ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1992

Seria: ELEKTRYKA z.126 Nr kol. 1168

Bogusław GRZESIK

Zbigniew KACZMARCZYK

Instytut Elektrotechniki
Teoretycznej i Przemysłowej
Politechniki Śląskiej

PROGRAM KOMPUTEROWEJ ANALIZY PRZEKSZTAŁTNIKÓW DIODOWYCH Z UOGÓLNIONYM BADANIEM STRUKTURY KOMUTACJI

Streszczenie. Opisuje się nowy typ programu komputerowego przeznaczonego do analizy przekształtników energoelektronicznych z diodami doskonałymi. Model nierównościowy diody i przekształtnika stanowi podstawę konstrukcji programu. Program umożliwia najogólniejsze z możliwych badanie struktury komutacji; strukturę komutacji stanowią zbiory schematów zastępczych: istotnych i osiągalnych oraz warunki komutacji określone dla każdego schematu istotnego. Struktura komutacji wykorzystana jest do określania przebiegów czasowych napięć i prądów przekształtnika. Program umożliwia analizę przekształtników typu RLCDT^{p}ej. Program ma cechy programu symbolicznego.

PROGRAM FOR GENERALIZED ANALYSIS OF COMMUTATION STRUCTURE OF DIODE POWER ELECTRONIC CONVERTERS

Summary. A novel program for analysis of diode power electronic converters is described in the paper. The inequality model of the perfect diode and such a model of the converter are a basis for the program. The developed program determines commutation structure: the set of decisive equivalent circuits, the set of attainable equivalent circuits and the conditions of all commutations. This is the most general analysis. The structure of commutation is used in calculation of the voltages and the currents of the converter. The program enables analysis of the converters of RLCDT^{p}ej-type. The program is of symbolic type.

ПРОГРАММА КОМПЬЮТЕРНОГО АНАЛИЗА СИЛОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НА СОВЕРШЕННЫХ ДИОДАХ С ИССЛЕДОВАНИЕМ СТРУКТУРЫ КОММУТАЦИИ

Резюме. Представлена новая программа компьютерного анализа силовых преобразователей на совершенных диодах. Программа была построена на базе неравенственной модели диода и такой же модели преобразователя. Программа дает возможность провести самый общий анализ структуры коммутации преобразователя. Результатом этого анализа является набор существенных и достижимых эквивалентных схем преобразователя; кроме этого результатом анализа являются условия коммутации. Структура коммутации используется для определения временных диаграмм напряжений и токов преобразователя. Программа предназначена для анализа RLCD^{p}ej - преобразователей. Программа имеет некоторые свойства символических программ.

1. WSTĘP

Przeważająca większość programów komputerowych czy to uniwersalnych (np. SPICE, PCNAP), czy też ukierunkowanych na energoelektronikę (np. TCAD, CPES) umożliwia analizę przekształtników energoelektronicznych na podstawie ciągu analiz numerycznych wykonanych dla pewnego określonego obszaru parametrów przekształtnika. W analizie takiej na ogół nie jest możliwe uwzględnienie wszystkich możliwych przypadków, nawet gdy modelami diod są diody doskonałe.

Opracowany program komputerowy nowego typu umożliwia systematyczne badanie wszystkich możliwych przypadków procesu, jaki zachodzi w przekształtniku energoelektronicznym z diodami doskonałymi. Jest to możliwe dzięki modelowi nierównościowemu przekształtnika.

W modelu tym badaniu podlegają układy nierówności opisujące odpowiednie schematy zastępcze. Wynikiem badania każdego układu nierówności jest stwierdzenie, czy odpowiedni schemat zastępczy jest schematem istotnym, czy też nieistotnym. W dalszym ciągu badnia procesu komutacyjnego ustala się, które ze schematów istotnych są schematami osiągalnymi.

Moduł programu STOŻEK został skonstruowany na podstawie modelu nierównościowego przekształtnika. Model nierównościowy i moduł STOŻEK odróżniają opisywany program od innych znanych programów analizy przekształtników energoelektronicznych.

Zastosowanie modelu nierównościowego sprowadza zadanie analizy przekształtnika do ciągu analiz liniowych.

W budowie modelu nierównościowego i do jego analizy wykorzystuje się teorię nierówności liniowych jednorodnych.

Praca zawiera podstawy teoretyczne modelu nierównościowego przekształtnika, jego interpretację geometryczną oraz opis programu komputerowego; w pracy zamieszczono przykłady ilustrujące funkcjonowanie programu.

Główną część niniejszego opracowania stanowią wyniki pracy [3]; opracowanie zawiera ponadto rezultaty dwóch wcześniejszych prac [1], [2] poświęconych modelowi nierównościowemu przekształtnika energoelektronicznego z diodami doskonałymi.

2. MODEL PRZEKSZTAŁTNIKA ENERGOELEKTRONICZNEGO, STRUKTURA KOMUTACJI

Przekształtnik energoelektroniczny przedstawia się jako obwód elektryczny złożony z diod doskonałych, liniowych elementów R, L, C oraz źródeł e, j.

Model diody - *dioda doskonała* jest dwójnikiem rezystancyjnym, przedziałami liniowym o rezystancji zaworowej skończonej $R_R \gg 0$ w *stanie zaworowym* ($-u_D \geq 0$) i rezystancji przewodzenia $R_F \ll R_R$ w *stanie przewodzenia* ($i_D \geq 0$); dla $u_D = i_D = 0$ dioda znajduje się w *stanie neutralnym*.

Model diody - *dioda doskonała* - nazywa się również *modelem nierównościowym diody*, ponieważ opisywany jest nierównościami:

$$\begin{cases} -u_D \geq 0 & \text{w stanie zaworowym} \quad R_D = R_R \\ i_D \geq 0 & \text{w stanie przewodzenia} \quad R_D = R_F \\ u_D = i_D = 0 & \text{w stanie neutralnym} \quad R_D - \text{nieokreślona} \end{cases} \tag{1}$$

Model przekształtnika ze względu na przyjęcie modelu nierównościowego diody nazywa się *modelem nierównościowym przekształtnika*. Oprócz równań różniczkowych i algebraicznych model ten zawiera pewien zbiór układów nierówności - każdy układ nierówności opisuje określony schemat zastępczy.

Zbiór *schematów zastępczych możliwych* stanowią wszystkie schematy, jakie można uzyskać przyjmując wszystkie możliwe kombinacje stanu nD diod.

Liczba schematów zastępczych możliwych wynosi:

$$NDD = 2^{nD} \tag{2}$$

Na przykład w prostowniku mostkowym m=2 liczba ta wynosi NDD=16.

Analiza przekształtników i ich badania laboratoryjne wykazują, że w czasie pracy przekształtnika realizują się niektóre spośród schematów możliwych.

Wśród zbioru 2^{nD} schematów możliwych istnieje podzbiór *schematów zastępczych istotnych*. Schemat zastępczy istotny jest to taki schemat możliwy, który realizuje się podczas pracy przekształtnika, gdy odpowiednio dobrane jest wymuszenie i parametry dynamiczne L,C.

Na przykład dla prostownika mostkowego m=2 liczba schematów istotnych wynosi NDDI=4 i są to schematy: 0000, 1001, 1111, 0110.

Zbiór schematów zastępczych istotnych przekształtnika jest określony, gdy zadane są: graf, typy gałęzi (R,L,C,e,j) oraz rezystancje gałęzi rezystancyjnych i rezystancje diod; nie definiują go parametry wymuszeń i parametry dynamiczne L,C.

Dopełnieniem do zbioru schematów zastępczych istotnych jest zbiór *schematów zastępczych nieistotnych*. Schemat zastępczy nieistotny jest schematem, w którym niektóre diody znajdują się w stanie neutralnym.

Na przykład w prostowniku mostkowym m=2 są to schematy 0111, 1000,... .

Wśród schematów zastępczych istotnych istnieją schematy zastępcze osiągalne.

Schematem osiągalnym jest taki schmat istotny, który powstaje podczas pracy przekształtnika, gdy skonkretyzowane jest wymuszenie i parametry dynamiczne L, C.

Na przykład w przypadku prostownika mostkowego m=2, gdy e=sinωt, i=const, liczba schematów osiągalnych wynosi NDDO=3 i są to schematy: 1001, 1111, 0110. Zmieniając wymuszenie i parametry L, C zmienia się zbiór schematów zastępczych osiągalnych.

Zbiory schematów możliwych, istotnych, nieistotnych, osiągalnych oraz warunki komutacji schematów stanowią *strukturę komutacji przekształtnika*.

Przedstawione powyżej pojęcia: schemat zastępczy możliwy, istotny, nieistotny oraz osiągalny mają odpowiednią *interpretację geometryczną* - przedstawiono ją poniżej w opisie modułu komputerowego STOŻEK. Opracowany program określa strukturę komutacji przekształtnika (moduł STOŻEK) oraz umożliwia obliczenie przebiegów czasowych odpowiednich napięć i prądów.

Pierwszym etapem określenia struktury komutacji jest zastąpienie wszystkich pojemności źródłami napięcia, a indukcyjności źródłami prądu.

Drugim etapem jest skonstruowanie dla każdego z możliwych schematów zastępczych układu nierówności liniowych jednorodnych. Współczynniki tych nierówności określa się metodą liczb strukturalnych Bellerta [5].

Trzecim etapem jest poszukiwanie rozwiązania podstawowego układu nierówności każdego schematu zastępczego możliwego. Określenie rozwiązania podstawowego danego układu nierówności jest narzędziem pozwalającym na stwierdzenie, czy dany schemat zastępczy jest istotny. Jeżeli dany schemat zastępczy jest istotny, to wynikiem osiągnięcia rozwiązania podstawowego jest wydzielenie z układu nD nierówności (dla danego schematu zastępczego) zbioru nierówności istotnych.

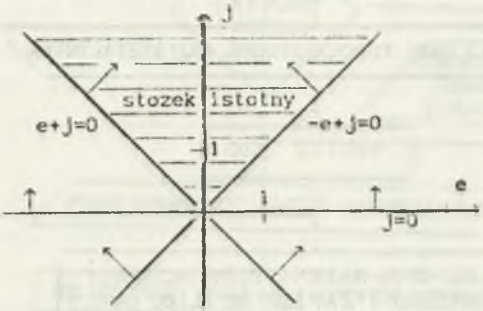
Pojęcie schematu zastępczego istotnego oraz nieistotnego zostało zinterpretowane geometrycznie w przykładzie 1.

Przykład 1

a) Dany jest schemat zastępczy opisany przez układ nierówności :

$$\begin{cases} e + j > 0 \\ -e + j > 0 \\ j > 0 \end{cases} \qquad \text{(p1.1)}$$

Rozwiązanie układu (p1.1) - stożek istotny - przedstawione zostało na rys.1. i odpowiada schematowi zastępczemu istotnemu.



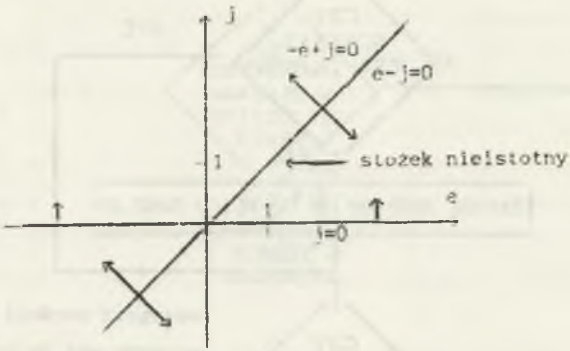
Rys.1. Stożek istotny - ilustracja geometryczna do przykładu 1

Fig.1. Decisive cone - geometrical illustration to example 1

b) Dany jest schemat zastępczy opisany przez układ nierówności:

$$\begin{cases} e - j > 0 \\ -e + j > 0 \\ j > 0 \end{cases} \qquad \text{(p1.2)}$$

Rozwiązanie układu (p1.2) - stożek nieistotny - przedstawione zostało na rys.2 i odpowiada ono schematowi zastępczemu nieistotnemu.

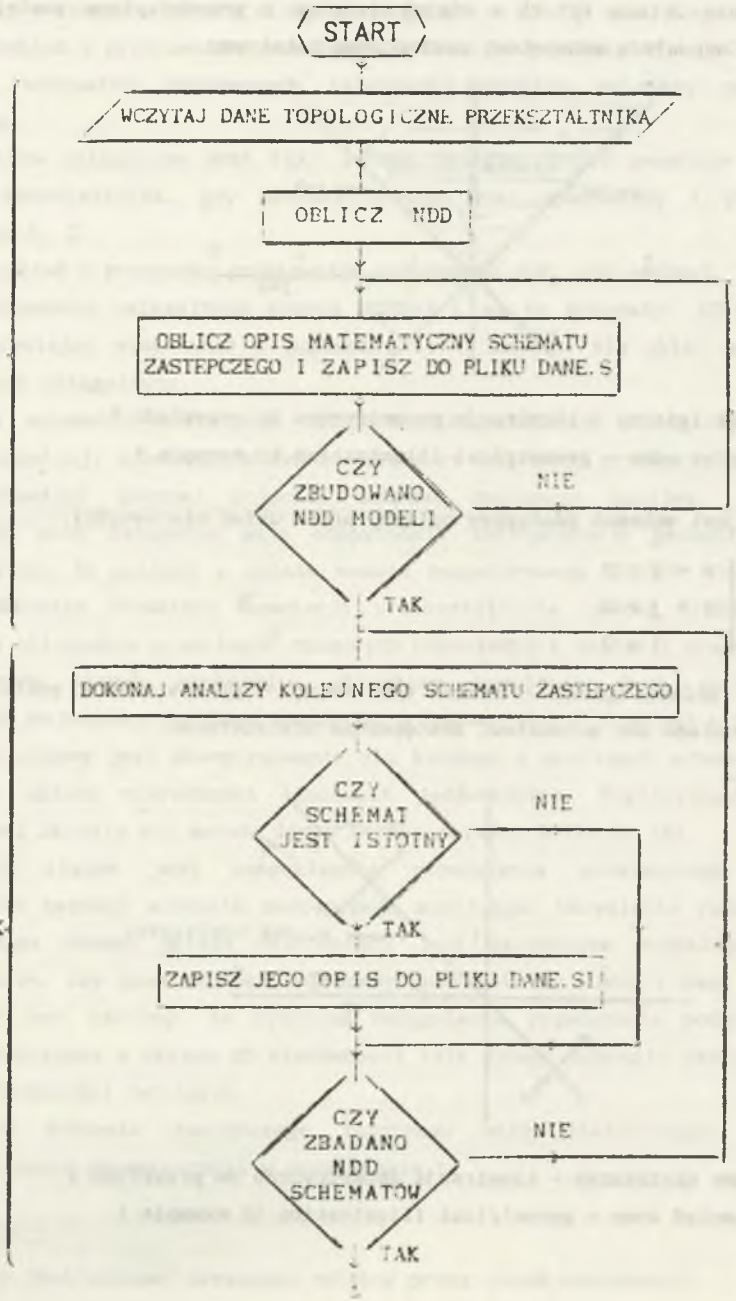


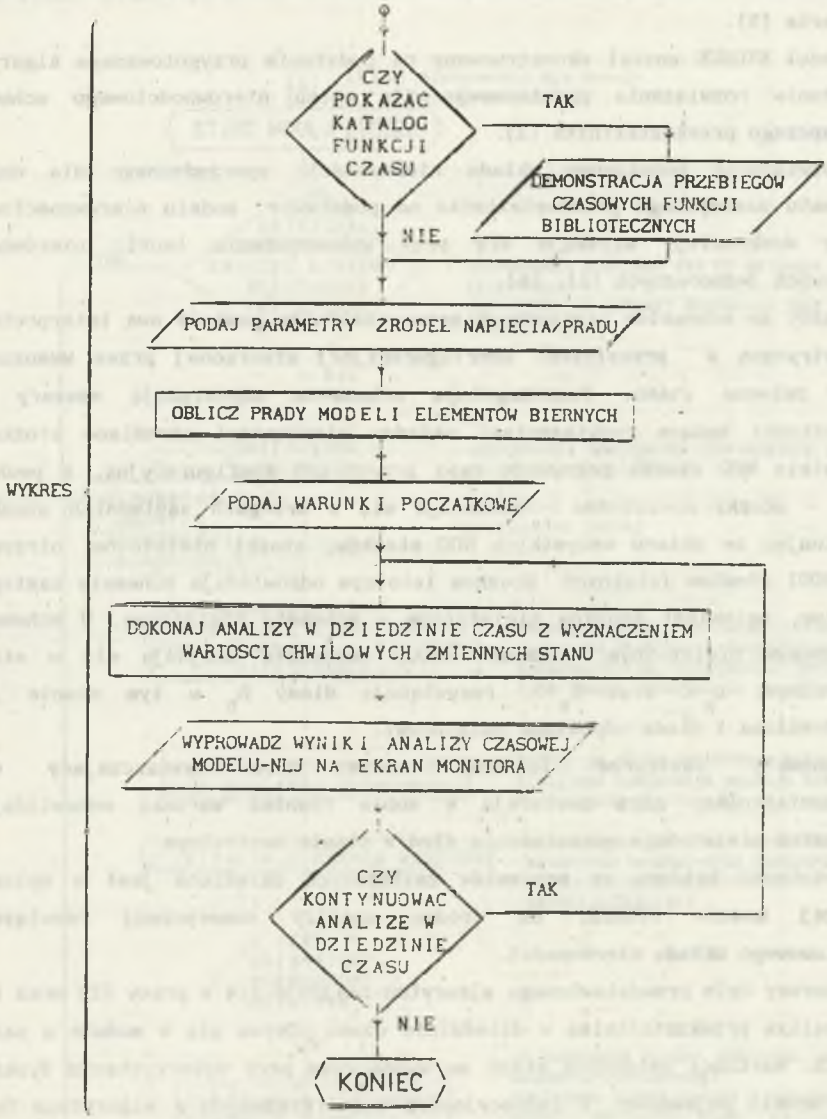
Rys.2. Stożek nieistotny - ilustracja geometryczna do przykładu 1

Fig.2. Neglected cone - geometrical illustration to example 1

3. KONSTRUKCJA PROGRAMU KOMPUTEROWEGO

Uproszczony schemat blokowy programu ma postać pokazano na rys.3.





Rys. 3. Schemat blokowy programu

Fig. 3. Folwchart of the program

Program został napisany w języku TURBO PASCAL 5.0. Składa się on z kilku modułów połączonych w jeden blok za pomocą programu głównego, którego zadaniem jest przekazywanie wykonywania programu do odpowiedniego modułu.

W module GRAF są wyznaczane współczynniki nierówności na podstawie metody Bellerta [5].

Moduł STOŻEK został skonstruowany na podstawie przygotowanego algorytmu uzyskania rozwiązania podstawowego dla opisu nierównościowego schematu zastępczego przekształtnika [2].

Rozwiązanie podstawowe układu nierówności, sporządzonego dla danego schematu zastępczego przekształtnika na podstawie modelu nierównościowego diody doskonałej, uzyskuje się przy wykorzystaniu teorii nierówności liniowych jednorodnych [2], [6].

Każdy ze schematów zastępczych przekształtnika posiada swą interpretację geometryczną w *przestrzeni konfiuguracyjnej* utworzonej przez wymuszenia oraz zmienne stanu. Poszczególnym schematom odpowiadają obszary tej przestrzeni będące rozwiązaniami układów nierówności określane *stożkami*. Wszystkie NDD stożki pokrywają całą przestrzeń konfiguracyjną, a pewne z nich - *stożki nieistotne* - zawierają się w brzegach sąsiednich stożków. Eliminując ze zbioru wszystkich NDD stożków, stożki nieistotne, otrzymuje się NDDI *stożków istotnych*. Stożkom istotnym odpowiadają schematy zastępcze istotne, natomiast stożkom nieistotnym - schematy nieistotne. W schemacie zastępczym nieistotnym, niektóre diody doskonałe znajdują się w stanie neutralnym, $u_D=0$ oraz $i_D=0$; rezystancja diody R_D w tym stanie jest nieokreślona i dioda odpowiada nulatorowi.

Schematy zastępcze istotne tworzą więc wystarczający opis przekształtnika, gdyż zawierają w sobie również warunki odpowiadające schematom nieistotnym pozostawania diod w stanie neutralnym.

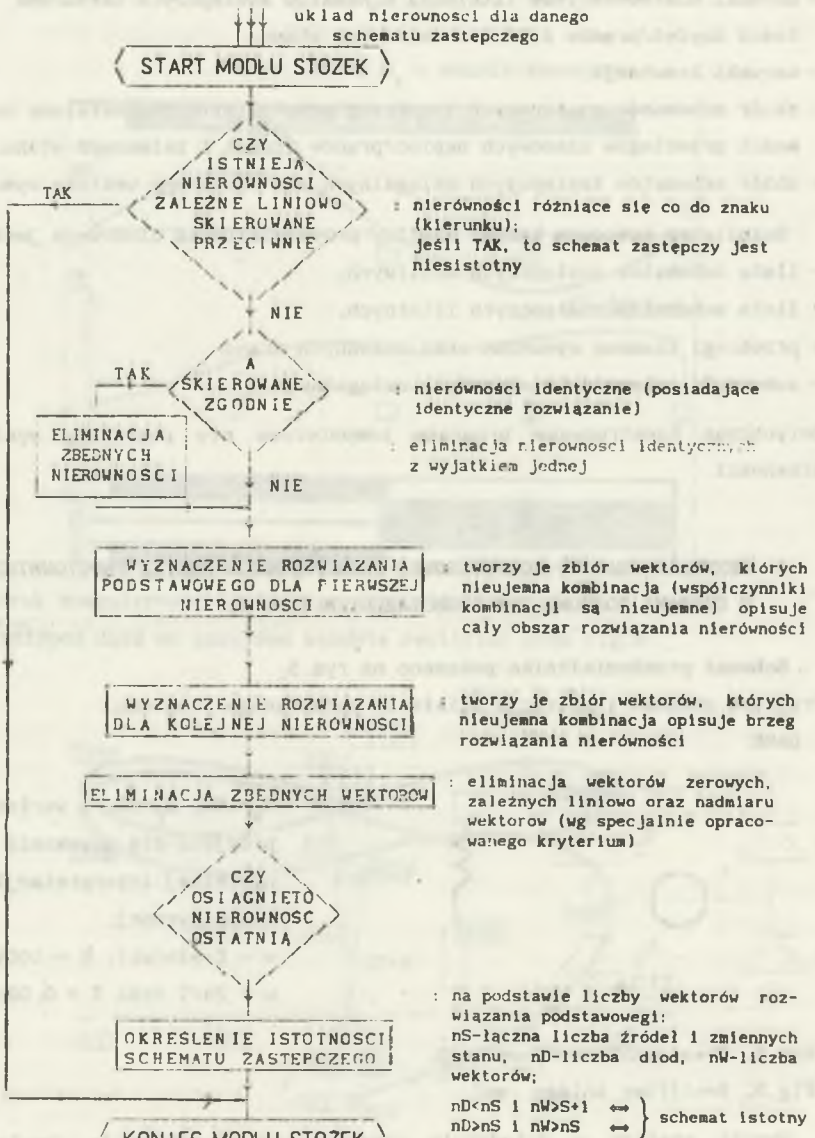
Istotność każdego ze schematów zastępczych określona jest w opisanym poniżej module STOŻEK, na drodze analizy numerycznej rozwiązania podstawowego układu nierówności.

Szerszy opis przedstawionego algorytmu znajduje się w pracy [2] oraz [7].

Analiza przekształtnika w dziedzinie czasu odbywa się w module o nazwie WYKRES. Wartości zmiennych stanu są wyznaczane przy wykorzystaniu dyskretnych modeli pojemności i indukcyjności stowarzyszonych z algorytmem Geara rzędu II.

Prezentowany program daje możliwość wszechstronnej analizy przekształtników z diodami doskonałymi. Raz wyznaczona struktura komutacji przekształtnika umożliwia wykonanie wielokrotnej analizy w dziedzinie czasu, przy dowolnie zadawanych wymuszeniach oraz parametrach dynamicznych.

Moduł STOŻEK można opisać schematem blokowym pokazanym na rys. 4.



Rys. 4. Schemat blokowy modułu STOŻEK

Fig. 4. Folwchart of the module STOŻEK

Program zawiera wszystkie informacje ujmujące strukturę komutacji w postaci graficznej i numerycznej; są to:

- warunki nierównościowe istnienia schematów zastępczych narzucone na wartości napięć/prądów źródeł i zmiennych stanu,
- warunki komutacji,
- zbiór schematów zastępczych istotnych przekształtnika, ustalony bez znajomości przebiegów czasowych napięć/prądów źródeł i zmiennych stanu,
- zbiór schematów zastępczych osiągalnych dla złożonego wektora wymuszenia.

Rezultatem końcowym każdej analizy przekształtnika diodowego jest:

- lista schematów zastępczych możliwych,
- lista schematów zastępczych istotnych,
- przebiegi czasowe wymuszeń oraz zmiennych stanu,
- sekwencja schematów zastępczych osiągalnych.

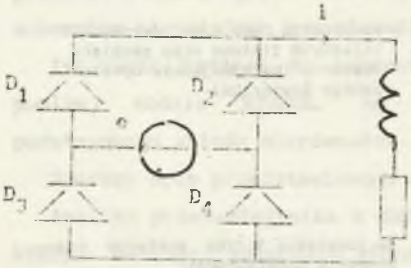
Dotychczas konstruowane programy komputerowe nie posiadały wymienionych własności.

4. PRZYKŁAD ANALIZY KOMPUTEROWEJ JEDNOFAZOWEGO MOSTKA PROSTOWNICZEGO Z DIODAMI DOSKONAŁYMI I OBCIĄŻENIEM TYPU RL

Schemat przekształtnika pokazano na rys.5.

Przykład stanowi ilustrację działania opisywanego programu.

DANE



I(0)=-3A

L=40mH

R=5Ω

R_R=10Ω, R_F=1Ω, - wartości przyjęte dla uzyskania czytelnej interpretacji geometrycznej.

$e = E\cdot\sin(\omega t)$, E = 100V

$\omega = 2\pi/T$ oraz T = 0.02s.

Rys.5. Prostownik mostkowy, m=2

Fig.5. Rectifier bridge, m=2

Wyniki analizy w dziedzinie czasu, wraz z sekwencją obowiązujących schematów zastępczych, zostały przedstawione na rys.6.

Inne ujęcie wyników analizy przekształtnika z rys.5. pokazano na rys.7. Tak przedstawiona trajektoria punktu pracy umożliwia interpretację geometryczną funkcjonowania przekształtnika.

Obszary wyróżnione odpowiadają rozwiązaniom podstawowym układów nierówności dla schematów zastępczych istotnych. Schematy zastępcze są identyfikowane przez stany diod, zapisane w następującej konwencji:

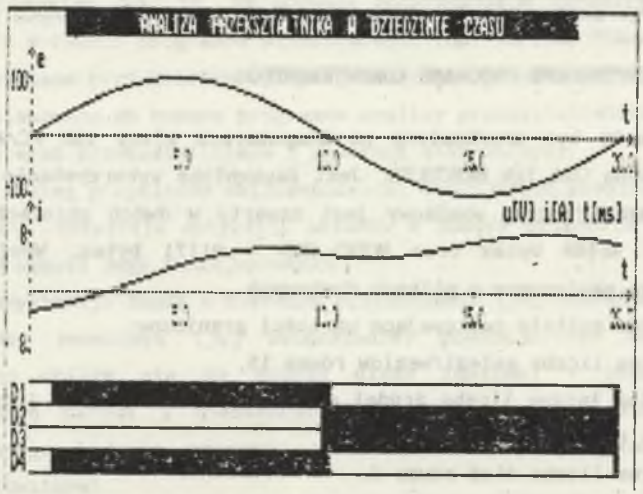
dioda D_1 w stanie przewodzenia

↓

1001

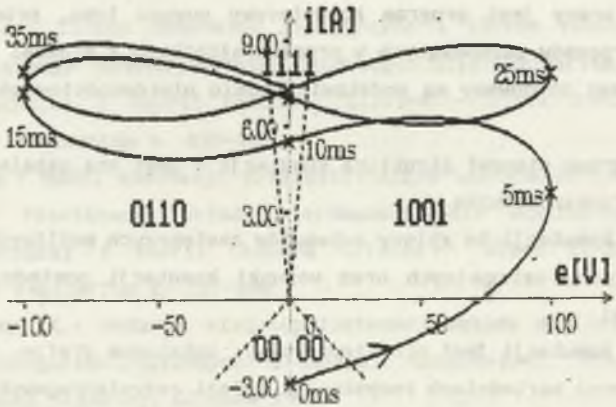
↑

dioda D_3 w stanie zaworowym



Rys.6. Wydruk komputerowej analizy przekształtnika z rys.5

Fig.6. Displayed data of analyzed example rectifier from fig.5



Rys.7. Interpretacja geometryczna wyników analizy prostownika z rys.5

Fig.7. Geometrical interpretation of analysis results for the example from fig.5

Rozwiązania graficzne, odpowiadające schematom zastępczym nieistotnym są identyczne z brzegami zaznaczonych schematów istotnych; w części wspólnej stożków 1111, 1001, leżą np. stożki 1011, 1101; a w części wspólnej wszystkich czterech stożków istotnych leżą np. stożki 0011, 0101.

Przejście trajektorii punktu pracy, która jest wyznaczona przez wymuszenie napięciowe oraz zmienną stanu, przez brzeg stożka istotnego (zmiana obowiązującego zestwu nierówności), odpowiada komutacji pewnych diod układu.

5. DANE TECHNICZNE PROGRAMU KOMPUTEROWEGO

Program może być uruchamiany na komputerach klasy IBM PC/AT lub XT z kartą graficzną CGA lub HERCULES. Jest zapewnione wykorzystanie koprocesora arytmetycznego. Program wynikowy jest zawarty w dwóch zbiorach dyskowych: MODEL.EXE - 46448 bytes oraz MODEL.OWR - 91171 bytes. Wyniki obliczeń pośrednich są zapisywane w plikach dyskowych.

Wprowadzone zostały następujące wartości graniczne:

- dopuszczalna liczba gałęzi/węzłów równa 15,
- dopuszczalna łączna liczba źródeł napięcia, źródeł prądu, indukcyjności i pojemności równa 5,
- dopuszczalna liczba diod równa 9.

6. UWAGI I WNIOSKI KOŃCOWE

1. Wynikiem pracy jest program komputerowy nowego typu, przeznaczony do badania procesów zachodzących w przekształtnikach z diodami doskonałymi.
2. Program jest zbudowany na podstawie modelu nierównościowego przekształtnika.
3. Novum programu stanowi struktura komutacji - jest ona ustalona w czasie badania przekształtnika.
4. Struktura komutacji to zbiory schematów zastępczych możliwych, istotnych, nieistotnych, osiągalnych oraz warunki komutacji pomiędzy schematami zastępczymi.
5. Struktura komutacji jest niezmienna przy: ustalonym grafie, typach gałęzi (RLCDej) oraz wartościach rezystancji gałęzi rezystancyjnych i diodowych. Nie zmieniają jej przebiegi czasowe wymuszeń i zmiennych stanu.
6. Struktura komutacji jest w programie wyprowadzana w postaci list schematów możliwych, istotnych oraz osiągalnych.

7. Oprócz struktury komutacji program realizuje obliczanie przebiegów czasowych napięć i prądów wymuszenia oraz zmiennych stanu; wyprowadzany jest w programie przebieg czasowy sekwencji schematów osiągalnych.
8. Wyniki uzyskiwane za pomocą programu umożliwiają interpretację geometryczną procesu zachodzącego w przekształtniku.
9. Ważnym wnioskiem jest to, że podobną interpretację geometryczną można wprowadzić w ramach programów standardowych (np. PSPICE, PCNAP).
10. Wyniki uzyskane przy konstrukcji programu mogą być po odpowiedniej adaptacji zastosowane do budowy programów analizy przekształtników z diodami idealnymi oraz przekształtników z zaworami sterowalnymi.
11. Wykonano szereg przykładów obliczeniowych, testujących powstały program komputerowy. Wszystkie dotyczyły układów o znanym działaniu i potwierdziły poprawność jego funkcjonowania.
12. Zmiana rezystancji diody w kierunku przewodzenia (jej zmniejszenie) oraz w kierunku zaworowym (jej zwiększenie) powoduje, że model diody doskonałej zbliża się do modelu diody idealnej - idealny klucz (odpowiednio zerowa i nieskończona rezystancja). Daje to możliwość przybliżonego badania procesów zachodzących w przedkształtnikach z diodami idealnymi.

LITERATURA

[1] Grzesik B.: Liczba schematów zastępczych i liczba komutacji energoelektronicznego przekształtnika diodowego. XIII Seminarium z Podstaw Elektrotechniki i Teorii Obwodów, Gliwice - Wisła 23-26 maj 1990, materiały seminarium s. 439-444.

[2] Grzesik B.: Model komutacji przekształtników energoelektronicznych diodowych - rozwiązanie układu nierówności. XIV Seminarium z Podstaw Elektrotechniki i Teorii Obwodów Gliwice - Wisła 22-25 maj 1991, materiały seminarium s. 257-266.

[3] Kaczmarczyk Z.: Badanie stałotopologicznej metody analizy przekształtników energoelektronicznych z diodami doskonałymi, Praca Dyplomowa Politechniki Śląskiej, Gliwice 1991.

[4] Siewniak P.: Konstrukcja i analiza nierównościowego modelu matematycznego przekształtnika energoelektronicznego z diodami doskonałymi, Praca Dyplomowa Politechniki Śląskiej, Gliwice 1990.

[5] Bellert S.,Woźniacki H.: Analiza i synteza układów elektrycznych metodą liczb strukturalnych, WNT, Warszawa 1968.

[6] Jefremow N.W., Rozendorn E.R.: Algebra liniowa wraz z geometrią wielowymiarową, PWN Warszawa 1974.

[7] Grzesik B.: Algorytm obliczeń rozwiązania podstawowego układu nierówności istotnych modelu komutacji przekształtnika energoelektronicznego, Zeszyty Naukowe Poltechniki Śląskiej ELEKTRYKA nr 124.

Recenzent: Prof.dr hab.inż. Kazimierz Mikołajuk

Wpłynęło do Redakcji dnia 18 listopada 1991 r.

PROGRAM FOR GENERALIZED ANALYSIS OF COMMUTATION STRUCTURE OF DIODE POWER ELECTRONIC CONVERTERS

A b s t r a c t

A novel program for analysis of diode power electronic converters is described in the paper. It allows for generalized analysis of commutation structure and this is the novum of the program; there are no existing programs which allow for such investigation of commutation structure. The structure of commutation consists of the sets of hypothetical decisive and attainable equivalent circuits, besides, this structure encloses also the conditions of all commutations of each equivalent circuit. The program displays the structure of commutation in the form of the list of equivalent circuits. Together with waveforms of voltages and currents the program displays the waveforms which show numbers of attainable equivalent circuits being realized in the course of the program execution.

An inequality model of perfect diode and inequality model of the converter make basis of the program; linear algebra and theory of linear inequalities have been used to construct the model of the converter.

It is possible to use the program to approximate analysis of the converters with ideal diodes.

The program is described by means of flocharts; there is a module STOŻEK presented in the work; the module runs the analysis of commutation structure.

The theory and principle of operation of the program are illustrated with the help of numerical examples.