

**Robert Fiuk, Zbigniew Wróblewski**  
Politechnika Wrocławska, Instytut Energoelektryki  
Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław  
email: robert.fiuk@pwr.wroc.pl,  
zbigniew.wroblewski@pwr.wroc.pl

## **CYFROWE MODELOWANIE PRZEPIĘĆ ŁĄCZENIOWYCH GENEROWANYCH PRZEZ ŁĄCZNIKI PRÓŻNIOWE**

Streszczenie – Przedstawiono metodę cyfrowego modelowania przebiegów generowanych przez łączniki próżniowe podczas komutacji obwodów z silnikami indukcyjnymi klatkowymi niskiego napięcia, w których występuje zjawisko naturalnego ucięcia prądu. Modelowanie przeprowadzono z zastosowaniem programu komputerowego opracowanego przez autorów artykułu oraz programu ATP/EMTP

### **1 Informacje wstępne**

Łączniki próżniowe charakteryzują się bardzo korzystnymi właściwościami użytkowymi, w porównaniu z innymi rodzajami łączników, dzięki czemu znajdują powszechne zastosowanie w sieciach elektrycznych niskiego i średniego napięcia. Istnieje przekonanie, że wkrótce będzie to dominujący rodzaj łączników w zakresie średnich napięć. Już obecnie udział łączników próżniowych ŚN w światowym rynku wszystkich rodzajów łączników elektroenergetycznych ocenia się na 50 do 70 % [2,4,8], a w Europie wynosi on około 50 % [12]. Również w Polsce znaczenie tej konstrukcji aparatów łączeniowych cały czas wzrasta [5].

Specyficzną właściwością łączników próżniowych jest ich skłonność do generowania nadmiernych przebiegów łączeniowych, zwłaszcza w obwodach o charakterze indukcyjnym. Przebiegi te w pewnych warunkach mogą zagrażać izolacji zasilanych urządzeń, a także sieci elektrycznej i zainstalowanym w niej urządzeniom elektroenergetycznym. Są one szczególnie groźne dla izolacji silników indukcyjnych niskiego napięcia, w szczególności w warunkach częstych łączy realizowanych z użyciem styczników próżniowych. Ogranicza to zakres zastosowań tych łączników lub wymaga stosowania z nimi w sterowanych przez nie obwodach odpowiedniej ochrony przeciwprzebiegiowej, co zwiększa koszty realizacji tej techniki łączenia.

Niebezpieczne wartości przepięć łączeniowych mogą występować w przypadku zastosowania łączników próżniowych do komutacji obwodu z silnikami indukcyjnymi podczas:

- wyłączenia silnika zahamowanego lub w czasie jego rozruchu,
- załączania układu zawierającego krótką linię kablową i silnik w warunkach występowania przerywanego łuku prądu załączeniowego.

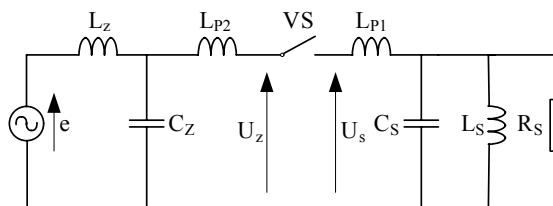
Przyczyną powstałych wówczas przepięć mogą być mechanizmy:

- naturalnego ucięcia prądu,
- wymuszonego (wirtualnego) ucięcia prądu,
- eskalacji napięcia,
- zapłonów późnych pojedynczych lub wielokrotnych (NSDD – Non Sustained Disruptive Discharge) [1,3,9,12].

Najpowszechniej występującym mechanizmem jest naturalne ucięcie prądu, pozostałe mechanizmy występują znacznie rzadziej, ponieważ muszą być spełnione określone warunki dla ich wystąpienia.

## 2 Naturalne ucięcie prądu

Zjawiska przepięciowe przy komutacji silnika indukcyjnego można analizować korzystając ze schematu zastępczego przedstawionego na rysunku 1, w którym  $L_z$  i  $C_z$  reprezentują indukcyjność i pojemność jednoczęstotliwościowego obwodu zasilania,  $L_S$ ,  $C_S$ ,  $R_S$ , indukcyjność, pojemność i rezystancję silnika.  $L_{P1}$  oraz  $L_{P2}$  odwzorowują indukcyjności połączeń. Układ ten pozwala na analizę zjawisk łączeniowych w obwodach trójfazowych symetrycznych z uziemionym punktem zerowym poprzez analizę przebiegów prądów i napięć w jednej fazie. W pozostałych fazach przebiegi te są takie same, lecz tylko przesunięte w czasie.



Rys. 1. Schemat zastępczy uproszczony do analizy procesów łączeniowych przy komutacji silnika indukcyjnego [10,12].

Naturalne ucięcie prądu następuje w wyniku nagłego zgaśnięcia łuku palącego się niestabilnie na stykach łącznika (rys.2a). Po rozwarciu styków łącznika w obwodzie, przedstawionym na rysunku 1, następuje między nimi zapłon łuku. Przy wartościach chwilowych prądu łuku

mniejszych niż pewna wartość graniczna  $I_{min}$ , zwana minimalnym prądem stabilnego palenia się łuku, łuk zaczyna palić się niestabilnie wskutek zachwiania bilansu energetycznego w plamce katodowej. W obwodzie pojawia się prąd  $i_{hf}$  o dużej częstotliwości

$$f_{hf} = \frac{1}{2\pi \sqrt{\frac{C_z C_s}{C_z + C_s} (L_{p1} + L_{p2})}} \quad (1)$$

zamykający się przez pojemności strony zasilającej i odbiorczej ( $C_z$  i  $C_s$ ) oraz łącznik. Prąd ten nakłada się na składową prądu o częstotliwości sieciowej (rys.2a). Ponieważ indukcyjność  $L_{p1}+L_{p2}$  jest bardzo mała, rzędu mikrohenrów, częstotliwość  $f_{hf}$  jest bardzo duża, rzędu setek kiloherców. Przy tak dużej częstotliwości reaktancje  $\omega_{hf}L_z$  i  $\omega_{hf}L_s$  są tak duże, że nie mają wpływu na wartość i przebieg generowanego prądu  $i_{hf}$ . Prąd dużej częstotliwości może zrównoważyć prąd o częstotliwości sieciowej komutowanego silnika i spowodować nagłe zmniejszenie prądu w obwodzie do wartości  $I_{uh}$  zbliżonej do zera i przerwanie obwodu przy niezerowej wartości prądu składowej podstawowej  $I_u$  płynącego przez indukcyjność  $L_s$  silnika, zwanej prądem ucięcia i przy napięciu  $U_{f0}$ . Energia zmagazynowana w indukcyjności  $L_s$  zaczyna oscylować w obwodzie  $L_s$ - $C_s$  z częstotliwością.

$$f_0 \approx \frac{1}{2\pi \sqrt{L_s C_s}} \quad (2)$$

Obecność w rzeczywistych obwodach rezystancji  $R_s$  uzwojeń silnika powoduje tłumienie przebiegu oscylacyjnego napięcia  $u_s(t)$ , zmniejszając jednocześnie jego częstotliwość. Napięcie na zaciskach silnika  $u_s(t)$  maleje do wartości  $U_{f0}$  w sposób tłumiony do zera (rys.2b). Napięcie od strony zasilania  $u_z(t)$  (rys.2c) wzrasta z częstotliwością

$$f_z = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_z C_z}} \quad (3)$$

w sposób tłumiony do chwilowej wartości źródła zasilania.

Wartości liczbowe oraz zależności opisujące przebiegi napięcia na zaciskach łącznika oraz elementów  $L_s$ ,  $C_s$  reprezentujących silnik, można wyznaczyć z praw Kirchhoffa lub też z bilansu energii pola elektrycznego i magnetycznego silnika w chwili ucięcia prądu. Ze względu na zagrożenie izolacji najbardziej interesująca jest wartość maksymalna oraz stromość narastania napięcia na zaciskach silnika. Przy pominięciu tłumienia, jako odgrywającego niewielką rolę w czasie  $t_m$ , odpowiadającym wystąpieniu pierwszej amplitudy napięcia o

częstotliwości własnej  $f_0$  obwodu, przebieg napięcia na zaciskach silnika można wyznaczyć z zależności

$$u_s(t) = U_{fm} \sqrt{(f_0 / f) \sin^2 \vartheta + \cos^2 \vartheta} \cdot \sin(\omega_0 t + \varepsilon) \quad (4)$$

Maksymalna wartość chwilowa tego napięcia jest natomiast określona zależnością

$$U_{smx} = U_{fm} \sqrt{(f_0 / f) \sin^2 \vartheta + \cos^2 \vartheta} \quad (5)$$

lub

$$U_{smx} = \sqrt{U_{f_0}^2 + I_u^2 Z_0^2} \approx I_u Z_0 \quad (6)$$

i jest osiągana po upływie czasu  $t_m$  od chwili wyłączenia, dla którego  $\sin(\omega_0 t_m + \varepsilon) = 1$ , tj. po upływie czasu

$$t_m = (\pi - \varepsilon) / 2\omega_0 \quad (7)$$

przy czym

$$\varepsilon = \arctg((f_0 / f) \operatorname{ctg} \vartheta) \quad (8)$$

$$U_{f_0} = U_{fm} \cos \vartheta \quad (9)$$

gdzie:

$\vartheta$  - kąt odpowiadający ucięciu prądu przed jego naturalnym przejściem przez zero,

$I_u$  - prąd ucięcia,

$f$  - częstotliwość napięcia źródła,

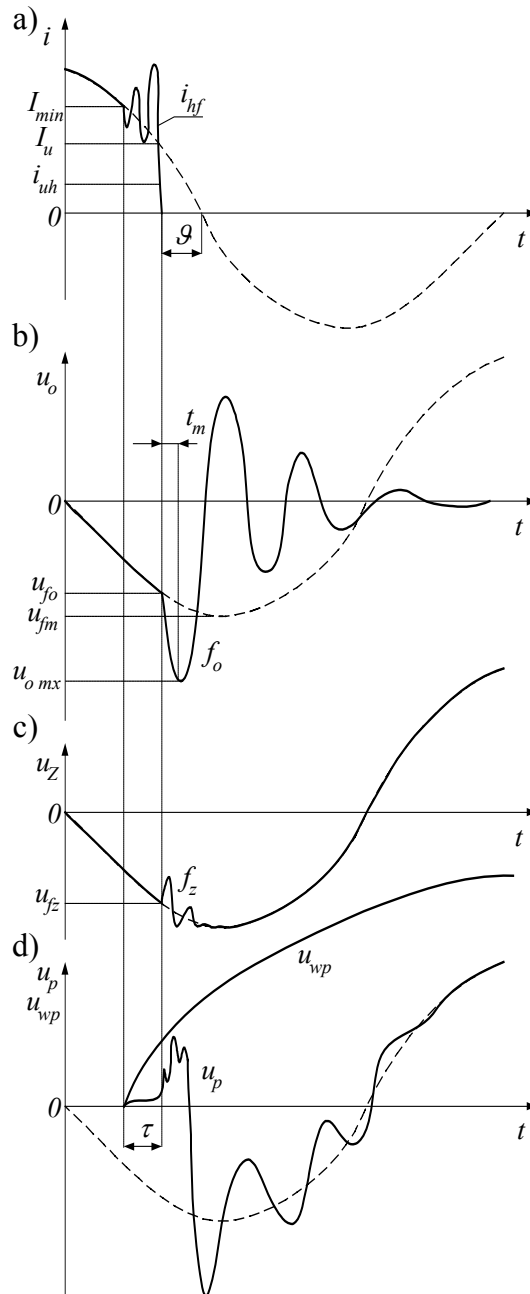
$U_{fm}$  - amplituda napięcia zasilającego,

$Z_0$  – impedancja charakterystyczna silnika.

Wartości przepięć łączeniowych zależą więc przede wszystkim (zal. 6) od wartości prądu ucięcia  $I_u$  oraz impedancji charakterystycznej silnika  $Z_0$ , określonej zależnością

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L_s}{C_s}} \quad (10)$$

Podstawową trudnością przy szacowaniu, zgodnie z zależnością (6), wartości maksymalnej przepięć powstających podczas komutacji silnika łącznikiem próżniowym jest z reguły nieznanomość dokładnych wartości zarówno impedancji charakterystycznej silnika  $Z_0$ , jak i prądu ucięcia  $I_u$  łącznika. Podawane niekiedy w katalogach łączników próżniowych dane dotyczące prądów ucięcia są mało przydatne do tych obliczeń, gdyż wobec dotychczasowego braku odpowiednich przepisów normalizacyjnych, prądy te są wyznaczone przez producentów w różnych obwodach probierczych (co może dawać nawet kilkaset procentowe różnice) i nie ma dotąd metod umożliwiających przeliczanie tych wartości na warunki rozpatrywanego obwodu elektrycznego [11].



Rys. 2. Przebiegi prądu i napięcia podczas komutacji silnika indukcyjnego: a) prąd w obwodzie łącznika; b) napięcia na zaciskach silnika; c) napięcia zasilania; d) napięcia powrotne [12]

Równie duży wpływ na wartość prądu ucięcia  $I_u$  ma rodzaj materiału styków łącznika. Większość obecnie produkowanych łączników próżniowych ma styki wykonane ze stopu CuCr (Miedź – Chrom), dla których wartość maksymalnego prądu ucięcia może w niekorzystnych warunkach osiągnąć nawet 15A [6]. Obecnie prowadzone są badania nad nowymi materiałami stykowymi, charakteryzującymi się małymi wartościami prądu ucięcia. Najbardziej obiecującymi materiałami z tej grupy są kompozyty WCuAg oraz WCCu, dla których maksymalna wartość prądu ucięcia nie przekracza 5A [7].

### 3 Wyznaczanie impedancji charakterystycznej silnika

Impedancję charakterystyczną silnika  $Z_o$  można oszacować, zgodnie ze wzorem (10), na podstawie pomiarów lub obliczeń jej składowych, indukcyjności  $L_S$  oraz pojemności  $C_S$ . W większości dotychczasowych prac indukcyjność  $L_S$  była obliczana na podstawie danych katalogowych silnika z wykorzystaniem zależności

$$L_S = \frac{U_{fn} \sqrt{1 - \cos \varphi_z}}{I_m \cdot \omega} \quad (11)$$

w której:  $U_{fn}$  – napięcie znamionowe fazowe,  $I_m$  – prąd rozruchowy znamionowy,  $\cos \varphi_z$  – współczynnik mocy w stanie zwarcia silnika. W obliczeniach tych zakładano przeważnie, że pojemność wejściowa  $C_S$  niskonapięciowych silników elektrycznych zmienia się w sposób liniowy. Wyznaczane przy tych ustaleniach charakterystyki  $Z_o = f(P)$ , gdzie  $P$  – moc znamionowa silnika, umożliwiają wprowadzić wyznaczenie charakterystyk  $U_{smx} = f(I_u)$ ,  $U_{smx} = f(P)$  i  $U_{smx} = f(Z_o)$ , zapewniających wystarczającą dla praktyki dokładność oszacowań wartości maksymalnych spodziewanych przepięć łączeniowych [10], lecz wyznaczanie tych charakterystyk w taki sposób jest jednak bardzo czasochłonne i pracochłonne.

Istotne uproszczenie, przy jednoczesnym zwiększeniu dokładności obliczeń impedancji  $Z_o$ , można uzyskać przez zastosowanie, przedstawionego w pracy [13], sposobu obliczania pojemności  $C_S$  i indukcyjności  $L_S$ . W pracy tej wykazano, że pojemność wejściowa  $C_S$  silników indukcyjnych nie jest wielkością liniową i zależy od prędkości synchronicznej  $n_s$  silnika (liczby par biegunów). Można ją wyznaczyć korzystając z zależności:

- dla silnika o  $n_s = 3000$  obrotów na minutę

$$C_S = 0,25 \sqrt{P_N} \quad (12)$$

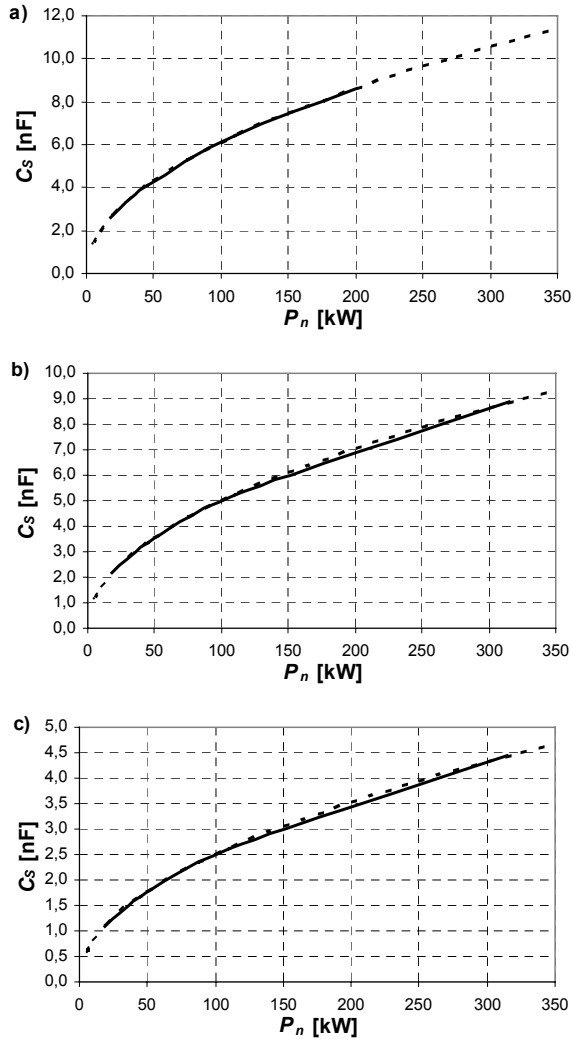
- dla silnika o  $n_s = 1500$  obrotów na minutę

$$C_S = 0,5 \sqrt{P_N} \quad (13)$$

- dla silnika o  $n_s = 1000$  obrotów na minutę

$$C_s = 0,61\sqrt{P_N} \quad (14)$$

Wyniki obliczeń z użyciem tych zależności są w dużej zgodności z wynikami empirycznymi (rys.3).



Rys. 3. Pojemność wejściowa silników indukcyjnych w zależności od mocy znamionowej  $P_n$  oraz prędkości synchronicznej  $n_s$ : obliczona ze wzorów (12)-(14) (linie kreskowane) oraz zmierzona (linie ciągłe);: a)  $n_s = 3000$  [obr/min] b)  $n_s = 1500$  [obr/min] c)  $n_s = 1000$  [obr/min] [14]

Indukcyjność  $L_S$  silnika można natomiast wyznaczyć z zależności [13]

$$L_S = \frac{U_N^2 \cos \varphi_N \eta}{100 \pi k_r P_N} \quad (15)$$

w której:  $U_N$  – napięcie znamionowe,  $\cos \varphi_N$  – znamionowy współczynnik mocy,  $\eta$  – sprawność znamionowa silnika,  $k_r$  – współczynnik rozruchu,  $P_N$  – moc znamionowa silnika. Są to wszystko podstawowe parametry silnika, których wartości są podawane na jego tabliczce znamionowej.

#### 4 Dopuszczalne wartości napięć łączeniowych

Urządzenia elektryczne, które oprócz izolacji głównej (fazowej, międzyfazowej) mają także izolację szeregową (międzyzwojową, międzywarstwową) są szczególnie wrażliwe na przebiegi łączeniowe, które mogą doprowadzić do uszkodzenia izolacji międzyzwojowej, przede wszystkim w pobliżu początków i końców wyprowadzeń uzwojeń. Spośród tych urządzeń silniki elektryczne odznaczają się najmniejszą odpornością izolacji międzyzwojowej na strome przebiegi napięciowe. Dopuszczalne dla izolacji silników elektrycznych wartości napięć łączeniowych  $U_d$  powinny być ustalane metodami statystycznymi z uwzględnieniem, między innymi, rodzaju i warunków eksploatacji silnika, napięcia znamionowego jego izolacji oraz częstości wykonywania operacji łączeniowych. Wobec dużej różnorodności czynników mających wpływ na zmniejszenie wytrzymałości elektrycznej izolacji silnika dopuszczalne jest szacowanie napięcia  $U_d$  na podstawie prób napięciowych, określonych przez normy i przepisy eksploatacji, jakim powinien być poddany silnik zarówno nowy jak i eksploatowany.

Wytrzymałość izolacji nowych silników niskiego napięcia można określić na podstawie badań wytrzymałości izolacji uzwojenia w stosunku do kadłuba maszyny, przeprowadzonych zgodnie z wymaganiami normy [14]. Badania te przeprowadza się napięciem probierczym o częstotliwości przemysłowej i wartości napięcia próby określonej zależnością  $2U_N + 1\text{kV}$  (lecz nie mniejszą niż 1500V). Polegają one na stopniowym zwiększaniu napięcia, od wartości nie większej od połowy pełnego napięcia próby, tak by w czasie dłuższym niż 10 sekund osiągnąć wartość wymaganą przez normę. Następnie napięcie probiercze powinno być utrzymywane przez 1 minutę, w tym czasie nie powinno wystąpić uszkodzenie izolacji (przebiecie). Zatem dla silników nowych wartość  $U_d$  można obliczyć z zależności

$$U_d = \sqrt{2}(2U_N + 1000) \text{ [V]} \quad (16)$$

I tak, np. dla silników o napięciu znamionowym 400 V  $U_d$  jest równe 2538 V.



W miarę upływu czasu eksploatacji wytrzymałość izolacji silników stopniowo maleje. Można ją określić na podstawie próby napięciowej izolacji uzwojeń stojana przeprowadzonej zgodnie z normą [16], która silniki o mocy powyżej 50 kW wymaga badać napięciem przemiennym o wartości równej 80% wartości napięcia stosowanego w próbie wytrzymałości izolacji silnika nowego (lub podanej przez producenta), określonej wzorem (17). Czas trwania takiej próby to 1 minuta. Wytrzymałość izolacji silników eksploatowanych o mocach mniejszych niż 50 kW, również może być określana na podstawie wyżej opisanej próby [17]. Zatem dla silników eksploatowanych wartość  $U_{dE}$  można wyznaczyć z zależności

$$U_{dE} = 0,8 \cdot \sqrt{2}(2U_N + 1000) \text{ [V]} \quad (17)$$

Dla silników o napięciu znamionowym 400 V  $U_{dE}$  jest równe 2030 V.

## 5 Metoda cyfrowego modelowania przebiegów

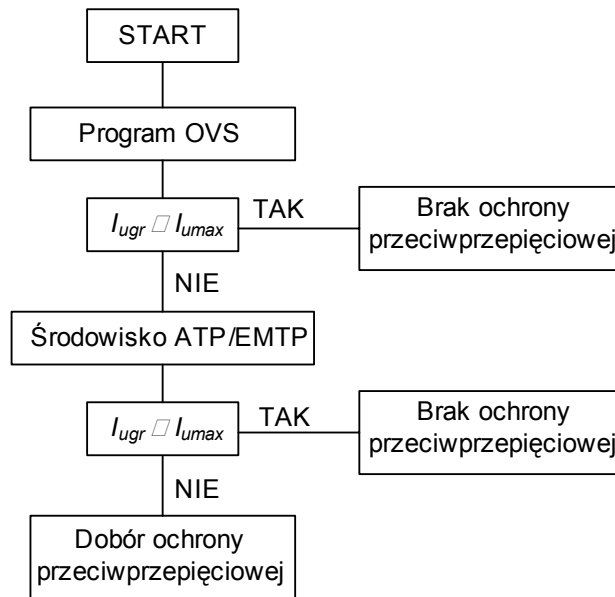
Proponowana metoda polega na kolejnym wykonywaniu następujących działań:

- wyznaczeniu, dla danego obwodu elektrycznego, granicznej wartości prądu ucięcia  $I_{ugr}$ , przy której może wystąpić przebieg łączeniowy o wartości zagrażającej izolacji silnika, tj. większej od wartości  $U_d$  lub  $U_{dE}$ , określonych odpowiednio przez zależności (15) i (16);
- ustaleniu wartości maksymalnej prądu ucięcia  $I_{umax}$  dla danego łącznika próżniowego; można ją wyznaczyć dla określonego rodzaju materiału, z którego zostały wykonane styki łącznika próżniowego, korzystając z wyników niezależnych badań;
- określeniu możliwości rezygnacji ze stosowania ochrony przebiegowej (gdy  $I_{ugr} \leq I_{umax}$ ) lub potrzeby jej zastosowania (gdy  $I_{ugr} \geq I_{umax}$ ) i doborze skutecznej ochrony przebiegowej.

Działania te są realizowane z użyciem:

- programu komputerowego „OVS”,
- pakietu ATP/EMTP.

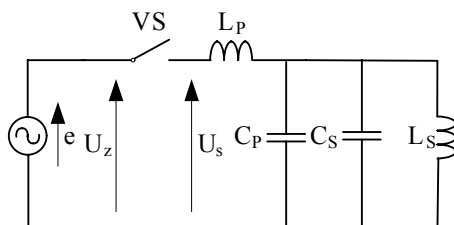
Program komputerowy „OVS” służy do szybkiego wyznaczania (z wystarczającą dla praktyki dokładnością) żądanych charakterystyk (wyznaczenie  $I_{ugr}$ ), natomiast środowisko ATP/EMTP umożliwia pełniejszą i znacznie dokładniejszą (niż program OVS) ocenę zagrożenia przebiegowego w analizowanym obwodzie. Obliczenia w środowisku ATP/EMTP są jednak znacznie bardziej czasochłonne i pracochłonne oraz wymagają dobrej znajomości tego środowiska. Na rysunku 4 przedstawiono algorytm decyzyjny proponowanej metody.



Rys. 4. Schemat decyzyjny metody cyfrowego modelowania przebiegów.

## 6 Program komputerowy OVS do szacowania maksymalnych wartości przebiegów łączeniowych

Opracowany przez autorów artykułu program komputerowy, o nazwie OVS, jest z założenia praktycznym narzędziem pozwalającym na szybkie wyznaczanie charakterystyk zależności wartości maksymalnych spodziewanych przebiegów łączeniowych  $U_{smx}$  od wartości prądu ucięcia  $I_u$  łącznika i parametrów znamionowych komutowanego silnika indukcyjnego, a także umożliwiającym wyznaczanie wartości granicznej prądu ucięcia powyżej której może wystąpić przebieg łączeniowy o wartości zagrażającej izolacji silnika, tj. większej od wartości  $U_d$  lub  $U_{dE}$ , określonych odpowiednio przez zależności (16) i (17)). W programie tym obwód elektryczny komutowanego silnika jest reprezentowany przez schemat zastępczy pokazany na rys.5 (prostszy od schematu z rys.1), gdzie LP i CP odwzorowują indukcyjność i pojemność przewodów zasilających, natomiast CS oraz LS są odpowiednio pojemnością wejściową silnika oraz jego indukcyjnością.

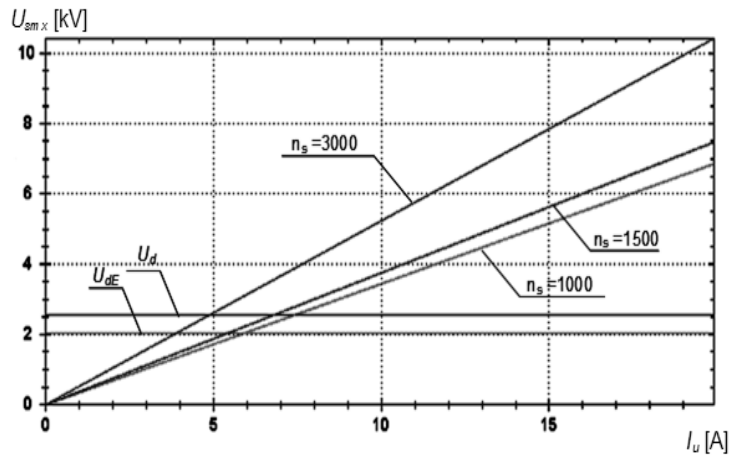


Rys. 5. Schemat zastępczy obwodu do analizy napięć, odwzorowywanego w programie komputerowym OVS

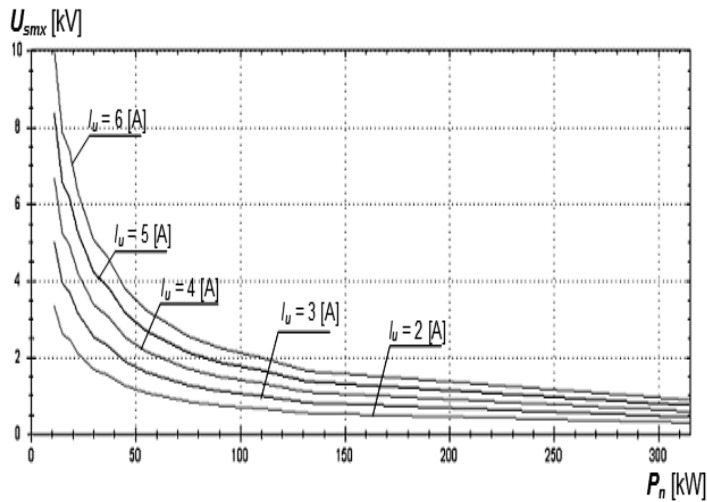
Program pozwala na wyznaczanie, dla rozpatrywanych typów silników klatkowych, następujących charakterystyk:

- zależności wartości maksymalnych napięć  $U_{smx}$  od wartości prądu ucięcia  $I_u$  łącznika (rysunek 6),
- wartości maksymalnych napięć  $U_{smx}$  w funkcji mocy znamionowej silnika (rysunek 7),
- wartości maksymalnych napięć  $U_{smx}$  w funkcji impedancji charakterystycznej  $Z_0$  silnika (rysunek 8),
- wartości maksymalnych napięć  $U_{smx}$  w funkcji długości kabla zasilającego silnik oraz rodzaju jego izolacji (rysunek 9),
- wartości indukcyjności  $L_S$  w funkcji mocy znamionowej silnika (rysunek 10),
- wartości pojemności  $C_S$  w funkcji mocy znamionowej silnika,
- wartości maksymalnych napięć  $U_{smx}$  w funkcji znamionowego współczynnika mocy  $\cos \varphi_N$  silnika,
- wartości maksymalnych napięć  $U_{smx}$  w funkcji znamionowego współczynnika rozruchu  $Kr$  silnika,
- wartości maksymalnych napięć  $U_{smx}$  w funkcji sprawności  $\eta$  silnika.

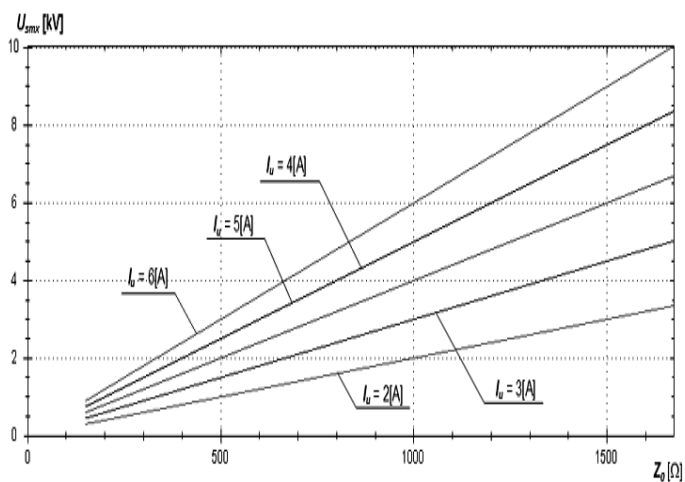
Znajomość tych charakterystyk pozwala na pełniejszą i szybszą niż wcześniej ocenę zagrożenia przepięciowego w analizowanych obwodach oraz jego minimalizację (m.in. w drodze odpowiedniego doboru parametrów silnika, łącznika próżniowego, kabli zasilających i środków ochrony przepięciowej) i to już na etapie projektowania tych obwodów.



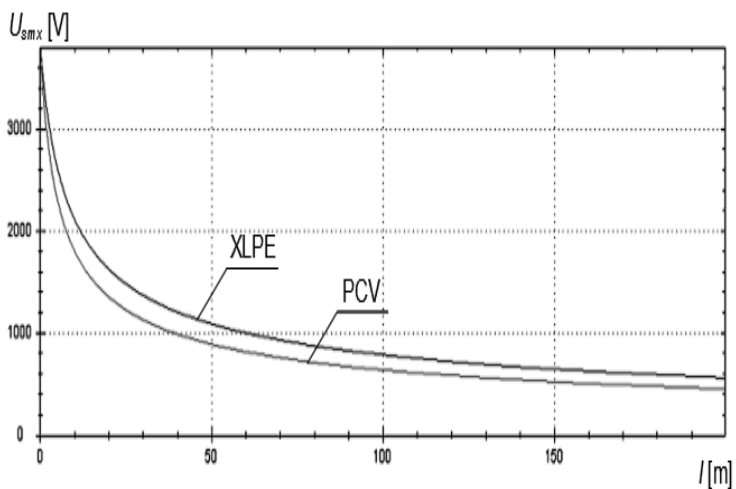
Rys. 6. Charakterystyki zmian wartości maksymalnych napięć  $U_{smx}$  w funkcji prądu ucięcia  $I_u$  dla silników o mocy znamionowej  $P_n = 90\text{kW}$  i różnych prędkościach synchronicznych



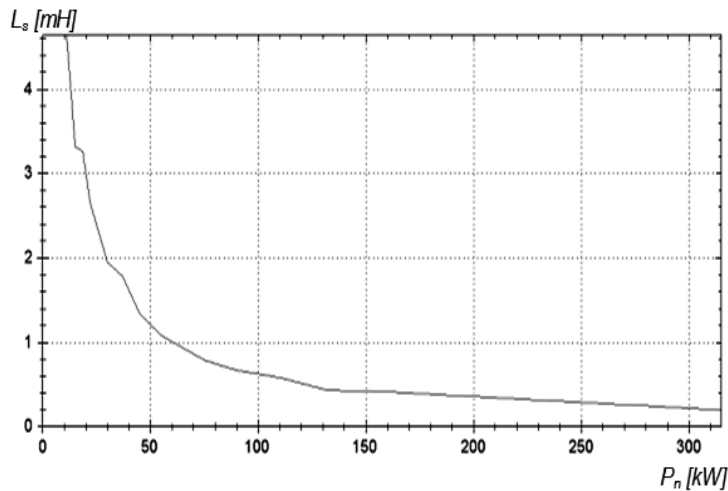
Rys. 7. Charakterystyki zmian wartości maksymalnych napięć  $U_{smx}$  w funkcji mocy znamionowej  $P_n$  silników o prędkości synchronicznej 1500 obrotów na minutę i prądu ucięcia  $I_u$



Rys. 8. Charakterystyki zmian wartości maksymalnych napięć łączeniowych  $U_{smx}$  w funkcji impedancji charakterystycznej  $Z_0$  i mocy znamionowej  $P_n$  silników o prędkości synchronicznej 1500 obrotów na minutę przy różnych prądach ucięcia  $I_u$



Rys. 9. Charakterystyki zmian wartości maksymalnych napięć  $U_{smx}$  w funkcji długości kabla zasilającego oraz rodzaju jego izolacji dla silnika o mocy znamionowej  $P_n = 30$  kW przy prądzie  $I_u = 5$  A

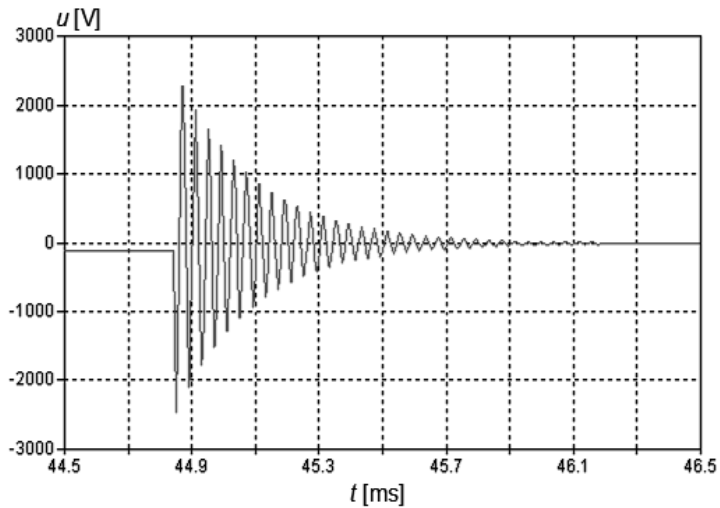


Rys. 10. Przykładowa charakterystyka zmian wartości indukcyjności  $L_S$  w funkcji mocy znamionowej silnika o prędkości synchronicznej 1500 obrotów na minutę

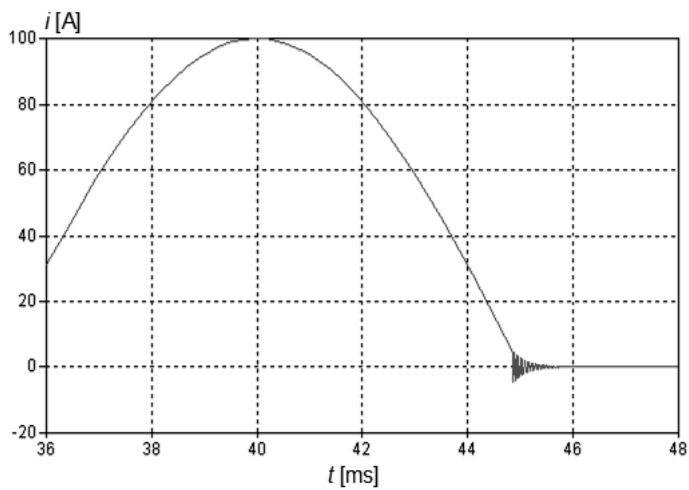
## 7 Modelowanie przebiegów w programie ATP/EMTP

Dokładniejsze niż w programie OVS wyniki otrzymuje się z zastosowaniem programu komputerowego opracowanego przez autorów artykułu z zastosowaniem procedur obliczeniowych programu (środowiska) ATP/EMTP, który jest szeroko wykorzystywany w modelowaniu procesów przejściowych w sieciach elektroenergetycznych i pozwala na modelowanie układów o rzeczywistych parametrach skupionych lub rozłożonych oraz na modelowanie elementów o charakterystykach zarówno stałych jak i zmiennych. W programie tym zaimplementowano obwód do analizy przebiegów łączeniowych, przedstawiony na rys.1 i zamodelowano mechanizm naturalnego ucięcia prądu. W wyniku przeprowadzonych eksperymentów obliczeniowych wyznaczono przebiegi zmian napięć i prądów w różnych punktach analizowanego obwodu. Przykładowe przebiegi czasowe napięcia i prądu płynącego przez zamodelowany silnik pokazano odpowiednio na rys.11 i rys. 12. W przykładzie tym silnik był połączony z łącznikiem próżniowym kablem YAKY 4x35mm<sup>2</sup> o długości 50 metrów.

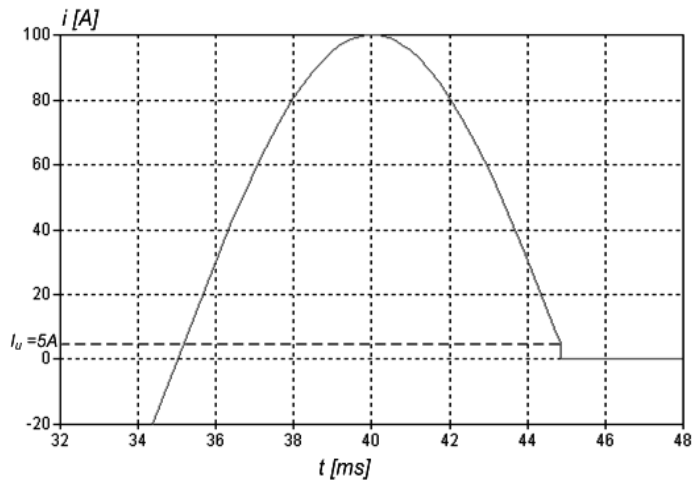
Rysunek 13 przedstawia natomiast, odpowiadający analizowanemu przypadkowi, przebieg prądu wyłączanego przez zamodelowany łącznik próżniowy. Jak widać, wyłączenie obwodu nastąpiło z „ucięciem prądu”, przy  $I_u = 5$  A.



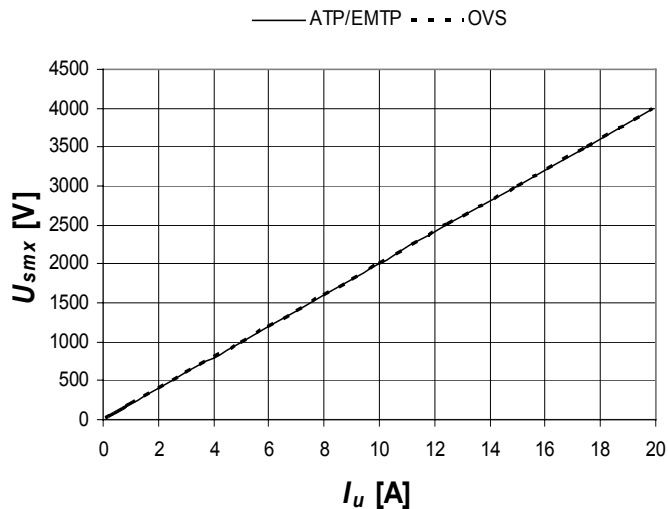
Rys. 11. Przykładowy przebieg napięcia na zaciskach zamodelowanego silnika o mocy znamionowej 30 kW i prędkości synchronicznej 1500 obrotów na minutę



Rys. 12. Przykładowy przebieg prądu na zaciskach zamodelowanego silnika o mocy znamionowej 30 kW i prędkości synchronicznej 1500 obrotów na minutę



Rys. 13. Przykładowy przebieg prądu wyłączanego przez zamodelowany łącznik próżniowy,  $i_u$  – prąd ucięcia



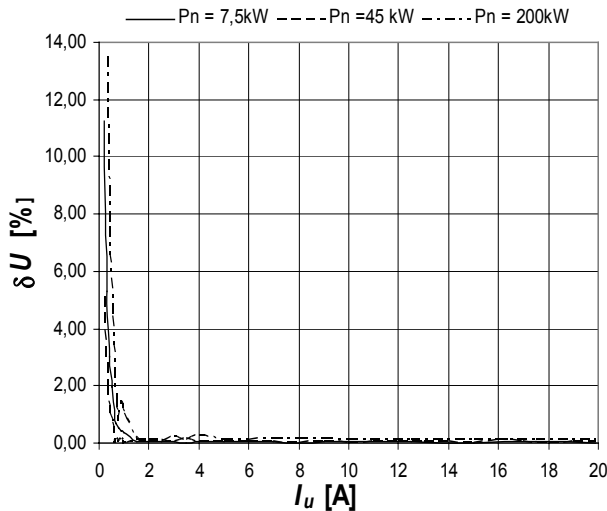
Rys. 14. Porównanie charakterystyk wartości maksymalnych spodziewanych napięć łączeniowych  $U_{smx}$  w funkcji prądu ucięcia  $i_u$ , dla silnika o mocy znamionowej 200 kW i prędkości synchronicznej 1000 obrotów na minutę

W celu weryfikacji i oceny przydatności praktycznej opracowanego programu OVS przeprowadzono analizę porównawczą charakterystyk wartości maksymalnych napięć  $U_{smx}$  w funkcji prądu ucięcia  $i_u$ , wy-

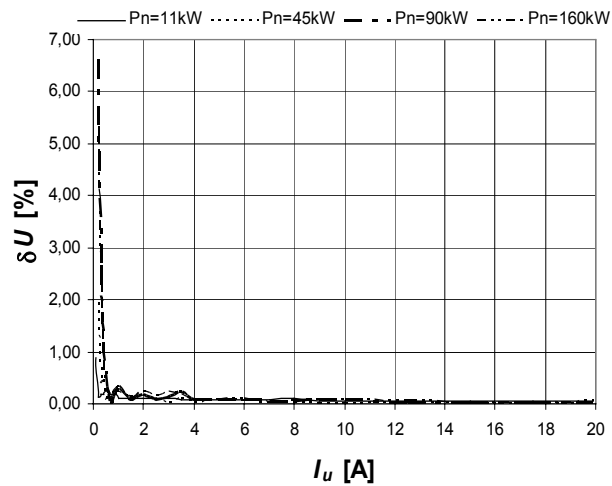


znaczonych dla obwodu z rysunku 4 z zastosowaniem programu OVS oraz programu ATP/EMTP, dla silników o różnych mocach znamionowych i różnych prędkościach synchronicznych. Analiza ta wykazała bardzo dużą porównywalność tych charakterystyk (rysunek 14).

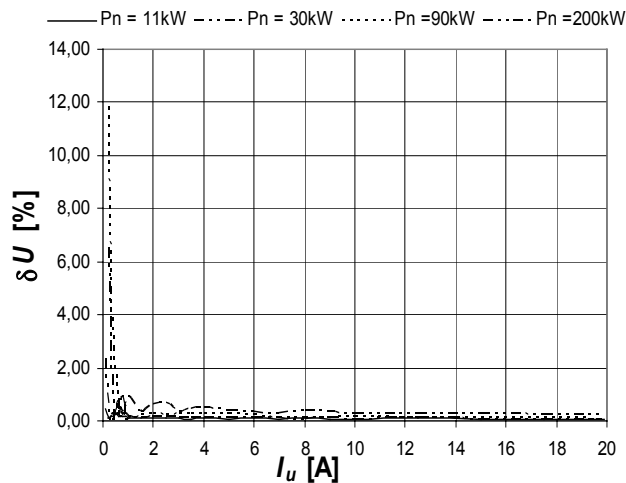
Bardzo małe różnice procentowe  $\delta U\%$  pomiędzy tymi charakterystykami, nieznacznie przekraczające dla niektórych silników 10% (rys. 15 – rys.17), dowodzą w pełni wystarczającej dokładności i przydatności praktycznej opracowanego programu komputerowego OVS do obliczeń przepięć łączeniowych w obwodach silników indukcyjnych sterowanych łącznikami próżniowymi. Należy przy tym podkreślić, że te niewielkie różnice występują tylko w zakresie bardzo małych wartości prądu ucięcia, mniejszych od 0,5 A, przy których przepięcia są już bardzo małe i nie stanowią zagrożenia dla izolacji sterowanych urządzeń.



Rys. 15. Różnice procentowe pomiędzy wartościami maksymalnymi spodziewanych przepięć łączeniowych wyznaczonych z zastosowaniem programów OVS i ATP/EMTP dla trzech silników o mocach znamionowych 7,5 kW, 45 kW, 90 kW i prędkości synchronicznej 1000 obrotów na minutę



Rys. 16. Różnice procentowe pomiędzy wartościami maksymalnymi spodziewanych prądów łączeniowych wyznaczonych z zastosowaniem programów OVS i ATP/EMTP dla czterech silników o mocach znamionowych 11 kW, 45 kW, 90 kW, 160kW i prędkości synchronicznej 1500 obrotów na minutę



Rys. 17. Różnice procentowe pomiędzy wartościami maksymalnymi spodziewanych prądów łączeniowych wyznaczonych z zastosowaniem programów OVS i ATP/EMTP dla czterech silników o mocach znamionowych 11 kW, 30 kW, 90 kW, 200kW i prędkości synchronicznej 3000 obrotów na minutę

## 8 Uwagi i wnioski

Przedstawiona metoda cyfrowego modelowania przebiegów łączeniowych generowanych przez łączniki próżniowe w obwodach z silnikami indukcyjnymi klatkowymi niskiego napięcia, składająca się z programu komputerowego OVS oraz programu wykorzystującego procedury obliczeniowe środowiska ATP/EMTP, umożliwi pełniejszą, dokładniejszą i szybszą niż dotychczas ocenę zagrożenia napięciowego w analizowanych obwodach, a tym samym jego minimalizację, zarówno w eksploatacji jak i na etapie projektowania tych obwodów, poprzez odpowiedni dobór elementów obwodu.

Dokładniejsze lecz bardziej czasochłonne obliczenia wykorzystujące program ATP/EMTP są bardziej przydatne w pracach projektowych, od których wymaga się dużej dokładności, a nieco mniej dokładne, lecz znacznie prostsze i szybsze w realizacji obliczenia wykonywane z zastosowaniem programu OVS mogą być stosowane głównie w eksploatacji.

## Literatura

- [1] Anderson E., Karolak J., Gadaliński A., Tąkiel J.: Badanie wyłączników próżniowych firmy ZWAR. *Energetyka* 1995, nr 2 (Biul. len.).
- [2] Brunie H.: Circuit-Breakers past, present and future. *Electra* N°208 June 2003.
- [3] Chaly A. M., Denisov L. V., Poluyanov V. N., Poluyanova I. N.: Peculiarities of Non - sustained disruptive discharges at interruption of cable/line charging current. XXth International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. Tours 2002.
- [4] Fink H., Renz R.: Future trends In vacuum technology applications. XXth International Symposium on Discharger and Electrical Insulation in Vacuum – Tours 2002.
- [5] Fiuk R.: Wyłączniki średnich napięć eksploatowane w Polsce. *Elektro.Info* 9/2005.
- [6] Glatze W., Kny Rieder W.F., Schusseck M.: The Influence of composition and Cr particle size of Cu/Cr contacts on chopping current, contact resistance, and breakdown voltage in vacuum interrupters. *IEEE Transactions on Components, Hybrids and Manufacturing Technology* 1989, vol.12, No 2.

- 
- [7] Gentsch D., Lindmayer M., Temborius S.: Properties of WCAg and WCCu for Vacuum Contactors. IEEE Transactions on Plasma Science, vol.31, No. 5, 2003.
  - [8] Slade P.G., Smith R.K.: The application of Culter-Hammer vacuum interrupter to switch, control land protest the World's distribution circuits. Cultler-Humer 1999.
  - [9] Smeets R.P.P., Lathouwers A.G.A.: Non-sustained disruptive discharges: test experiences, standardization status and network consequences. IEEE Transactions on 2002, Volume 9, 194-200.
  - [10] Wróblewski Z.: Przepięcia łączeniowe w obwodach silników ze stycznikami próżniowymi. Przegląd Elektrotechniczny 1987, nr 1-2, 6-11.
  - [11] Wróblewski Z.: Analiza możliwości i celowości normalizacji badań prądu ucięcia łączników próżniowych. Przegląd Elektrotechniczny 1984, nr 9, 337-342.
  - [12] Wróblewski Z.: Badanie i symulacja cyfrowa wybranych właściwości łączników próżniowych. Monografia z serii Postępy Wielkich Mocy i Wysokich Napięć Komitetu Elektrotechniki Polskiej Akademii Nauk, Oficyna Wydawnicza PWr., Wrocław 2005.
  - [13] Cahier technique no. 198 – Vacuum switching. Schneider Electric 2000.
  - [14] Tavrida Electric: Overvoltages Measurement and Statistical Simulation 2000.
  - [15] PN-EN 60034-15:2002 – Maszyny elektryczne wirujące. Część 15: Poziomy wytrzymałości na udary napięciowe maszyn wirujących prądu przemiennego o uzwojeniach stojana z ukształtowanymi zezwojów.
  - [16] PN-E-O4700:1998 – Wytyczne przeprowadzania pomontażowych badań odbiorczych.
  - [17] Przepisy eksploatacji urządzeń elektrycznych. Dział I zeszyt 8. „WEMA” Warszawa 1987.

## **DIGITAL MODELLING OF OVERVOLTAGE GENERATED BY VACUUM CONNECTOR**

Summary – The method of the digital modelling of the overvoltages generated by vacuum connectors during the commutation of the circuit made of the low voltage induction motors, was described. The modelling were carried out with use of computer programme worked out by authors of the paper, as well as programme ATP/EMTP.