieje zatem optymalna, ze względu na minimum funkcji $F(R)$, wartość rezystancji R_0 . Chcąc jednak optymalizować funkcję energii komutacyjnej jako funkcję jednej zmiennej konieczne jest określenie wartości funkcji $F(R_0)$ a zatem określenie wartości R_0 . Wartość R_{02} jest technicznie nierealna. Arbitralne przyjęcie wartości R_0 z przedziału $0, \infty$ pociąga za sobą wątpliwości wobec braku wartości odniesienia. Najmniej zastrzeżeń budzić może przyjęcie do dalszych obliczeń wartości R_{01} . Dla wartości R_{01} funkcja $F(R)$ ma pierwszą pochodną równą zero, co daje małe przyrosty funkcji w blis-

kim otoczeniu punktu zero, a więc i małe błędy w określeniu wartości $F(R_0)$ dla warunków, jakie istnieją w falownikach fizykalnych.

Po obliczeniu wartości $F(R=R_{01})$ i podstawieniu do (9) w miejsce $F(R)$ otrzymuje się

$$W(X) = L \frac{U_{QD} I_0 I_{23}(0)}{U_{QD} + U_{QT}} + \frac{1}{2} L I_{23}^2(0).$$

Analizując katalogowe [2], [3], [4], [5], [6] wartości napięć przewodzenia diod i tyrystorów można przyjąć, że $U_{QD} \approx U_{QT}$. Dla takiego przyjęcia

$$W(X) = \frac{1}{2} L [I_0 I_{23}(0) + I_{23}^2(0)],$$

a mając na uwadze, że $I_{23}(0) = I_{2max}$

$$W(X) = \frac{1}{2} L (I_0 I_{2max} + I_{2max}^2). \quad (10)$$

Ponieważ zgodnie z pracą [1] jest

$$L = \frac{1}{\omega} X \frac{E}{I_0},$$

można równanie (10) sprowadzić do postaci

$$\frac{2}{E} \frac{F(X)}{I_0 I_d} = \frac{X}{\omega I_d} \left(\frac{I_{2max}}{I_0} + \frac{I_{2max}^2}{I_0^2} \right) = \underline{W}(X)$$

Wyrażenie to jest zależnością względnej wartości energii jednego procesu komutacyjnego od względnej raktancji rezonansowej.

Wartość (ωI_d) oraz $\frac{I_{2max}}{I_0}$ zostały wyznaczone uprzednio zależnościami (5) i (6).

Ostatecznie zależność

$$\underline{W}(X) = \frac{X}{(\omega I_d)} \left[\frac{I_{2max}}{I_0} + \left(\frac{I_{2max}}{I_0} \right)^2 \right]$$

z zależnościami (2), (3), (4), (5), (6) przyjmuje się za funkcję celu optymalizacji.

Znalezienie ekstremum tej funkcji metodami analizy matematycznej jest trudne. Wygodniej jest zastosować metodę numeryczną i przeprowadzić obliczenia na maszynie cyfrowej. Obliczenia takie zostały wykonane na maszynie Odra 1204, a wyniki tych obliczeń przedstawione na rys. 1, 2, 3.

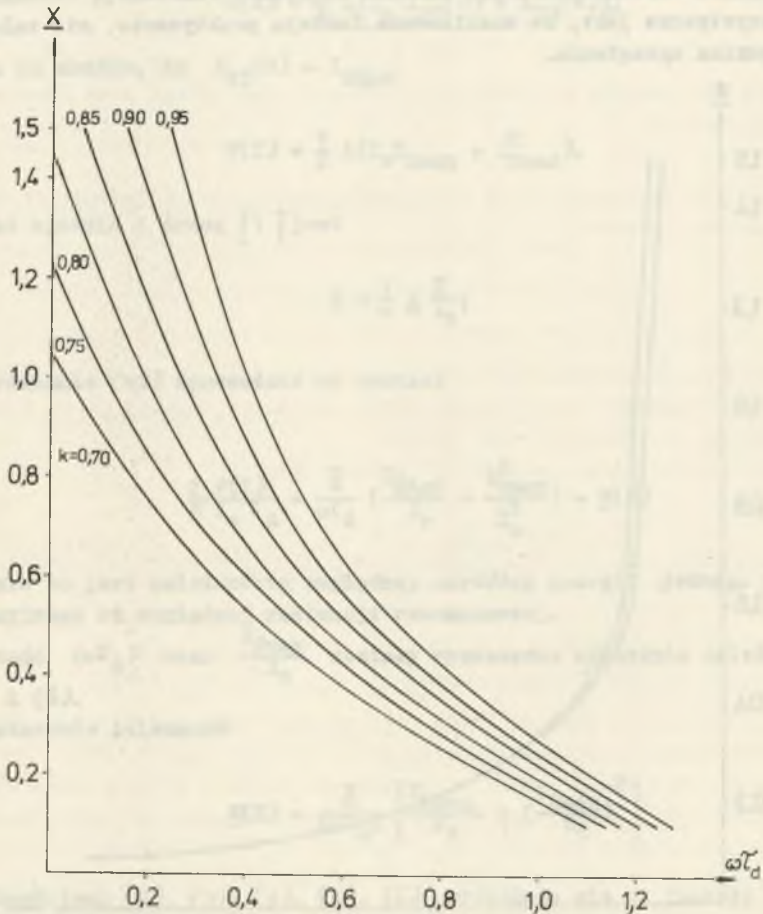
Rezultaty obliczeń dowodzą, że funkcja celu jest krzywą posiadającą określone minimum, a zatem proces opisany tą funkcją poddaje się optymalizowaniu.

Krzywa z rys. 1 przedstawia zależność względnej maksymalnej wartości prądu komutującego od względnej reaktancji rezonansowej obwodu komutacji. Jest ona graficznym przedstawieniem zależności (6). Podaje ona, ile razy wartość szczytowa prądu komutującego przewyższa maksymalną wartość prądu, jaki może zostać w falowniku pewnie skomutowany przy wartościach elementów komutacyjnych określonych przez wartość względnej reaktancji rezonansowej. Charakterystyczne jest, że analizowana funkcja praktycznie nie zależy od współczynnika sprzężenia.

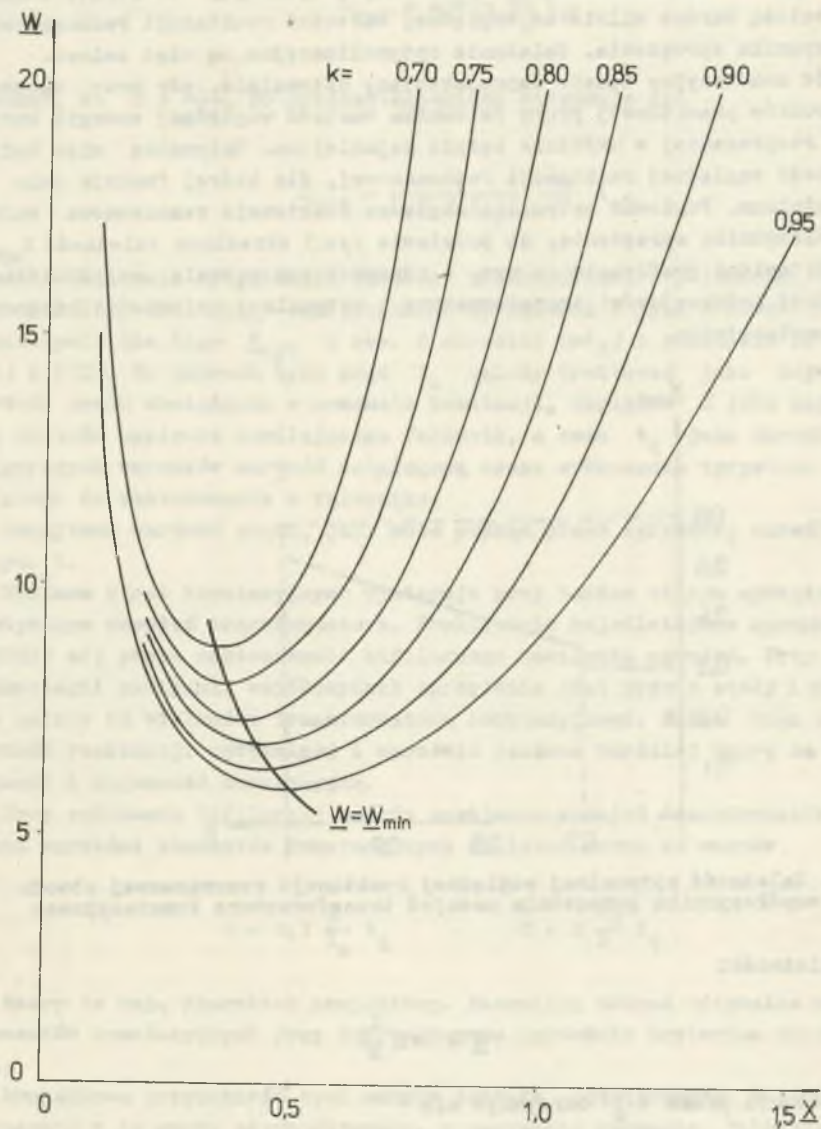


Rys. 1. Zależność względnej maksymalnej wartości prądu komutującego od względnej reaktancji rezonansowej obwodu komutacji

Krzywe z rys.2 przedstawiają zależność wyrażonego w mierze kątowej czasu dysponowanego na wyłączenie od względnej reaktancji rezonansowej. Są one graficznym przedstawieniem funkcji (5). Krzywe wskazują, w jakim stopniu wartości elementów komutacyjnych obwodu współ z współczynnikiem sprzężenia wpływają na wartość czasu zaporowej polaryzacji tyrystora wyłączanego, przy stałych wartościach napięcia zasilającego układ i prądu komutowanego. Krzywe wykazują, że korzystne jest silne sprzężenie magnetyczne obydwu uzwojeń transformatora. Zapewnia ono przy takich samych wartościach elementów komutacyjnych większy czas dysponowany na wyłączenie tyrystora.



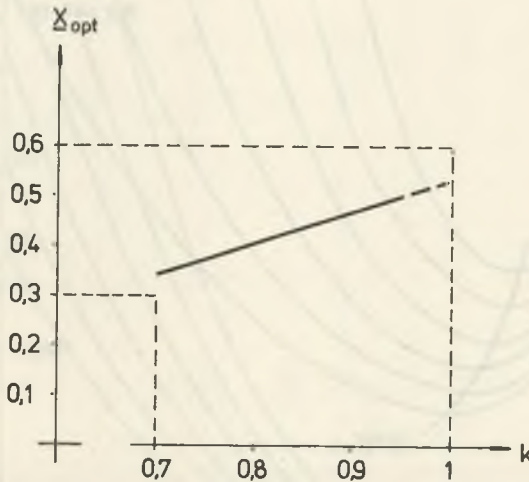
Rys. 2. Zależność wyrażonego w mierze kątowej czasu dysponowanego na wyłączenie od względnej reaktancji rezonansowej obwodu komutacji



Rys. 3. Zależność względnej energii komutacyjnej rozpraszanej w obwodzie w procesie komutacji od względnej reaktancji rezonansowej

Krzywe $\underline{W} = f(X)$ z rys. 3 przedstawiają zależność względnej wartości energii rozproszonej w obwodzie w procesie komutacji od względnej wartości reaktancji rezonansowej dla różnych współczynników sprzężenia, przy jednoczesnym zachowaniu warunków prawidłowej pracy falownika. Krzywe te są graficznym przedstawieniem funkcji celu. Krzywe wykazują, że straty komutacyjne zależą bardzo silnie od względnej wartości reaktancji rezonansowej i współczynnika sprzężenia. Działania optymalizacyjne są więc celowe.

Obwód komutacyjny będzie zaprojektowany optymalnie, gdy przy zachowaniu warunków prawidłowej pracy falownika wartość względnej energii komutacyjnej rozpraszanej w układzie będzie najmniejsza. Optymalną więc będzie ta wartość względnej reaktancji rezonansowej, dla której funkcja celu osiąga minimum. Ponieważ optymalna względna reaktancja rezonansowa zależy od współczynnika sprzężenia, na podstawie rys.3 określono zależność $X_{opt}(k)$ i przedstawiono graficznie na rys. 4. Rysunek ten pozwala na obliczenie optymalnej indukcyjności transformatora i optymalnej pojemności kondensatora komutacyjnego.



Rys. 4. Zależność optymalnej względnej reaktancji rezonansowej obwodu od współczynnika sprzężenia uzwojeń transformatora komutacyjnego

Z zależności

$$\underline{X} = \omega L \frac{I_o}{B}$$

po wymnożeniu przez τ_d otrzymuje się

$$L = \frac{\underline{X}}{(\omega \tau_d)} \frac{B}{I_o} \tau_d.$$

Dla $\underline{X} = \underline{X}_{opt}$ oraz przy założeniu, że czas dysponowany na wyłączenie t_d jest równy czasowi wyłączania t_q można napisać

$$L_{opt} = \frac{\underline{X}_{opt}}{(\omega t_d)} \frac{E}{I_0} t_q \quad (11)$$

Wiedząc, że $C = \frac{1}{\omega^2 L}$, po przekształceniach otrzymuje się

$$C_{opt} = \frac{1}{(\omega t_d)^2 \underline{X}_{opt}} \frac{I_0}{E} t_q \quad (12)$$

Dla obliczenia optymalnych wartości indukcyjności i pojemności komutacyjnej należy dla danego współczynnika sprzężenia z rys. 4 określić \underline{X}_{opt} , a następnie dla tego \underline{X}_{opt} z rys. 2 określić (ωt_d) i podstawić do równań (11) i (12). We wzorach tych prąd I_0 należy traktować jako największą wartość prądu obciążenia w momencie komutacji, napięcie E jako najmniejszą wartość napięcia zasilającego falownik, a czas t_q jako określoną dla najgorszych warunków wartość katalogową czasu wyłączania tyrystora przewidzianego do zastosowania w falowniku.

Szczytową wartość prądu, jaki może płynąć przez tyrystor, określa się z rys. 1.

Minimum strat komutacyjnych występuje przy bardzo silnym sprzężeniu magnetycznym uzwojeń transformatora. Praktycznie najsilniejsze sprzężenie uzyskuje się przez zastosowanie bifilarnego nawijania uzwojeń. Przy takiej technologii nawijania współczynnik sprzężenia jest prawie stały i nieznacznie zależy od wielkości transformatora komutacyjnego. Można więc ustalić wartość reaktancji optymalnej i uprościć jeszcze bardziej wzory na indukcyjność i pojemność komutacyjną.

Przy założeniu bifilarnej metody nawijania uzwojeń transformatora optymalne wartości elementów komutacyjnych obliczyć można ze wzorów

$$L = 0,7 \frac{E}{I_0} t_q \quad C = 2 \frac{I_0}{E} t_q$$

Wzory te mają charakter projektowy. Pozwalają dobrać optymalne wartości elementów komutacyjnych przy sformułowanym uprzednio kryterium optymalizacji.

Projektowa przydatność tych wzorów została potwierdzona w praktyce. W oparciu o te wzory zaprojektowano, a następnie wykonano falownik przeznaczony do zasilania silnika indukcyjnego. Wyzyskując ten falownik w Instytucie Metrologii i Maszyn Elektrycznych wykonano cykl badań silników indukcyjnych klatkowych zasilanych z falownika. Opis falownika oraz wyniki badań podane są w pracach [7] i [8].

LITERATURA

- [1] Paszek W., Kempski W.: Analiza przebiegów komutacyjnych tyrystorowego falownika napięciowego z transformatorem komutacyjnym. Zeszyty Nauko-Politechniki Śląskiej nr 47, 1975.
- [2] Półprzewodnikowe diody energetyczne i tyrystory. Informator techniczny. Warszawa, 1972.
- [3] Polovodiče. Praha, 1973.
- [4] Siemens Leistungshalbleiter Datenbuch 1972/73.
- [5] Westinghouse Semiconductors. London, 1969.
- [6] AEI Semiconductors. London, 1969.
- [7] Badanie silników indukcyjnych zasilanych napięciem z przetwornic tyrystorowych. Część 1. Praca naukowo-badawcza Instytutu Metrologii i Maszyn Elektrycznych. Gliwice, 1971.
- [8] Badanie silników indukcyjnych zasilanych napięciem z przetwornic tyrystorowych. Część 4. Praca naukowo-badawcza Instytutu Metrologii i Maszyn Elektrycznych. Gliwice, 1973.

Przyjęto do druku w czerwcu 1974 r.

ОПТИМИЗАЦИЯ КОММУТАЦИОННОЙ ЦЕПИ ТИРИСТОРНОГО
ИНВЕРТОРА НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ ПИТАНИЯ
ИНДУКЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Р е з ю м е

В статье приводятся критерия оптимизации тиристорного инвертора напряжения с коммутационным трансформатором. На основе этих критериев рассчитаны условия минимальных коммутационных потерь. Представлены результаты оптимизационных вычислений и приведены формулы, пригодные для проектирования инверторов.

OPTIMISATION OF THE COMMUTATION CIRCUIT
OF THE THYRISTOR VOLTAGE INVERTER
FOR SUPPLYING THE INDUCTION MOTOR

S u m m a r y

Optimisation criterion of the thyristor voltage inverter with a commutation transformer is presented. Due to this criterion minimisation of the commutation losses was obtained. The calculated results and suitable designing pattern are given.