

Bogusław GRZESIK

Instytut Podstawowych Problemów
Elektrotechniki i Energoelektroniki
Politechnika Śląska Gliwice

MODELOWANIE ANALOGOWE PRZEKSZTAŁTNIKÓW ENERGOELEKTRONICZNYCH - STAN AKTUALNY ZAGADNIENIA^{x)}

Streszczenie. Omówiono wyczerpująco wszystkie znane i jedną nową metodę analogowego modelowania przekształtników. Podano jednolite ujęcie modelowania w oparciu o teorię obwodów i topologię, nakreślając zależności pomiędzy poszczególnymi metodami modelowania. Zamieszczono pełny przekrój reprezentatywnych publikacji tematu.

1. WSTĘP

Maszyna analogowa pozostaje nadal wiele użytecznym narzędziem do symulacji przekształtników energoelektronicznych. Wynika to ze względnie dużej dostępności do tych maszyn, z dużej ich szybkości działania i dialogowego sposobu prowadzenia obliczeń.

Wielka liczba publikacji z zakresu modelowania i symulacji przekształtników wymaga omówienia ze względu na bardzo zróżnicowane ujęcie prezentowanego materiału. Jednolite ujęcie umożliwia łatwiejszą ocenę przydatności danej metody modelowania do konkretnej klasy zadań.

Praca jest próbą uporządkowania bardzo obszernego i rozproszonego materiału publikowanego; ujmując w dużej mierze nieznanne lub bardzo mało znane w kraju publikacje [2,3,5,9,12]. Ponadto omówiono materiał oryginalny (dotychczas niepublikowany) ujmujący modelowanie o zmiennej topologii [17].

^{x)} Praca była prezentowana na IV Krajowej konferencji napędu elektrycznego, energoelektroniki i trakcji elektrycznej, Warszawa 9-11.04.1984.

Zadania analizy przekształtników energoelektrycznych można ze względu na stopień określenia tych zadań podzielić na dwie klasy:

- zadania w pełni określone,
- zadania nie w pełni określone.

Pierwsze z nich mają ściśle opisaną sekwencję schematów zastępczych, a tym samym pewien ograniczony obszar w dyskretnej przestrzeni stanu zaworów. Ściśle można tu określić przekroczenie granic tego obszaru. Mieszczą się tu analizy znanych przekształtników, takich jak: prostowniki, regulatory napięcia przemiennego itp.

W drugim typie zadań, funkcjonowanie przekształtnika nie jest zwykle dostatecznie znane. Nieznana jest sekwencja schematów zastępczych. Do tej klasy zadań należą zadania z analizy nowych przekształtników o zwykle mało znanym sposobie działania.

Praca niniejsza jest próbą odpowiedzi na następujące pytania:

- czy możliwe jest jednolite ujęcie wszystkich znanych sposobów modelowania przekształtników, jeżeli tak, to jakie ono jest?
- czy każdy ze znanych sposobów modelowania analogowego przekształtników energoelektrycznych w równym stopniu jest przydatny do rozwiązywania obydwu wymienionych rodzajów zadań, jeżeli nie, to jakie rodzaje modelowania wykazują najlepszą (ze względu na szybkość programowania zadania, szybkość uzyskania rozwiązania, stabilność rozwiązania oraz uniwersalność) przydatność do konkretnych klas zadań?

2. OMÓWIENIE METOD MODELOWANIA

Znakomitą większość analogowego modelowania przekształtników energoelektrycznych można zestawić w następujące cztery grupy:

- A) modelowanie przy niezmienniej topologii,
- B) modelowanie przy zmiennej topologii,
- C) modelowanie funkcjonalne,
- D) modelowanie analogowo-fizyczne.

(A). Modelowanie przekształtników oparte o model z niezmienną topologią [1 - 6], [10] jest najprostszym i najbardziej przejrzystym typem modelowania analogowego. Zadania do analizy metodą symulacji analogowej ze względu na konfigurację elementów przekształtnika można podzielić na trzy klasy.

Najprostsza klasa może być rozwiązana metodą bezpośrednią, jeżeli każdy zawór może być przedstawiony równaniem o postaci $i = f(u)$ lub $u = f(i)$, w drzewo grafu wchodzi wszystkie gałęzie $u = f(i)$ oraz żadna gałąź $i = f(u)$, a w dopełnieniu drzewa znajdują się wszystkie gałęzie $i = f(u)$ i żadna gałąź

$u = f(i)$ z tym, że parametry zaworów daje się zamodelować w obszarze skończonych wzmocnień wzmacniaczy maszyny analogowej.

Równania tego modelu mają postać

$$Q i = \begin{bmatrix} I & Q_1 \end{bmatrix} i = \begin{bmatrix} I & Q_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_t \\ i_1 \end{bmatrix} = 0; u_t = Z_t i_t$$

$$B u = \begin{bmatrix} Q_1' & I \end{bmatrix} u = \begin{bmatrix} -Q' & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_t \\ u_1 \end{bmatrix} = 0; i_1 = Y_1 u_1$$
(1)

gdzie:

Q - macierz przekrojów głównych,

B - macierz obwodów głównych,

i_t, u_t - wektory prądów i napięć gałęzi drzewa,

i_1, u_1 - wektory prądów i napięć gałęzi dopełnienia drzewa,

Z_t - macierz impedancji gałęzi drzewa,

Y_1 - macierz admitancji gałęzi dopełnienia drzewa.

Macierze Z_t, Y_1 zmieniają się wraz ze zmianą stanu zaworów. Jeżeli parametrów zaworów nie można odwzorować za pomocą skończonych wzmocnień, wzmacniaczy maszyny analogowej, to zadanie należy do drugiej klasy.

.. Druga klasa zadań może być zamodelowana tak, że nie wystąpi tu problem skończonych wzmocnień wzmacniaczy maszyny analogowej. Dzieje się to poprzez wprowadzenie do równań przekształtnika przekształcenia liniowego. W wyniku takiego przekształcenia współczynniki wzmocnienia wzmacniaczy odwzorowujących zawory ograniczone zostają do jedności.

Jeżeli charakterystykę napięciowo-prądową zaworu zapisać w postaci

$$i = (s Y_{sc} + \bar{s} y_{sn}) u.$$

to wielkości maszynowe mają postać

$$I = \frac{s_i}{s_u} (s Y_{sc} + s y_{sn}) U = \frac{s_i}{s_u} y_s U$$

a współczynnik wzmocnienia wzmacniacza $\frac{s_i}{s_u} y_{sc}$ może wynosić do kilkuset, co stwarza trudności w osiągnięciu stabilnego rozwiązania maszynowego. Prze-

kształcenie liniowe równania maszynowego zaworu daje wzmocnienie bloku odwzorowującego zawór

$$K^L = (1_{12} + \frac{s_1}{s_u} 1_{22}) (1_{11} - \frac{s_1}{s_u} y_s 1_{21}) = i^L U^L,$$

które jest ograniczone do jedności przy właściwym doborze współczynników przekształcenia liniowego.

Równania modelu przekształtnika uzyskuje się z równań (1) przez wprowadzenie do nich przekształcenia liniowego.

... Jeżeli przekształtnik posiada taką konfigurację, że istnieją w nim obwody o zerowej impedancji lub przekroje o nieskończenie wielkiej impedancji, z tym że w każdym z wymienionych obwodów istnieje przynajmniej jedna pojemność, a w każdym z wymienionych przekrojów występuje jedna indukcyjność, to zadanie analizy takiego przekształtnika zalicza się do trzeciej klasy zadań. Aby możliwe było zestawienie modelu analogowego w tego typu zadaniu równania przekształtnika wyraża się przy pomocy pochodnych napięć w pierwszym przypadku i pochodnych prądów w drugim przypadku. Taki zabieg sprowadza zadania omawianej klasy do zadania klas wymienionych wyżej.

Z powyższego wynika, że wymienione modele przekształtników umożliwiają wykonanie analizy wszystkich zadań spotykanych w teorii i praktyce energoelektroniki przy dużej prostocie modelowania i "automatycznym" uwzględnieniu wszystkich możliwych stanów zaworów. Tak więc, modelowanie typu A jest w najwyższym stopniu przydatne do rozwiązywania zadań drugiej klasy złożoności.

(B). Choćby modele A ujmują wszystkie możliwe poprawne przypadki, to równolegle do modeli A poczynając od modeli z funkcjami przełączającymi [7] powstawały modele o zmiennej topologii [8]. Modele o zmiennej topologii znalazły uznanie ze względu na niezwykłą ich prostotę i stabilność, uzyskiwanych za ich pomocą rozwiązań. W początkach ich rozwoju modele o zmiennej topologii budowane były intuicyjnie. Praca [8] jest pierwszą próbą sformalizowania procesu modelowania (model o zmiennej topologii) w oparciu o teorię obwodów. Ograniczono się tam jednak tylko do niezmiennego drzewa części ciągłej przekształtnika. W ogólnym przypadku drzewo części ciągłej jest zmienne, co istotnie zmienia równania modelu. Poniżej przedstawiono zarys konstrukcji modelu przekształtnika przy zmiennej topologii, gdy drzewo części ciągłej jest zmienne, w oryginalnym dotychczas niepublikowanym ujęciu [17]. Podobnie jak w modelu A zadania do analizy podzielić można, ze względu na konfigurację elementów przekształtnika, na dwie klasy.

Do pierwszej klasy zadań, które mogą być analizowane przy pomocy modelu o zmiennej topologii zalicza się takie, w których przekształtnik może być przedstawiony tak, że każdy zawór przewodzący jest reprezentowany równaniem $u = f(i)$, a zawór nieprzewodzący równaniem $i = f(u)$, przy czym dla każdego stanu zaworów do drzewa wchodzi wszystkie zawory przewodzące oraz

pozostałe gałęzie typu $u = f(i)$ i żaden zawór nieprzewodzący oraz żadna gałąź typu $i = f(u)$, natomiast w dopełnieniu drzewa znajdują się wszystkie zawory nieprzewodzące oraz pozostałe gałęzie typu $i = f(u)$ i żaden zawór przewodzący oraz żadna gałąź typu $u = f(i)$. Model opiera się na przekonstruowaniu drzewa grafu zgodnie z sekwencją schematów zastępczych, przy czym na ogół żąda się minimalizacji liczby gałęzi wymienianych pomiędzy drzewem a jego dopełnieniem. Model opisywany jest równaniami podobnymi do równań (1), z tym, że zamiast macierzy przekrojów głównych Q jest tu macierz sumaryczna przekrojów głównych Q_{Σ} a zamiast macierzy obwodów głównych B sumaryczna macierz obwodów głównych B_{Σ} . Te same gałęzie mogą wyznaczać wiersze i kolumny macierzy sumarycznych jako, że ta sama gałąź w zależności od stanu zaworów może przynależać do drzewa lub do jego dopełnienia. Z tego wynika, że napięcie /prądy pozostałych gałęzi, poza pojemnościami i indukcyjnymi wyliczane są bądź to z macierzy Q_{Σ} , B_{Σ} , bądź to z równań gałęziowych w zależności od stanu zaworów. Macierze sumaryczne Q_{Σ} , B_{Σ} wyznacza się na podstawie znanej sekwencji schematów zastępczych. Macierze te następnie wpisuje się do pamięci maszyny. Wyczytywanie elementów obydwóch macierzy z pamięci odbywa się pod nadzorem sygnałów przejść bezwarunkowych, odwzorowujących sterowanie zaworów oraz warunkowych odwzorowujących stan zaworów.

Modele zaworów w omawianym przypadku mogą być np. typu $R = 0, \infty$ lub o skończonych rezystencjach w stanie przewodzenia i nieprzewodzenia.

.. Druga klasa zadań, szersza w stosunku do pierwszej, umożliwi analizę przekształtników w sytuacji, gdy zarówno przewodzące jak i nieprzewodzące zawory mogą znaleźć się w drzewie grafu bądź w jego dopełnieniu. Warunek taki dopuszcza do pojawienia się przekrojów typu ILS oraz obwodów typu ECS. Z tego wynika, że zawory muszą w takim przypadku mieć skończoną impedancję. Daje to szersze możliwości obliczeniowe w tym sensie, że

- możliwe jest wierniejsze odwzorowanie procesów fizycznych modelowanego obiektu w porównaniu do pierwszego wariantu B,
- możliwe jest wprowadzenie maszynowego konstruowania macierzy Q_{Σ} , B_{Σ} w systemie on-line. Z tego wynikają takie same możliwości obliczeniowe omawianego modelu (2^Z stanów) jak możliwości obliczeniowe A, z tym że rozwiązanie jest tu z definicji bardziej stabilne.

Mimo bardzo korzystnych własności modelu B ze względu na jego złożoność techniczną nie wydaje się on godny polecenia do rozwiązywania zadań drugiego stopnia złożoności.

(C). Modele funkcjonalne [9,10,13] różnią się od modeli A,B ponieważ zadaniem ich jest odzwierciedlać niektóre, wybrane cechy zewnętrzne przekształtników; zwykle jest to praca regularna przekształtnika. Konstrukcja tego rodzaju modeli jest ściśle oparta o poprzednie dwa typy modeli, A i B. Równania opisujące omawiany typ modeli wynikają z równań modeli A i B; Najczęściej spotyka się modele funkcjonalne prostowników [9,10,13], falowników [14], regulatorów napięcia stałego i przemiennego itp. Modele funkcjonalne

nadają się szczególnie do konstrukcji typu hardware. Pozwalają na szybkie i sprawne zestawienie modeli nawet bardzo złożonych obiektów.

(D). Ostatnim rodzajem modelowania jest modelowanie analogowo-fizyczne [11,12]. Atrakcyjność jego wynika z możliwego tu do zastosowania izomorfizmu modelowany obiekt-model, co pozwala pominąć pracochłonny etap układania równań modelu. Modelowanie w tym przypadku przypomina czynności laboratoryjne. W modelu wykorzystuje się dwutranzystorowe modele tyrystorów oraz bloki odwzorowujące kondensatory, dławiki i transformatory zbudowane w oparciu o konwertery napięcie-prąd.

Niektóre kondensatory i wszystkie oporniki modeluje się czysto fizycznie. Autorzy przytoczonych publikacji wykazują wielką przydatność tego rodzaju modelowania do prac projektowo-badawczych wykonywanych często, w których model nie musi odwzorowywać obiektu ze zbyt dużą dokładnością. Istotnym mankamentem rozwiązania technicznego modelu analogowo-fizycznego jest konieczność galwanicznej separacji poszczególnych analogowych bloków funkcjonalnych, co w przypadku stosowania systemu modulacja-demodulacja powodować może pewne niestabilności i niedokładności.

::::: Cennymi publikacjami, które leżą na pograniczu grup B i C są pozycje [14] i [15]. Pierwsza z nich pokazuje możliwości zformalizowania modelowania grupy C.

3. WNIOSKI

Z analizy przeprowadzonej przez autora wynikają następujące wnioski:

I. Ścisłe jednolite podejście do wszystkich wymienionych grup modelowania nie jest możliwe. Ścisła jednolitość może zostać zachowana jedynie w stosunku do grup A i B, a po zastosowaniu metod użytych w pracy [14] również w stosunku do grup A,B,C.

Żądanie jednolitości podejścia w stosunku do wszystkich czterech grup A, B,C,D jest niecelowe ze względu na specyfikę modelowania typu D.

II. Jednolite ujęcie modeli przekształtników opiera się na teorii obwodów elektrycznych w tym i na ich topologii.

III. Przydatność poszczególnych omówionych metod modelowania do konkretnych typów zadań jest funkcją złożoności schematowej przekształtnika, stopnia określoności jego działania, rodzaju systemu obliczeniowego, w którym ma pracować itp. Przydatność tę można wyrazić następująco:

grupa A nadaje się szczególnie dobrze do zadań drugiej klasy złożoności, a ponadto do zadań pierwszej klasy złożoności w przypadkach, gdy model A jest prostszy od modeli pozostałych grup,

grupa B jest wygodna do konstrukcji modeli typu hardware przy ograniczonym zasięgu obliczeniowym,

grupa C może być stosowana do modelowania w większych systemach obliczeniowych najczęściej spotykanych przekształtników,

grupa D może być zalecana w przypadkach, gdy niezbędne jest prowadzenie często przeprogramowywanych analiz symulacyjnych przy niewielkiej dokładności.

IV. Systematyzacja i jednolitość ujęcia modelowania analogowego przekształtników jest niezwykle przydatna w konstrukcji modeli cyfrowych przekształtników [4,16].

LITERATURA

- [1] Navratil S.: Nachbildung einiger Gleichrichter schaltungen im stationären und nicht stationären Betrieb auf dem elektronischen -Analogrechner. Acta Techn. CSAV, No. 1, s. 152-160, 1966,
- [2] Mustafa G.M.: Prjamoj metod analiza ventil'nych schem na AVM. Elektro-techničeskaja promyšlennost . Ser. Preobrazovatel'naja tehnika 1971 vyp. 23-24, s.24-25.
- [3] Mustafa G.M.: Modelirovanie schem preobrazovatel'noj tehniki na analogovych vyčislitel'nych mašinach (avtoreferant dissertacij na soiskanie učenoj stepni kandidata techničeskich nauk), M. 1973.
- [4] Foch H., Trannoy B., Faucher J.: Complete simulation of static converter by digital and analogue methods. IFAC symposium on Control in Power Electronics and Electrical Drives, Düsseldorf, October 7-9, 1974, Vol. 1, pp. 363-373.
- [5] Mustafa G.M., Baregamjann G.V.: Analogovaja model' neupravljajemogo vprjamitelja, učitivajuščaja parazitnyje emkosti. Elektrotech.prom.-st'. Ser. Preobrazovatel'naja tehnika 1979, Vyp. 2(109) s.10-13.
- [6] Rodacki T., Gierlotka K., Grzesik B.: Model analogowy i badania trystorowego układu zasilania odbiornika łukowego, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Elektryka, z.84, 1983, s.79-94.
- [7] Bogryj V.S., Russkich A.A.: Matematičeskoje modelirovanie tiristornych preobrazovatelej. Moskva, "Energija" 1972.
- [8] Russkich A.A., Ščerbakov B.F.: Primenenie grafov dlja postrojenija strukturnoj schemy električeskoj cepi, Električestvo, 1979, No 6.
- [9] Nikitin V.M., Donskoj N.V., Eliseev V.N.: Princip modelirovanija upravljaemych ventil'nych preobrazovatelej, Elektrotechničeskaja prom.-st'. Ser. Preobrazovatel'naja tehnika 1971. Vyp. 14, s. 19-32.
- [10] Myrcik C.: Modelowanie i symulacja przekształtnikowych układów napędowych, Skrypt Nr 1119 Politechniki Śląskiej, Gliwice 1984.
- [11] Primenenija analogovych vyčislitel'nych mašin v energetičeskich sistemach. Pod red. Sokolova N.I., Moskva, Energija, 1970,
- [12] Bogryj V.S., Vitkovskij O.P., Rusakov A.E.: Vyčislitel'nyj kompleks dlja rešenija zadač preobrazovatel'noj tehniki metodom prjamoj analogii. Tezisy dokładow Vsesojuznoj naučno-techničeskoj konferencii, Kiev, sentjabr, 1975, čast 4, s. 114-118.

- [13] Rodacki T., Nowak J.: Zastosowanie techniki analogowej do badania statyki i dynamiki silnika prądu stałego zasilanego z przekształtnika tyrystorowego, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Elektryka, z.38. Gliwice 1972.
- [14] Deskur J.: Modele matematyczne tyrystorowych układów przekształtnikowych, PWN, Warszawa-Poznań 1981.
- [15] Lipo T.A.: Simulation of a Current Source Inverter Drive, IEEE Trans. On Ind. Appl. and Cont. Instrumentation, Vol. IECI, No 2, 1979.
- [16] Szczęsny R.: Wybrane problemy modelowania cyfrowego układów energoelektrycznych, Praca doktorska, Politechnika Gdańska, Gdańsk 1976.
- [17] Grzesik B.: Teoria przekształtników statycznych, Skrypt uczelniany Politechniki Śląskiej, Gliwice 1984.

Recenzent: doc. dr inż. Zygmunt Bendyk

Wpłynęło do redakcji dn. 10 maja 1984 r.

АНАЛОГОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТИРИСТОРНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ, СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

Р е з ю м е

В статье обсуждены все известные и один новый метод аналогового моделирования тиристорных преобразователей. Упомянутые методы моделирования рассматриваются на основе теории электрических цепей. Этот единый подход дал возможность сравнить показанные методы. В статье дан полный перечень работ посвященных этой теме.

ANALOGUE MODELLING OF ELECTRONIC POWER CONVERTORS-STATE OF ART

S u m m a r y

All known and one new method of modelling of power electronic converters are presented in the paper. Different methods of modelling are described basing on electrical network theory. On the base of such uniform description the comparison of these methods is given. The paper contains entire survey of representative references of the subject.