

## AUTONOMICZNE PRĄDNICE INDUKCYJNE O ZMIENNYM CZASIE WŁĄCZENIA POJEDYNCZEJ BATERII KONDENSATORÓW REGULACYJNYCH

Zdzisław Gientkowski, Roman Żarnowski, Jan Mućko

Instytut Elektrotechniki  
Akademia Techniczno-Rolnicza w Bydgoszczy  
ul. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz

W artykule przedstawiono opis matematyczny oraz wyniki badań symulacyjnych i eksperymentalnych autonomicznej prądnicy indukcyjnej o wzbudzeniu kondensatorowym z jedną baterią kondensatorów regulacyjnych komutowaną za pomocą szybkiego łącznika tyrystorowego. Opisano konstrukcję łącznika. Oceniono parametry generowanej energii.

*Słowa kluczowe:* autonomiczna prądnica indukcyjna, wzbudzenie kondensatorowe, szybki łącznik półprzewodnikowy, komutacja baterii kondensatorów

### 1. WSTĘP

Praktyczne wykorzystanie maszyny indukcyjnej (MI) w stanie autonomicznej pracy prądnicowej jest możliwe jedynie przy współpracy z regulowanym źródłem mocy biernej (ŻMB). Źródło to dostarcza moc bierną dla maszyny i obciążenia, a także spełnia rolę stabilizatora napięcia wyjściowego prądnicy, które jest zależne od wielkości i charakteru obciążenia.

W chwili obecnej ŻMB dla autonomicznych prądnic indukcyjnych (API) można podzielić na dwie grupy: kondensatorowe – składające się z podzielonych na stopnie baterii kondensatorów komutowanych w sposób dyskretny za pomocą różnego rodzaju łączników (najczęściej półprzewodnikowych), i przekształtnikowe - którymi najczęściej są w odpowiedni sposób sterowane układy przekształtnikowe o strukturze falownika napięcia z MSI.

Zarówno układy pierwszej, jak i drugiej grupy posiadają swoje zalety i wady. Do zalet układów pierwszej grupy zalicza się przede wszystkim niski koszt, zapewnienie samowzbudzenia prądnicy oraz sinusoidalnego kształtu generowanego przez prądnicę napięcia. Do wad - stosunkowo „miękkie” charakterystyki zewnętrzne oraz dyskretny sposób stabilizacji napięcia.

Najistotniejszą zaletą drugiej grupy ŻMB jest możliwość płynnego sterowania mocą bierną, zapewniająca płynną stabilizację napięcia wyjściowego oraz dużą „sztywność” charakterystyk zewnętrznych prądnicy. Wadami takich układów są:

- niesinusoidalny kształt napięcia wyjściowego prądnicy, wynikający z zasady kształtowania krzywej prądu w układzie falownika (konieczność stosowania filtrów),

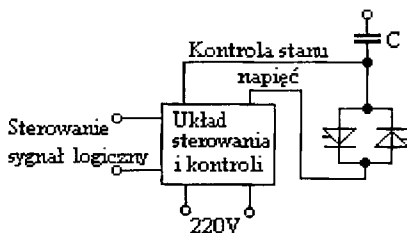
- trudności z samowzbudzeniem prądnicy (konieczne jest stosowanie dodatkowych układów),
- stosunkowo wysoki koszt API z układami tej grupy, przekraczający o 60-70% koszt analogicznych API z kondensatorowymi ŻMB.

Wymienione wyżej aspekty powodują, że nadal są prowadzone badania nad API o wzbudzeniu kondensatorowym, a problematyka sterowania mocą bierną w takich układach jest aktualna.

## 2. UNIWERSALNY ŁĄCZNIK PÓŁPRZEWODNIKOWY

Warunki pracy łączników półprzewodnikowych w układach stabilizacji napięcia API o wzbudzeniu kondensatorowym różnią się od warunków w statycznych kompensatorach mocy biernej [1.2]. Do najistotniejszych różnic należy zaliczyć konieczność komutowania nie rozładowanych kondensatorów, zmieniającą się wraz z obciążeniem częstotliwość oraz częste przełączanie.

Dla potrzeb API opracowano uniwersalny moduł łącznika półprzewodnikowego, umożliwiający tworzenie różnych konfiguracji łączników (diodowo-tyrystorowe, dwutyristorowe) zarówno na napięcie fazowe, jak i międzyfazowe, pozwalający na bezударową komutację stopni kondensatorów regulacyjnych, połączonych w gwiazdę lub trójkąt. Schemat funkcjonalny wariantu dwutyristorowego opracowanego łącznika przedstawiono na rysunku 1.

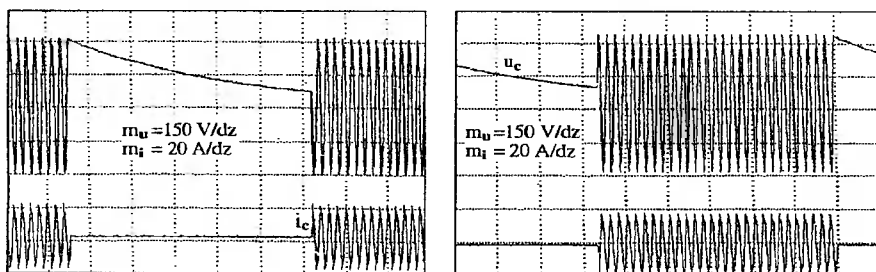


Rys. 1. Schemat funkcjonalny łącznika półprzewodnikowego dla układów stabilizacji napięcia API

Najistotniejszą cechą, odróżniającą ten łącznik od istniejących rozwiązań łączników, jest samokontrola napięcia na łączniku i załączanie kondensatora w najbliższym momencie czasowym, w którym możliwe jest jego bezударowe załączenie. Warunki załączania łącznika są następujące:

- istnienie napięcia zasilania łącznika,
- występowanie sygnału zezwolenia załączania z regulatora,
- wypadkowe napięcie na łączniku (wartość chwilowa) bliskie zero (przyjęto  $\leq 5$  V).

Tak skonstruowany łącznik umożliwia załączanie nie rozładowanych kondensatorów, przy czym maksymalny czas odpowiedzi na sygnał sterujący wynosi pół okresu. Całkowity czas załączania trójfazowego stopnia kondensatorów regulacyjnych nie przekracza 25-30 milisekund, a maksymalny udar prądowy przy załączaniu nie przekracza wartości ustalonej prądu kondensatora. Potwierdzają to oscylogramy na rysunku 2.



Rys. 2. Oscylogramy napięcia i prądu kondensatora o pojemności  $200 \mu\text{F}$  dla dwóch różnych chwil załączania

Opracowany łącznik posiada prosty układ sterowania i może być stosowany we wszystkich innych układach, w tym również w układach zasilanych napięciem odkształconym.

### 3. OPIS BADANYCH UKŁADÓW API

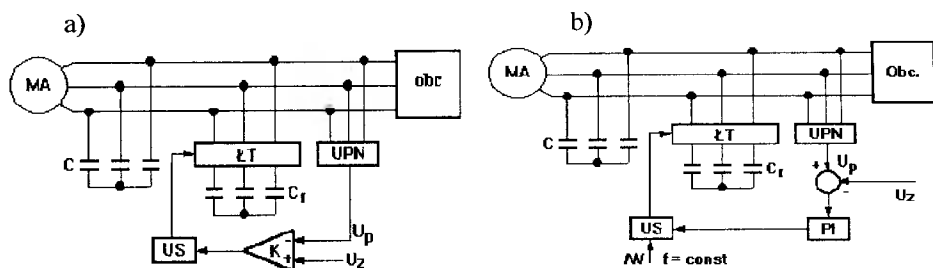
Badana prądnica indukcyjna składa się z maszyny asynchronicznej MA, baterii kondensatorów wzbudzających C, baterii kondensatorów regulacyjnych  $C_r$ , układu pomiaru napięcia UPN, trójfazowego łącznika tyrystorowego ŁT, układu sterowania US oraz komparatora K lub regulatora PI (w zależności od wariantu układu). Wzbudzenie prądnicy w stanie jałowym zapewnia dołączona na stałe bateria kondensatorów wzbudzających, a stabilizacja napięcia wyjściowego odbywa się poprzez odpowiednie załączanie i wyłączenie baterii kondensatorów regulacyjnych.

Badaniami objęto dwa warianty układu stabilizacji napięcia API:

- układ z komparatorem napięcia o zmiennej częstotliwości załączania kondensatorów regulacyjnych  $f = \text{var}$  (rys. 3a),
- układ z regulatorem proporcjonalno-całkującym z modulacją czasu załączenia kondensatorów regulacyjnych o stałej częstotliwości  $f = \text{const}$  (rys.3b).

W układzie z rysunku 3a napięcie  $U_p$ , proporcjonalne do napięcia prądnicy, jest podawane na węzeł sumacyjny komparatora K, na który jednocześnie jest podawane napięcie  $U_z$ , proporcjonalne do wartości zadanej napięcia prądnicy. Przy obniżeniu napięcia prądnicy poniżej dolnej granicy strefy histerezy na wyjściu komparatora pojawia się sygnał, zezwalający na załączenie baterii kondensatorów regulacyjnych w najbliższej chwili czasowej, zapewniającej bezударowe załączenie baterii. Następuje proces narastania amplitudy napięcia. Po przekroczeniu górnej granicy strefy histerezy następuje odłączenie baterii kondensatorów regulacyjnych i zmniejszenie amplitudy napięcia. Przy stałym obciążeniu występuje więc powtarzający się proces narastania i opadania amplitudy generowanego napięcia prądnicy, przy czym częstotliwość powtarzania tego procesu jest zmienna. Zasada działania układu z rysunku 3b jest analogiczna z tym, że częstotliwość załączania baterii kondensatorów regulacyjnych jest zadawana częstotliwością generatora  $f$ , a uchyb regulacji określa czas załączenia tych kondensatorów w przedziale czasu, określonym tą częstotliwością.

Badania eksperymentalne wykazały, że niezbędna jest optymalizacja parametrów obu wariantów układu stabilizacji napięcia API zarówno co do częstotliwości załączania baterii kondensatorów regulacyjnych, jak i szerokości strefy histerezy.



Rys. 3. Schematy ideowe badanych układów API: a) o zmiennej i b) o stałej częstotliwości załączania kondensatorów regulacyjnych

W tym celu opracowano modele matematyczne badanych układów oraz dokonano symulacji komputerowej procesów elektromagnetycznych.

#### 4. MODEL MATEMATYCZNY

W procesie tworzenia modelu matematycznego wykorzystano sposób opisu zastosowany w [3] oparty o metodę wielobiegunników [4]. Metoda polega na rozbiciu modelowanego układu na elementy strukturalne mające postać wielobiegunników, ich opisie matematycznym (przy założeniu, że znane są potencjały węzłów zewnętrznych oraz prądy w gałęziach zewnętrznych) i określeniu sposobu połączeniu tych elementów za pomocą macierzy incydencji. Model matematyczny zostanie przedstawiony na przykładzie układu z rysunku 3b.

Przy powszechnie przyjmowanych założeniach MA może być potraktowana jako dwunastobiegunnik, opisany równaniem wektorowym

$$p[\Psi] + [R][i] + [\varphi'] - [\varphi''] = 0, \quad (1)$$

gdzie:

$[\Psi]$ ,  $[\varphi']$ ,  $[\varphi'']$ ,  $[i]$  – odpowiednio wektory strumieni sprzężonych, potencjałów węzłowych i prądów gałęziowych jak w [3],

$[R]$  – macierz diagonalna rezystancji fazowych.

Otrzymany model matematyczny maszyny indukcyjnej może być włączony do modelu matematycznego układu na podstawie równania (1) oraz macierzy incydencji

$$[\Gamma^M] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Baterie kondensatorów regulacyjnych wraz z łącznikami półprzewodnikowymi można przedstawić w postaci czterobiegunnika i opisać równaniem wektorowym

$$p[i^{kr}] + [G^{kr}][\varphi^{kr}] + [C^{kr}] = 0, \quad (2)$$

gdzie:

$[i^{kr}] = [i_1, \dots, i_4]$ ,  $[\varphi^{kr}] = [\varphi_1, \dots, \varphi_4]$ ,  $[G^{kr}]$ ,  $[C^{kr}]$  - jak w [3] z uwzględnieniem, że liczba stopni jest równa jedności.

Macierz incydencji przy założeniu układu połączenia kondensatorów w gwiazdę ma dla tej baterii kondensatorów postać:

$$[\Pi^k] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Analogicznym równaniem można opisać baterię kondensatorów podłączonych na stałe do maszyny

$$p[i^{kw}] + [G^{kw}] \varphi^{kw} + [C^{kw}] = 0. \quad (3)$$

W równaniu tym macierze  $[G^{kw}]$ ,  $[C^{kw}]$  są identyczne jak  $[G^{kr}]$ ,  $[C^{kr}]$  z tym, że nie występują w nich wielkości reprezentujące łączniki.

Obciążenie rezystancyjno-indukcyjne można przedstawić w postaci wielobiegunnika o sześciu węzłach. Równanie wektorowe tego wielobiegunnika ma postać:

$$p[i^o] + [G^o] \varphi^o + [C^o] = 0, \quad (4)$$

gdzie:  $[i^o] = [i_1, \dots, i_6]$ ,  $[\varphi^o] = [\varphi_1, \dots, \varphi_6]$ ,  $[G^o]$ ,  $[C^o]$  - jak w[3].

Macierz połączeń dla elementu strukturalnego, jakim jest obciążenie, ma postać

$$[\Pi^o] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Układ stabilizacji napięcia, składający się z elementu pomiaru napięcia (EPN), sumatora i regulatora cyfrowego jest opisany równaniem różniczkowym o postaci:

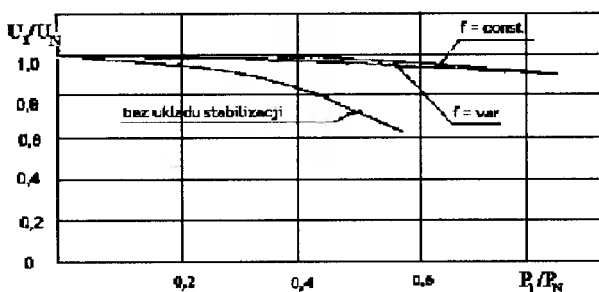
$$pU_S = \frac{(U_Z - U_S)}{T}, \quad (5)$$

w którym  $U_Z$ ,  $U_S$  - jak na rysunku 3,  $T$  - stała czasowa EPN, oraz równaniami algebry logiki opisującymi warunki załączania i wyłączania łączników półprzewodnikowych. Wyłączenie łączników odbywa się w momentach przechodzenia prądów kondensatorów przez zero.

## 5. WYNIKI BADAŃ

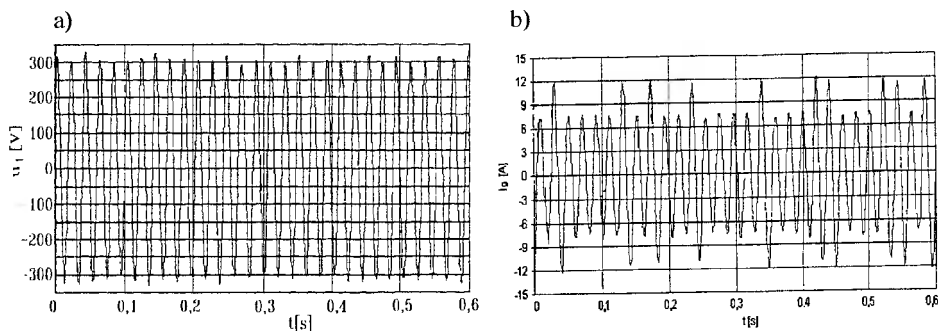
Badania symulacyjne i eksperymentalne układów przeprowadzono dla prądnic zbudowanych z typowego silnika indukcyjnego klatkowego o mocy znamionowej  $P_N = 3$  kW i napięciu znamionowym  $U_N = 220/380$  V dla obciążeń rezystancyjnych i rezystancyjno-indukcyjnych o  $\cos\varphi_{ind} = 0,8$ , oraz dla różnych częstotliwości załączania

kondensatorów regulacyjnych i stref histerezy komparatora. Bateria kondensatorów podłączonych do prądnicy na stałe zapewniała napięcie  $U_1 = 230$  V.

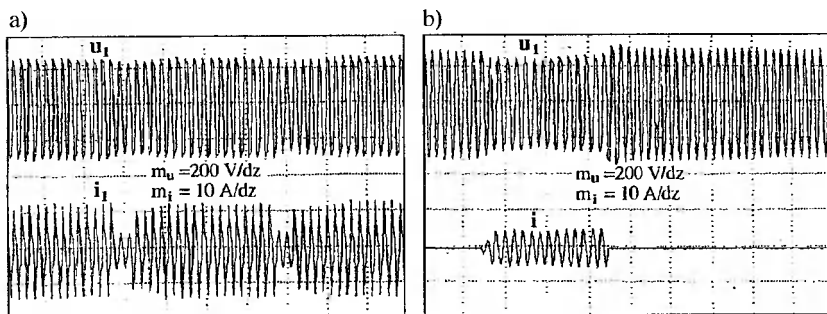


Rys. 4. Charakterystyki zewnętrzne API przy obciążeniu rezystancyjnym ( $f = 20$  Hz,  $\Delta U = 10$  V)

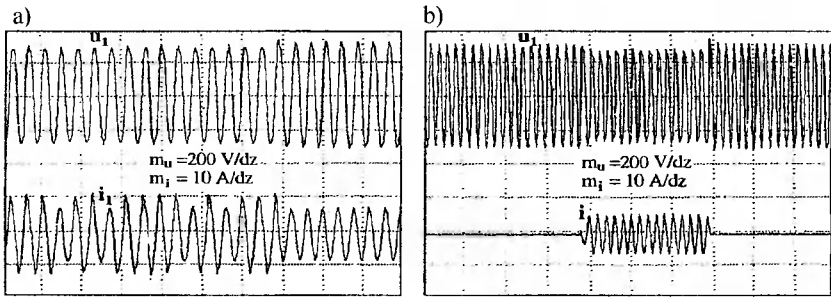
Przykładowe wyniki badań symulacyjnych prądnic w stanach statycznych i dynamicznych przedstawiono na rysunkach 4 i 5, a przebiegi czasowe w jednym z układów na rysunkach 6 i 7.



Rys. 5. Obliczone przebiegi czasowe API z układem stabilizacji  $f = var$  dla obciążenia rezystancyjnego  $P_1/P_N = 0,5$ : a) napięcie fazowe, b) prąd fazowy



Rys. 6. Oscylogramy napięć i prądów fazowych API z układem stabilizacji  $f = const = 5$  Hz dla obciążenia rezystancyjnego, odpowiadającego prądowi znamionowemu maszyny: a) napięcie i prąd prądnicy w stanie ustalonym, b) napięcie i prąd obciążenia w stanie przejściowym załączenia i wyłączenia obciążenia



Rys. 7. Oscylogramy napięć i prądów fazowych API z układem stabilizacji  $f = \text{var}$  dla obciążenia rezystancyjnego, odpowiadającego prądowi znamionowemu maszyny: a) napięcie i prąd prądnicy w stanie ustalonym, b) napięcie i prąd obciążenia w stanie przejściowym załączenia i wyłączenia obciążenia

## 6. WNIOSKI

Przeprowadzone badania symulacyjne i eksperymentalne pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

- model matematyczny i symulacja komputerowa procesów elektromagnetycznych w badanych API zapewniają dokładność w stanach statycznych rzędu 6-8%, a w stanach dynamicznych rzędu 12%,
- w stanach statycznych obydwa układy zapewniają charakterystyki zewnętrzne praktycznie o jednakowej sztywności, przy czym w układzie  $f = \text{const}$  obserwuje się nieco większą sztywność tych charakterystyk,
- przy zmianie obciążenia od stanu jałowego do stanu, w którym prąd prądnicy jest równy prądowi znamionowemu maszyny napięcie wyjściowe jest stabilizowane z błędem 8%. Takim samym zmianom obciążenia w stanach dynamicznych odpowiada zmiana napięcia wyjściowego rzędu 15%,
- moc odbierana od prądnicy jest mniejsza od mocy znamionowej maszyny. Jest to spowodowane powtarzającymi się stanami pracy przy nieco większym nasyceniu oraz stanami niesymetrycznymi w przedziałach komutacji baterii kondensatorów regulacyjnych. Stopień zmniejszenia mocy pozostaje zadaniem do rozwiązania,
- API z układem stabilizacji  $f = \text{const}$  zapewnia lepszą jakość generowanej energii elektrycznej, a najkorzystniejsze widmo napięcia prądnicy uzyskuje przy  $f = 20$  Hz (trzecia harmoniczna 9%, piętnasta 3%),
- API z badanymi układami stabilizacji mogą znaleźć zastosowanie jedynie u odbiorców o stosunkowo niskich wymaganiach odnośnie parametrów energii elektrycznej i tylko dla obciążeń o  $0,8 \geq \cos\phi \leq 1,0$ .

## LITERATURA

- [1] H. Tunia i in., 1982. Układy energoelektroniczne. Obliczanie, modelowanie, projektowanie. WNT Warszawa.
- [2] H. Supronowicz., J. Kozłowski, 1992. Łącznik baterii kondensatorów połączonych w trójkąt. Patent PL 156942 B1, WUP 04/1992.

- [3] Z. Gientkowski, 1997. Autonomiczne prądnice indukcyjne o wzbudzeniu kondensatorowym i przekształtnikowym. Rozprawy 83, Wyd. Uczeln. ATR w Bydgoszczy.
- [4] E.G. Plachtyna, 1986. Matematyčeskoje modelirowanije elektromaszinnowien-tilnych sistiem. Wiszcza Szkoła, Lwow.

## AUTONOMOUS INDUCTION GENERATORS WITH VARIABLE SWITCHING TIME OF A SINGLE CONTROL CAPACITOR BATTERY

### Summary

In the paper the mathematic model and results of simulation and experiment tests of an autonomous induction generator with capacitor excitation are presented. The generator is excited with single control capacitor battery commutated with a quick thyristor switching device. Construction of the switching device is described. Parameters of generated energy are evaluated.

*Keywords:* autonomous induction generator, capacitor excitation, fast semiconductor switch, commutation battery capacitors