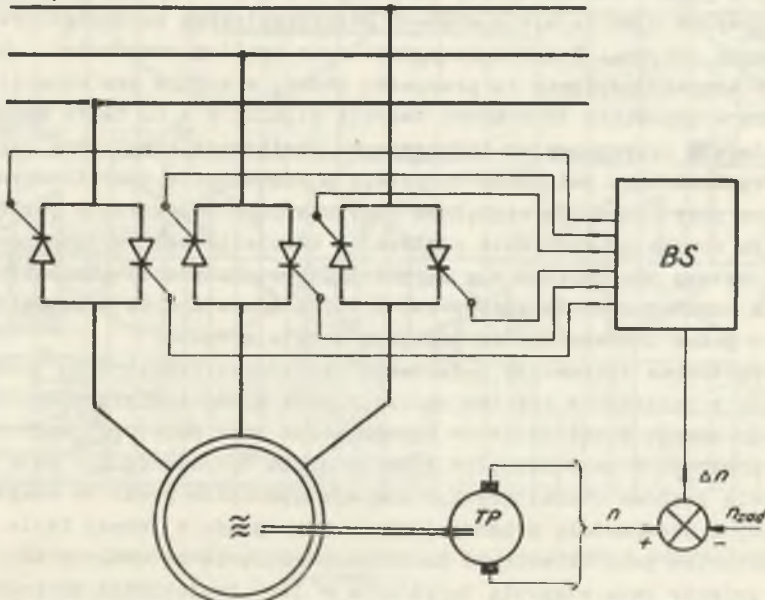


WALERY POTAPOW

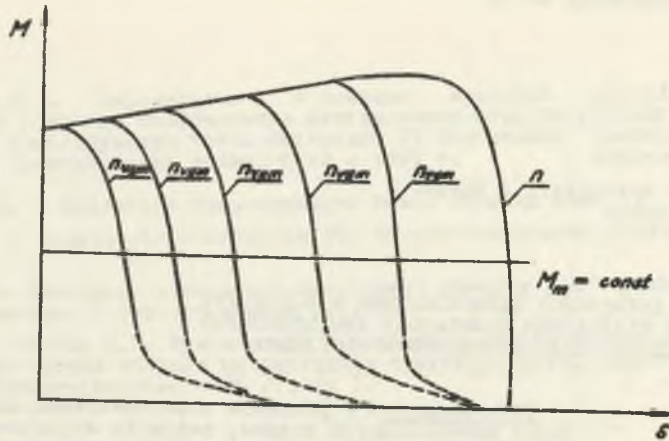
Instytut Metrologii i Maszyn
ElektrycznychANALIZA ZAWARTOŚCI HARMONICZNYCH W 3-FAZOWYM
NAPIĘCIU WYJŚCIOWYM KOMUTATORA TYRYSTOROWEGO
PRZY REZYSTANCYJNO-INDUKCYJNYM OBCIĄŻENIU

Streszczenie. W artykule przeprowadzono analizę zawartości harmonicznych krzywej napięcia wyjściowego z 3-fazowego komutatora tyrystorowego przy rezystancyjno-indukcyjnym odbiorniku. Wprowadzono równania czasowe napięcia wyjściowego z komutatora tyrystorowego. Przeprowadzono porównania krzywych obliczonych z krzywymi pomiarowymi.

W napędach wymagających nastawianej prędkości obrotowej stosowane są silniki indukcyjne klatkowe zasilane z symetrycznej trójfazowej sieci poprzez komutator tyrystorowy (rys. 1). Układ taki przy ujemnym sprzężeniu prędkościowym pozwala nastawiać prędkość obrotową silnika w szerokim zakresie. Charakterystyki mechaniczne silnika przy tym sposobie zasilania podano na rys. 2.



Rys. 1. Schemat komutatora tyrystorowego do zasilania silnika indukcyjnego

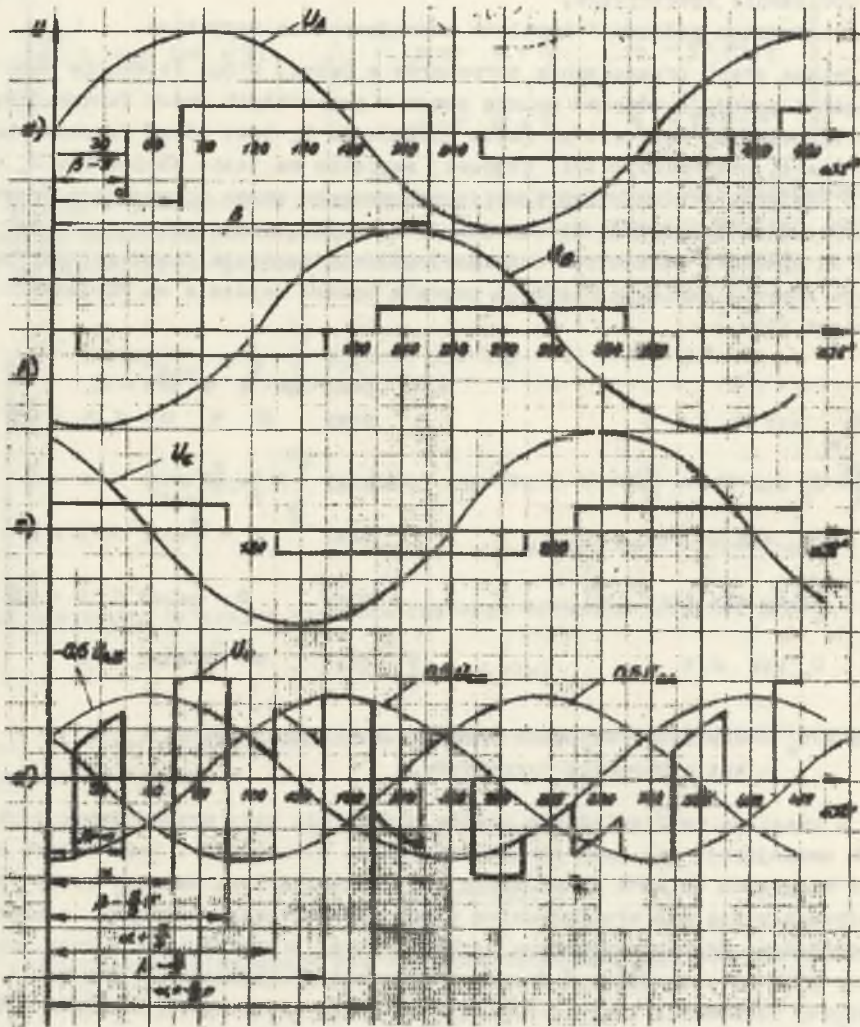


Rys. 2. Charakterystyki mechaniczne $M = f(s)$ silnika indukcyjnego klatkowego przy zasilaniu z komutatora tyrystorowego w układzie zamkniętym

W ogólnym przypadku widmo harmonicznych w krzywej napięcia zasilania silnika i w prądzie obciążenia zależy od kąta mocy φ odbiornika oraz kąta otwarcia tyrystorów α .

Jeśli obciążeniem jest silnik indukcyjny uwzględnienie tych wszystkich parametrów w sposób dokładny prowadzi do bardzo skomplikowanych równań. Szczególnie duże komplikacje do analizy wprowadza prędkość obrotowa, od której z jednej strony zależy kąt mocy φ , a z drugiej strony ω_{rot} rotacji której wpływ ujawnia się w stanach beznapięciowych poszczególnych faz w uzwojeniu stojana. W artykule ograniczono analizę zawartości harmonicznych w krzywej napięcia do przypadku pracy, w którym ω_{rot} jest równa zero - odpowiada to stanowi zwarcia silnika $n = 0$. Takie warunki pracy odpowiadają rezystancyjno-indukcyjnemu obciążeniu komutatora tyrystorowego. Przeciwnie połączone tyrystory w komutatorze tyrystorowym pracują kolejno przy dodatnich względnie przy ujemnych półokresach napięcia wyjściowego zamykając względnie otwierając włączenia bądź wyłączenia tyrystora. Zjawisko to powtarza się w każdym okresie napięcia zasilającego. W 3-fazowych komutatorach tyrystorowych impulsy sterujące są przesunięte między sobą o jedną trzecią okresu napięcia zasilającego.

Tyrystorowe sterowanie 3-fazowego obciążenia (odbiornik połączony w gwiazdę z izolowanym punktem zerowym) daje w ogólnym przypadku w czasie jednego okresu sześć odcinków wykazujących bądź symetrię, bądź niesymetrię prądową, w zależności od kąta otwarcia tyrystorów α i kąta mocy φ . Symetria prądowa charakteryzuje się występowaniem prądu we wszystkich 3 fazach, a niesymetrię prądową cechuje brak prądu w jednej fazie. Głównym zagadnieniem przy określaniu zależności napięcia na odbiorniku 3-fazowym, przy zmianie kąta otwarcia tyrystorów α jest znalezienie odcinków przy symetrii i przy niesymetrii prądowej.



Rys. 3. Wykresy formowania krzywej napięcia wyjściowego z komutatora tyrystorowego

a, b, c - napięcia fazowe sieci zasilającej U_A , U_B , U_C oraz przedziały otwarcia i zamknięcia tyrystorów, d - krzywa napięcia wyjściowego komutatora tyrystorowego

Pracą komutatora tyrystorowego przy rezystancyjno-indukcyjnym obciążeniu zilustrowano na rys. 3, na którym przedstawiono formowanie krzywej napięcia na fazie "a" obciążenia.

Przy konstrukcji wykresów założono:

1. sinusoidalne napięcie sieci zasilającej
2. sztywną sieć zasilającą,
3. obciążenie symetryczne,
3. symetryczne podawanie impulsów sterujących na tyrystory.

Zmiana stanu przewodzenia tyrystorów w jednej z faz (otwarcie bądź zamknięcie) powoduje również zmianę prądu w pozostałych dwóch fazach. Przy symetrii prądowej napięcie na fazie obciążenia U_r jest równe fazowemu napięciu sieci, przy niesymetrii prądowej napięcie na fazie obciążenia U_r wynika z napięcia przewodowego sieci przenoszonego przez przewodzące tyrystory. Początek obliczania bieżącej katowej współrzędnej wybiera się tak by był on zgodny z początkiem dodatniej półfali napięcia fazowego. Analiza wykresu krzywej napięcia fazowego pozwala opisać napięcie na obciążeniu równaniami (1)

$$U_a = \left\{ \begin{array}{ll} 0 & \text{przy } \beta - \pi \leq \omega t < \alpha \\ U_m \sin \omega t & \text{przy } \alpha \leq \omega t < \beta - \frac{2}{3}\pi \\ \frac{\sqrt{3}}{2} U_m \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{6} \right) & \text{przy } \beta - \frac{2}{3}\pi \leq \omega t < \alpha + \frac{\pi}{3} \\ U_m \sin \omega t & \text{przy } \alpha + \frac{\pi}{3} \leq \omega t < \beta - \frac{\pi}{3} \\ \frac{\sqrt{3}}{2} U_m \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{6} \right) & \text{przy } \beta - \frac{\pi}{3} \leq \omega t < \alpha + \frac{2}{3}\pi \\ U_m \sin \omega t & \text{przy } \alpha + \frac{2}{3}\pi \leq \omega t < \beta \end{array} \right. \quad (1)$$

gdzie U_m - amplituda napięcia fazowego sieci zasilającej
 β - kąt wyłączenia tyrystorów.

Z uwagi na współzależność prądów obciążenia kąty przewodzenia tyrystorów zmniejszają się przy powiększeniu kąta otwarcia α . Przy kątach otwarcia większych od kąta granicznego α_g występują inne warunki pracy charakteryzujące się nie występowaniem prądu we wszystkich 3-fazach impedencji obciążenia. Charakterystyczną cechą dla tego przypadku pracy jest przerywany prąd we wszystkich 3 fazach impedencji obciążenia.

Wykresy formowania krzywej napięcia fazowego na obciążeniu przy $\alpha > \alpha_g$ uzyskuje się analogicznie jak dla $\alpha < \alpha_g$ (rys. 3) jednak przy określeniu przedziałów przewodzenia należy uwzględnić, że każdy z tyrystorów włącza się dwukrotnie z przesunięciem fazowym o kąt 60° , ponieważ o taki kąt są przesunięte chwile włączenia tyrystorów w układzie komutatora.

W przypadku $\alpha > \alpha_g$ krzywą napięcia fazowego na obciążeniu opisują równania (2)

$$U_a = \left\{ \begin{array}{ll} 0 & \text{przy } \beta - \frac{2}{3}\pi \leq \omega t < \alpha \\ \frac{\sqrt{3}}{2} U_m \sin(\omega t + \frac{\alpha}{6}) & \text{przy } \alpha \leq \omega t < \beta \\ 0 & \text{przy } \beta \leq \omega t < \alpha + \frac{\pi}{3} \\ \frac{\sqrt{3}}{2} U_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{6}) & \text{przy } \alpha + \frac{\pi}{3} \leq \omega t < \beta + \frac{\pi}{3} \\ 0 & \text{przy } \beta + \frac{\pi}{3} \leq \omega t < \alpha + \pi \end{array} \right. \quad (2)$$

Dla celów praktycznych konieczna jest znajomość wartości podstawowej i wyższych harmoniczných napięcia na impedencji obciążenia. Rozkład napięcia na poszczególne harmoniczne określaają współczynniki Fouriera

$$a_{2g+1} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} U_2(\omega t) \cos(2g+1)\omega t \, d\omega t$$

$$b_{2g+1} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} U_2(\omega t) \sin(2g+1)\omega t \, d\omega t$$

$$g = 0; 1; 2 \dots\dots$$

Uwzględniając, że krzywe napięcia fazowego wykazują symetrię typu

$$f(t + \frac{T}{2}) = -f(t)$$

oraz, że impedancja obciążenia jest symetryczna można utworzyć 2 grupy wyższych harmoniczných:

$$6g + 1 \quad i \quad 6g + 5$$

$$g = 1; 2; 3 \dots\dots$$

Po przekształceniu uzyskuje się równania opisujące chwilową wartość napięcia na odbiorniku

$$u_z(t) = H_{1,1} \sin(\omega t + \phi_1) + \sum_{g=1}^{\infty} H_{6g+1} \sin[(6g+1)\omega t + \phi_{6g+1}] + \sum_{g=1}^{\infty} H_{6g+5} \sin[(6g+5)\omega t + \phi_{6g+5}] \quad (3)$$

gdzie

$$H_1 = \sqrt{a_1^2 + b_1^2}$$

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{a_1}{b_1}$$

$$H_{6g+1} = \sqrt{a_{6g+1}^2 + b_{6g+1}^2}$$

$$\operatorname{tg} \varphi_{6g+1} = \frac{a_{6g+1}}{b_{6g+1}}$$

$$H_{6g+5} = \sqrt{a_{6g+5}^2 + b_{6g+5}^2}$$

$$\operatorname{tg} \varphi_{6g+5} = \frac{a_{6g+5}}{b_{6g+5}}$$

Przy $\alpha < \alpha_{gr}$

$$a_1 = -\frac{3}{2\pi} U_m \frac{\cos 2\beta - \cos 2\alpha}{2}$$

$$b_1 = \frac{3}{2\pi} U_m \left[\beta - \alpha - \frac{\pi}{3} - \frac{\sin 2\beta - \sin 2\alpha}{2} \right]$$

$$a_{6g+1} = \frac{3}{2\pi} U_m \left[\frac{\cos 6g\beta - \cos 6g\alpha}{6g} - \frac{\cos(6g+2)\beta - \cos(6g+2)\alpha}{6g+2} \right]$$

$$b_{6g+1} = \frac{3}{2\pi} U_m \left[\frac{\sin 6g\beta - \sin 6g\alpha}{6g} - \frac{\sin(6g+2)\beta - \sin(6g+2)\alpha}{6g+2} \right]$$

$$a_{6g+5} = \frac{3}{2\pi} U_m \left[\frac{\cos(6g+4)\beta - \cos(6g+4)\alpha}{6g+4} - \frac{\cos(6g+6)\beta - \cos(6g+6)\alpha}{6g+6} \right]$$

$$b_{6g+5} = \frac{3}{2\pi} U_m \left[\frac{\sin(6g+4)\beta - \sin(6g+4)\alpha}{6g+4} - \frac{\sin(6g+6)\beta - \sin(6g+6)\alpha}{6g+6} \right]$$

przy $\alpha > \alpha_{gr}$

$$a_1 = -\frac{3}{2\pi} U_m \frac{\cos(2\beta + \frac{\pi}{3}) - \cos(2\alpha + \frac{\pi}{3})}{2}$$

$$b_1 = \frac{3}{2\pi} U_m \left[\beta - \alpha - \frac{\sin(2\beta + \frac{\pi}{3}) - \sin(2\alpha + \frac{\pi}{3})}{2} \right]$$

$$a_{6g+1} = \frac{3}{2\pi} U_m \left\{ \frac{\cos 6g\beta - \cos 6g\alpha}{6g} - \frac{\cos[(6g+2)\beta + \frac{\pi}{3}] - \cos[(6g+2)\alpha + \frac{\pi}{3}]}{6g+2} \right\}$$

$$b_{6g+1} = \frac{3}{2\pi} U_m \left\{ \frac{\sin 6g\beta - \sin 6g\alpha}{6g} - \frac{\sin[(6g+2)\beta + \frac{\pi}{3}] - \sin[(6g+2)\alpha + \frac{\pi}{3}]}{6g+2} \right\}$$

$$a_{6g+5} = \frac{3}{2\pi} U_m \left\{ \frac{\cos [(6g+4)\beta - \frac{\pi}{3}] - \cos [(6g+4)\alpha - \frac{\pi}{3}]}{6g+4} - \frac{\cos(6g+6)\beta - \cos(6g+6)\alpha}{6g+6} \right\}$$

$$b_{6g+5} = \frac{3}{2\pi} U_m \left\{ \frac{\sin [(6g+4)\beta - \frac{\pi}{3}] - \sin [(6g+4)\alpha - \frac{\pi}{3}]}{6g+4} - \frac{\sin(6g+6)\beta - \sin(6g+6)\alpha}{6g+6} \right\}$$

Napięcia na pozostałych dwóch fazach są przesunięte o kąt $\pm 120^\circ$.

Dla rozkładu krzywej napięcia na szereg Fouriera jest konieczna znajomość kąta wyłączenia tyrystorów, gdyż warunki pracy tyrystorów, przy zadanych kątach otwarcia α i mocy ϕ zależą od kąta wyłączenia tyrystorów

Kąt wyłączenia tyrystorów odpowiadający przejściu prądu przez zero wynika z równań prądu obciążenia. Zależność $\beta = f(\alpha, \phi)$ podawane są w literaturze [1] i [3] w postaci wykresów i tablic.

Na rys. 4 przedstawiono zależność amplitudy harmonicznych rzędu 1;5;7 w napięciu fazowym w funkcji kątów α i ϕ .

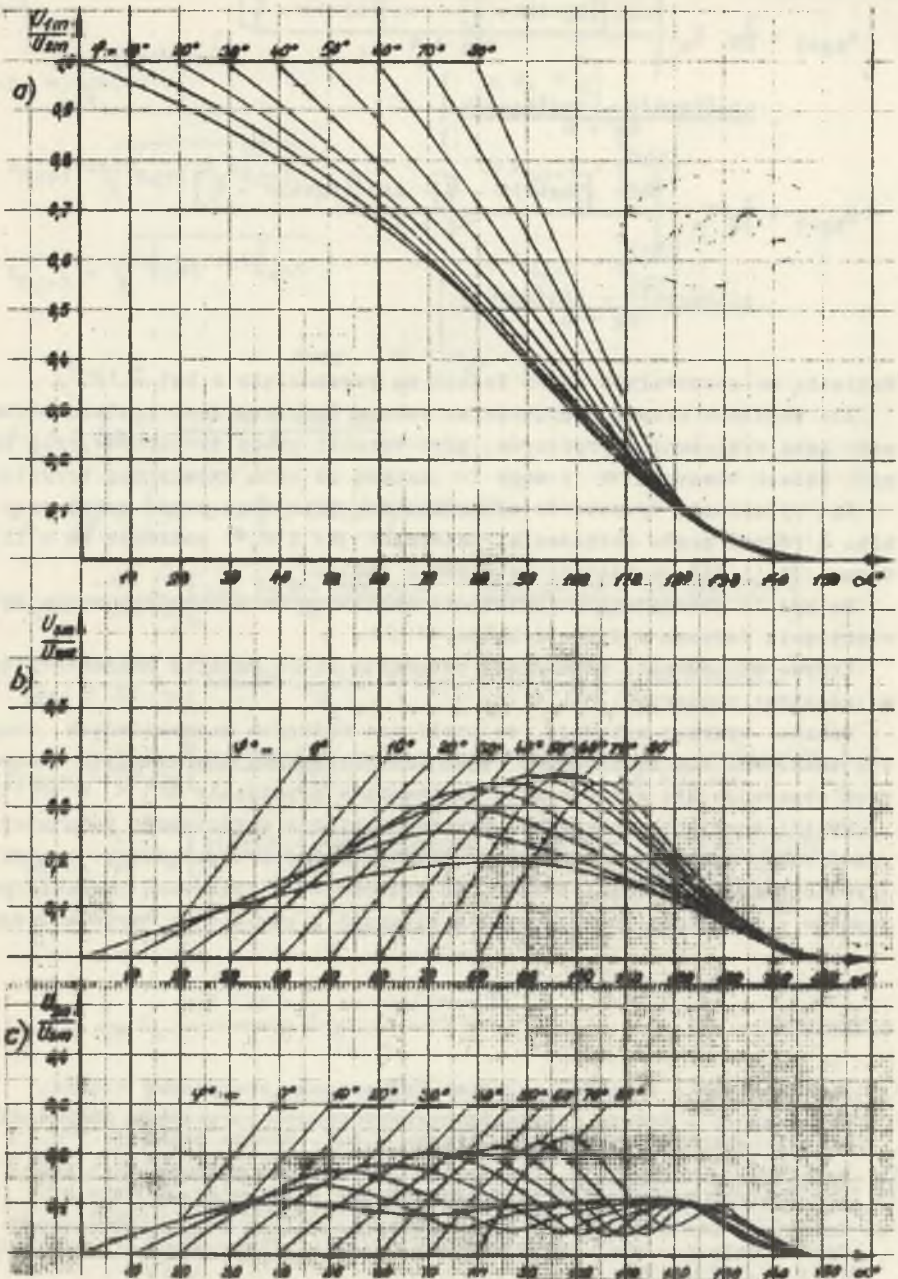
Krzywe obliczone z równań (3) pokrywają się w pełni z charakterystykami zdjętymi pomiarowo.

Podane wykresy wykazują, że amplituda wyższych harmonicznych napięcia zmniejsza się ze wzrostem rzędu harmonicznych. Dla wyższych harmonicznych obserwuje się występowanie ekstremum w przedziale $60^\circ < \alpha < 110^\circ$.

Wyniki analizy harmonicznej krzywej napięcia wyjściowego komutatora tyrystorowego nie tylko pozwalają ocenić energetyczne parametry komutatora tyrystorowego, ale również mogą być pomocne w obliczeniach charakterystyk napędów z silnikami indukcyjnymi zasilanymi z komutatora tyrystorowego.

LITERATURA

1. Булгаков А.А.: - Основы динамики управляемых вентильных систем.
2. Козлитин Л.: - Работа трехфазного тиристорного регулятора напряжения на активно-индуктивную нагрузку. Труды М.Э.И. Москва 1966.
3. Toshiaro J. Taksvchi: - Theory of SCR Circuit and application to motor control Tokyo electrical engineering college press 1968 r.
4. Michel M: Die strom - und Spannungsverhältnisse bei der Steuerung von Drehstromlasten über antiparallele Ventile. Elektrotechnische Zeitschrift 12.5 1967 10.



Rys. 4. Zależność amplitudy

a) 1-harmonicznej; b) 5-harmonicznej, c) 7-harmonicznej; od kąta otwarcia tyrystorów α i kąta mocy φ . Przedstawione wykresy otrzymano drogą pomiarową. Krzywe obliczeniowe dokładnie pokrywają się z krzywymi pomiarowymi

ГАРМОНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ КРИВОЙ ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ
3-ФАЗНОГО ТИРИСТОРНОГО КОММУТАТОРА
ПРИ АКТИВНО-ИНДУКТИВНОЙ НАГРУЗКЕ

Р е з ю м е

В статье проведен гармонический анализ кривой выходного напряжения тиристорного коммутатора при работе на активно-индуктивную нагрузку. Приведены выражения для мгновенного значения выходного напряжения ТК. Результаты теоретического анализа состава гармонических подтверждены экспериментально.

THE ANALYSIS OF HARMONIC CONTENT IN THE THREE-PHASE
OUTPUT VOLTAGE OF THE THYRISTOR COMMUTATOR UNDER RESISTIVE-
INDUCTIVE LOAD

S u m m a r y

The harmonic content in the three-phase output voltage of the thyristor commutator under resistive-inductive load is analysed in the paper. The time equations of the output voltage of the thyristor commutator are introduced. The calculated curves are compared with experimental ones.