ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1985

Seria: ELEKTRYKA 94 Nr kol. 819

Tadeusz RODACKI

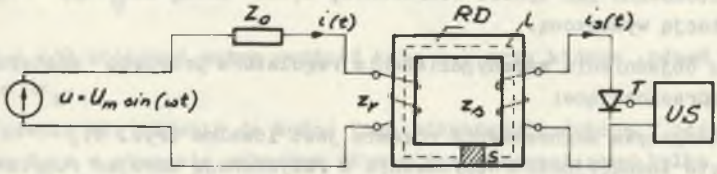
Instytut Podstawowych Problemów
Elektrotechniki i Energoelektroniki
Politechniki Śląskiej

TYRYSTOROWO-MAGNETYCZNE REGULATORY NAPIĘCIA

Streszczenie. W artykule omówiono zasady działania i sposoby obliczania tyrystorowo-magnetycznego regulatora napięcia w układzie transformatorowym. Wyprowadzono równania opisujące podstawowe zależności i charakterystyki regulatora tyrystorowo-magnetycznego.

1. BUDOWA I DZIAŁANIE REGULATORA TYRYSTOROWO-MAGNETYCZNEGO

Uproszczony schemat regulatora tyrystorowo-magnetycznego [1] przedstawiono na rys. 1.

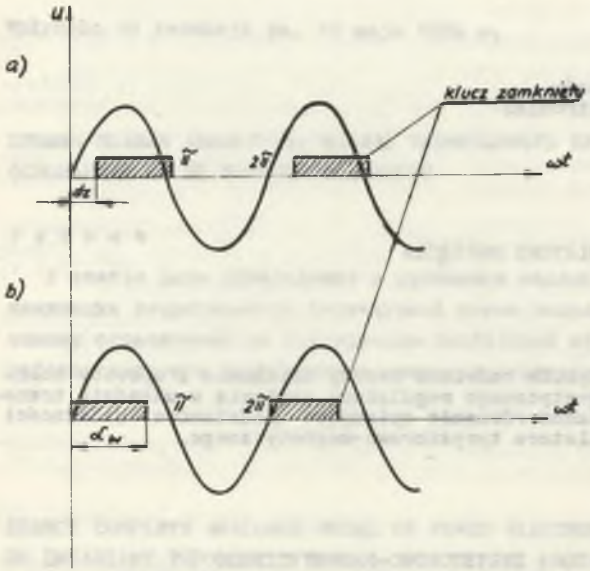


Rys. 1. Uproszczony schemat regulatora tyrystorowo-magnetycznego

Zbudowany jest on z rdzenia ferromagnetycznego RD,o przekroju S, na którym nawinięte są dwa uzwojenia: robocze o liczbie zwojów z_r i sterujące o liczbie zwojów z_s. Szeregowo z uzwojeniem roboczym włączona jest impedancja obciążenia Z_o, natomiast uzwojenie sterujące zbocznikowane jest półprzewodnikowym kluczem, którym może być tyrystor lub tranzystor mocy. Element ten pozwala na regulację wartości prądu w obwodzie roboczym w zależności od je-

go kąta wysterowania lub kąta wyłączenia. Sygnał sterujący pracę półprzewodnikowego klucza wytwarzany jest w układzie sterowania US.

W opisanym układzie możliwe są dwa zasadnicze sposoby sterowania pracą klucza (rys. 2):



Rys. 2. Sterowanie kluczy półprzewodnikowych w regulatorze

a) z komutacją naturalną, b) z komutacją wymuszoną

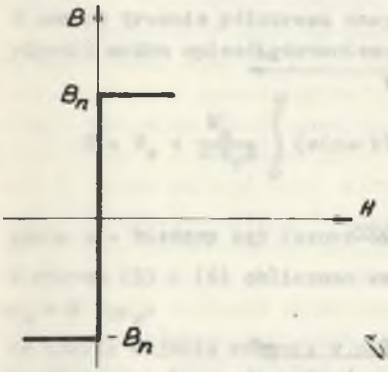
- półprzewodnikowy klucz zwiera uzwojenie sterujące tylko raz w czasie jednego okresu napięcia zasilającego przy kącie wysterowania α_z liczonym od chwili przejścia napięcia przez zero ($0<\alpha_z<\pi$) i rozwiera je po przejściu prądu obciążenia przez zero. Regulator tyrystorowo-magnetyczny, w którym zastosowano ten sposób sterowania będzie dalej nazywany regulatorem z komutacją naturalną,
- półprzewodnikowy klucz zwiera uzwojenie sterujące raz w czasie jednego okresu napięcia zasilającego z chwilą przejścia napięcia przez zero, a rozwiera je przy kącie wyłączenia α_w nie większym od π. Regulator tyrystorowo-magnetyczny, w którym zastosowano ten sposób sterowania, będzie dalej nazywany regulatorem z komutacją wymuszoną.

W celu objaśnienia zasady działania regulatora przyjęto następujące założenia upraszczające:

- charakterystyka magnesowania rdzenia jest idealna (rys. 3),
- pominięto indukcyjność rozproszenia i rezystancję uzwojeń roboczego i sterującego,
- w układzie zastosowano idealny klucz półprzewodnikowy,
- obciążenie ma charakter rezystancyjny,
- maksymalne napięcie zasilania jest mniejsze lub równe napięciu krytycznemu.

a) <u>półokres sterowania,</u> w którym poziom indukcji B_s w rdzeniu jest ustalony przez włączenie tyrystora impulsem bramkowym. Prąd płynie wtedy w uzwojeniu roboczym i sterującym.

b) Półokres nasycenia, w którym rdzeń przemagnesowywany jest od indukcji B_s do indukcji nasycenia B_n. Od chwili nasycenia się rdzenia prąd płynie tylko w uzwojeniu roboczym.



Rys. 3. Idealna charakterystyka magnesowania rdzenia

Zasadę działania regulatora tyrystorowo-magnetycznego z komutacją naturalną można wyjaśnić następująco:

W półokresie sterowania w przedziale $0 \leqslant \omega t \leqslant \alpha_z$ indukcja w rdzeniu zmienia się od wartości B_n $(t = 0)$ według zależności

$$B = B_n + \frac{U_m'}{\omega z_r S} \int_0^{\alpha} (-\sin\omega t)(d\omega t = B_n \cos\alpha \qquad (1)$$

Od chwili wysterowania tyrystora dla $\omega t = \alpha_z$ do końca półokresu sterowania w układzie płynie prąd ograniczony rezystancją obciążenia.

W tym czasie indukcja w rdzeniu ma wartość stałą i równą:

$$B_s = B_n \cos\alpha_z \qquad (2)$$

W czasie półokresu nasycenia w przedziale $0 \leqslant \omega t \leqslant \alpha_n$ indukcja w rdzeniu opisana jest zależnością:

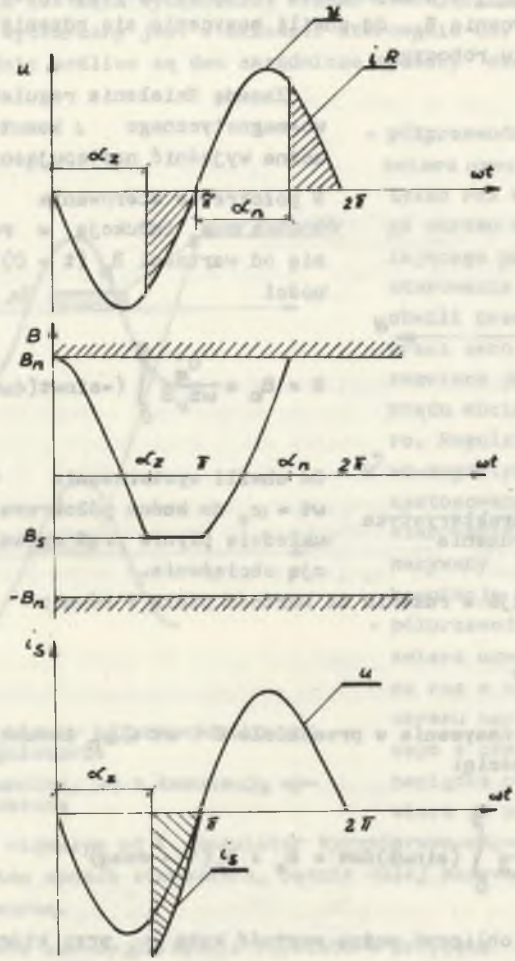
$$B = B_s + \frac{U_m}{\omega z_r S} \int_0^{\alpha} (\sin\omega t) d\omega t = B_s + B_n(1 - \cos\alpha) \qquad (3)$$

Z równań (2) i (3) obliczyć można wartość kąta α_n, przy którym rdzeń nasyca się: $\alpha_n = \alpha_z$.

Z chwilą nasycenia się rdzenia do końca tego półokresu indukcja pozostaje stała i równa B_n, a w obwodzie roboczym płynie prąd ograniczony tylko rezystancją obciążenia.

Przebiegi ilustrujące powyższe rozważania dla obciążenia rezystancyjnego przedstawiono na rys. 4.

W regulatorze tyrystorowo-magnetycznym z komutacją wymuszoną kąt wysterowania klucza półprzewodnikowego jest zawsze równy zeru, dlatego indukcja w rdzeniu w półokresie sterowania w przedziale $0 \leqslant \omega t \leqslant \alpha_w$ ma wartość stałą



Rys. 4. Przebiegi napięć, prądów i indukcji w regulatorze z komutacją naturalną przy $\alpha_z > \frac{\pi}{2}$

równą B_n. Przebieg indukcji w przedziale $\alpha_w \leqslant \omega t \leqslant \pi$ można określić z zależności:

$$B = B_n + \frac{U_m}{\omega z_r S} \int_{\omega_w}^{\alpha} (-\sin\omega t)\, d\omega t = B_n(1 - \cos\alpha_w + \cos\alpha) \qquad (4)$$

Przy końcu półokresu sterowania dla $\omega t = \pi$ indukcja ma wartość

$$B_s = - B_n \cos \alpha_w \tag{5}$$

W czasie trwania półokresu nasycenia w przedziale $0 \leqslant \omega t \leqslant \alpha_n$ indukcję w rdzeniu można opisać równaniem:

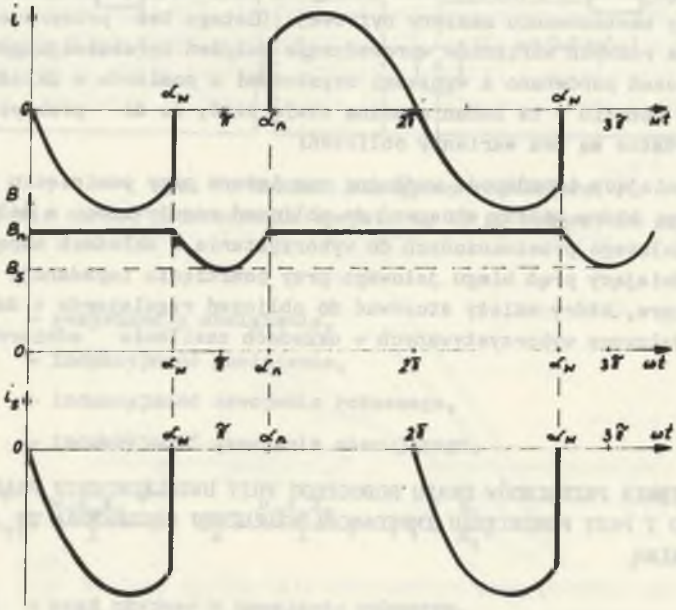
$$B = B_s + \frac{U_m}{\omega z_r S} \int_0^{\alpha} (\sin \omega t) d\omega t = B_s + B_n(1 - \cos\alpha) \tag{6}$$

gdzie α - bieżący kąt fazowy liczony od początku półokresu nasycenia.

Z równań (5) i (6) obliczono wartość kąta, przy którym rdzeń nasyca się: $\alpha_n = \pi - \alpha_w$.

Od chwili wejścia rdzenia w nasycenie do końca półokresu nasycenia indukcja pozostaje stała i równa B_n.

Przebiegi prądów i indukcji dla obciążenia rezystancyjnego przedstawiono na rys. 5.



Rys. 5. Przebiegi prądów i indukcji w regulatorze z komutacją wymuszoną przy $\alpha_w > \frac{\pi}{2}$

Przedstawiona powyżej zasada działania regulatora TM oraz otrzymane przebiegi czasowe prądu obciążenia wykazują, że przy poczynionych założeniach upraszczających pracę regulatora TM można porównać z pracą tyrystorowego regulatora napięcia przemiennego. Dlatego też do wstępnej oceny właściwości i możliwości zastosowania regulatora TM można stosować zależności i charakterystyki wyznaczone dla tyrystorowego regulatora napięcia przemiennego.

Istotną cechą rzeczywistych regulatorów TM jest istnienie prądu biegu jałowego, którego wartość zależy od konstrukcji zastosowanego transformatora. Istnienie tego prądu należy uznać za wadę przy stosowaniu tych regulatorów w układach napędowych, ale może to stanowić cenną zaletę tych regulatorów przy zastosowaniu ich np. w układach zasilania łuku elektrycznego. W rzeczywistych regulatorach TM charakterystyka magnesowania nie jest idealnie prostokątna, przenikalność magnetyczna rdzenia ma wartość skończoną, występuje zjawisko histerezy oraz należy uszględnić impedancję wzdłużną w schemacie zastępczym zastosowanego transformatora. Chcąc określić właściwości i charakterystyki regulatora TM oraz możliwości jego zastosowania,należy przeprowadzić analizę pracy regulatora TM w oparciu o model jak najbardziej zbliżony do układu rzeczywistego.

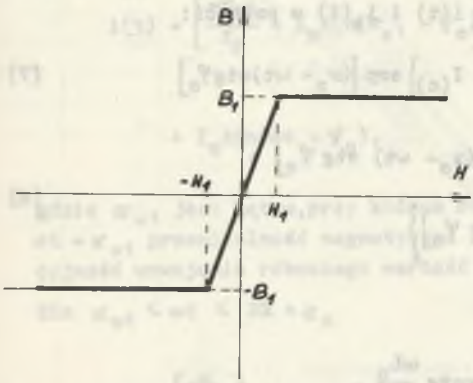
W pracy [2] przedstawiono dość dokładny model matematyczny regulatora TM z komutacją naturalną. Jednak uzyskane wtedy zależności opisujące jego pracę są bardzo złożone i korzystanie z nich w praktyce inżynierskiej jest trudne nawet przy zastosowaniu maszyny cyfrowej. Dlatego też przeprowadzono obliczenia dla różnych wariantów wprowadzania założeń upraszczających [3] i wyniki obliczeń porównano z wynikami uzyskanymi z pomiarów w układzie rzeczywistym. W oparciu o te badania można stwierdzić, że do praktycznych obliczeń przydatne są dwa warianty obliczeń:

- uwzględniający impedancję wzdłużną regulatora przy pominięciu prądu biegu jałowego, który należy stosować do obliczeń regulatorów o małym prądzie biegu jałowego przeznaczonych do wykorzystania w układach napędowych,
- uwzględniający prąd biegu jałowego przy pominięciu impedancji wzdłużnej regulatora, który należy stosować do obliczeń regulatorów o dużym prądzie biegu jałowego wykorzystywanych w układach zasilania odbiorników łukowych.

2. OBLICZENIA PRZEBIEGÓW PRĄDU ROBOCZEGO PRZY UWZGLĘDNIENIU PRĄDU BIEGU JAŁOWEGO I PRZY POMINIĘCIU IMPEDANCJI WZDŁUŻNEJ REGULATORA TM Z KOMUTACJĄ NATURALNĄ

Przyjęto założenia:

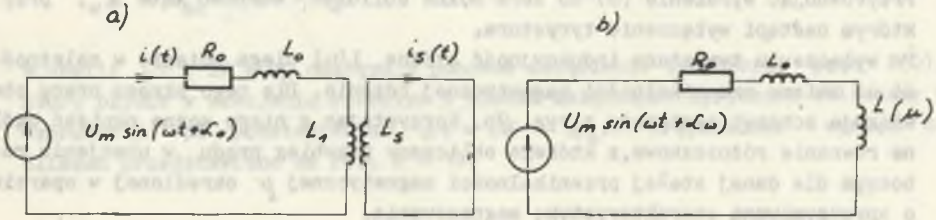
- charakterystyka magnesowania rdzenia aproksymowana jest dwuodcinkowo (rys. 6),



Rys. 6. Aproksymowana charakterystyka rdzenia

- pominięto impedancję wzdłużną regulatora w schemacie zastępczym,
- regulator zasilany jest napięciem $u(t) = U_m \sin\omega t$, przy czym $\frac{U_m}{\omega z_r S} \leq B_1$)
- załączenie tyrystora następuje w chwili $\omega t = 2k\pi + \alpha_0 = \alpha_z$, wyłączenie tyrystora w chwili $\omega t = \alpha_0 + \lambda = \alpha_w$.

Przy tych założeniach schemat zastępczy regulatora dla okresu przewodzenia tyrystora i po jego wyłączeniu przedstawia rys. 7.



Rys. 7. Schemat zastępczy regulatora
a) dla okresu przewodzenia tyrystora, b) po wyłączeniu tyrystora

gdzie:

R_o - rezystancja obciążenia,

L_o - indukcyjność obciążenia,

L_1 - indukcyjność uzwojenia roboczego,

L_s - indukcyjność uzwojenia sterującego,

$$L_{11} = \frac{\mu_1 z_r^2 S}{l}, \quad L_s = \frac{\mu_1 z_s^2 S}{l}, \quad \mu_1 = \frac{B_1}{H_1}$$

i(t) - prąd płynący w uzwojeniu roboczym,

$i_s(t)$ - prąd płynący w uzwojeniu sterującym,

M - współczynnik sprzężenia magnetycznego między uzwojeniami,

I(0) - prąd płynący przez uzwojenie robocze w chwili załączenia tyrystora.

Dla okresu przewodzenia tyrystora $\alpha_o \leqslant \omega t \leqslant \alpha_w$ można w oparciu o schemat zastępczy z rys. 7a napisać układ równań a po jego rozwiązaniu [2] otrzymamy wzory określające przebiegi prądów i(t) i $i_s(t)$ w postaci:

$$i(t) = I_m \sin(\omega t - \varphi_o) + \left[I_m \sin(\varphi_o - \alpha_o) + I_{(o)}\right] \exp\left[(\alpha_o - \omega t) \operatorname{ctg} \varphi_o\right] \tag{7}$$

$$i_s(t) = \frac{M}{L_s}\left\{I_m \sin(\omega t - \varphi_o) - I_{(o)}\left[1 - \exp(\alpha_o - \omega t) \operatorname{ctg} \varphi_o\right] + I_m \sin(\varphi_o - \alpha_o) \exp\left[(\alpha_o - \omega t) \operatorname{ctg} \varphi_o\right]\right\} \tag{8}$$

gdzie:

$$I_m = \frac{U_m}{\sqrt{R_o^2 + (\omega L_o)^2}}, \qquad \varphi_o = \operatorname{arctg} \frac{\omega L_o}{R_o}.$$

Przyrównując wyrażenie (8) do zera można obliczyć wartość kąta α_w, przy którym nastąpi wyłączenie tyrystora.
Po wyłączeniu tyrystora indukcyjność główna $L(\mu)$ ulega zmianie w zależności od zmiany przenikalności magnetycznej rdzenia. Dla tego okresu pracy obowiązuje schemat zastępczy z rys. 7b. Korzystając z niego można napisać ogólne równanie różniczkowe, z którego obliczamy przebieg prądu w uzwojeniu roboczym dla danej stałej przenikalności magnetycznej μ określonej w oparciu o aproksymowaną charakterystykę magnesowania.
Dla $\alpha_w \leqslant \omega t \leqslant \alpha_{z1}$

$$i(t) = I_{m1} \sin(\omega t - \varphi_1) + \left[I(\alpha_w) + I_{m1} \sin(\varphi_1 - \alpha_w)\right] \exp\left[(\alpha_w - \omega t) \operatorname{ctg} \varphi_1\right] \tag{9}$$

gdzie:

$$I_{m1} = \frac{U_m}{\sqrt{R_o^2 + \omega^2 (L_o + L_1)^2}}, \qquad \varphi_1 = \operatorname{arctg} \frac{\omega (L_o + L_1)}{R_o}$$

α_{z1} jest kątem fazowym, przy którym prąd i(t) osiąga wartość $\frac{-H_1 l}{z_r}$ i rdzeń nasyca się, co powoduje skokową zmianę indukcyjności uzwojenia roboczego z wartości L_1 do wartości 0. Wartość kąta α_{z1} można obliczyć z zależności (9) po podstawieniu $\omega t = \alpha_{z1}$ i $i(t) = \frac{-H_1 l}{z_r}$.

Dla $\alpha_{z1} \leqslant \omega t \leqslant \alpha_{w1}$

$$i(t) = \left[\frac{-H_1 l}{z_r} - I_m \sin(\alpha_{z1} - \varphi_o)\right] \exp\left[(\alpha_{z1} - \omega t) \operatorname{ctg} \varphi_o\right] + \tag{10}$$

$$+ I_m \sin(\omega t - \varphi_o),$$

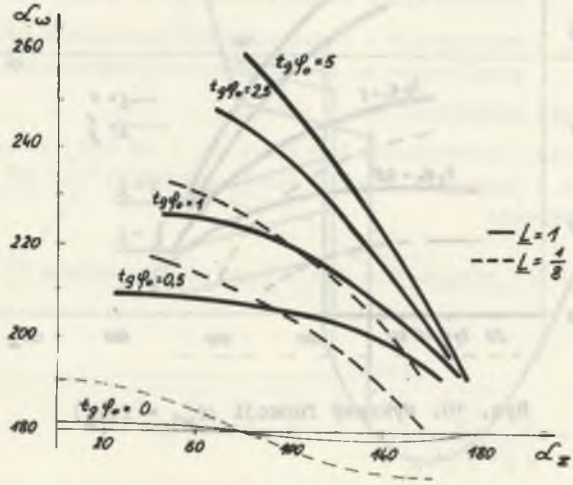
gdzie α_{w1} jest kątem, przy którym rdzeń wychodzi z nasycenia, począwszy od $\omega t = \alpha_{w1}$ przenikalność magnetyczna rdzenia ma ponownie wartość μ_1 a indukcyjność uzwojenia roboczego wartość L_1.

Dla $\alpha_{w1} \leqslant \omega t \leqslant 2\pi + \alpha_o$

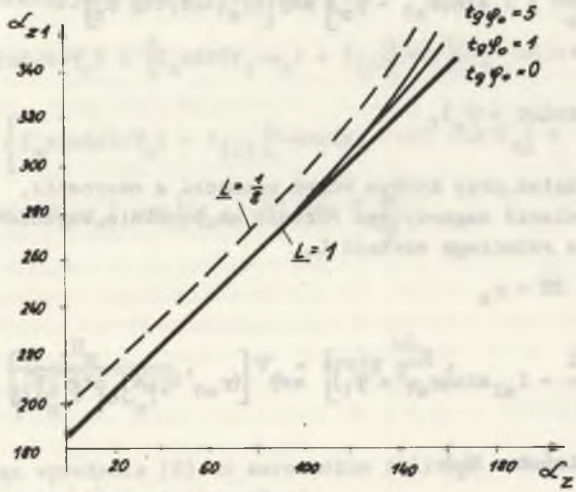
$$i(t) = \left[\frac{-H_1 l}{z_r} - I_{m1} \sin(\alpha_{w1} - \varphi_1)\right] \exp\left[(\alpha_{w1} - \omega t) \operatorname{ctg} \varphi_1\right] + \tag{11}$$

$$+ I_{m1} \sin(\omega t - \varphi_1)$$

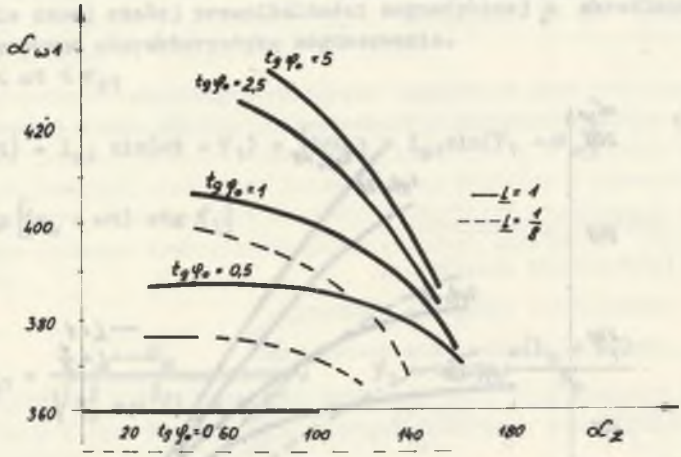
W chwili $\omega t = 2\pi + \alpha_o$ następuje ponowne załączenie tyrystora, prąd I(0), który płynie w uzwojeniu roboczym w chwili załączenia tyrystora obliczamy z wzoru (11) po podstawieniu $\omega t = 2\pi + \alpha_o$. Przykładowe wyniki obliczeń przedstawiono na rys. 8 - 12.



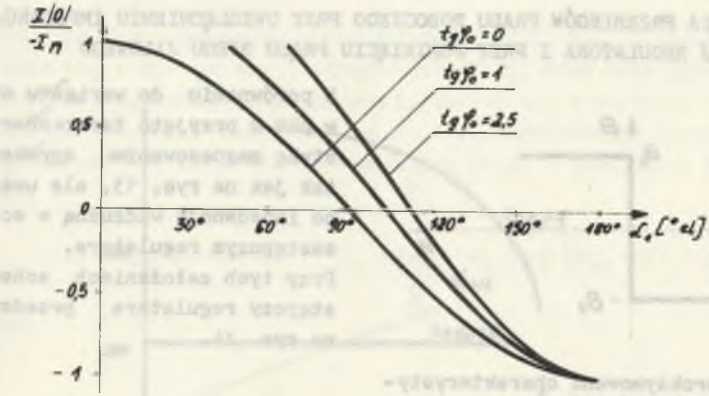
Rys. 8. Wykresy funkcji $\alpha_w = f(\alpha_z)$



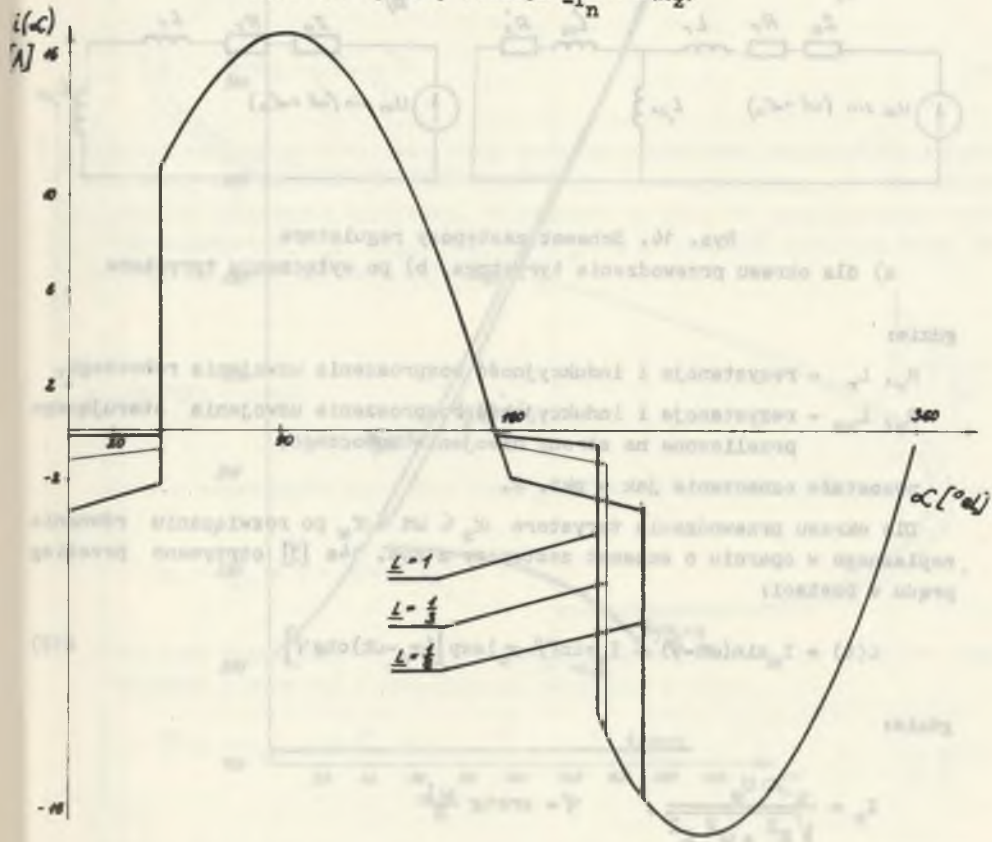
Rys. 9. Wykresy funkcji $\alpha_{z1} = f(\alpha_z)$



Rys. 10. Wykresy funkcji $\alpha_{w1} = f(\alpha_z)$

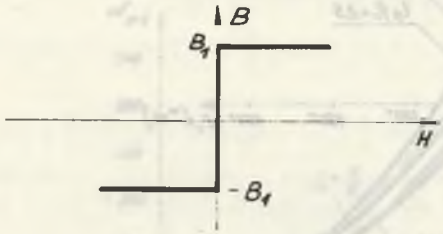


Rys. 11. Wykresy funkcji $\frac{I_o}{-I_n} = f(\alpha_z)$



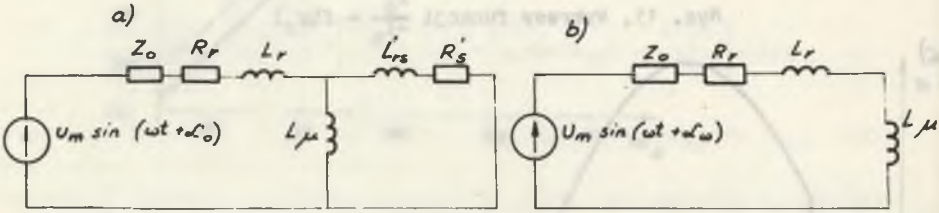
Rys. 12. Obliczony przebieg prądu obciążenia dla $\alpha_o = 40^o$, $tg\,\varphi_o = 0$ dla trzech różnych wartości indukcyjności głównej L

3. OBLICZENIA PRZEBIEGÓW PRĄDU ROBOCZEGO PRZY UWZGLĘDNIENIU IMPEDANCJI WZDŁUŻNEJ REGULATORA I PRZY POMINIĘCIU PRĄDU BIEGU JAŁOWEGO



Rys. 13. Aproksymowana charakterystyka rdzenia

W porównaniu do wariantu obliczeń w pkt 2 przyjęto teraz charakterystykę magnesowania aproksymowaną tak jak na rys. 13, ale uwzględniono impedancję wzdłużną w schemacie zastępczym regulatora.
Przy tych założeniach schemat zastępczy regulatora przedstawiono na rys. 14.



Rys. 14. Schemat zastępczy regulatora
a) dla okresu przewodzenia tyrystora, b) po wyłączeniu tyrystora

gdzie:

R_r, L_r - rezystancja i indukcyjność rozproszenia uzwojenia roboczego,

R_s, L_{rs} - rezystancja i indukcyjność rozproszenia uzwojenia sterującego przeliczone na stronę uzwojenia roboczego,

pozostałe oznaczenia jak w pkt. 2.

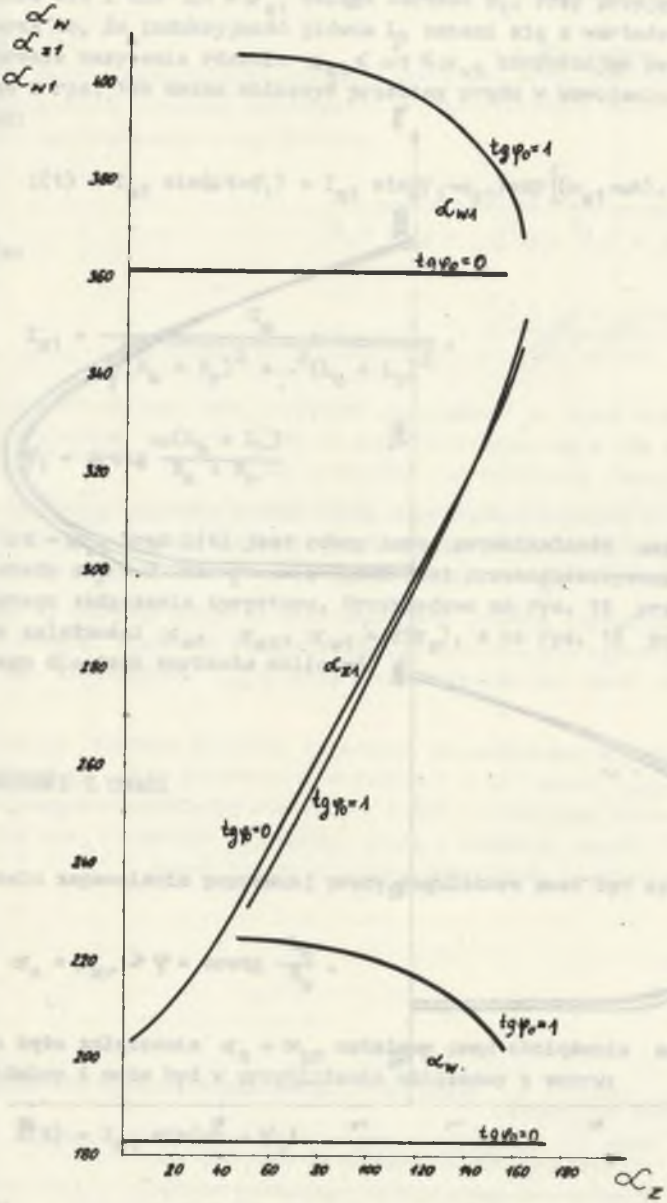
Dla okresu przewodzenia tyrystora $\alpha_z \leqslant \omega t \leqslant \alpha_w$ po rozwiązaniu równania napisanego w oparciu o schemat zastępczy z rys. 14a [3] otrzymano przebieg prądu w postaci:

$$i(t) = I_m \sin(\omega t - \varphi) + I_m \sin(\varphi - \alpha_o) \exp\left[(\alpha_o - \omega t) \operatorname{ctg} \varphi\right] \tag{12}$$

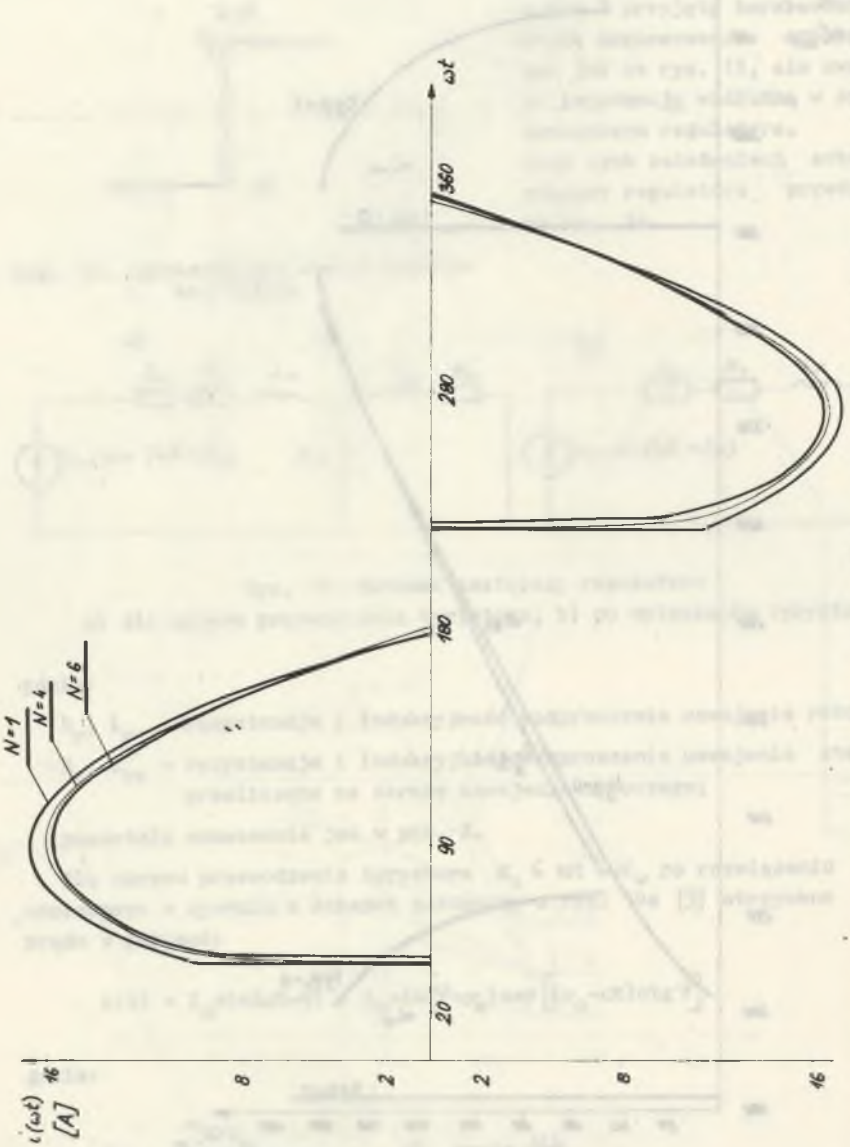
gdzie:

$$I_m = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}}, \qquad \varphi = \operatorname{arctg} \frac{\omega L}{R}$$

$$R = R_o + R_r + R'_s, \qquad L = L_o + L_r + L_{sr}.$$



Rys. 15. Wykresy funkcji α_w, α_{z1}, $\alpha_{w1} = f(\alpha_z)$



Rys. 16. Obliczony przebieg prądu obciążenia dla $\alpha_o = 40^o$, $tg\,\varphi_o = 0$ dla trzech różnych wartości indukcyjności rozproszenia $\frac{L_{rs}}{L_{-sN}} = N$

Po wyłączeniu tyrystora w przedziale $\alpha_w \leqslant \omega t \leqslant \alpha_{z1}$ indukcja w rdzeniu zmienia się i dla $\omega t = \alpha_{z1}$ osiąga wartość B_1. Przy przyjętych założeniach oznacza to, że indukcyjność główna L_μ zmieni się z wartości ∞ do zera. W okresie nasycenia rdzenia $\alpha_{z1} \leqslant \omega t \leqslant \alpha_{w1}$ korzystając ze schematu zastępczego z rys. 14b można obliczyć przebieg prądu w uzwojeniu roboczym w postaci:

$$i(t) = I_{m1} \sin(\omega t - \varphi_1) + I_{m1} \sin(\varphi_1 - \alpha_{z1}) \exp\left[(\alpha_{z1} - \omega t) . \mathrm{ctg}\, \varphi_1\right] \tag{13}$$

gdzie:

$$I_{m1} = \frac{U_m}{\sqrt{(R_o + R_r)^2 + {}^2(L_o + L_r)^2}},$$

$$\varphi_1 = \mathrm{arctg}\, \frac{\omega(L_o + L_r)}{R_o + R_r} \tag{14}$$

Dla $\omega t = \alpha_{w1}$ prąd i(t) jest równy zeru, przenikalność magnetyczna zmienia się wtedy z $\mu = 0$ na $\mu = \infty$. Rdzeń jest przemagnesowywany aż do momentu ponownego załączenia tyrystora. Przykładowo na rys. 15 przedstawiono obliczone zależności α_w, α_{z1}, $\alpha_{w1} = f(\alpha_z)$, a na rys. 16 przebieg prągu roboczego dla tego wariantu obliczeń.

4. WNIOSKI I UWAGI

- W celu zapewnienia poprawnej pracy regulatora musi być spełniony warunek:

$$\alpha_z = \alpha_{kr} > \varphi = \mathrm{arctg}\, \frac{L_o}{R_o}.$$

- dla kąta załączenia $\alpha_z = \alpha_{kr}$ ustalony prąd obciążenia ma kształt sinusoidalny i może być w przybliżeniu obliczony z wzoru:

$$i(t) = I_{m1} \sin(\omega t - \varphi_1)$$

gdzie:

I_{m1}, φ_1 są określone zależnościami (14).

- Dla kąta załączania tyrystora $\alpha_z = 180^o$ prąd obciążenia w stanie ustalonym jest prądem biegu jałowego regulatora i jest określony równaniem:

$$i(t) = I_{m2} \sin(\omega t - \varphi_2)$$

gdzie:

$$I_{m2} = \frac{U_m}{\sqrt{(R_o + R_r)^2 + \omega^2 (L_o + L_r + L_1)^2}},$$

$$\varphi_2 = \operatorname{arctg} \frac{\omega(L_o + L_r + L_1)}{R_o + R_r}.$$

- Użyteczna wartość kąta α_z wyzwalania tyrystora przy obciążeniu rezystancyjnym zawiera się w przedziale od zera do 180°. Wraz ze wzrostem indukcyjności obciążenia przedział ten zmniejsza się.
- Kąt α_{z1} wejścia rdzenia w nasycenie jest większy od kąta $\alpha_z + \vartheta$. Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że różnica ta nie przekracza 13° i zależy głównie od wielkości α_z i rodzaju obciążenia.
- Wielkość indukcyjności głównej transformatora ma wpływ głównie na wartość prądu biegu jałowego regulatora. Jej zmniejszenie powoduje wzrost prądu biegu jałowego, poza tym zmniejszenie kąta α_{w1}, zwiększenie wartości kąta α_{z1}.
- Impedancja wzdłużna regulatora ma niewielki wpływ na kształt obliczanych przebiegów prądu, dlatego też w niektórych przypadkach można ją pominąć, co znacznie upraszcza obliczenia. Praca regulatora tyrystorowo-magnetycznego o małym prądzie biegu jałowego i małej impedancji wzdłużnej jest zbliżona do pracy tyrystorowego regulatora napięcia przemiennego.

LITERATURA

[1] Kuczewski Z., Rodacki T.: Układ tyrystorowo-magnetycznego sterowania napięcia. Patent PRL 78019.

[2] Rodecki T., Duda A.: Tyrystorowo-magnetyczny regulator napięcia. Zeszyty Naukowe Politechniki Śl. Elektryka z. 75, 1981 r.

[3] Rodacki T.: Tyrystorowo-magnetyczne regulatory napięcia i ich zastosowanie. Gliwice, marzec 1983 r. (opracowanie niepublikowane).

[4] Rozenblat M.A.: Magnitnyje elementy awtomatiki i wyczislitelnoj techniki. Nauka, Moskwa 1974 r.

Rencenzent: doc. dr inż. Józef Dancewicz

Wpłynęło do redakcji dn. 15 kwietnia 1984 r.

ТИРИСТОРНО-МАГНИТНЫЕ РЕГУЛЯТОРЫ ПЕРЕМЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Р е з ю м е

В работе представлены принципы действия, метод расчета и аналитически определенные основные зависимости и характеристики тиристорно-магнитного регулятора переменного напряжения.

THE THYRISTOR-MAGNETIK REGULATORS OF ALTERNATING VOLTAGE

S u m m a r y

The paper presents theoretical discussion on thyristor-magnetic regulators of alternating voltage. The fundamental equations and characteristics have been presented.