

Laboratorium  
Elektromechaniczne Systemy Napędowe

Ćwiczenie

**BADANIE AUTONOMICZNEGO  
GENERATORA INDUKCYJNEGO**

**Instrukcja**

**Opracował:**

**Dr hab. inż. Krzysztof Pieńkowski, prof. PWr**

**Wrocław, listopad 2014 r.**

## Ćwiczenie

### BADANIE AUTONOMICZNEGO GENERATORA INDUKCYJNEGO

#### Program ćwiczenia:

1. Poznanie układu autonomicznego generatora indukcyjnego i przebiegu procesu samowzbudzenia.
2. Badanie procesu samowzbudzenia autonomicznego generatora indukcyjnego.
3. Badanie charakterystyk zewnętrznych i obciążenia autonomicznego generatora indukcyjnego.

#### 1. Wprowadzenie

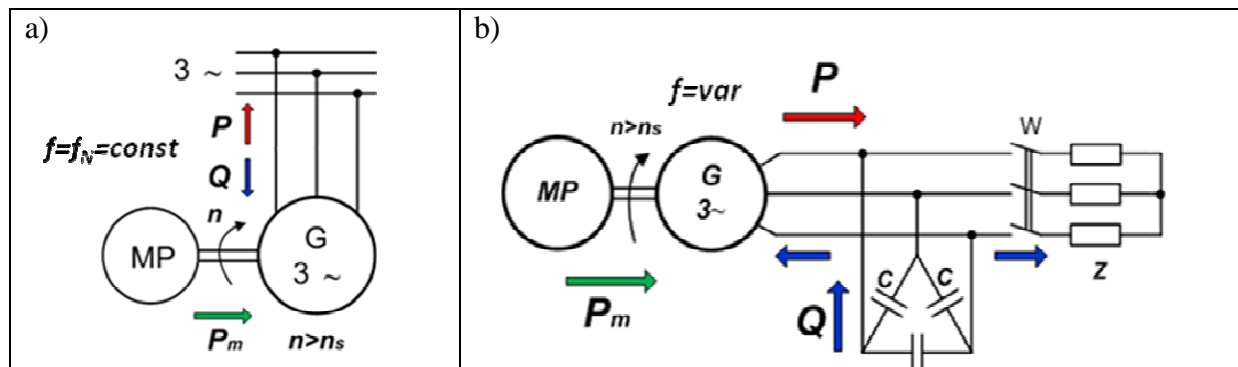
Maszyna indukcyjna 3-fazowa przyłączona do 3-fazowej sieci sztywnej prądu zmiennego może pracować zarówno w stanie pracy silnikowej i generatorowej. Warunkiem działania maszyny indukcyjnej jest wytwarzanie wirującego pola magnetycznego w szczelinie powietrznej maszyny. Prędkość obrotowa wirującego pola magnetycznego jest nazywana prędkością synchroniczną  $n_s$ .

Układ połączeń i warunki pracy generatorowej maszyny indukcyjnej przyłączonej do sieci 3-fazowej przedstawiono na rys.1a. Podczas pracy generatorowej prędkość obrotowa  $n$  wirnika generatora  $G$  powinna być większa od prędkości synchronicznej maszyny indukcyjnej  $n > n_s$ . Generator indukcyjny  $G$  wytwarza wtedy moc elektryczną czynną  $P$  oddawaną do sieci, pobiera natomiast z sieci moc bierną  $Q$ , konieczną do wytwarzania pola wirującego w maszynie. Częstotliwość napięć i prądów w obwodach stojana generatora ma stałą wartość, równą częstotliwości znamionowej sieci  $f_N$ . Prędkość wirowania pola magnetycznego w szczelinie maszyny jest proporcjonalna do częstotliwości prądu stojana  $f_N$  i ma stałą wartość.

Autonomiczny generator indukcyjny jest to generator indukcyjny, który wytwarza energię elektryczną w układzie bez przyłączenia do sieci prądu zmiennego. Energia elektryczna wytwarzana przez generator jest dostarczana bezpośrednio do odbiorników przyłączonych do zacisków uzwojenia stojana generatora.

Układ połączeń i warunki pracy autonomicznego generatora indukcyjnego przedstawiono na rys.1b. Podczas pracy autonomicznego generatora  $G$  wirnik generatora jest napędzany przez maszynę pierwotną  $MP$  z prędkością obrotową  $n$ , która powinna być większa od prędkości synchronicznej  $n > n_s$ . Generator indukcyjny  $G$  zasila 3-fazowy odbiornik o impedancji  $Z$ . Generator indukcyjny posiada zdolność do przetwarzania mocy mechanicznej maszyny pierwotnej tylko na moc elektryczną czynną  $P$ . Warunkiem pracy autonomicznego generatora indukcyjnego jest konieczność przyłączenia do generatora źródła mocy biernej  $Q$ . Moc bierna tego źródła jest pobierana przez generator dla wytwarzania w generatorze wirującego pola magnetycznego oraz pokrywa zapotrzebowanie mocy biernej przez odbiornik rezystancyjno-indukcyjny przyłączony do generatora. Źródłem tej mocy biernej jest 3-fazowa bateria kondensatorów  $C$ , która jest przyłączona do zacisków stojana generatora. W odróżnieniu od pracy generatorowej maszyny indukcyjnej przyłączonej do sieci podczas autonomicznej pracy generatorowej częstotliwość  $f$  napięć i prądów w obwodzie stojana może być różna od częstotliwości sieciowej  $f_N$ . Wartość częstotliwości  $f$  jest złożoną funkcją prędkości obrotowej

wirnika generatora, parametrów elektromagnetycznych generatora i parametrów elektromagnetycznych obciążenia. Z tego wynika, że uzyskanie warunków pracy autonomicznej generatora z zapewnieniem stałej wartości częstotliwości i wytwarzanego napięcia jest trudne i wymaga stosowania odpowiednich układów regulacji.



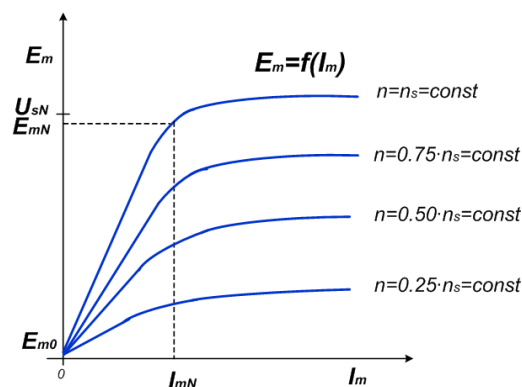
Rys. 1. Układy pracy generatora indukcyjnego:  
a) przy współpracy z siecią prądu zmiennego; b) przy pracy autonomicznej

## 2. Proces samowzbudzenia autonomicznego generatora indukcyjnego

Najważniejszym procesem związanym z pracą autonomicznego generatora indukcyjnego jest proces samowzbudzenia generatora.

Proces samowzbudzenia polega na tym, że w autonomicznym generatorze indukcyjnym napędzanym przez maszynę pomocniczą i z przyłączoną baterią kondensatorów do uzwojenia stojana jest inicjowany samoczynnie proces wytwarzania napięcia przemiennego na zaciskach stojana generatora. Po zakończeniu procesu samowzbudzenia 3-fazowy generator indukcyjny wytwarza na zaciskach stojana 3-fazowe napięcia przemiennie o ustalonej wartości skutecznej i częstotliwości.

W procesie samowzbudzenia generatora indukcyjnego istotną rolę stanowi nieliniowość głównego obwodu magnetycznego i występowanie pola remanentu magnetycznego wirnika maszyny indukcyjnej. Nieliniowość obwodu magnetycznego maszyny indukcyjnej jest określona przez przebiegi charakterystyk magnesowania przedstawione na rys.2. Ze względu na łatwość weryfikacji pomiarowej charakterystyki magnesowania generatora indukcyjnego przedstawiano jako charakterystyki wartości skutecznej siły elektromotorycznej indukowanej w uzwojeniu stojana od wartości skutecznej prądu magnesowania generatora  $E_m = f(I_m)$ , przy stałej zadanej prędkości mechanicznej wirnika generatora  $n$ .

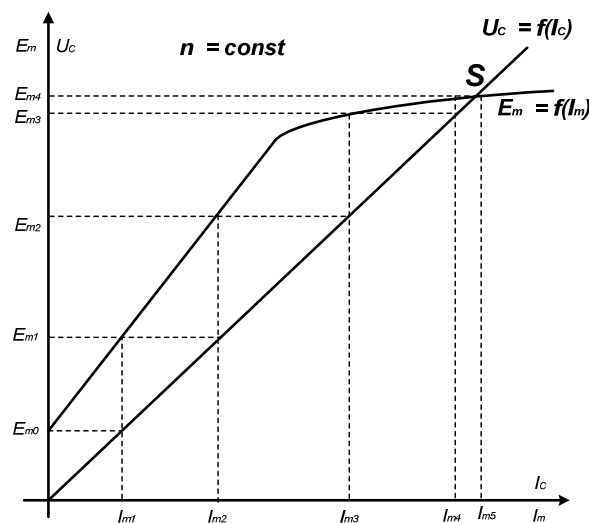


Rys.2. Charakterystyki magnesowania generatora indukcyjnego

Charakterystyki magnesowania generatora indukcyjnego  $E_m = f(I_m)$  wykazują dużą nieliniowość w przedziale prądów magnesowania większych od prądu znamionowego

magnesowania  $I_{mN}$ . Z charakterystyk magnesowania wynika występowanie pola remanentu magnetycznego wirnika – przy wartości prądu magnesowania równej zero ( $I_m=0$ ) w uzwojeniu stojana indukowane są siły elektromotoryczne  $E_{m0}$  od remanentu magnetycznego wirnika. Wartość skuteczna sił elektromotorycznych  $E_{m0}$  przy prędkości wirnika równej prędkości synchronicznej wynosi zwykle około 1-2% wartości skutecznej napięcia znamionowego stojana maszyny indukcyjnej.

Dla uzyskania szybkiego i niezawodnego samowzbudzenia w autonomicznych generatorach indukcyjnych proces samowzbudzenia generatora jest realizowany podczas stanu pracy jałowej generatora. Podczas procesu samowzbudzenia do stojana generatora indukcyjnego jest przyłączona wtedy tylko bateria kondensatorów. Odbiorniki energii elektrycznej stanowiące obciążenie generatora są dołączane dopiero po pomyślnym zakończeniu procesu samowzbudzenia generatora. Przebieg procesu samowzbudzenia generatora indukcyjnego przedstawiono poglądowo na rys.3.



Rys. 3. Ilustracja przebiegu procesu samowzbudzenia autonomicznego generatora indukcyjnego

Na rys.3 przedstawiono we wspólnym układzie współrzędnych charakterystykę magnesowania generatora indukcyjnego  $E_m=f(I_m)$  oraz charakterystykę napięciowo-prądową  $U_C=f(I_C)$  baterii kondensatorów przyłączonych do zacisków stojana generatora. Charakterystyki te przecinają się w punkcie S. Przyjęto, że podczas procesu samowzbudzenia generator indukcyjny jest napędzany ze stałą prędkością obrotową  $n$ .

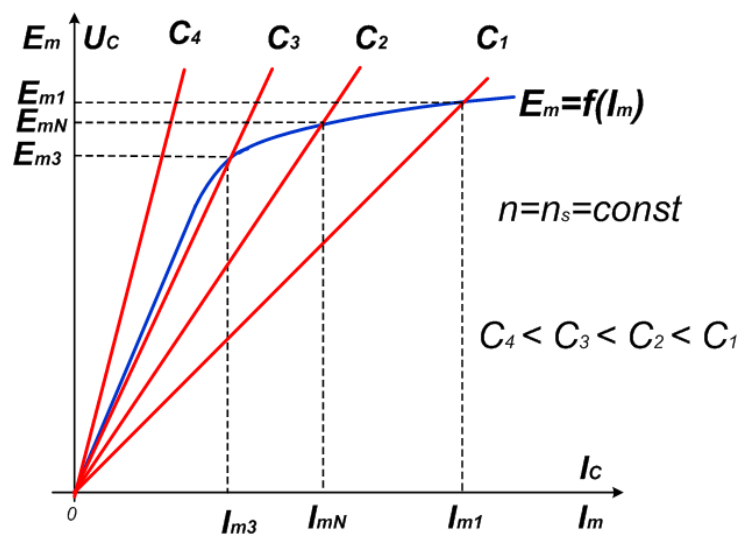
Na początku procesu samowzbudzenia pole remanentu magnetycznego wirującego wirnika generatora indukuje w uzwojeniu stojana siły elektromotoryczne o wartości skutecznej  $E_{m0}$ . Przy przyłączonej do stojana baterii kondensatorów, te siły elektromotoryczne wywołują w zamkniętych obwodach uzwojenia stojana przepływ prądów o wartości skutecznej  $I_{m1}$ . Prądy te powodują wytworzenie pola wirującego indukującego w uzwojeniu stojana siły elektromotoryczne o wartości skutecznej  $E_{m1} > E_{m0}$ . Siły elektromotoryczne  $E_{m1}$  wywołują przepływ w uzwojeniu stojana prądów o wartości  $I_{m2}$ , które powodują dalsze zwiększenie wartości wytwarzanego pola wirującego i indukowanych w stojanie sił elektromotorycznych. Taki przebieg procesu samowzbudzenia jest kontynuowany, aż do wystąpienia stanu, gdy z powodu nasycenia obwodu magnetycznego generatora wirujące pole magnetyczne nie będzie już zwiększane. Nastąpi wtedy stan pracy ustalonej autonomicznego generatora indukcyjnego w punkcie S wyznaczonym przez przecięcie charakterystyki magnesowania i charakterystyki napięciowo-prądowej kondensatorów wzbudzenia.

Podstawowe warunki konieczne do zapewnienia samowzbudzenia generatora indukcyjnego:

- Występowanie w maszynie indukcyjnej magnetyzmu szczątkowego wirnika;
- Przyłączenie baterii kondensatorów do zacisków stojana generatora indukcyjnego;
- Napędzanie wirnika generatora indukcyjnego przez maszynę pomocniczą;
- Występowanie punktu przecięcia charakterystyki magnesowania generatora indukcyjnego i charakterystyki napięciowo-prądowej baterii kondensatorów.

Na rys.4 przedstawiono charakterystyki ilustrujące wpływ pojemności baterii kondensatorów  $C$  przyłączonych do zacisków uzwojenia stojana na proces samowzbudzenia generatora indukcyjnego. Na podstawie przebiegu tych charakterystyk można sformułować następujące stwierdzenia:

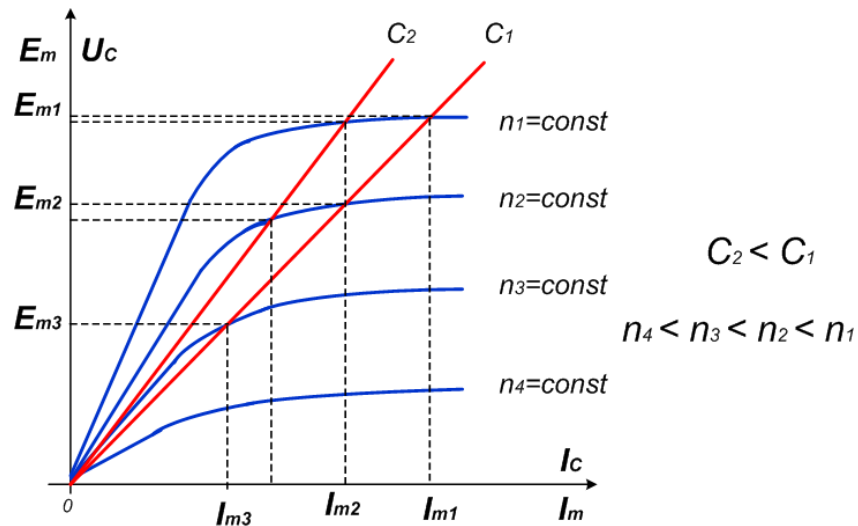
- Zmniejszanie wartości pojemności kondensatorów wzbudzenia  $C$  przy stałej prędkości obrotowej wirnika  $n$  powoduje zmniejszanie napięcia wytwarzanego przez autonomiczny generator indukcyjny na zaciskach stojana.
- Przy zbyt małej wartości pojemności kondensatorów wzbudzenia  $C$  (poniżej pewnej wartości krytycznej  $C < C_{kryt}$ ) charakterystyka magnesowania generatora i napięciowo-prądowa baterii kondensatorów nie mają punktu przecięcia i proces samowzbudzenia generatora indukcyjnego nie wystąpi.
- Przy zbyt dużej wartości pojemności kondensatorów wzbudzenia  $C$  podczas pracy generatora mogą wystąpić nadmiernie duże wartości prądów w uzwojeniu stojana.



Rys.4. Ilustracja wpływu pojemności baterii kondensatorów  $C$  na proces samowzbudzenia autonomicznego generatora indukcyjnego

Na rys.5 przedstawiono charakterystyki ilustrujące wpływ prędkości obrotowej  $n$  wirnika generatora na proces samowzbudzenia generatora indukcyjnego. Na podstawie tych charakterystyk można sformułować następujące stwierdzenia:

- Zmniejszanie prędkości obrotowej  $n$  wirnika generatora przy stałej pojemności kondensatorów wzbudzenia  $C$  powoduje zmniejszanie napięcia wytwarzanego przez autonomiczny generator indukcyjny.
- Przy zbyt małej wartości prędkości obrotowej wirnika generatora  $n$  (poniżej pewnej wartości krytycznej  $n < n_{kryt}$ ) charakterystyka magnesowania generatora i napięciowo-prądowa baterii kondensatorów nie mają punktu przecięcia i proces samowzbudzenia generatora indukcyjnego nie wystąpi.

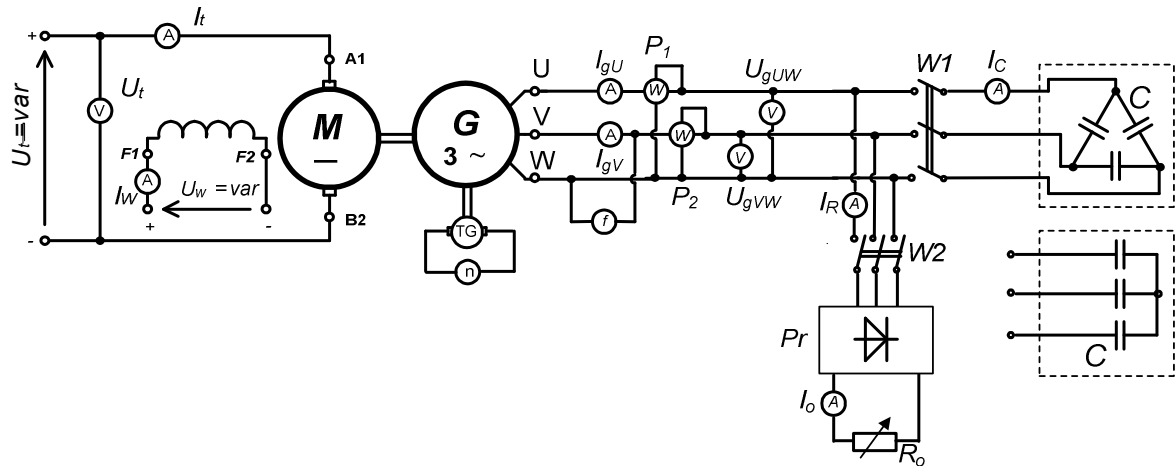


Rys. 5. Ilustracja wpływu prędkości obrotowej  $n$  wirnika generatora na proces samowzbudzenia autonomicznego generatora indukcyjnego

### 3. Instrukcja

#### 3.1. Opis stanowiska pomiarowego

Schemat układu pomiarowego do badań charakterystyk statycznych autonomicznego 3-fazowego generatora indukcyjnego przedstawiono na rys.6.



Rys.6. Schemat układu pomiarowego do badania i pomiaru charakterystyk autonomicznego generatora indukcyjnego

Układ pomiarowy składa się z trójfazowego generatora indukcyjnego klatkowego  $G$  sprzężonego mechanicznie z maszyną pomocniczą prądu stałego  $M$ . Podczas pomiarów charakterystyk generatora maszyna  $M$  pracuje jako obcowzbudny silnik prądu stałego i pełni rolę maszyny pierwotnej napędzającej generator. Prędkość kątową wirnika generatora jest nastawiana przez sterowanie prędkości kątowej silnika  $M$ . W celu sterowania prędkości kątowej obwód twornika i obwód wzbudzenia silnika  $M$  są zasilane z oddzielnych źródeł regulowanego napięcia stałego. Łącznik  $W1$  jest przeznaczony do przyłączenia do zacisków stojana generatora 3-fazowej baterii kondensatorów wzbudzenia  $C$ . Łącznik  $W2$  służy do przyłączenia do zacisków stojana generatora przez prostownik diodowy  $Pr$  odbiornika rezystorowego  $R_o$ . Do pomiaru prędkości obrotowej  $n$  generatora indukcyjnego zastosowano tachoprądnice  $TP$  sprzężoną mechanicznie z wirnikiem generatora indukcyjnego. W

obwodach przyłączonych do zacisków stojana generatora indukcyjnego zastosowano układ dwóch woltomierzy  $V$  do pomiaru napięć przewodowych stojana generatora, układ dwóch amperomierzy  $A$  do pomiaru prądów przewodowych stojana generatora oraz układ z dwoma watomierzami  $W$  do pomiaru 3-fazowej mocy czynnej generatora. Zastosowano również częstotściomierz  $f$  do pomiaru częstotliwości napięć i prądów wytwarzanych przez generator. Do pomiaru prądów pobieranych przez baterię kondensatorów i odbiornik 3-fazowy zastosowano odpowiednio pomiar prądów w jednej z faz zasilających te układy.

Wyznaczona pomiarowo moc czynna  $P$  wytwarzana przez generator jest równa sumie algebraicznej mocy  $P_1$  i  $P_2$  wskazywanych przez watomierze pomiarowe:

$$P = P_1 + P_2$$

Wyznaczona pomiarowo moc pozorna  $S$  generatora wynosi:

$$S = \sqrt{3} U_1 I_1$$

Wyznaczona pomiarowo moc bierna  $Q$  baterii kondensatorów wynosi:

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2}$$

gdzie średnie wartości skuteczne napięć i prądów przewodowych stojana generatora wynoszą:

$$U_1 = \frac{U_{gUW} + U_{gVW}}{2}; \quad I_1 = \frac{I_{gU} + I_{gV}}{2}$$

### **3.2. Badanie procesu samowzbudzenia autonomicznego generatora indukcyjnego**

Badania wykonuje się w układzie pomiarowym przedstawionym na rys.6. Podczas tych badań generator indukcyjny  $G$  jest napędzany przez maszynę pomocniczą  $M$ .

W pierwszej części badań należy generator napędzać z prędkością obrotową zbliżoną lub równą prędkości synchronicznej  $n_s$  generatora, przy otwartym obwodzie stojana generatora (łączniki  $W1$  i  $W2$  otwarte). Na podstawie kontroli wskazań woltomierzy  $V$  stwierdzić, czy w uzwojeniu stojana indukowane są siły elektromotoryczne wywołane przez pole remanentu magnetycznego wirnika (napięcia wywołane przez pole remanentu magnetycznego wirnika zwykle mają wartość około 1÷2% wartości napięcia znamionowego generatora). Następnie za pośrednictwem łącznika  $W1$  dokonać przyłączenia do stojana generatora baterii kondensatorów  $C$  o wybranym układzie połączeń (w trójkąt lub w gwiazdę). Na podstawie kontroli wskazań woltomierzy  $V$  stwierdzić, czy nastąpił proces samowzbudzenia generatora (napięcia indukowane w stojanie generatora powinny uzyskać duże wartości). Jeżeli wystąpił proces samowzbudzenia należy obniżyć stopniowo prędkość wirnika generatora i dokonać wyznaczenia charakterystyk statycznych napięcia stojana generatora w funkcji prędkości obrotowej generatora  $U=f(n)$  i częstotliwości napięcia stojana generatora w funkcji prędkości obrotowej generatora  $f=f(n)$ , przy stałej wartości pojemności kondensatorów  $C$ . Przy obniżaniu prędkości wirnika generatora zanotować wartość krytycznej prędkości obrotowej generatora przy której występuje utrata zdolności do pracy generatorowej. Wymienione charakterystyki wyznaczyć dla różnych wartości pojemności i różnych układów połączeń baterii kondensatorów.

Odmienne postępowanie dotyczy przypadku, gdy podczas realizacji pierwszej części badań zostanie stwierdzony brak wystąpienia procesu samowzbudzenia generatora po przyłączeniu baterii kondensatorów. Baterię kondensatorów  $C$  należy wtedy odłączyć od generatora (łącznik  $W1$  otwarty), a następnie przyłączyć krótkotrwale poszczególne kondensatory baterii do specjalnego źródła napięcia stałego w celu wstępnego naładowania

kondensatorów. Po przyłączeniu naładowanej w ten sposób baterii kondensatorów do stojana generatora prądu rozładowania kondensatorów zamykające się przez uzwojenie stojana powinny w obwodzie magnetycznym generatora wytworzyć pole magnetyczne zapewniające pożądany przebieg procesu samowzbudzenia generatora.

Inną możliwą metodą postępowania jest krótkotrwałe przyłączenie uzwojenia stojana generatora do źródła napięcia stałego niskiego napięcia w celu wywołania powstania strumienia remanentu magnetycznego.

Po uzyskaniu procesu samowzbudzenia generatora należy dokonać wyznaczenia przebiegu charakterystyk generatora indukcyjnego w przedstawiony powyżej sposób.

### **3.3. Badanie charakterystyk zewnętrznych i obciążenia autonomicznego generatora indukcyjnego**

Badania wykonuje się w układzie pomiarowym przedstawionym na rys.6. Podczas tych badań generator indukcyjny G jest napędzany przez maszynę pomocniczą M. Badania charakterystyk zewnętrznych i obciążenia polegają na wyznaczeniu przebiegu charakterystyk napięcia generatora od prądu przewodowego generatora  $U=f(I)$ , od prądu obciążenia  $U=f(I_R)$  i od mocy oddawanej przez generator  $U=f(P)$ , przy stałej zadanej wartości prędkości generatora  $n=const$  i stałej zadanej wartości pojemności baterii kondensatorów  $C=const$ . Stałą zadaną wartość prędkości generatora należy utrzymywać przez odpowiednie sterowanie wartości napięcia twornika i napięcia wzbudzenia silnika obcowzbudnego M.

Wymienione powyżej charakterystyki należy wyznaczyć również dla warunku pracy generatora przy utrzymywaniu stałej zadanej wartości częstotliwości napięcia stojana generatora  $f=const$ . Utrzymywanie stałej częstotliwości napięcia generatora może wymagać nastawiania odpowiednio zmiennej prędkości obrotowej generatora. Sterowanie prędkości obrotowej generatora uzyskuje się przez odpowiednie sterowanie wartości napięcia twornika lub napięcia wzbudzenia silnika obcowzbudnego M.

## **4. Sprawozdanie**

Sprawozdanie z wykonanych badań powinno zawierać:

1. Dane znamionowe maszyn elektrycznych zastosowanych w badanym układzie elektromechanicznym.
2. Wykaz aparatury pomiarowej.
3. Schematy ideowe układów pomiarowych.
4. Tabele z wynikami pomiarów oraz obliczeń wykonanych na podstawie pomiarów.
5. Opis obserwacji związanych z przebiegiem procesu samowzbudzenia generatora.
6. Charakterystyki autonomicznego generatora indukcyjnego:
  - a) charakterystyki dla pracy jałowej autonomicznego generatora indukcyjnego:  
 $U = f(n); f = f(n);$  przy  $C=par$
  - b) charakterystyki zewnętrzne i obciążenia dla pracy autonomicznego generatora indukcyjnego z obciążeniem:  
 $U = f(I); U=f(I_R); U=f(P); f=f(P)$  - przy  $n = const; R_o = var;$   
 $U = f(I); U=f(I_R); U=f(P)$  - przy  $f = const; R_o = var;$
  - c) dla wybranych punktów pracy generatora (bieg jałowy i stany obciążenia) przeanalizować wartości mocy czynnej i biernej generatora;
7. Wnioski z wykonanych badań i własne spostrzeżenia.



## **5. Pytania kontrolne**

1. Przedstawić układy połączeń generatora indukcyjnego przy współpracy z siecią sztywną i w układzie autonomicznym.
2. Porównać stany pracy generatora indukcyjnego przy współpracy z siecią sztywną i w układzie autonomicznym.
3. Opisać proces samowzbudzenia autonomicznego generatora indukcyjnego.
4. Podać warunki konieczne do pracy ustalonej autonomicznego generatora indukcyjnego.
5. Przedstawić wpływ pojemności baterii kondensatorów i prędkości obrotowej wirnika na przebieg procesu samowzbudzenia i pracę ustaloną autonomicznego generatora indukcyjnego.

## **Literatura**

- [1] Plamitzer A. M., Maszyny elektryczne, WNT, Warszawa, 1982.
- [2] Boldea I., Variable Speed Generators, CRC Press, Taylor @Francis Group, 2006.