

Zbigniew MANTORSKI

Instytut Podstawowych Problemów
Elektrotechniki i Energoelektroniki
Politechniki Śląskiej

CYFROWY MODEL 3-FAZOWEGO, MOSTKOWEGO PRZEKSZTAŁNIKA TYRYSTOROWEGO

Streszczenie. W artykule przedstawiono cyfrowy model 6-pulso-
wego przekształtnika tyrystorowego zbudowany w oparciu o program NAP2.
Podano opis modelu oraz przykładowe przebiegi prądów i napięć uzyska-
ne za jego pomocą.

1. WSTĘP

Coraz wyższe wymagania stawiane przekształtnikowym układom napędowym prądu stałego stwarzają konieczność prowadzenia w wielu przypadkach ścisłej analizy ich pracy, zarówno w stanach ustalonych jak i przejściowych. Trudności w prowadzeniu takiej analizy wynikają stąd, że przekształtnik tyrystorowy jest urządzeniem nieliniowym o działaniu dyskretnym, charakteryzującym się dodatkowo opóźnieniem przy przejściu ze stanu przewodzenia w stan zapowrowy oraz brakiem jednoznaczności między sygnałem wejściowym i wyjściowym (wpływ obciążenia) [1].

Potrzeba uwzględnienia przebiegów komutacyjnych, impedancji źródła zasilającego oraz ich ewentualnych niesymetrii, jak również niesymetrii w obwodach sterowania, powiększają te trudności.

W praktyce przeprowadzenie obliczeń analitycznych jest możliwe tylko przy zastosowaniu bardzo daleko idących uproszczeń, co nie zawsze prowadzi do w pełni zadowalających rezultatów. Uzyskanie dokładnych wyników jest możliwe tylko za pomocą modelowania analogowego lub cyfrowego.

2. CYFROWY MODEL PRZEKSZTAŁNIKA

Do zbudowania cyfrowego modelu przekształtnika tyrystorowego wraz z jego obciążeniem wykorzystano program NAP2 (Nonlinear Analysis Program). Program ten został opracowany w celu symulacji a następnie do analizy układów elektronicznych. Został on zakodowany w języku Fortran IV dla maszyny IBM 370/165 [3], ale istnieje też jego wersja adaptowana do maszyny Odra [4]. W program NAP2 wbudowane są modele diod, tranzystorów bipolarnych i unipolarnych, można wbudowywać też inne nieliniowe podzespoły, tablice, funkcje oraz posługiwać się procedurami języka Fortran. Wszystkie parametry mogą być zależne od innych parametrów lub elementów układu lub od odpowiedzi układu,

którymi są napięcia węzłowe i prądy gałęziowe. Wynika stąd, że program ten doskonale nadaje się do modelowania układów tyrystorowych.

Na rys. 1 przedstawiono schemat badanego 3-fazowego przekształtnika tyrystorowego w układzie mostkowym. Na schemacie tym wszystkie potencjały są ponumerowane a oznaczenia literowe poszczególnych elementów zgodne z wymaganiami programu NAP2.

Wszystkie napięcia fazy zostały przedstawione w postaci 3 niezależnych źródeł napięcia i zostały oznaczone przez E w wyrażeniach określających rezystancje RA, RB i RC. Przykładowo dla fazy A:

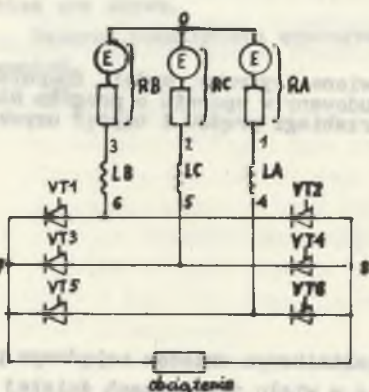
$$RA \ 1 \ 0 \ 0 \ E = 155 * ASIN(X6); \ ; \ RA = 0 \ \ E = 155 \sin \left(\frac{6\omega t + 5\pi}{6} \right),$$

gdzie pierwsze dwie liczby oznaczają numery potencjałów, pomiędzy którymi znajduje się rezystancja RA, a trzecia określa jej wartość (w tym przypadku RA = 0). Wielkość $E = 155 \sin \left(\frac{6\omega t + 5\pi}{6} \right)$ jest przedstawiona przy pomocy funkcji ASIN zależnej z kolei od funkcji X6, w której zmienną niezależną jest czas.

Funkcje te zostały przedstawione następująco:

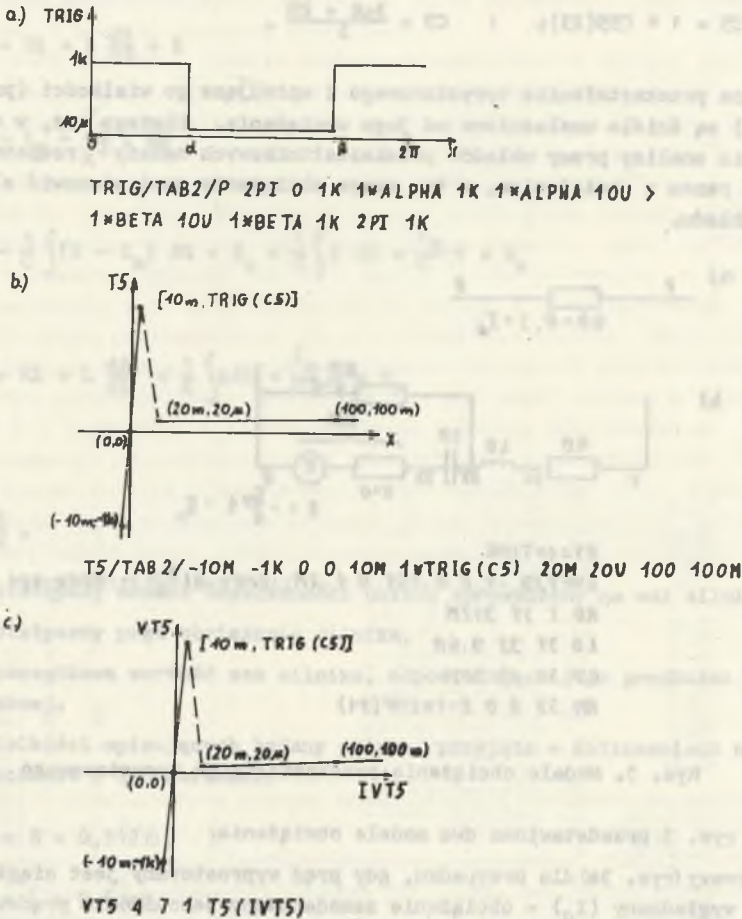
$$X6 = 600 \text{ PI} * \text{TIME} \ ; \ ; \ X6 = 6\omega t$$

$$\text{ASIN/SIN/C} = 5\text{PI D } 6 \ ; \ ; \ \text{ASIN} = \sin \left(\frac{X + 5\pi}{6} \right)$$



Rys. 1. Schemat 3-fazowego, mostkowego przekształtnika tyrystorowego

Sposób w jaki został zbudowany model pojedynczego tyrystora ilustruje rys.2 - przykładowo dla tyrystora 5.



Rys. 2. Model tyrystora

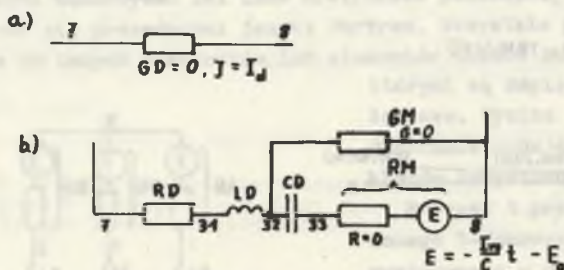
Napięcie VT5 (rys. 2c) na tyrystorze 5 mierzone pomiędzy potencjałami 4 i 7 jest określone za pomocą funkcji T5, której wartość jest uzależniona od prądu IVT5 płynącego przez ten tyrystor (rys. 2b). Chwila, w której następuje włączenie tyrystora jest określona za pomocą funkcji przełączającej TRIG, uzależnionej od czasu (rys. 2a), gdzie czas wprowadzony jest przy użyciu następujących wyrażeń:

$$X3 = 300 \text{ PI} * \text{TIME}; \quad : X3 = 3 \omega t$$

$$C55//C - 2PI D 3; \quad : \quad C55 = \frac{X + 2\pi}{3}$$

$$C5 = 1 * C55(X3); \quad : \quad C5 = \frac{2\omega t + 2\pi}{3}$$

Praca przekształtnika tyrystorowego i opisujące go wielkości (prądy, napięcia) są ściśle uzależnione od jego obciążenia. Dlatego też, w celu prowadzenia analizy pracy układów przekształtnikowych należy rozpatrywać je zawsze razem z obciążeniem, a tym samym obciążenie musi stanowić element modelu układu.



X1=1*TIME

EMF//B -1 C 0.151 D 1.2M; ::EMF=-B(\frac{X-C}{D})=-900X-121

RD 7 31 312M

LD 31 32 9.6M

CD 32 33 30M

RM 33 8 0 E=1*EMF(X1)

Rys. 3. Modele obciążenia przekształtnika tyrystorowego

Na rys. 3 przedstawiono dwa modele obciążenia:

- pierwszy (rys. 3a) dla przypadku, gdy prąd wyprostowany jest ciągle i idealnie wygładzony (I_d) - obciążenie zamodelowano jako źródło prądowe w wyrażeniu na konduktancję GD ,
- drugi (rys. 3b), gdy z przekształtnika jest zasilany silnik prądu stałego typu 1HU3 106 OAD01 (Siemens), z magnesami stałymi o danych:
 - moc $P_n = 2,9 \text{ kW}$,
 - napięcie $U_n = 179 \text{ V}$,
 - prąd $I_n = 24 \text{ A}$,
 - prędkość obrotowa $n_n = 1200 \text{ obr/min}$,
 - elektromechaniczna stała czasowa $T_m = 6,3 \text{ ms}$,
 - rezystancja obwodu głównego $R = 0,312 \Omega$,
 - indukcyjność obwodu głównego $L = 9,6 \text{ mH}$,
 - moment bezwładności silnika $J_s = 0,037 \text{ kgm}^2$.

Silnik został przedstawiony za pomocą jego analogowego modelu elektrycznego opisanego równaniami:

$$U = R i + L \frac{di}{dt} + E$$

$$i - I_m = \frac{J_t}{k^2} \cdot \frac{dE}{dt}$$

$$E = \frac{1}{C} \int (i - I_m) dt + E_0 = \frac{1}{C} \int i dt - \frac{I_m}{C} t + E_0$$

$$U = R i + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i dt - \frac{I_m}{C} t + E_0$$

gdzie:

$$C = \frac{J_t}{k^2},$$

J_t - zastępczy moment bezwładności układu sprowadzony na wał silnika,

I_m - statyczny prąd obciążenia silnika,

E_0 - początkowa wartość sem silnika, odpowiadająca jego prędkości początkowej.

Dla wielkości opisujących badany silnik przyjęto w obliczeniach następujące oznaczenia i ich wartości:

$$RD = R = 0,312 \Omega,$$

$$LD = L = 9,6 \text{ mH},$$

$$J_t = 1,5 J_B = 1,5 \cdot 0,037 = 0,0555 \text{ kgm}^2,$$

$$k = \frac{30}{\pi} k_e = \frac{30}{\pi} \cdot \frac{U_n - I_n R}{n_n} = 1,366 \text{ Vs},$$

$$CD = C = \frac{J_t}{k^2} = 30 \text{ mF}.$$

```

***** MAP2 VERSION 010619   DATE 6 3 82   TIME 17 32 43 *****
CIRCUIT
X6=CPI*TIME
ASIN/SIN/C -SPI D 6 :: SIN(WT+SPI/6) PHASE T
BSIN/SIN/C -SPI D 6 :: SIN(WT+PI/6) PHASE S
CSIN/SIN/C -SPI D 6 :: SIN(WT-PI/6) PHASE S
RA 1 0 0 F=155*ASIN(X6)
RB 1 0 0 F=155*BSIN(X6)
RC 1 0 0 F=155*CSIN(X6)
ALPHA=1.047
T=17.67
TRIA=ABZ/P 2PI 0 IK 1*ALPHA IK 1*ALPHA 1CU >
1*DE-A 10U 1*BLTA IK 2PI IK
X3=APPI*TIME
C11/P 3 -CPI 3 :: C=1*PI*(X3) :: C=WT+PI/3
C33/P 3 -CPI 3 :: C=1*PI*(X3) :: C=WT
C66/P 3 -CPI 3 :: C=1*PI*(X3) :: C=WT+PI/2
C22/P 3 -CPI 3 :: C=1*PI*(X3) :: C=WT+PI/6
V4/V2 1 -1*PI D 3 :: C=1*PI*(X3) C=WT+PI/3
V3/V2 1 -1*PI D 3 :: C=1*PI*(X3) C=WT
V1/V2 1 -1*PI D 3 :: C=1*PI*(X3) C=WT+PI/6
V6/V2 1 -1*PI D 3 :: C=1*PI*(X3) C=WT+PI/2
V5/V2 1 -1*PI D 3 :: C=1*PI*(X3) C=WT
V7/V2 1 -1*PI D 3 :: C=1*PI*(X3) C=WT+PI/3
V8/V2 1 -1*PI D 3 :: C=1*PI*(X3) C=WT
V9/V2 1 -1*PI D 3 :: C=1*PI*(X3) C=WT+PI/6
V10/V2 1 -1*PI D 3 :: C=1*PI*(X3) C=WT
V11/V2 1 -1*PI D 3 :: C=1*PI*(X3) C=WT+PI/3
V12/V2 1 -1*PI D 3 :: C=1*PI*(X3) C=WT
V13/V2 1 -1*PI D 3 :: C=1*PI*(X3) C=WT+PI/6
V14/V2 1 -1*PI D 3 :: C=1*PI*(X3) C=WT
LA 1 4 0H
LB 1 4 0H
LC -6 01
EMFZ/1 C 3 D 1.25H
GD 1 0
XI=1*TIME
T0 1 12 00H
T1 1 12 30H
LD 1 1 35 00H
CM 1 1 8 0 E=1*EMF(X1)
SMOOTHY IFA -0 VTS 0 YLA 7 IRC 0 ILC -0 IVT4 0 >
ILD 0
VT1/V5 0 200H
*IF ALD-(50 TIME 0) 200H VGD -300 600 >
*PLT(1450) # ILA >
*PLT-(50 TIME 0) 200H VVT -300 600 >
*PLT-(50 TIME 0) 200H VGM -300 300 >
*PLT-(50 TIME 0) 200H ILA -200 200 >
*SPU PPER 20MS

```

Rys. 4. Program obliczeń 3-fazowego, mostkowego przekształtnika tyrystorowego, obciążonego silnikiem prądu stałego (zerowe warunki początkowe), przy skokowym zadaniu kąta $\alpha = 60^\circ$

Instrukcja *MODIFY umożliwia wprowadzenie odpowiednich warunków początkowych (od przyjęcia, których zależne będą przebiegi dynamiczne układu).

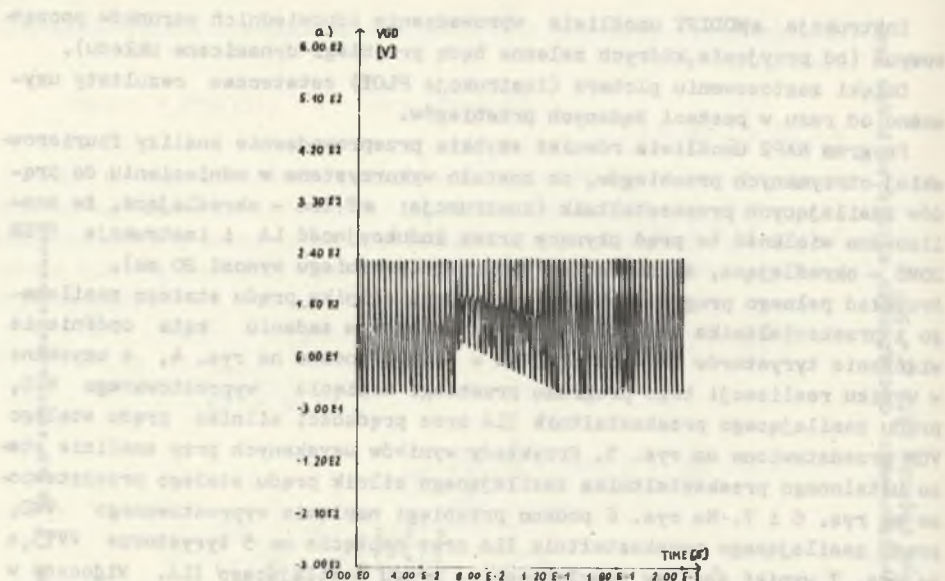
Dzięki zastosowaniu plotera (instrukcja PLOT) ostateczne rezultaty uzyskano od razu w postaci żądanych przebiegów.

Program NAP2 umożliwia również szybkie przeprowadzenie analizy fourierowskiej otrzymanych przebiegów, co zostało wykorzystane w odniesieniu do prądów zasilających przekształtnik (instrukcja: *F ILA - określająca, że analizowana wielkość to prąd płynący przez indukcyjność LA i instrukcja FPER 20MS - określająca, że okres analizowanego przebiegu wynosi 20 ms).

Przykład pełnego programu obliczeń rozruchu silnika prądu stałego zasilanego z przekształtnika tyrystorowego przy skokowym zadaniu kąta opóźnienia włączenia tyrystorów $\alpha = 60^\circ$ (ALPHA = 1,047) podano na rys. 4, a uzyskane w wyniku realizacji tego programu przebiegi napięcia wyprostowanego VGD, prądu zasilającego przekształtnik ILA oraz prędkości silnika prądu stałego VGM przedstawiono na rys. 5. Przykłady wyników uzyskanych przy analizie stanu ustalonego przekształtnika zasilającego silnik prądu stałego przedstawiono na rys. 6 i 7. Na rys. 6 podano przebiegi napięcia wyprostowanego VGD, prądu zasilającego przekształtnik ILA oraz napięcia na 5 tyrystorze VVT5, a na rys. 7 wyniki analizy fourierowskiej prądu zasilającego ILA. Widoczne w spektrum prądu tzw. niecharakterystyczne wyższe harmoniczne (np. parzyste) mają wartości bardzo małe, a ich istnienie jest wynikiem przybliżonego przyjęcia warunków początkowych określających stan ustalony.

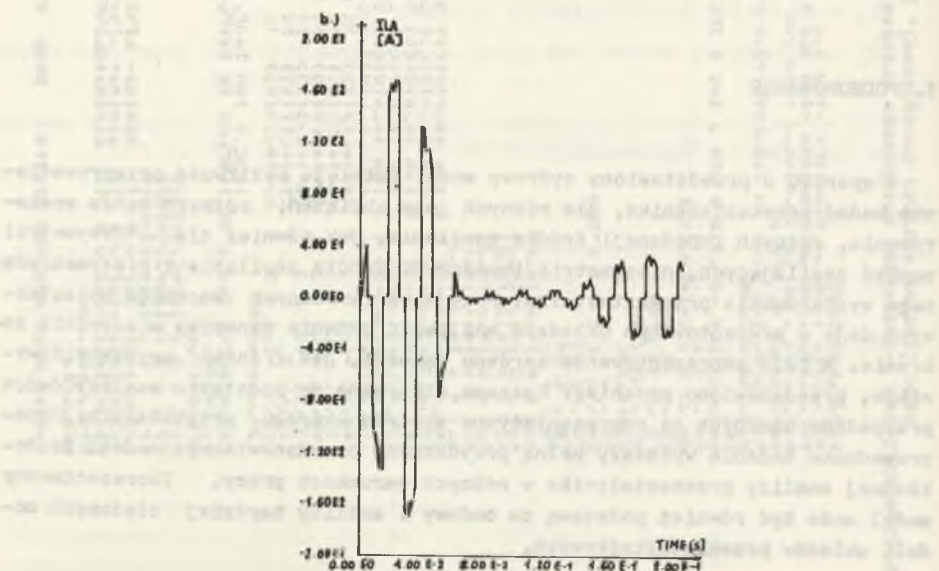
3. PODSUMOWANIE

W oparciu o przedstawiony cyfrowy model istnieje możliwość przeprowadzenia badań przekształtnika, dla różnych jego obciążeń, różnych kątów wysterowania, różnych impedancji źródła zasilania, jak również dla niesymetrii napięć zasilających, niesymetrii impedancji źródła zasilania i niesymetrycznego wysterowania przekształtnika. Przyjmowanie różnych warunków początkowych daje w prezentowanym układzie możliwość badania dynamiki w szerokim zakresie. W celu zaprezentowania zarówno jakości, jak i formy uzyskanych wyników, przedstawiono przebiegi czasowe otrzymane na podstawie analizy dwóch przypadków uznanych za reprezentatywne spośród szeregu przebadanych. Przeprowadzone badania wykazały pełną przydatność przedstawionego modelu do dokładnej analizy przekształtnika w różnych warunkach pracy. Zaprezentowany model może być również podstawą do budowy i analizy bardziej złożonych modeli układów przekształtnikowych.



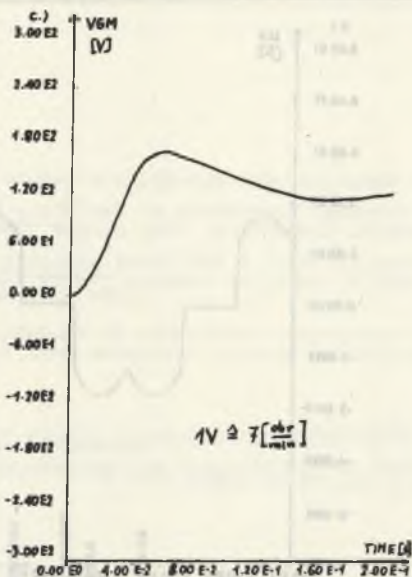
Rys. 5. Przebiegi przy rozruchu silnika prądu stałego zasilanego z przekształtnika tyrystorowego, przy skokowym zadaniu kąta $\alpha = 60^\circ$;

a - napięcia wyprostowanego VGD

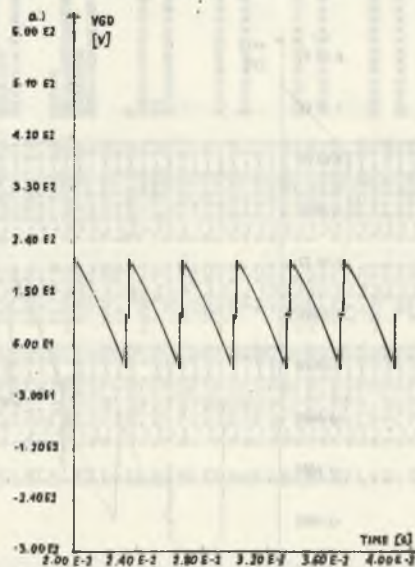


Rys. 5. Przebiegi przy rozruchu silnika prądu stałego zasilanego z przekształtnika tyrystorowego, przy skokowym zadaniu kąta $\alpha = 60^\circ$;

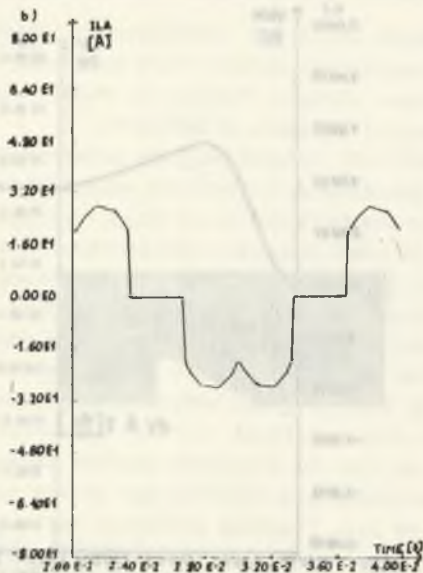
b - prądu zasilającego przekształtnik ILA



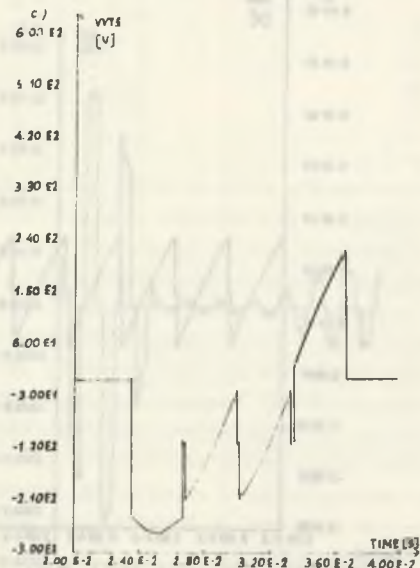
Rys. 5. Przebiegi przy rozruchu silnika prądu stałego zasilanego z prze-
kształtnika tyrystorowego, przy skokowym zadaniu kąta $\alpha = 60^\circ$
c - prędkości obrotowej silnika VGM



Rys. 6. Przebiegi przy zasilaniu silnika prądu stałego z przekształtnika ty-
rystorowego przy $\alpha = 60^\circ$ i $L_A = L_B = L_C = 0,84$ mH
a - napięcia wyprostowanego VGD



Rys. 6. Przebiegi przy zasilaniu silnika prądu stałego z przekształtnika tyrystorowego przy $\alpha = 60^\circ$ i $L_A = L_B = L_C = 0,84$ mH
b - prądu zasilającego przekształtnik ILA



Rys. 6. Przebiegi przy zasilaniu silnika prądu stałego z przekształtnika tyrystorowego przy $\alpha = 60^\circ$ i $L_A = L_B = L_C = 0,84$ mH
c - napięcia na tyrystorze 5 VVT5

LITERATURA

- [1] Czajkowski A.: Napęd tyrystorowy prądu stałego. WNT, Warszawa 1974.
- [2] Mantorski Z.: Computer Simulation of the Six - Pulse Bridge Converter, Lab. for Industrial Elektronik, DTH, Lyngby 1982.
- [3] Rübner - Petersen T.: NAP2 a Nonlinear Analysis Program for Electronic Circuits, Version 2. Inst. of Circuit Theory and Telecommunication, DTH, Lyngby 1981.
- [4] Szałkowski J.: Tymczasowy podręcznik do komputerowego obliczania urządzeń elektronicznych w oparciu o program NAP2 Z/E Warel. Warszawa 1978.

Recenzent: doc. dr inż. Michał Tall

Wpłynęło do redakcji dn. 15 kwietnia 1984 r.

ЦИФРОВАЯ МОДЕЛЬ ТРЕХФАЗНОГО ТИРИСТОРНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Р е з ю м е

В статье изложен метод моделирования на ЦВМ 3-фазного тиристорного мостового преобразователя с использованием программы НАП 2 для анализа нелинейных систем а также представлены примеры результатов испытаний модели преобразователя.

DIGITAL MODEL OF THE SIX-PULSE THYRISTOR BRIDGE CONVERTER

S u m m a r y

Computer simulation of the six-pulse bridge converter using Nonlinear Analysis Program NAP2 has been done. The model of the converter and examples transients of voltages and currents obtained using this model are presented.