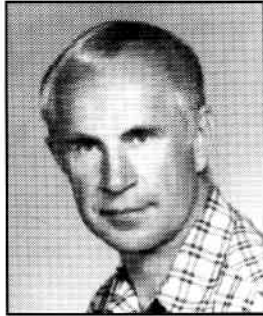


**Andrzej J. GRONO**  
POLITECHNIKA GDAŃSKA  
WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI I AUTOMATYKI

## Wyznaczanie i wizualizacja kąta niezgodności fazowej napięć podczas synchronizacji obiektów elektroenergetycznych

**Dr hab. inż. Andrzej J. Grono** absolwent Wydziału Elektrycznego (obecnie Elektrotechniki i Automatyki) Politechniki Gdańskiej z roku 1963. Na tym Wydziale obronił rozprawę doktorską (1972) i habilitacyjną (1992). Od 1994 roku pracuje w Katedrze Automatyki na stanowisku profesora nadzwyczajnego. Jest członkiem IEEE, PES oraz IASTED. Przedmiotem jego zainteresowań jest automatyka elektroenergetyczna, a w szczególności automatyka synchronizacji prądnic. Jest autorem lub współautorem ponad 125 artykułów i referatów, w tym twórcą lub współtwórcą 36 patentów, z których ponad połowa znalazła zastosowanie w praktyce.



### Streszczenie

**Dokonano krytycznej oceny znanych urządzeń do wyznaczania i wizualizacji kąta niezgodności fazowej napięć podczas synchronizacji obiektów elektroenergetycznych. Opisano oryginalną, opatentowaną metodę przetwarzania napięć obiektów synchronizowanych na sygnał odpowiadający kątowi ich niezgodności fazowej oraz podano sposób wizualizacji tego sygnału za pomocą punktów świetlnych rozłożonych równomiernie na okręgu. Podano przykład zastosowania tej metody w synchronoskopie elektronicznym. Przytoczono wyniki badań synchronoskopu. Opisano też koncepcję systemu komputerowej wizualizacji procesu automatycznej synchronizacji. W zakończeniu sformułowano wnioski.**

### Abstract

**The original and patented method of determination and indication of the phase discrepancy between two voltage signals with close frequencies is presented. This method can be applied to the electronic synchronoscopes with diode indicator. It is based on direct processing of the inputs signals in the steering signal for the diodes placed uniformly on the circle. The example of such device using the presented method is given. The results of laboratory tests are done. Primary conception of computer visualization is presented. Some conclusions are stated.**

### WPROWADZENIE

Poprawna praca systemu elektroenergetycznego w dużej mierze zależy od właściwie zorganizowanej komunikacji pomiędzy operatorem a tym systemem. Dotyczy to zwłaszcza procesu wprowadzania do ruchu kolejnego zespołu elektroenergetycznego. Ten proces obejmuje również synchronizację [1], w której podstawowym parametrem informacyjnym dla operatora jest kąt niezgodności fazowej napięć synchronizowanych obiektów elektroenergetycznych. Potrzeba wyznaczania i wizualizacji tego parametru dotyczy nie tylko wartości, ale też szybkości i kierunku jego zmian. Do tego celu służą synchronoskopy. Mogą one pracować jako odrębne urządzenia lub mogą stanowić fragment systemu komputerowej wizualizacji procesu synchronizacji prądnic.

### DOTYCHCZASOWE ROZWIĄZANIA

W dotychczas stosowanych rozwiązaniach określania i wskazywania kąta niezgodności fazowej napięć obiektów synchronizowanych wykorzystuje się:

- woltomierze zerowe,
- żarówki połączone w układzie „na ciemno” lub w układzie „ze światłem wirującym”,
- synchronoskopy wskazówkowe.

Woltomierze zerowe [2] nie pozwalają na określenie znaku różnicy częstotliwości i charakteryzują się znacznym błędem pomiarowym, zwłaszcza dla większych wartości różnicy częstotliwości. Żarówki w układzie „na ciemno” [2] również nie pozwalają na określenie znaku różnicy częstotliwości oraz nie zapewniają dostatecznej dokładności w otoczeniu punktu zgodności fazowej, ze względu na występowanie strefy martwej, spowodowanej brakiem żarzenia żarówek w znacznym otoczeniu punktu zgodności fazowej. Tę ostatnią niedogodność wykazują również żarówki połączone w układzie „ze światłem wirującym” [2]. Natomiast synchronoskopy wskazówkowe [3, 4] nie są przydatne dla większych wartości różnicy częstotliwości, a ich dokładność jest niewielka w całym zakresie kąta niezgodności fazowej. Poza tym wadą synchronoskopów wskazówkowych jest złożona konstrukcja oraz wrażliwość na czynniki zewnętrzne.

Jak widać, dotychczas stosowane synchronoskopy tylko w niewielkim stopniu spełniają rosnące wymagania stawiane nowoczesnym urządzeniom automatyki elektroenergetycznej. Wprawdzie znane są synchronoskopy elektroniczne, ale informacje na temat zasady ich działania są bardzo skąpe [5, 6]. Taki synchronoskop z wyświetlaczem diodowym opracowano także w Politechnice Gdańskiej [7]. Zastosowano w nim nową, oryginalną metodę wyznaczania i wizualizacji kąta niezgodności fazowej napięć synchronizowanych obiektów elektroenergetycznych [8, 9, 10]. Wprawdzie to elektroniczne urządzenie jest wolne od wad synchronoskopów konwencjonalnych, ale coraz powszechniejsze stosowanie komputerowego sterowania w systemie elektroenergetycznym, pociąga za sobą konieczność wprowadzenia również komputerowego monitorowania licznych procesów w energetyce, w tym także i procesu synchronizacji. Zapewni to możliwość korzystania z jednolitych środków komunikowania się operatora z systemem elektroenergetycznym.

### SFORMUŁOWANIE ZADANIA

Podjmując prace nad nowym synchronoskopem, przyjęto, że:

- kąt niezgodności fazowej będzie wskazywany z dokładnością równą ok. 12 stopni przez diody świecące rozłożone na okręgu, przy czym w otoczeniu punktu zgodności fazowej dokładność będzie dwukrotnie większa;
- urządzenie będzie poprawnie pracować w szerokim zakresie napięć (100÷250 V) i częstotliwości (40÷70 Hz);
- dokładność wskazań będzie praktycznie niezależna od wartości napięć i częstotliwości zawierających się w wyżej podanych przedziałach;
- zbyt duża, bezwzględna wartość różnicy częstotliwości, przy

której wskazania synchronoskopu są nieczytelne, będzie odpowiednio sygnalizowana;

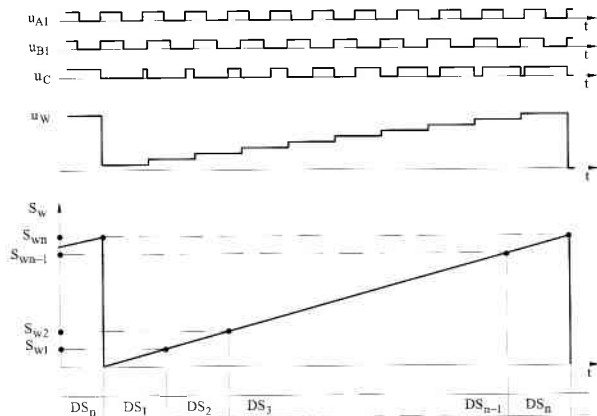
- wskazania synchronoskopu będą możliwie najdokładniejsze w otoczeniu punktu zgodności fazowej;
- będzie sygnalizowany brak napięć wejściowych;
- urządzenie będzie łatwe do strojenia podczas produkcji seryjnej oraz mało wrażliwe na rozrzut wartości parametrów elementów składowych.

Natomiast w zakresie komputerowej wizualizacji procesu synchronizacji przyjęto, że proponowane rozwiązanie będzie gwarantować realizację wszystkich, aktualnie możliwych funkcji pakietów wizualizacyjnych, ze szczególnym uwzględnieniem problemów dwustronnej komunikacji operatora z procesem. Ponadto przyjęto, że komputerowa wizualizacja procesu synchronizacji w możliwie szerokim zakresie będzie nawiązywać do dotychczasowych sposobów prezentacji zjawisk zachodzących podczas synchronizacji.

### Rozwiązania proponowane

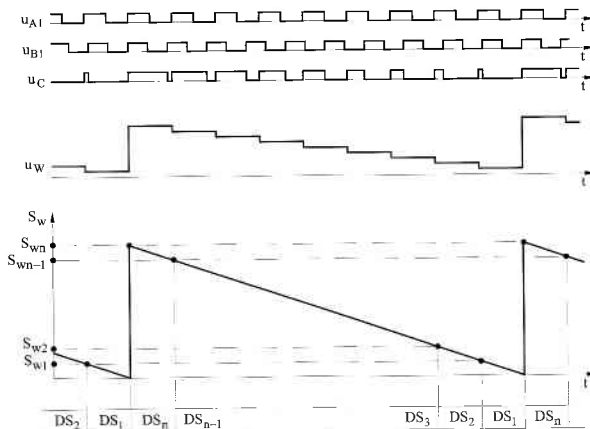
#### Synchronoskop elektroniczny z wyświetlaczem diodowym

W synchronoskopie elektronicznym z wyświetlaczem diodowym wykorzystuje się opatentowaną metodę wyznaczania i wizualizacji kąta niezgodności fazowej dwóch napięć przemiennych o zbliżonych pulsacjach (rys. 1 i rys. 2) [8].



Rys. 1. Przebiegi poszczególnych sygnałów dla dodatniego znaku różnicy częstotliwości napięć obiektów synchronizowanych

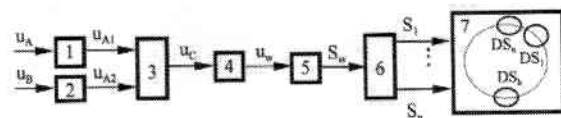
Metoda ta polega na przetwarzaniu tych napięć na odpowiadające im dwa przebiegi prostokątne  $u_{A1}$  i  $u_{B1}$ . Te przebiegi prostokątne wykorzystuje się do tworzenia przebiegu impulsowego  $u_C$  o impulsach rozpoczynających się w chwilach zmiany wartości – w określonym kierunku – jednego przebiegu prostokątnego, a kończących się w chwilach zmiany wartości – w tym samym kierunku – drugiego przebiegu prostokątnego. Wartość średnia współczynnika wypełnienia przebiegu impulsowego  $u_C$  odpowiada kątowni niezgodności fazowej przetwarzanych napięć przemiennych i jest rosnącą lub malejącą funkcją czasu, zależnie od znaku różnicy ich częstotliwości. Następnie współczynnik wypełnienia przebiegu impulsowego  $u_C$ , w znany sposób [11], zamienia się na napięcie  $u_w$ , którym z kolei – za pośrednictwem odpowiadającego temu napięciu uśrednionego sygnału  $S_w$  oraz elementu sterującego – steruje się zestawem diod świecących  $DS_1, DS_2, \dots, DS_n$  równomiernie rozmieszczonych na okręgu.



Rys. 2. Przebiegi poszczególnych sygnałów dla ujemnego znaku różnicy częstotliwości napięć obiektów synchronizowanych

Łatwo zauważyć, że zależnie od wartości kąta niezgodności fazowej jest aktywna odpowiednia, tylko jedna, dioda świecąca. Jeżeli częstotliwości napięć przemiennych różnią się wzajemnie, to kąt ich niezgodności fazowej zmienia się w czasie i następuje ustawiczne przełączanie świecenia na kolejne diody świecące. Rozmieszczenie diod na okręgu daje efekt „wirowania”, którego prędkość kątowa i kierunek zależą odpowiednio od wartości i znaku różnicy częstotliwości.

Zaletą proponowanej metody jest możliwość uproszczenia konstrukcji synchronoskopu przez wyeliminowanie dość złożonych układów elektromechanicznych. Wpływa to na zwiększenie jego trwałości i niezawodności, gdyż urządzenie jest bezstykowe i nie wymaga żadnej konserwacji podczas eksploatacji. Nie bez znaczenia jest także możliwość korzystania z jednofazowych napięć o praktycznie zerowym poborze mocy. Jest to istotne zwłaszcza podczas testowania automatycznych synchronizatorów na stanowisku badawczym, gdzie na ogół korzysta się z półprzewodnikowych, jednofazowych generatorów napięć przemiennych małej mocy. Ma to również znaczenie w eksploatacji, gdy instaluje się synchronoskop w znacznym oddaleniu od miejsca przyłączenia napięć pomiarowych. Schemat układu do praktycznej realizacji przedstawionej metody w wersji analogowej jest przedstawiony na rys. 3.

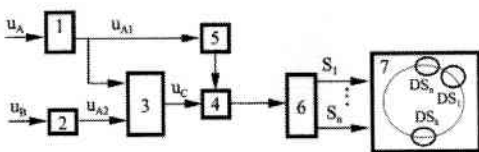


Rys. 3. Schemat blokowy układu synchronoskopu w wersji analogowej: 1, 2 – przetworniki napięcia sinusoidalnego na prostokątne, 3 – przetrzutnik, 4 – element przetwarzający ciąg impulsów na napięcie, 5 – element wzmacniająco-filtrujący, 6 – element sterujący, 7 – wskaźnik diodowy

Wykorzystuje się tu typowe elementy i układy elektroniki. W szczególności elementem sterującym może być układ scalony UL

1970N, przeznaczony do sterowania wskaźnikiem diodowym złożonym z 16 diod świecących, co jednak nie we wszystkich przypadkach zapewnia należyłą dokładność. Dotyczy to zwłaszcza synchronizacji obiektów elektroenergetycznych o znacznych mocach znamionowych. Możliwe jest dwukrotne zwiększenie dokładności przez zastosowanie dwóch takich układów scalonych, sterujących łącznie 30 diodami świecącymi. Jednakże każde z powyższych rozwiązań prowadzi do układu, który wymaga dokładnego strojenia podczas produkcji seryjnej. Ponadto zmiana parametrów elementów składowych, powstała w wyniku ich starzenia się, może powodować utratę dokładności wskazań przyrządu.

Powyższe wady można wyeliminować, stosując wersję cyfrową synchronoskopu. Podobnie jak w wersji analogowej wykorzystuje się tu przetworniki napięcia sinusoidalnego na prostokątne oraz element przerzutnikowy, w którym formuje się przebieg impulsowy o współczynniku wypełnienia zależnym od kąta niezgodności fazowej napięć sinusoidalnych. W dalszej części układ jest odmienny od poprzedniego, gdyż czas trwania impulsu zamienia się nie na napięcie – jak poprzednio – lecz na liczbę impulsów. Odbywa się to metodą bramkowania elementu zliczania impulsów podawanych przez generator o stabilnej częstotliwości. Następnie liczba zliczonych impulsów jest dekodowana przez demultiplekser na sygnały sterujące diodami świecącymi, rozmieszczonymi na okręgu, podobnie jak w poprzednim układzie. Zmiana kąta niezgodności fazowej powyżej wartości określonej dyskretyzacją podziału tego kąta powoduje świecenie kolejnej diody. Łatwo zauważyć, że w każdej z wyżej omówionych wersji synchronoskopu występuje zależność wskazań od wartości częstotliwości każdego z synchronizowanych obiektów elektroenergetycznych. Wynika to z faktu, że czas trwania każdego impulsu przebiegu impulsowego zależy nie tylko od wartości kąta niezgodności fazowej, lecz także od okresów napięć synchronizowanych obiektów elektroenergetycznych. Dla stosunkowo dużych zmian tego parametru należy zastosować generator o zmiennej częstotliwości, zależnej od częstotliwości napięcia jednego z synchronizowanych obiektów elektroenergetycznych. Można to osiągnąć, stosując układ powielania częstotliwości tego napięcia, wykorzystujący pętlę fazową. W prototypie zastosowano powielanie częstotliwości o wartości 256. Okazało się to w zupełności wystarczające. Natomiast do detekcji zbyt dużej wartości bezwzględnej różnicy częstotliwości zastosowano powielanie częstotliwości o wartości 128. Odbywa się to przez zliczanie impulsów o częstotliwości równej 128-krotnej częstotliwości napięcia sieci w czasie trwania półfali napięcia prądniczej oraz porównywanie liczby zliczonych impulsów z liczbąadaną, odpowiadającą określonej wartości różnicy częstotliwości. W ten sposób zbyt duża lub zbyt mała częstotliwość napięcia prądniczej, dla której wskazania synchronoskopu stają się nieczytelne, jest sygnalizowana przez odpowiednią diodę świecącą (koloru czerwonego) i powoduje wygaszenie diod rozmieszczonych na okręgu. Zanik każdego napięcia wejściowego jest również sygnalizowany.



Rys. 4. Schemat blokowy układu synchronoskopu z pętlą fazową PLL: 1, 2 – przetworniki napięcia sinusoidalnego na prostokątne, 3 – przerzutnik, 4 – licznik impulsów, 5 – pętla fazowa PLL, 6 – demultiplekser, 7 – wskaźnik diodowy

Schemat blokowy synchronoskopu w wersji cyfrowej z pętlą fazową PLL jest przedstawiony na rys. 4. Widać, że do budowy tego przyrządu również wykorzystuje się typowe elementy i układy elektroniki.

### Komputerowa wizualizacji procesu synchronizacji

W związku z coraz powszechniejszym stosowaniem komputerów do sterowania pracą poszczególnych elementów systemu elektroenergetycznego pojawia się potrzeba poszukiwania nowych rozwiązań, przydatnych do aplikacji komputerowej, nie tylko w zakresie realizacji warunków synchronizacji obiektów elektroenergetycznych, ale także i w zakresie komputerowej wizualizacji tego procesu z możliwie szerokim zakresem obsługi [12]. W dotychczasowych rozwiązaniach automatyzacji procesu synchronizacji te zagadnienia są w ogóle pomijane.

Synchronizacja prądnic jest procesem specyficznym w porównaniu z innymi procesami technologicznymi wizualizowanymi komputerowo, bowiem charakteryzuje się dużą szybkością zmian licznych wielkości i krótkim czasem ich trwania, co stawia monitorowaniu szereg dodatkowych wymagań oraz wprowadza pewne ograniczenia.

Ze względu na dużą dynamikę procesu synchronizacji w opracowanym systemie wizualizacyjnym zrezygnowano z prezentowania wartości mierzonych za pomocą liczb, tak jak to ma miejsce w wyświetlaczach cyfrowych. Posłużono się sposobem typowym dla mierników analogowych, gdzie dana wartość jest określana przez odpowiedni wskaźnik odpowiednio usytuowany względem skali. Takie podejście zapewni szybszą, niż ma to miejsce w przypadku mierników cyfrowych, ocenę sytuacji na podstawie kilku danych, co w przypadku synchronizacji ma większe znaczenie niż znajomość dokładnych wartości wielkości mierzonych. Krótki z reguły czas trwania samego procesu synchronizacji sprawia, że operator nie jest w stanie analizować dużej liczby danych oraz przełączać się pomiędzy wieloma ekranami, by sięgnąć po bardziej szczegółowe informacje lub inne sposoby przedstawienia graficznego danego procesu. Dlatego w proponowanym systemie całość wizualizacji jest zrealizowana tylko na jednym ekranie i zapewnia obserwację podstawowych trzech wielkości: różnicy faz, różnicy amplitud i różnicy częstotliwości napięć prądniczej i sieci. Z poziomu operatora możliwe jest ponadto zainicjowanie i przerwanie procesu synchronizacji w dowolnej chwili. Realizuje się to przez naciśnięcie określonego klawisza na klawiaturze.

### BADANIA

Wykonany prototyp synchronoskopu poddano badaniom laboratoryjnym. Celem tych badań było określenie przedziałów zmienności amplitud i częstotliwości napięć wejściowych, w których wskazania przyrządu są prawidłowe oraz pomiary wartości granicznych różnicy częstotliwości, których przekroczenie jest sygnalizowane.

W wyniku badań stwierdzono, że:

- dla kąta niezgodności fazowej równego 0 lub  $\pi$  przyrząd pracuje poprawnie w zakresie zmian jednego z napięć wejściowych od 37 V do 250 V, gdy drugie napięcie wejściowe wynosi 250V,
- dla napięć wejściowych zawierających się w wyżej podanych granicach, wskazania przyrządu są poprawne w przedziale częstotliwości każdego z tych napięć od 38 Hz do 103 Hz,
- dla częstotliwości jednego z napięć wejściowych równej 50 Hz, przyrząd pracuje poprawnie przy zmianie częstotliwości drugiego z napięć w przedziale od 48,7 Hz do 51 Hz.

Wykonany system komputerowej wizualizacji procesu

synchronizacji również poddano badaniom laboratoryjnym, które wykazały poprawność jego działania.

## WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań laboratoryjnych można stwierdzić, że opracowany i wykonany synchronoskop spełnia wszystkie wymagania określone w założeniach projektowych. Pod względem eksploatacyjnym jest niewielki i prosty w obsłudze. Brak elementów ruchomych zapewnia niewrażliwość na wstrząsy i korzystnie wpływa na pewność działania. Na szczególnie podkreślenie zasługuje rozszerzenie spełnianych funkcji, bardzo istotnych w procesie eksploatacji. Stało się to możliwe dzięki zastosowaniu układu elektronicznego, w którym realizacja wielu – nawet złożonych – funkcji jest możliwa i stosunkowo prosta. W wersji cyfrowej urządzenie nie wymaga praktycznie żadnego strojenia podczas produkcji seryjnej, które jest zwykle kłopotliwe i kosztowne, ze względu na konieczność zaangażowania bardziej fachowego personelu produkcyjnego. Osiągnięte podczas badań zakresy działania przyrządu mogą być łatwo zmienione i dostosowane do indywidualnych potrzeb użytkownika.

Zastosowanie komputerowej wizualizacji procesu automatycznej synchronizacji prądu o pełnym zakresie funkcji realizowanych przez pakiety wizualizacyjne:

- umożliwia wnikliwą obserwację procesu synchronizacji,
- ułatwia sterowanie tym procesem,
- zapewnia rejestrację przebiegów wszystkich istotnych dla tego procesu parametrów,
- wpływa na poprawę jakości energii elektrycznej w wyniku lepiej prowadzonego procesu wprowadzania do ruchu kolejnego obiektu elektroenergetycznego.

## LITERATURA

[1] A. GRONO: Nowe rozwiązania automatycznych synchronizatorów obiektów elektroenergetycznych. Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej, Elektryka LXIX, 1991 z. 471 (rozprawa habilitacyjna).

- [2] Z. BAJOREK.: Maszyny elektryczne. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1977.
- [3] S. LEBSON: Podstawy miernictwa elektrycznego. Państwowe Wydawnictwa Naukowe, Warszawa 1964.
- [4] S. LEBSON.: Elektryczne przyrządy pomiarowe. Państwowe Wydawnictwa Techniczne, Warszawa 1960.
- [5] Led synchronoscope and check sync. Relay. Prospekt firmy DEIF A/S, nr D511-1/E.
- [6] Synchronoscope M8100. Prospekt firmy SELCO, nr M 8195-32.
- [7] A. GRONO: Synchronoskop elektroniczny z wyświetlaczem diodowym. Automatyka Elektroenergetyczna 1994, nr 1.
- [8] A. GRONO: Sposób wyznaczania i wskazywania kąta niezgodności fazowej dwóch napięć przemiennych o zbliżonych pulsacjach. Patent RP nr 162032.
- [9] A. GRONO: Metoda wyznaczania kąta niezgodności fazowej napięć podczas synchronizacji. Automatyka Elektroenergetyczna 1994, nr 2.
- [10] A. GRONO: Określanie i wskazywanie kąta niezgodności fazowej napięć obiektów synchronizowanych. Referat na VII Międzynarodowej Konferencji Naukowej Aktualne Problemy w Elektroenergetyce (APE'95), organizowanej przez Katedrę Systemów Elektroenergetycznych Politechniki Gdańskiej w dniach 12-14 czerwca 1995 roku w Juracie. Materiały Konferencyjne, Tom I oraz Automatyka Elektroenergetyczna 1996, nr 2-3.
- [11] A. GRONO, R. ZIELIŃSKI: Metoda przetwarzania kąta niezgodności fazowej przebiegów harmonicznnych na napięcie przy synchronizacji obiektów elektroenergetycznych. Przegląd Elektrotechniczny 1986, nr 6.
- [12] R. TUTAJ: Wizualizacja przemysłowa – aktualne trendy i wymagania. Pomiary Automatyka Robotyka 1997, nr 8.