



**Krzysztof OLESIAK**

## **ZASTOSOWANIE REGULATORÓW ROZMYTYCH W UKŁADACH PRZERYWACZY PRĄDU STAŁEGO**

### *Streszczenie*

*W artykule przedstawiono ogólną strukturę regulatora rozmytego. Scharakteryzowano zasady projektowania przerywacza prądu stałego z wykorzystaniem pakietu Matlab/Simulink. Zrealizowano model przerywacza z tyrystorem wyłączalnym oraz rozmytym regulatorem napięcia. Przeprowadzono badania symulacyjne dla wybranych wartości współczynnika wypełnienia oraz obciążenia rezystancyjno-indukcyjnego. Rezultaty badań zaprezentowano w postaci charakterystyk czasowych napięcia obciążenia, prądu obciążenia oraz prądu tyrystora.*

### **WSTĘP**

Przerywacze prądu stałego zaliczamy do grupy przekształtników niezależnych o komutacji wewnętrznej. W takich układach wyłączanie obwodu głównego nie wymaga bezpośredniego oddziaływania zewnętrznego źródła napięcia.

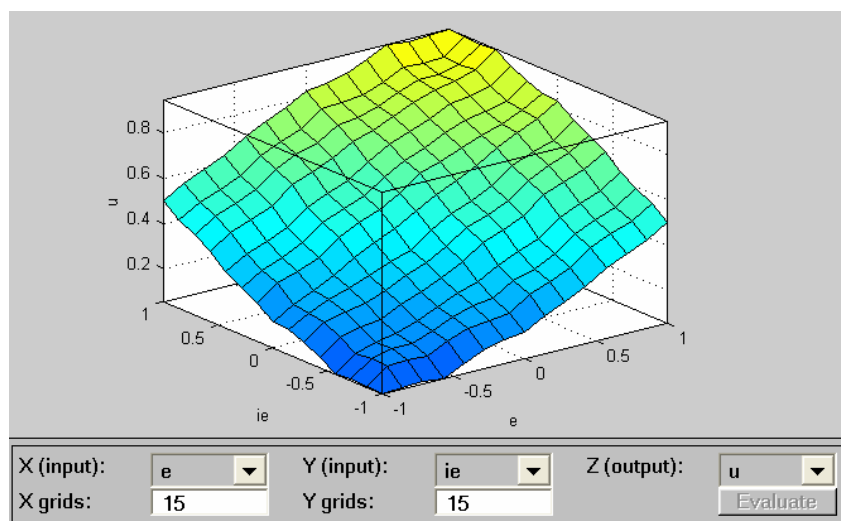
Zasada działania przerywacza polega na łączeniu i przerywaniu obwodu prądu stałego. Sterowanie wartości średniej napięcia lub prądu stałego odbywa się poprzez zmianę czasu przewodzenia elementu półprzewodnikowego w jednym cyklu pracy przerywacza lub poprzez zmianę częstotliwości przy stałym czasie przewodzenia. Jako elementy mocy najczęściej stosowane są tranzystory typu MOSFET oraz tyrystory wyłączalne GTO. Występują także układy z tyrystorami konwencjonalnymi SCR, ale są mniej popularne ze względu na konieczność stosowania dodatkowych obwodów polaryzacji wstecznej umożliwiających poprawną pracę układu. Wybór półprzewodnikowego elementu mocy jest uwarunkowany częstotliwością pracy przerywacza oraz parametrami prądowo-napięciowymi układu [1,9].

### **1. REGULATOR ROZMYTY MAMDANIEGO**

Zapewnienie odpowiedniego poziomu napięcia wyjściowego przerywacza oraz utrzymanie prawidłowych ograniczeń prądowych, przy zmiennych warunkach obciążenia, stwarza konieczność zastosowania układu regulacji. Można to zrealizować z wykorzystaniem regulatorów rozmytych [5, 8]. W odniesieniu do przerywacza prądu stałego uzasadniony jest wybór regulatora Mamdaniego, którego cechą charakterystyczną jest to, iż zarówno poprzedniki reguł jak i następni mają charakter rozmyty. Regulator Mamdaniego o strukturze MISO (multiple-input single-output) można opisać przy zastosowaniu następującego ogólnego zbioru reguł [3, 6]:



Charakterystykę sterowania zrealizowanego regulatora rozmytego dla metody defuzyfikacji COA przedstawiono na rys. 1.



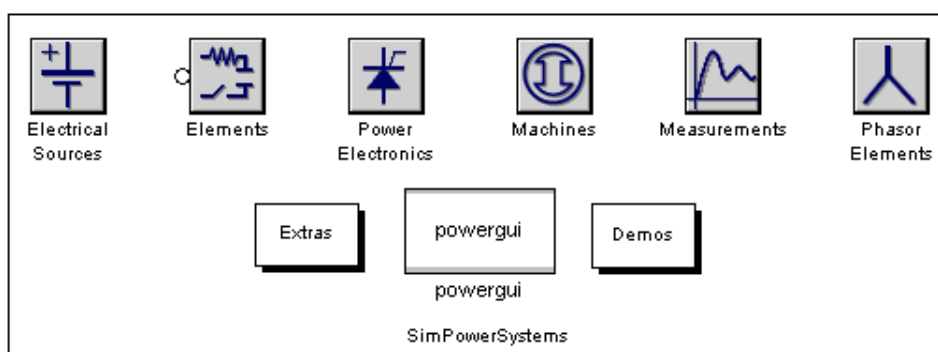
**Rys. 1.** Zależność sygnału wyjściowego od sygnałów wejściowych regulatora rozmytego dla algorytmu defuzyfikacji centroid (Center of Area)

**Źródło:** opracowanie własne

## 2. MODEL PRZERYWACZA PRĄDU STAŁEGO

Zastosowanie przybornika SimPowerSystems wchodzącego w skład pakietu Matlab/Simulink umożliwia projektowanie różnych rodzajów przerywacza prądu stałego przy wykorzystaniu tyrystorów konwencjonalnych SCR, tyrystorów wyłączalnych GTO oraz tranzystorów mocy typu MOSFET [7].

Projektowanie wybranego układu przerywacza prądu stałego rozpoczynamy od uruchomienia przybornika SimPowerSystems, który został zaprezentowany na rys. 2.

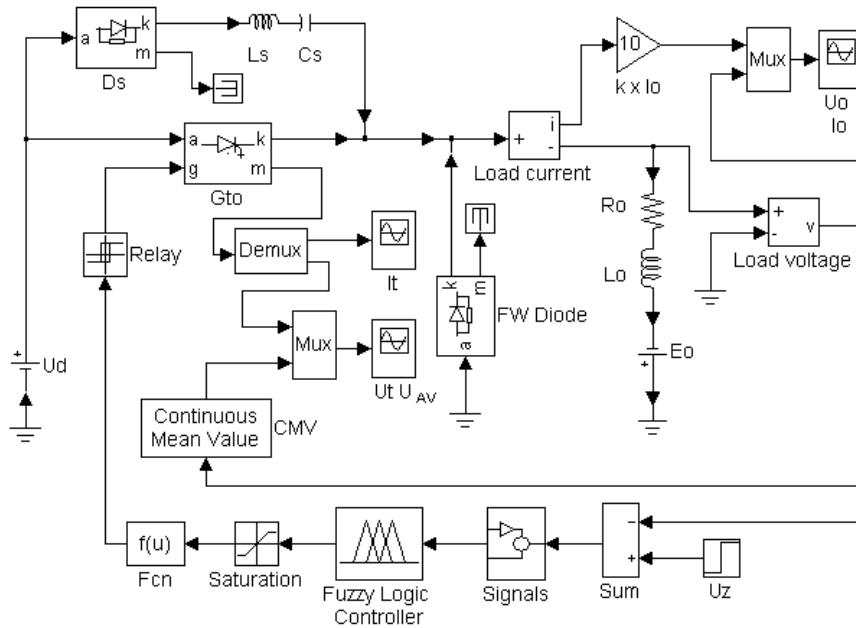


**Rys. 2.** Przybornik SimPowerSystems pakietu Matlab/Simulink [7]

**Źródło:** opracowanie Math Work Inc

W skład przybornika wchodzi sześć podstawowych bibliotek: Źródła Elektryczne, Elementy, Elementy Mocy, Maszyny Elektryczne, Moduły Pomiarowe i Elementy Wektorowe. Uzupełnienie stanowią biblioteki zawierające elementy dodatkowe oraz przykłady demonstracyjne.

Wykorzystując odpowiednie elementy przyborników SimPowerSystems oraz Fuzzy Logic Toolbox zrealizowano model przerywacza prądu stałego z regulatorem rozmytym. Opracowany model zaprezentowano na rys. 3.

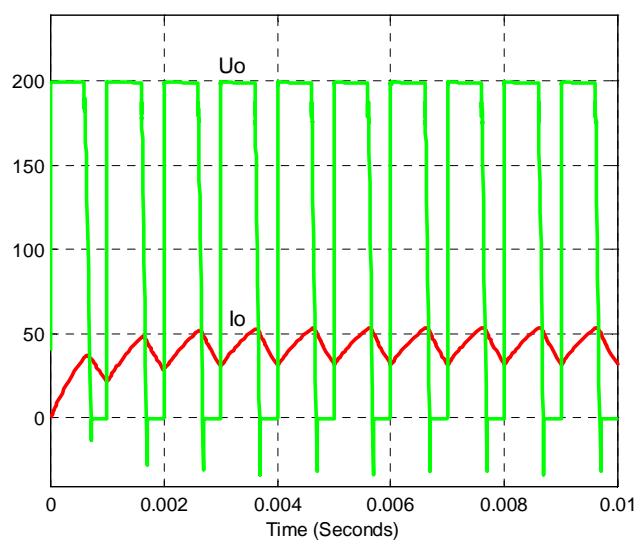


Rys. 3. Model przerywacza prądu stałego z regulatorem rozmytym [1, 7, 4]

Źródło: opracowanie własne na podstawie [1, 7, 4]

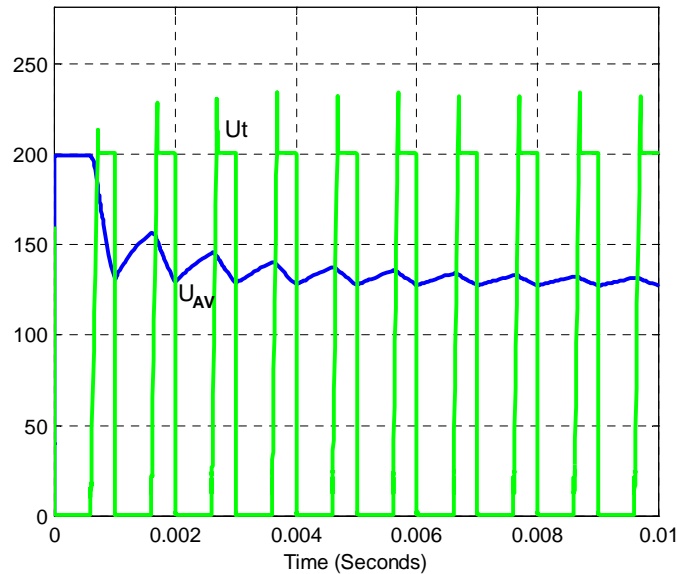
### 3. REZULTATY BADAŃ SYMULACYJNYCH PRZERYWACZA

Sterowanie zrealizowanego modelu przerywacza odbywa się poprzez zmianę współczynnika wypełnienia impulsów. Przykładowe przebiegi czasowe napięć i prądu dla wybranego współczynnika wypełnienia oraz stałego napięcia wewnętrznego  $E_o = -40V$  i napięcia zasilania  $U_d = 200V$  przedstawiono na rys. 4 i 5. Współczynnik skalowania dla prądu  $I_o$  wynosi  $k=10$ .



Rys. 4. Przebiegi czasowe napięcia obciążenia  $U_o$  i prądu obciążenia  $I_o$  przy współczynniku wypełnienia impulsów  $d = 60\%$  oraz parametrach obciążenia  $R_o = 20\Omega$  i  $L_o = 20mH$

Źródło: opracowanie własne



**Rys. 5.** Przebiegi czasowe napięcia tyrystora  $U_t$  i wartości średniej napięcia obciążenia  $U_{AV}$  przy współczynniku wypełnienia impulsów  $d = 60\%$  oraz parametrach obciążenia  $R_O = 20\Omega$  i  $L_O = 20\text{mH}$

**Źródło:** opracowanie własne

Napięcie średnie na obciążeniu jest proporcjonalne do napięcia zasilającego przerywacz oraz względnego czasu przewodzenia elementu półprzewodnikowego, co można zapisać w postaci następującej zależności [2, 9]:

$$U_{AV} = U_d \frac{t_P}{T} \quad (3)$$

gdzie:  $U_{AV}$  – wartość średnia napięcia obciążenia,  $U_d$  – napięcie zasilania,  $t_P$  – czas przewodzenia prądu przez element półprzewodnikowy,  $T$  – okres przebiegu impulsowego napięcia odbiornika.

Zwiększanie współczynnika wypełnienia skutkuje wzrostem wartości średniej napięcia obciążenia oraz prądu obciążenia, dla którego można wyznaczyć wartości minimalną oraz maksymalną przy zastosowaniu następujących formuł matematycznych [1, 9]:

$$I_{O\text{MIN}} = \frac{U_d}{R_O} \left( \frac{e^{t_P/\tau_O} - 1}{e^{T/\tau_O} - 1} \right) - \frac{E_O}{R_O} \quad (4)$$

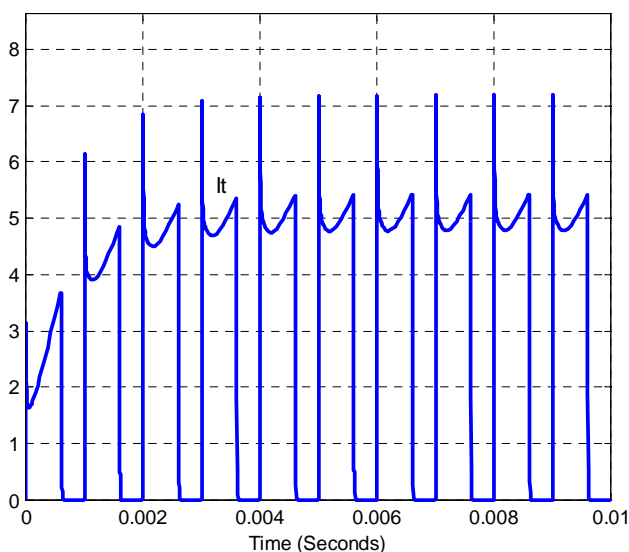
$$I_{O\text{MAX}} = \frac{U_d}{R_O} \left( \frac{1 - e^{-t_P/\tau_O}}{1 - e^{-T/\tau_O}} \right) - \frac{E_O}{R_O} \quad (5)$$

gdzie:  $I_{O\text{MIN}}$ ,  $I_{O\text{MAX}}$  – wartości minimalna i maksymalna prądu obciążenia,  $R_O$  – rezystancja obciążenia,  $\tau_O$  – stała czasowa obwodu obciążenia,  $E_O$  – napięcie wewnętrzne odbiornika.

Stalą czasową obwodu obciążenia można wyznaczyć wykorzystując zależność [2, 9]:

$$\tau_O = \frac{L_O}{R_O} \quad (6)$$

Wzrost wartości prądu obciążenia powoduje w konsekwencji zwiększenie prądu tyrystora wyłączalnego, który powinien być dobrany w taki sposób, aby dla maksymalnego współczynnika wypełnienia wartości szczytowe prądu nie przekroczyły wartości dopuszczalnych elementu półprzewodnikowego [1].



**Rys. 6.** Przebiegi czasowe prądu tyrystora  $I_t$  przy współczynniku wypełnienia impulsów  $d = 60\%$  oraz parametrach obciążenia  $R_o = 20\Omega$  i  $L_o = 20\text{mH}$

**Źródło:** opracowanie własne

W odniesieniu do badanego układu przerywacza interesujące są również przebiegi czasowe napięcia i prądu obciążenia przy przewodzeniu impulsowym, które można uzyskać poprzez zmniejszenie indukcyjności oraz współczynnika wypełnienia. Wpływa to także na zwiększenie pulsacji prądu osiągającej wartość maksymalną przy spełnionym warunku [1, 9]:

$$\frac{t_p}{T} = \frac{1}{2} \quad (7)$$

Wówczas pulsację maksymalną wyznacza się z następującej zależności [1, 9]:

$$\Delta I_{oMAX} = \frac{U_d}{R_o} \left( \frac{1 - e^{-T/2\tau_o}}{1 + e^{-T/2\tau_o}} \right) \quad (8)$$

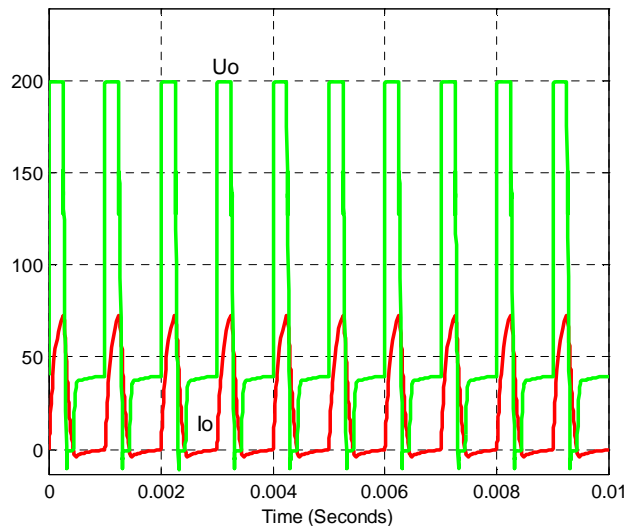
W przypadku, gdy stała czasowa układu obciążenia jest znacznie większa od okresu łążeń przerywacza, co często jest spełnione w układach praktycznych, czyli:

$$e^{-T/2\tau_o} \approx 1 - \left( \frac{T}{2\tau_o} \right) \quad (9)$$

Wobec tego zależność (8) można przedstawić za pomocą wyrażenia:

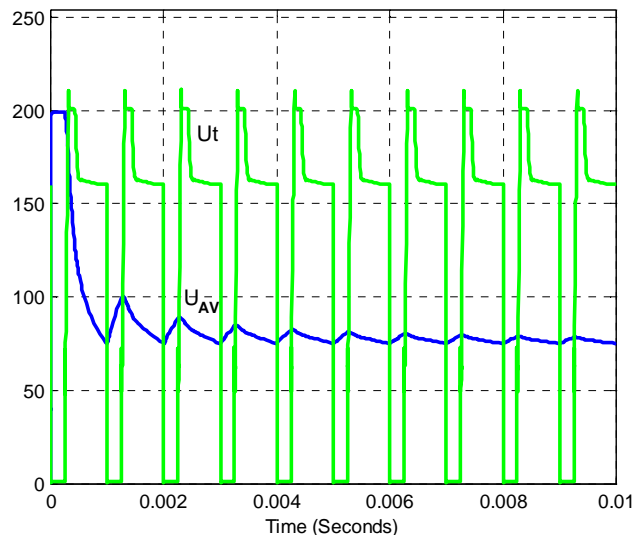
$$\Delta I_{oMAX} = \frac{U_d}{R_o} \cdot \frac{T}{4\tau_o} \quad (10)$$

Z przedstawionych zależności (8) i (10) wynika, że maksymalna pulsacja prądu obciążenia nie zależy od wartości napięcia wewnętrznego odbiornika. Natomiast ma na nią wpływ stała czasowa obwodu obciążenia, okres łącznej przerwy oraz wartość napięcia zasilania układu. Przebiegi czasowe napięcia obciążenia, prądu obciążenia, prądu tyrystora i wartości średniej napięcia obciążenia dla wybranego współczynnika wypełnienia oraz stałego napięcia wewnętrznego  $E_o = -40V$  i napięcia zasilania  $U_d = 200V$  przy przewodzeniu impulsowym zaprezentowano na rys. 7 i 8. Współczynnik skalowania dla prądu  $I_o$  wynosi  $k=10$ .



**Rys. 7.** Przebiegi czasowe napięcia obciążenia  $U_o$  i prądu obciążenia  $I_o$  przy współczynniku wypełnienia impulsów  $d = 25\%$  oraz parametrach obciążenia  $R_o = 20\Omega$  i  $L_o = 2mH$

**Źródło:** opracowanie własne



**Rys. 8.** Przebiegi czasowe napięcia tyrystora  $U_t$  i wartości średniej napięcia obciążenia  $U_{AV}$  przy współczynniku wypełnienia impulsów  $d = 25\%$  oraz parametrach obciążenia  $R_o = 20\Omega$  i  $L_o = 2mH$

**Źródło:** opracowanie własne

## PODSUMOWANIE

Pakiet oprogramowania Matlab/Simulink umożliwia modelowanie układów przerywaczy prądu stałego z uwzględnieniem: parametrów elementów półprzewodnikowych mocy, konfiguracji układu sterowania oraz rodzaju zastosowanego obciążenia o charakterze rezystancyjnym, rezystancyjno-indukcyjnym lub rezystancyjno-indukcyjnym z dodatkowym źródłem napięcia. Rezultaty badań symulacyjnych w postaci charakterystyk czasowych napięć oraz prądów w badanym układzie pozwalają na ocenę wpływu wybranych parametrów na pracę przerywacza prądu stałego.

Zastosowanie rozmytego układu regulacji stwarza znacznie szersze możliwości doboru parametrów i kształtowania charakterystyk sterowania poprzez dobór odpowiednich funkcji przynależności, określenie ich wzajemnego położenia oraz modyfikację bazy reguł przy uwzględnieniu wymagań procesu regulacji.

## APPLICATION OF FUZZY CONTROLLERS IN DIRECT CURRENT CIRCUIT BREAKERS

### *Abstract*

*The paper presents the general structure of the fuzzy controller. Design principles of the direct current breakers using Matlab/Simulink package were characterized. The model breaker with GTO thyristor and fuzzy controller was realized. Simulation studies were performed for selected values of duty cycle and the resistive-inductive load. The results of simulations were presented in the form of time characteristics of the load voltage, the load current and the thyristor current.*

## BIBLIOGRAFIA

1. Barlik R., Nowak M.: *Technika tyrystorowa*. WNT, Warszawa 1994.
2. Boldea I., Nasar S. A.: *Electric Machine Dynamics*. Macmillan Publishing Company, New York 1986.
3. Driankov D., Hellendoorn H., Reinfrank M.: *Wprowadzenie do sterowania rozmytego*. WNT, Warszawa 1996.
4. *Fuzzy Logic Toolbox for use with Matlab - User's Guide*. The Math Works 2002.
5. Guesmi K., Hamzaoui A., Zaytoon J.: *Fuzzy controller synthesis for a DC-DC converter*. Joint 48th IEEE Conference on Decision and Control, Shanghai 2009.
6. Piegat A.: *Modelowanie i sterowanie rozmyte*. Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 1999.
7. *SimPowerSystems for use with Simulink*. The Math Works 2003.
8. Sivanandam S.N., Sumathi S., Deepa S. N.: *Introduction to Fuzzy Logic using MATLAB*. Springer-Verlag, Berlin 2006.
9. Tunia H., Winiarski B.: *Energoelektronika*. WNT, Warszawa 1994.

**Autor:**

**Dr inż. Krzysztof OLESIAK** – Politechnika Częstochowska