

**Grzegorz REDLARSKI**

POLITECHNIKA GDAŃSKA, WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI I AUTOMATYKI,  
ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk

## Metoda automatycznej identyfikacji charakterystyk zadajników prędkości kątowej zespołów wytwórczych

Dr hab. inż. Grzegorz REDLARSKI

Kierownik Katedry Mechatroniki i Inżynierii Wysokich Napięć. Studia wyższe w zakresie automatyki (2000), awans zawodowy, w zakresie elektrotechniki: doktorat (2003), habilitacja (2010). Zatrudniony dodatkowo (od 2011) na Uniwersytecie Warmińsko-Mazurskim w Olsztynie, na stanowisku profesora nadzwyczajnego. Główny obszar jego działalności naukowej obejmuje automatykę elektroenergetyczną, a od niedawna także inżynierię biomedyczną.



e-mail: g.redlarski@ely.pg.gda.pl

### Streszczenie

W artykule przedstawiono propozycję algorytmu identyfikacji charakterystyk zadajników prędkości kątowej. Rozwiązania te znajdują zastosowanie w nowoczesnych synchronizatorach automatycznych realizujących funkcję szybkiego łączenia obiektów elektroenergetycznych do pracy równoległej w systemie elektroenergetycznym, szczególnie w sytuacjach ruchowych wymagających zdecydowanego oraz szybkiego działania. Przeprowadzone badania eksperymentalne potwierdzają skuteczność zaproponowanych rozwiązań.

**Słowa kluczowe:** metody synchronizacji, synchronizacja automatyczna.

### The method for automatic identification of characteristics of electrical power unit angular velocity adjusters

#### Abstract

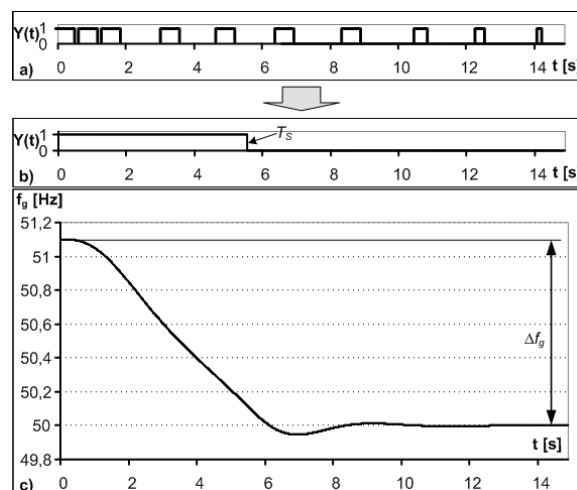
The paper describes a method for identification of angular velocity adjuster characteristics (Fig. 2). An algorithm (Fig. 4) of its practical application in modern and microprocessor automatic synchronizers operating according to the latest known methods (Fig. 1) is presented. These methods allow for significant, even several times – in relation to the solutions used on a large scale and generally regarded as classics – shortening of the connection process duration. Hence, the proposed solutions can play a special role in many situations requiring a decisive action and fast connection of electrical power units to operate in parallel. Such situations can occur during a sudden demand for electricity in a power electric system – one of which should certainly include cases of threatened blackout – whose effects and consequences can be very serious. The experimental tests fully confirm the effectiveness of the proposed solutions. Thus, they confirm the possibility to automatize tedious and time-consuming processes connected with identification of the characteristics of angular velocity adjusters connecting power electrical objects.

**Keywords:** synchronization methods, automatic synchronization.

## 1. Wprowadzenie

Jednym z ważnych procesów, który wpływa na niezawodną pracę systemu elektroenergetycznego oraz umożliwia szybką restytucję poawaryjną jest proces łączenia synchronicznych obiektów elektroenergetycznych do pracy równoległej [2, 6, 8]. Realizacja odnośnego procesu wymaga przeprowadzenia synchronizacji, która na wielu obiektach elektroenergetycznych jest realizowana za pomocą dedykowanych urządzeń automatyki, jakimi są nowoczesne, mikroprocesorowe synchronizatory automatyczne (SA) [1, 3, 4, 10]. Urządzenia te, działając na podstawie znanych i sprawdzonych metod synchronizacji [2], przywiązują szczególną wagę do dokładności łączenia, traktując drugorzędnie zmienną stan, jaką jest czas synchronizacji. Tego rodzaju działanie jest niekorzystne, a w wielu sytuacjach ruchowych wymagających szybkiego i zdecydowanego działania, może być nawet szkodliwe

[9]. Stąd też w literaturze przedmiotowej [5, 6] proponowana jest alternatywna metoda synchronizacji – zwana metodą MASD, której możliwość zastosowania w stanie dynamicznych zmian prędkości kątowych łączonych obiektów pozwala na istotne, nawet kilkakrotne w odniesieniu do stanu obecnego, skrócenie czasu łączenia. Istota odnośnej metody (rys. 1) polega na zastępowaniu serii impulsów sterujących wysyłanych z SA (rys. 1a), pojedynczym impulsem sterującym o odpowiednim czasie trwania  $T_S$  (rys. 1b). W wyniku ww. postępowania uzyskuje się odpowiednią (często z pewnym nadładkiem – wynikającym z konieczności uniknięcia stanu pracy quasisynchronicznej niesynfazowej) zmianę częstotliwości napięcia, wprowadzanego do ruchu obiektu (rys. 1c). Podstawę określenia zmiany częstotliwości  $\Delta f_g$  stanowi charakterystyka zadajnika prędkości kątowej zespołu wytwórczego, która musi zostać zidentyfikowana [7] przed pierwszym uruchomieniem synchronizatora na danym obiekcie.

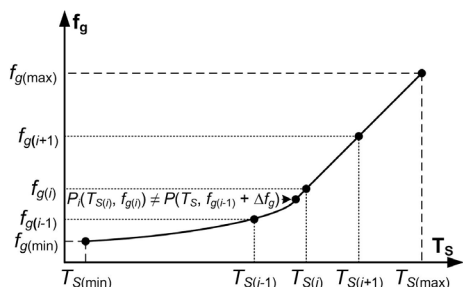


Rys. 1. Istota metody MASD [6]: a) impulsy sterujące – typowy SA, b) impuls sterujący wg MASD, c) zmiana częstotliwości zadanej łączonego obiektu  
Fig. 1. The essence of the MASD method: a) control signals – typical SA, b) control signals according to MASD, c) change of the input frequency of a connected object

## 2. Cel i metoda identyfikacji

Identyfikacja kolejnych punktów nieliniowej charakterystyki zadajnika prędkości kątowej jest zadaniem żmudnym i czasochłonnym. Wynika to z konieczności przeprowadzenia dużej liczby dokładnych pomiarów zmian prędkości kątowej wału zespołu wytwórczego, w obu kierunkach ruchu, tj.: od prędkości początkowej niższej od wartości znamionowej do wartości znamionowej oraz od prędkości znamionowej wyższej od wartości znamionowej, do wartości znamionowej (rys. 2). Liczba niezbędnych do wykonania pomiarów wynika z potrzeby dokładnego odwzorowania charakterystyki zadajnika (w praktyce przyjmuje się, że błąd identyfikacji powinien być, co najmniej dziesięciokrotnie mniejszy do dopuszczalnej wartości różnicy częstotliwości w chwili łączenia, która jest nastawiana w synchronizatorze). Identyfikacja kolejnych punktów charakterystyki zadajnika może zostać przeprowadzona w sposób ręczny [6] – przez odpowiednio przeszkolony personel, lub przy pomocy dedykowanego trybu pracy synchronizatora, który realizując odpowiedni podprogram pozwala na automatyzację odnośnego procesu. Ostatni z opisa-

nych sposobów postępowania stanowi przedmiot przedstawionej w artykule propozycji identyfikacji.

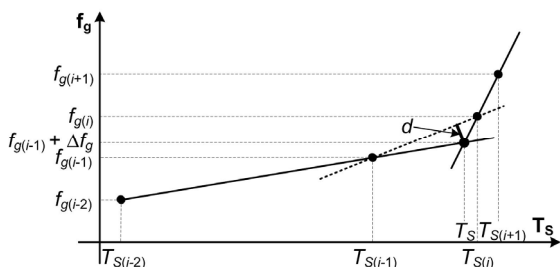


Rys. 2. Nieliniowa charakterystyka zadajnika prędkości kątowej  
Fig. 2. Nonlinear characteristic of the angular velocity adjuster

Znając kolejne punkty charakterystyki zadajnika prędkości kątowej (rys. 2) oraz początkową różnicę częstotliwości łączonych obiektów  $\Delta f_g$ , można określić czas trwania impulsu sterującego  $T_s$ , wysyłanego z synchronizatora. Jeśli częstotliwości  $\Delta f_g$ , wynikającej z pomiarów, nie odpowiada żadna chwila  $T_{S(i)}$ , wówczas (z uwagi na monotoniczność identyfikowanej charakterystyki zadajnika prędkości kątowej, w podlegającym ocenie przedziale) można dokonać interpolacji zmiennej  $T_s$ , zgodnie ze wzorem

$$T_s = T_{S(i-1)} + \frac{\Delta f_g (T_{S(i)} - T_{S(i-1)})}{f_{g(i)} - f_{g(i-1)}} \quad (1)$$

Interpolując wartość  $T_s$  w powyższy sposób należy uwzględnić błędy wynikające z linearyzacji nieliniowej charakterystyki zadajnika prędkości kątowej (rys. 2). Do oceny maksymalnej wartości odnośnych błędów (kolano charakterystyki), można posłużyć się miarą, jaką stanowi odległość  $d$ , punktu przecięcia prostych przechodzących przez punkty sąsiadujące z rozpatrywanym przedziałem, od prostej reprezentującej linię interpolacji (rys. 3).



Rys. 3. Błędy interpolacji liniowej zmiennej  $T_s$   
Fig. 3. Errors of linear interpolation variable  $T_s$

Maksymalny błąd częstotliwości  $\delta f_{g(i)}$ , popełniany w wyniku stosowania proponowanej metody, można wyznaczyć ze wzoru

$$|\delta f_{g(i)}| = \frac{|AT_s + B(f_{g(i-1)} + \Delta f_g) + C|}{\sqrt{A^2 + B^2}} \quad (2)$$

przy czym

$$\begin{cases} A = \frac{f_{g(i)} - f_{g(i-1)}}{T_{S(i)} - T_{S(i-1)}}, \\ B = -1, \\ C = f_{g(i-1)} - \frac{f_{g(i)} - f_{g(i-1)}}{T_{S(i)} - T_{S(i-1)}} \end{cases} \quad (3)$$

wartości  $T_s$  oraz  $(f_{g(i-1)} + \Delta f_g)$ , wynikają ze wzorów

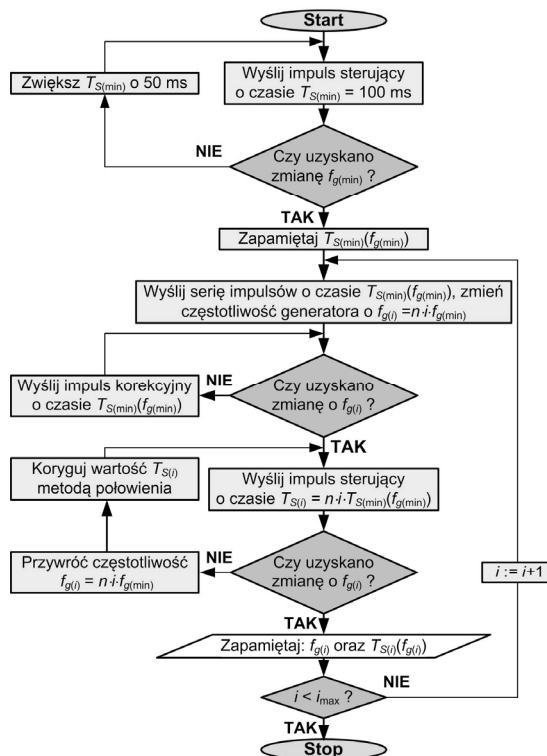
$$\begin{cases} T_s = \frac{d-b}{a-c}, \\ f_{g(i-1)} + \Delta f_g = a \frac{d-b}{a-c} + b \text{ oraz } a \neq c, \end{cases} \quad (4)$$

a współczynniki:  $a, b, c, d$ , z zależności

$$\begin{cases} a = \frac{f_{g(i-1)} - f_{g(i-2)}}{T_{S(i-1)} - T_{S(i-2)}}, \\ b = f_{g(i-2)} - \frac{f_{g(i-1)} - f_{g(i-2)}}{T_{S(i-1)} - T_{S(i-2)}} T_{S(i-2)}, \\ c = \frac{f_{g(i+1)} - f_{g(i)}}{T_{S(i+1)} - T_{S(i)}}, \\ d = f_{g(i)} - \frac{f_{g(i+1)} - f_{g(i)}}{T_{S(i+1)} - T_{S(i)}} T_{S(i)}. \end{cases} \quad (5)$$

### 3. Algorytm identyfikacji

Implementacja proponowanej metody identyfikacji w nowoczesnych, mikroprocesorowych synchronizatorach automatycznych wymaga opracowania, a następnie zastosowania, dedykowanego algorytmu działania. Strukturę odnośnego algorytmu przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Algorytm identyfikacji charakterystyki zadajnika prędkości kątowej  
Fig. 4. The identification algorithm of the angular velocity adjuster characteristic

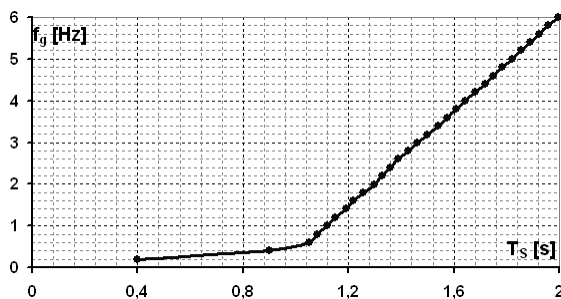
Pierwszym krokiem wynikającym z algorytmu (rys. 4) jest eksperymentalne określenie czasu  $T_{S(min)}$  wyzwalającego ruch silnika w regulatorze prędkości kątowej, a tym samym wywołanie najmniejszej powtarzalnej zmiany częstotliwości  $f_{g(min)}$  synchronizowanego obiektu. Następnie, rozpoczynając od znamionowej wartości częstotliwości obiektu, wysyłane są serie impulsów regulacyjnych, które wymuszają zmianę częstotliwości obiektu o wartość  $f_{g(i)}$ . Kolejnym krokiem, jest poszukiwanie takiego czasu trwania impulsu sterującego  $T_{S(i)}$ , którego wartość spowodowałaby

powrót częstotliwości obiektu do wartości pierwotnej – znamionowej. W przypadku, gdy wyznaczony czas  $T_{S(i)} = i \cdot T_{S(\min)}$  jest zbyt długi, opisana procedura jest powtarzana, a mniejsza wartość  $T_{S(i)}$ , zostaje wyznaczona metodą połowienia przedziału. W przypadku wyznaczenia wartości  $T_{S(i)}$  powodującej zmianę częstotliwości obiektu o zadaną wartość  $f_{g(i)}$  (z akceptowalną dokładnością), oba parametry są rejestrowane, a procedura określona algorytmem jest powtarzana, dla kolejnego punktu charakterystyki.

Z uwagi na długi czas identyfikacji charakterystyki zadajnika, celowe jest wprowadzenie w algorytmie z rys. 4, parametru  $n$ , stanowiącego mnożnik „skoku” częstotliwości  $f_{g(i)}$ . Wówczas skrócenie czasu identyfikacji odbywa się kosztem dokładności, którą można oszacować, korzystając ze wzoru (2).

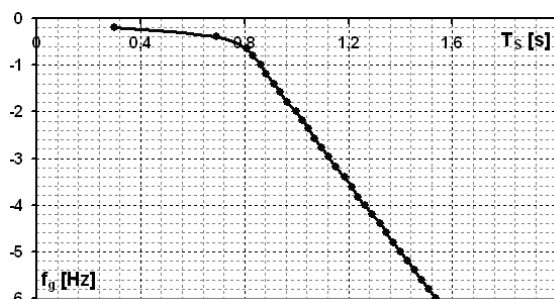
#### 4. Weryfikacja proponowanych rozwiązań

Proces weryfikacji proponowanych rozwiązań został przeprowadzony na stanowisku laboratoryjnym wyposażonym w blok wytworczy o mocy 27 kVA, z zadajnikiem napięcia o charakterystyce nieliniowej. Za satysfakcjonującą uznawano identyfikację z błędem nie przekraczającym 10% wartości dopuszczalnej różnicy częstotliwości w chwili łączenia (która w rozpatrywanym przypadku została ustalona na poziomie 0,8 Hz). Uzyskaną, przykładową, charakterystykę zadajnika prędkości kątowej, dla skokowej zmiany częstotliwości o 0,2 Hz (dla  $n = 20$ ,  $f_{g(\min)} = 0,01$  Hz oraz  $T_{S(\min)} = 150$  ms), dla obydwu kierunków zmian prędkości kątowej, przedstawiono na rys. 5 oraz na rys. 6.



Rys. 5. Zidentyfikowana charakterystyka zadajnika prędkości kątowej w kierunku narastającym do wartości znamionowej [6]

Fig. 5. The identified characteristic of the angular velocity adjuster towards increasing the nominal value [6]



Rys. 6. Zidentyfikowana charakterystyka zadajnika prędkości kątowej w kierunku malejącym do wartości znamionowej

Fig. 6. The identified characteristic of the angular velocity adjuster towards decreasing the nominal value

Prowadząc etap weryfikacji stwierdzono prawidłowy przebieg procesu identyfikacji. Maksymalny błąd częstotliwości  $\delta f_{g(i)}$  wyniósł 0,07 Hz, co stanowiło wartość mniejszą od założonej (równej 0,08 Hz). Podczas badań zaobserwowano również istotne wydłużanie czasu identyfikacji wraz ze wzrostem wartości parametru  $n$  odpowiedzialnego za zmianę częstotliwości  $f_{g(i)}$ . Przykła-

dowo, dla  $n = 20$  (rys. 5), czas ten wyniósł 68 minut i 25 sekund, a dla  $n = 10$  ponad dwie godziny i 25 minut (był, więc ponad dwukrotnie dłuższy). Tego rodzaju wydłużenie czasu identyfikacji wynika z liczby powtórzeń programu, wymuszonych realizacją algorytmu z rys. 4. W praktyce dwukrotnemu zwiększeniu parametru  $n$  odpowiada dwukrotnie zmniejszenie liczby punktów charakterystyki, w związku, z czym dokładność identyfikacji maleje, a czas trwania całego procesu skraca się.

#### 5. Wnioski

Przedstawiona metoda stanowi, w literaturze krajowej, pierwszą pełną publikację, która traktuje, w jaki sposób zautomatyzować żmudny i czasochłonny proces identyfikacji charakterystyk prędkości kątowej synchronicznych obiektów elektroenergetycznych, w celu umożliwienia szybkiego ich połączenia do pracy równoległej. Tego rodzaju rozwiązanie jest szczególnie ważne w przypadku zastosowania w synchronizatorach automatycznych, najnowszych znanych i opracowanych metod [6], pozwalających na istotne – nawet kilkakrotne, w porównaniu z metodami klasycznymi – skrócenie czasu łączenia. Działanie to, nabiera szczególnego znaczenia w licznych sytuacjach ruchowych wymagających zdecydowanego i szybkiego działania, tj.: w sytuacjach wymagających szybkiej restytucji systemu elektroenergetycznego, lub w sytuacjach przeciążeniowych, wymagających niezwłocznego dostarczenia dodatkowej mocy do systemu.

Przeprowadzone badania potwierdzają skuteczność proponowanego rozwiązania oraz pokazują wpływ wartości parametrów konfiguracyjnych (występujących w algorytmie) na dokładność i czas trwania procesu identyfikacji. Korelacja pomiędzy parametrem  $n$  występującym algorytmie (rys. 4), a czasem oraz dokładnością identyfikacji, stanowią podstawę określania początkowej wartości parametru  $n$  w potencjalnych urządzeniach realizujących funkcję synchronizacji automatycznej, według najnowszych znanych metod (rys. 1).

#### 6. Literatura

- [1] Automatic Synchronizer BE1-25A. Basler Electric Bulletin 2010.
- [2] Grono A. J.: Komputerowa synchronizacja prądnic. Gdańsk: PAN, Seria wydawnicza Monografie, Komitet Elektrotechniki, Postępy Napędu Elektrycznego i Energoelektroniki. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej 2001.
- [3] Instrukcja użytkownika synchronizatora mikroprocesorowego SM-06A. PUP KARED Sp. z o.o. Gdańsk-Kowale 2004.
- [4] M-0193B Syncrocloser Unit Instructions Book, Beckwith Electric CO., INC., USA, Florida, 2004.
- [5] Redlarski G.: Nowa metoda synchronizacji w stanie dynamicznym związanym z wyrównywaniem częstotliwości łączonych obiektów. Przegląd Elektrotechniczny, nr 4/2010.
- [6] Redlarski G.: Nowe rozwiązania automatyzacji procesu łączenia obiektów elektroenergetycznych do pracy równoległej. Politechnika Gdańska, seria Monografie nr 98, Gdańsk 2009.
- [7] Redlarski G.: Sposób szybkiej synchronizacji obiektów elektroenergetycznych uwzględniający charakterystykę nastawnika prędkości kątowej synchronizowanego zespołu wytworczego. Zgłoszenie patentowe nr P-389188 z dnia 02.10.2009 r.
- [8] Reimer D.: Protective Relaying for Power Generation Systems, Taylor & Francis Group, 2006.
- [9] Szczerba Z.: Warunki łączenia do pracy równoległej po awarii w systemie elektroenergetycznym, Automatyka elektroenergetyczna, nr 1/1999.
- [10] Three Phase Synchronizer SPM-D10/YD. Woodward Company 2006.

otrzymano / received: 23.03.2011

przyjęto do druku / accepted: 03.09.2012

artykuł recenzowany / revised paper