

## OCHRONA PRZECIWPRIĘCIOWA PRZY WYKORZYSTANIU WARYSTORA I KONDENSATORA

### Streszczenie

W artykule przeprowadzono analizę stanu nieustalonego w obwodzie zawierającym indukcyjność, warystor i kondensator. Celem tej analizy jest wyznaczenie wartości chwilowych wielkości elektrycznych w obwodzie, które są pomocne do oszacowania jakości ochrony przeciwprzebieciowej. Wyniki symulacji porównano z eksperymentem. Przedstawiono metodę wyznaczania wartości pojemności kondensatora współpracującego z warystorem.

### WSTĘP

Ochrona przeciwprzebieciowa odbiorników indukcyjnych stanowi ważny element w ogniwie bezpiecznej pracy łączników. Jak wykazano w literaturze [5], [7] ochrona zbudowana jedynie z warystora nie stanowi wystarczającej ochrony. Przy stromych zboczach prądów płynących po komutacji w obwodach zawierających indukcyjności, sam spiek warystorowy nie jest w stanie ograniczyć takich przebiegów. Ponadto zauważono, że zwiększenie pojemności w obwodzie zmieni częstotliwość oscylacji i w konsekwencji może ograniczyć przebiegi. Pośrednio dowód tego przedstawiono w pracy [1], gdzie udowodniono, że pojemność równoległa ogranicza zjawiska falowe oraz ogranicza przebiegi.

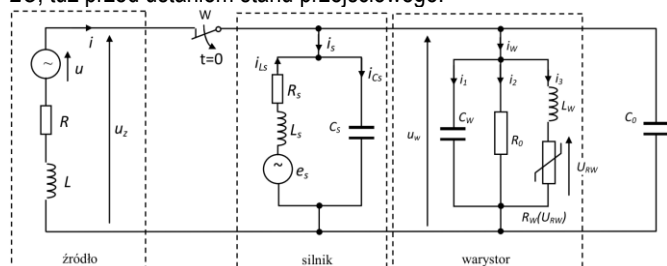
Wysunąć można zatem następujące wnioski:

- bezpośrednio po dojściu do węzła z pojemnością fali napięciowej początkowej, kondensator stanowi zwarcie;
- w miarę upływu czasu kondensator ładuje się i łagodzi stromość czoła fali;
- naładowany kondensator nie obniża wartości szczytowej fali napięciowej o długim czasie trwania.

Połączenie równoległe warystora i kondensatora jest szczególnie uzasadnione przy ochronie elementów elektronicznych przed stromymi zboczami prądów wyładowczych, oraz przy możliwości długotrwałego utrzymywania się fali przebiegu.

### 1. OPIS MODELU MATEMATYCZNEGO I JEGO WARUNKI POCZĄTKOWE

Dwójnik ograniczający przebiegi zbudowany jest z równoległego połączenia warystora oraz kondensatora. Rolą kondensatora w takim rozwiązaniu będzie zmniejszenie stromości czoła fali napięciowej, natomiast warystor zabezpieczy przed pojawieniem się przebiegów przy przebiegach prądu o częstotliwościach mniejszych od częstotliwości własnych obwodu LC, tuż przed ustaniem stanu przejściowego.



Rys. 1. Reprezentacja graficzna modelu analizowanego obwodu

Model matematyczny silnika indukcyjnego (jedna faza) jest wyznaczany dla warunków ustalonych pracy. Oznacza to, że wartość  $L_s$  jest zależna między innymi od czynników zewnętrznych takich jak obciążenie na wale [7]. Zmiana warunków pracy silnika będzie powodować zmianę częstotliwości własnej drgań obwodu, co bez warystora doprowadzić może do generacji przebiegów.

Analizowany obwód (rys.1) można opisać równaniem:

$$\begin{cases} \frac{di_3}{dt} = \frac{1}{L_w} [u_w - u_{RW}(i_3)] \\ \frac{du_w}{dt} = \frac{-1}{C_z} \left( i_3 + i_{L_s} + \frac{u_w}{R_0} \right) \\ \frac{di_{L_s}}{dt} = \frac{-1}{L_s} (-u_w + R_s i_{L_s} + e_s) \end{cases}, \quad t \geq 0, \quad (1)$$

gdzie:

$$C_z = C_s + C_w + C_0, \quad C_0 \gg C_s, C_w, \quad e_s(t) = E_m e^{-\alpha t} \sin \omega t.$$

Ze względu na nieliniowość funkcji  $u_{RW}(i_3)$ , równanie (1) jest nieliniowym równaniem różniczkowym.

Wprowadzony przed komutacją ( $t < 0$ ) dodatkowy kondensator  $C_0$  ma wpływ na przesunięcie fazowe między prądem i napięciem źródła zasilającego, co przenosi się na warunki początkowe  $i_{L_s}(0) = I_0$  oraz  $u_w(0) = U_0$ . Przy nieznannej wartości  $C_0$  warunki początkowe byłyby pewnymi nieznanymi funkcjami  $I_0(C_0)$  i  $U_0(C_0)$ . W celu ułatwienia dalszych analiz przyjęto największe możliwe spodziewane wartości warunków początkowych. Przykładowo dla silnika jednofazowego o mocy 23 W będą to wartości:  $I_0 = 0,3229$  A,  $U_0 = 326,3$  V.

### 2. WYZNACZENIE WARTOŚCI $C_0$

Kondensator  $C_0$ , oprócz ograniczania szybkich przebiegów, pełni w obwodzie również funkcję kompensatora mocy biernej indukcyjnej. Wiadomo, że przy doborze pojemności kompensującej należy unikać kompensacji zupełnej i przekompensowania. Oznacza to, że pojemność kompensacji zupełnej będzie wartością graniczną poszukiwanej wielkości.

$$C_0 + C_s + C_w < C_{Zup} = \frac{P}{U^2 \omega} \operatorname{tg} \varphi_L, \quad (2)$$

gdzie:

$P, U$  – odpowiednio moc czynna i napięcie zasilające,

$\varphi_L$  – przesunięcie kątowe między prądem i napięciem na silniku bez kondensatora kompensującego.

Wynika z tego, że graniczna wartość pojemności wynosi:

$$C_0 < \frac{P \cdot L_S}{U^2 R_S} - C_S - C_W \quad (3)$$

Dla silnika o mocy 23 W i wartości pojemności wyznaczonych w [7] uzyskuje się:

$$C_0 < \frac{39,6 \cdot 0,1994}{230,7^2 \cdot 71,29} - 1,4 \cdot 10^{-9} - 80 \cdot 10^{-12} \cong 2,1 \mu F. \quad (4)$$

Przy kompensacji częściowej, poprawiając współczynnik mocy ( $\cos \varphi$ ) do wartości dopuszczalnej  $\cos \varphi = 0,8$  pojemność kondensatora wynosi:

$$C_{0,8} = \frac{P}{U^2 \omega} \left( \frac{\omega L_S}{R_S} - \operatorname{tg} \varphi \right) = \frac{39,6}{230,7^2 \cdot 314} \left( \frac{314 \cdot 0,1994}{71,29} - \frac{\sqrt{1-0,8^2}}{0,8} \right) = 0,3 \mu F. \quad (5)$$

Oznacza to, że pod względem kompensacji mocy biernej poszukiwana wartość pojemności  $C_0$  będzie w przedziale:

$$C_{0,8} - C_S - C_W = 0,3 \mu F < C_0 < 2,1 \mu F. \quad (6)$$

Przyjmując funkcję nieliniową  $R_W(U_{RW})$  aproksymowaną wielo-odcinkowo, dochodzi się do trzech liniowych równań stanu [7]. Wiedząc, że początkowy przebieg napięcia opisany sinusoidą o dużej częstotliwości, zależy głównie od elementów LC, do analizy przyjmuje się równanie stanu dla odcinka wielkiej rezystancji. Równanie (1) przechodzi do postaci:

$$\begin{cases} \frac{di_3}{dt} = \frac{1}{L_W} [u_W - R_A i_3] \\ \frac{du_W}{dt} = \frac{-1}{C_Z} \left( i_3 + i_{L_S} + \frac{u_W}{R_0} \right) \\ \frac{di_{L_S}}{dt} = \frac{-1}{L_S} (-u_W + R_S i_{L_S} + e_s) \end{cases}, \quad |i_3| \leq \frac{U_1}{R_A}, \quad t \geq 0. \quad (7)$$

Przyjmując wektor stanu  $\mathbf{x} = [i_3 \quad u_W \quad i_{L_S}]^T$  uzyskać można:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{R_A}{L_W} & \frac{1}{L_W} & 0 \\ \frac{1}{C_Z} & -\frac{1}{R_0 C_Z} & -\frac{1}{C_Z} \\ 0 & \frac{1}{L_S} & -\frac{R_S}{L_S} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\frac{1}{L_S} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{u} = [e_s], \quad (8)$$

czyli równanie (7) w zapisie macierzowym:

$$\frac{d}{dt} \mathbf{x} = \mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{B} \mathbf{u}, \quad (9)$$

co po przekształceniu obustronnym Laplace'a daje:

$$s \mathbf{X}(s) - \mathbf{x}(0) = \mathbf{A} \mathbf{X}(s) + \mathbf{B} \mathbf{U}(s), \quad (10)$$

gdzie:  $\mathbf{x}(0) = [0 \quad U_0 \quad I_0]^T$ .

Zatem, rozwiązania poszczególnych zmiennych stanu dla silnika o mocy 23 W mają postać:

$$I_3(s) = \frac{64 \cdot 10^{-5} [1 \cdot 10^{31} C_Z s^3 + (1 \cdot 10^{35} C_Z - 1 \cdot 10^{28}) s^2] + 64 \cdot 10^{-5} [(4 \cdot 10^{37} C_Z - 6 \cdot 10^{39}) s + 4 \cdot 10^{38} C_Z + 5 \cdot 10^{32}]}{M(s)}, \quad (11)$$

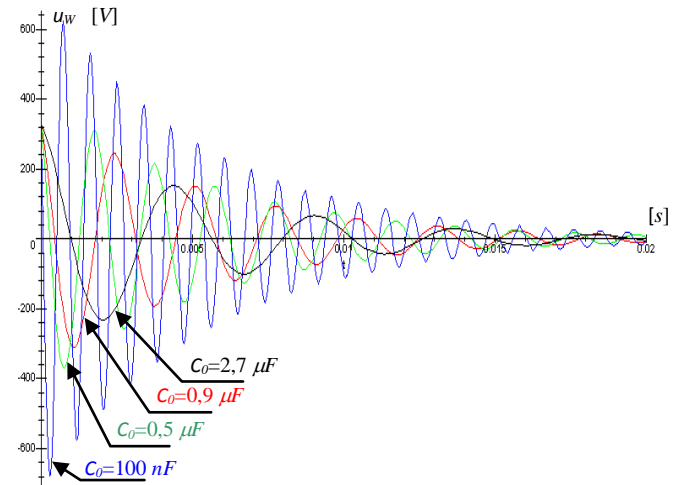
$$u_W(s) = \frac{3 \cdot 10^{-5} [1 \cdot 10^{31} C_Z s^4 + (7 \cdot 10^{39} C_Z - 1 \cdot 10^{28}) s^3 + (3 \cdot 10^{42} C_Z - 9 \cdot 10^{36}) s^2] + 3 \cdot 10^{-5} [(8 \cdot 10^{44} C_Z - 5 \cdot 10^{38}) s + 2 \cdot 10^{47} C_Z - 9 \cdot 10^{41}]}{M(s)}, \quad (12)$$

$$i_{L_S}(s) = \frac{8 \cdot 10^{-9} [6 \cdot 10^{30} C_Z s^4 + (4 \cdot 10^{39} C_Z + 6 \cdot 10^{21}) s^3 + (1 \cdot 10^{43} C_Z + 5 \cdot 10^{33}) s^2] + 8 \cdot 10^{-9} [(1 \cdot 10^{45} C_Z + 3 \cdot 10^{33}) s + 1 \cdot 10^{49} C_Z - 4 \cdot 10^{40}]}{M(s)}. \quad (13)$$

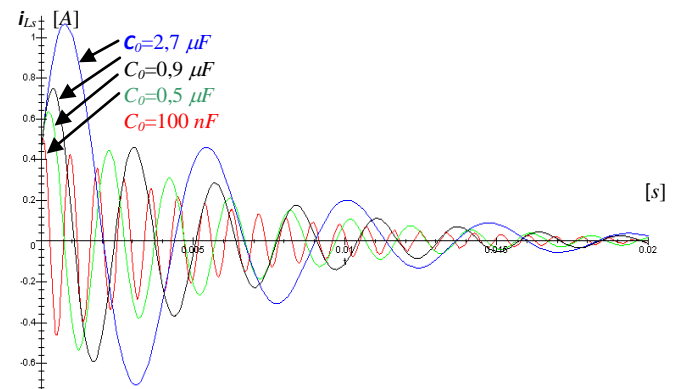
gdzie:

$$M(s) = [1 \cdot 10^{77} C_Z s^3 + (6 \cdot 10^{15} C_Z + 10) s^2 + (2 \cdot 10^{18} C_Z + 8 \cdot 10^9) s + 3 \cdot 10^{16}] \cdot (1 \cdot 10^{16} s^2 + 5 \cdot 10^{17} s + 1 \cdot 10^{21})$$

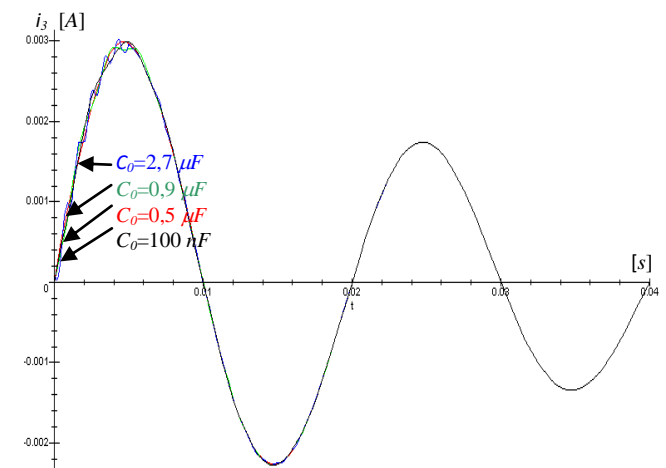
Ilustrację graficzną transformaty odwrotnej powyższych równań przedstawiają poniższe rysunki:



Rys. 2. Przebieg napięcia  $u_W(t)$  dla kilku wartości pojemności  $C_0$



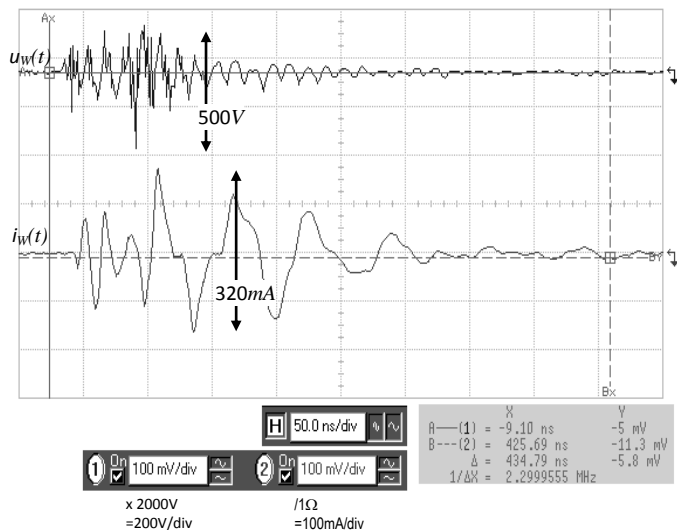
Rys. 3. Przebieg prądu  $i_{L_S}(t)$  dla kilku wartości pojemności  $C_0$



Rys. 4. Przebieg prądu  $i_3(t)$  dla kilku wartości pojemności  $C_0$

### 3. WERYFIKACJA

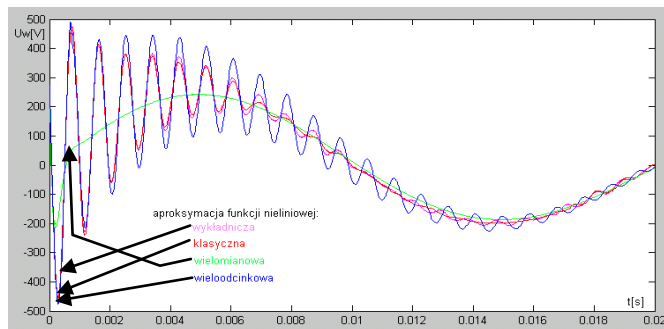
Wykonano eksperymentalne wyznaczenie przebiegu prądu i napięcia przy równoległe dołączonym do silnika o mocy 23 W warystorze oraz kondensatorze  $C_0$ . Eksperyment wykazał, że już przy pojemności  $C_0 = 100 \text{ nF}$  przepięcia generujące łuk na wyłączniku ustaly.



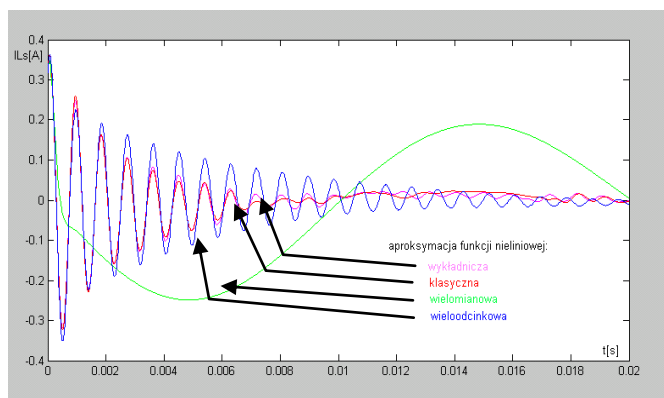
Rys. 5. Przebieg napięcia  $u_w(t)$  i prądu  $i_w(t)$  wyznaczone podczas eksperymentu

Dołączenie większych pojemności przyniesie jeszcze lepszy rezultat. Oznacza to, że dołączenie pojemności kompensującej (4) wraz z warystorem skutecznie ograniczy przepięcia powyłaczeniowe. W pewnych sytuacjach jednak (na przykład, gdy silnik pracuje w układzie kompensacji grupowej) nie ma potrzeby stosowania droższych kondensatorów o większej pojemności. Wystarczą pojemności mniejsze, bez potrzeby analizy współczynnika mocy.

Należy pamiętać, że uzyskane wyniki odpowiadają aproksymacji wieloodcinkowej funkcji nieliniowej  $R_W(U_{RW})$ , która jak wiadomo jest najmniej dokładna w pobliżu znamionowego napięcia warystorowego. Zatem, celowe jest sprawdzenie rozwiązań dla wszystkich aproksymacji metodami symulacyjnymi.



Rys. 6. Przebieg napięcia  $u_w(t)$  wyznaczony w wyniku symulacji



Rys. 7. Przebieg prądu  $i_{Ls}(t)$  wyznaczony w wyniku symulacji

Na rysunkach 6 i 7 przedstawiono przebiegi zmiennych stanu wyznaczone symulacyjnie przy pojemności równej

$C_Z = C_S + C_W + C_0 = 100nF$ . Funkcję nieliniową aproksymowano kilkoma zależnościami szerzej opisanymi w (7).

Na rysunkach 6 i 7 zauważyć można wpływ funkcji nieliniowej na kształt przebiegów. Pojawia się tutaj dodatkowa modulacja sinusoidą o większym okresie. Ponadto porównując rysunek 6 z rysunkiem 2 widać, że amplituda napięcia  $u_w(t)$  wyznaczona analitycznie dla odcinka o wielkiej rezystancji jest nieznacznie większa od amplitudy odczytanej przy uwzględnieniu funkcji nieliniowej. Zauważalne jest to również analizując prąd  $i_{Ls}(t)$  na rysunku 7 oraz 3.

Odnosząc się ponadto do przebiegu wyznaczonego podczas eksperymentu (rys.5) widać, że pomimo wyznaczania modeli matematycznych nie uwzględniających zjawisk zachodzących na stykach wyłącznika, przybliżone rozwiązania analityczne dostarczają dostatecznej wiedzy o amplitudzie przebiegów.

Zgodnie z wytycznymi producenta [2] amplitudę przepięć występujących podczas odłączania obwodu indukcyjnego można oszacować, wykorzystując zależność:

$$U_{wm} = I_0 \sqrt{\frac{L_S}{C_Z}} \quad (14)$$

Dla przyjętych wartości liczbowych otrzymuje się  $U_{wm} = 0,3229 \sqrt{\frac{0,1994}{1 \cdot 10^{-7}}} = 456 V$ . Jest to wartość zbliżona do wyznaczonych symulacyjnie.

Przekształcając zależność (14), poszukiwaną wartość pojemności można oszacować na podstawie zależności:

$$C_0 = \frac{L_S}{\left(\frac{U_{wm}}{I_0}\right)^2} - C_S - C_W \quad (15)$$

Przyjmując dopuszczalne przepięcia na poziomie 450 V uzyskuje się:

$$C_0 = \frac{0,1994}{\left(\frac{450}{0,3229}\right)^2} - 1,4 \cdot 10^{-9} - 80 \cdot 10^{-12} = 101,2 nF \quad (16)$$

co jest wielkością zbliżoną do wyznaczonej symulacyjnie.

## PODSUMOWANIE

Zgodnie z przeprowadzonym eksperymentem (rys.5), dla przyjętych wartości liczbowych modelu opisującego silnik jednofazowy o mocy 23W, pojemność  $C_0 = 100 nF$  jest wartością minimalną, przy której wartość chwilowa napięcia nie powinna powodować zapłonu łuku elektrycznego. W przyjętym przedziale poszukiwań wartość pojemności  $C_0$  nie wpływa znacząco na prąd  $i_s$  przedstawiony w równaniu (1). Natomiast zwiększenie wartości pojemności  $C_0$  powoduje wzrost wartości chwilowych prądu rozładowczego  $i_{Ls}$ .

## BIBLIOGRAFIA

1. Gacek Z., Technika wysokich napięć. Izolacja wysokonapięciowa w elektroenergetyce. Przepięcia i ochrona przed przepięciami. Skrypt uczelniany nr 2137 wyd.III. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1999.
2. PELELECTRIC Warystory Tlenkowe, Elementy ochrony przepięciowej <http://www.pelelectric.pl>
3. Smyczek J., Duer S., Sokołowski S., Żywno W., Zajkowski K., Podstawy Elektrotechniki i Elektroniki Dla Nielektryków, Laboratorium, Tom 1. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2008

4. Zajkowski K., Wyznaczenie parametrów dwójnika ograniczającego przepięcia pokomutacyjne na silniku. Computer Applications In Electrical Engineering. IEP Politechn.Poznańskiej, Poznań, 2008, s.47-48
5. Zajkowski K., Analysis of overvoltages on inductive system with varistor and capacitor. Academic Journals Issue 59 2009, Publ.by Poznan University of Technology 2009, p.87-97.
6. Zajkowski K., Duer S., Diagnoza uszkodzeń modułu tyrystorowego sterowanego grupowo w podgrzewaczach przepływowych wybranego producenta. Computer Applications In Electrical Engineering. IEP Politechn.Poznańskiej, Poznań, 2010, s.45-46
7. Zajkowski K., Analiza stanu nieustalonego w obwodach rezystancyjno-indukcyjnych w aspekcie minimalizacji przepięć komutacyjnych. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2011

## SURGE PROTECTION USING THE VARISTOR AND A CAPACITOR

### *Abstract*

*In the article the analysis of transient circuit containing inductance, varistor and a capacitor has been carried out. The purpose of this analysis is to determine the instantaneous value of electrical circuit that is useful for evaluating the quality of surge protection. The simulation results were compared with the experiment. We present a method for determining the value of the capacitor cooperating with varistor.*

Autorzy:

dr inż. **Konrad Zajkowski** – Politechnika Koszalińska, Wydział Mechaniczny, 75-620 Koszalin, ul. Raclawicka 15-17, tel. + 48 94 3478 426, konrad.zajkowski@tu.koszalin.pl

dr hab. inż. **Stanisław Duer** – Politechnika Koszalińska, Wydział Mechaniczny, 75-620 Koszalin, ul. Raclawicka 15-17, tel. + 48 94 3478 262, stanislaw.duer@tu.koszalin.pl