

Prof. dr hab. inż. Andrzej Grono
Dr inż. Grzegorz Redlarski
Dr inż. Jacek Zawalich
Politechnika Gdańska
Wydział Elektrotechniki i Automatyki
Katedra Automatyki

KOMPUTEROWE BADANIA AUTOMATYCZNYCH SYNCHRONIZATORÓW PRĄDNIC

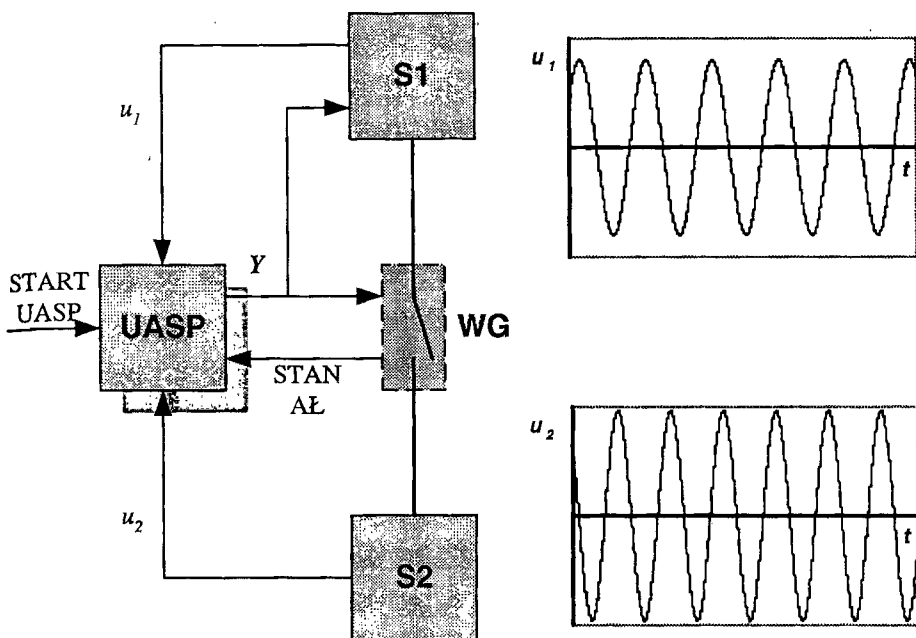
Przedstawiono istotę synchronizacji w systemie elektroenergetycznym, zwrócono uwagę na konsekwencje nieprawidłowego prowadzenia tego procesu, opisano nowoczesne urządzenia diagnostyczno-badawcze automatycznych synchronizatorów oraz podano przykładowe okna pod-systemu wizualizacji wybranych urządzeń z uwzględnieniem przebiegów istotnych parametrów procesu synchronizacji prądnic.

COMPUTER TESTING OF SYNCHRONIZATION PROCESS OF POWER GENERATORS

The idea of synchronization process in electrical power systems is presented. Testing and diagnostic devices for automatic synchronizers are described. Computer visualization of synchronization process is given. Conclusions are drawn.

1. ISTOTA PROCESU SYNCHRONIZACJI W SYSTEMIE ELEKTROENERGETYCZNYM

Proces wprowadzania do ruchu kolejnego obiektu elektroenergetycznego w systemie elektroenergetycznym (SEE) jest zadaniem niezwykle ważnym i odpowiedzialnym, gdyż nieprawidłowy jego przebieg może powodować konsekwencje prawne, społeczne i finansowe [1, 2, 4]. Istotny fragment tego procesu jest realizowany za pośrednictwem układów automatycznej synchronizacji prądnic (UASP), zwanych krócej automatycznymi synchronizatorami prądnic. W większości zastosowań UASP dokonują łączenia pojedynczej prądnicy synchronicznej z SEE, rzadziej natomiast służą do spinania wydzielonych SEE tworzących tzw. prądnice zastępcze. Sposób połączenia UASP z synchronizowanym obiektem elektroenergetycznym (S1) oraz systemem elektroenergetycznym SEE (S2) przedstawiono na rys. 1. W chwili podania sygnału START na odpowiednie wejście UASP mierzy on napięcia u_1 i u_2 reprezentujące synchronizowane obiekty elektroenergetyczne oraz – za pośrednictwem sygnału STAN AŁ – sprawdza stan wyłącznika głównego (WG): aparat łączeniowy może być zamknięty lub otwarty. Następnie UASP wysyła wektor sygnałów sterujących Y oddziałujących na obiekt S1. Celem tego oddziaływania jest zrównanie amplitud napięć i częstotliwości synchronizowanych obiektów elektroenergetycznych z określoną tolerancją (warunki: amplitudowy i częstotliwościowy) i załączenie wyłącznika głównego, w chwili spełnienia powyższych warunków oraz warunku fazowego, z uwzględnieniem predykcji chwili zgodności fazowej wymienionych napięć.



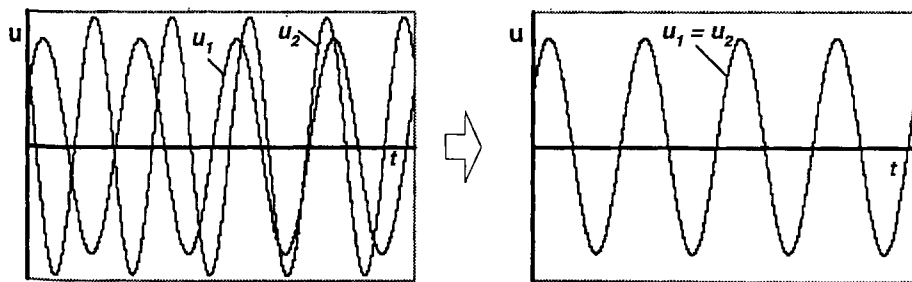
Rys. 1. Uproszczony schemat realizacji procesu synchronizacji w SBE

2. GŁÓWNE PRZYCZYNY I SKUTKI NIEPRAWIDŁOWEGO PRZEBIEGU PROCESU SYNCHRONIZACJI

Idealny przebieg procesu synchronizacji wymaga spełnienia trzech określonych warunków synchronizacji: amplitudowego – warunkującego równość amplitud napięć reprezentujących synchronizowane obiekty elektroenergetyczne, częstotliwościowego – warunkującego zgodność częstotliwości tych napięć oraz fazowego – warunkującego zgodność faz obu napięć w chwili zamknięcia styków wyłącznika głównego. Realizacja przez UASP w/w warunków prowadzi do tzw. ogólnego warunku synchronizacji

$$u_1(t) = u_2(t) \quad (1)$$

którego spełnienie jest związane ze zgodnością napięć synchronizowanych obiektów elektroenergetycznych w chwili zamknięcia styków wyłącznika głównego (rys. 2).



Rys. 2. Ilustracja realizacji ogólnego warunku synchronizacji

W praktyce osiągnięcie idealnego synchronizmu nie jest możliwe. Powodem tego mogą być m.in. nieprawidłowości związane z działaniem szeregu urządzeń automatyki oraz zakłócenia występujące w napięciach synchronizowanych obiektów [1, 3].

Do grupy układów automatyki, mogących powodować pogorszenie parametrów synchronizacji należy zaliczyć przede wszystkim: układy automatycznej synchronizacji prądnic, układy regulacji prędkości kątowej maszyny napędowej oraz układy regulacji napięcia prądnicy synchronicznej. Nieprawidłowe ich działanie może stać się przyczyną powstawania pewnych procesów przejściowych. Należy tu przede wszystkim wymienić udary prądu wyrównawczego i udary mocy wyrównawczej oraz przysiadły napięcia i udary momentów obrotowych, które ujemnie wpływają na zachowanie się samych obiektów elektroenergetycznych oraz całego systemu elektroenergetycznego. W efekcie może to doprowadzić do naruszenia stabilności pracy równoległej, a w krańcowym przypadku nawet do utraty synchronizmu [1, 3].

Zakłócenia powstałe w napięciach synchronizowanych obiektów elektroenergetycznych, wskutek pewnej ich dynamiki, stanowią źródło większości kłopotów podczas synchronizacji, bowiem częstokroć uniemożliwiają realizację funkcji UASP w taki sposób, aby były zachowane wartości dopuszczalnych odstępstw od warunków idealnej synchronizacji. Z punktu widzenia UASP pojawiają się one w sposób losowy i mogą wynikać z dużych i szybkich zmian obciążenia, zwarc, awaryjnych zmian konfiguracji układu przesyłowego itp. Do grupy zakłóceń występujących w napięciach synchronizowanych obiektów najczęściej zalicza się [1, 2, 3]:

- zakłócenia związane z „pływaniami” częstotliwości i amplitudy,
- zakłócenia spowodowane wpływem nieliniowych impedancji systemu, które wywołują nieparzyste składowe harmoniczne (często 3, 5, 7), których amplitudy nie przekraczają kilku procent wartości amplitudy podstawowej harmonicznej,
- zakłócenia przebiegu sinusoidalnego w pobliżu przejścia przez wartość zerową, spowodowane występowaniem parzystych składowych harmonicznych,
- zakłócenia spowodowane przełączeniami w urządzeniach półprzewodnikowych (np. tyrystory), które przenoszą się poprzez transformatory,
- szybkie i stosunkowo duże zmiany napięcia powstałe wskutek zwarc występujących w systemie elektroenergetycznym,
- zmiany częstotliwości napięcia spowodowane przeciążeniami zespołów prądotwórczych tworzących wyspy.

Przedstawione powyżej przyczyny oraz ich skutki, częstokroć warunkujące nieprawidłowy przebieg procesu synchronizacji, skłaniają do prowadzenia ciągłych badań kontrolnych i diagnostyki urządzeń biorących udział w tym procesie, ze szczególnym uwzględnieniem UASP.

W referacie zaprezentowano nowoczesne urządzenia komputerowe umożliwiające dokonywanie badań UASP na wszystkich etapach „życia” tych układów. Począwszy od etapu prototypu oraz produkcji, kiedy to szczególnie istotna jest szybka detekcja błędów powstałych wskutek nieprawidłowego działania oprogramowania UASP lub wadliwej konstrukcji jego struktury sprzętowej, poprzez okres eksploatacji, kiedy to należy dokonywać okresowych przeglądów mających na celu ocenę zdolności UASP do wykonywania synchronizacji, z określoną dokładnością, w określonych (zbliżonych do rzeczywistych) warunkach pracy, aż do wycofania urządzenia z użytku.

3. NOWOCZESNE URZĄDZENIA DO BADAŃ UASP

3.1. Ogólne zadania stawiane urządzeniom do badań UASP

Zakres zadań stawianych nowoczesnym urządzeniom badawczo-diagnostycznym UASP jest bardzo szeroki. Wynika to z faktu, że układy te pełnią niezwykle ważną i odpowiedzialną rolę podczas wprowadzania do ruchu kolejnego zespołu prądotwórczego, bądź też podczas spinania wydzielonych SEE. Nieprawidłowa praca UASP wpływa, bowiem nie tylko na jakość wytwarzanej i dostarczanej do odbiorców energii elektrycznej, ale i bezpieczeństwo samego SEE. Dlatego też badania UASP powinny być prowadzone na wszystkich etapach „życia” tych układów.

Na etapie prototypu, kiedy to ujawnia się najwięcej usterek powstającego układu oraz na etapie produkcyjnym, urządzenia testujące powinny realizować zakrojone na szeroką skalę czynności diagnostyczne. Celem takiego działania jest sprawdzanie poprawności wykonywania programu głównego, sterującego UASP oraz jego struktury sprzętowej. Działania diagnostyczne mają, zatem na celu wykrycie ewentualnych wad nowo powstającego urządzenia już we wczesnym stadium jego „życia”. Ze strony oprogramowania wadami tymi może być np. nieprawidłowe odmierzenie czasu własnego załączania wyłącznika głównego, czy też zaprzestanie wysyłania przez UASP sygnałów sterujących oraz brak sygnalizacji błędów, podczas wystąpienia pewnych, niekontrolowanych zakłóceń w SEE. Natomiast ze strony struktury sprzętowej UASP może to być, przykładowo, nieprawidłowe działanie elementów sterujących UASP, którymi są zazwyczaj przekaźniki elektromagnetyczne.

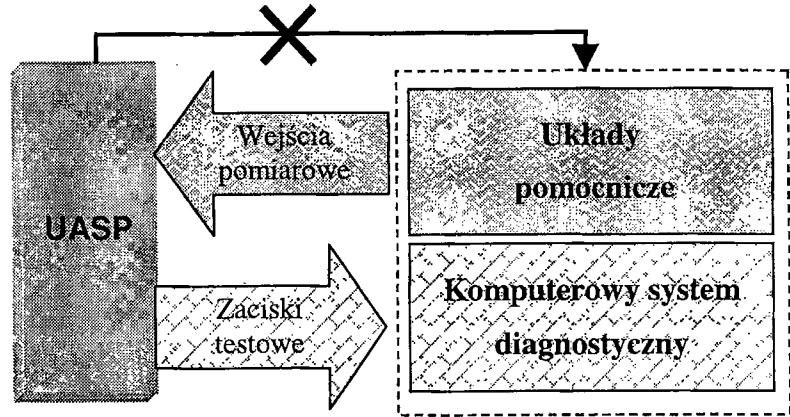
Na etapie eksploatacji, od chwili wprowadzenia UASP do eksploatacji, aż do momentu jego wycofania z użytku niezbędna jest ocena całościowa. Celem tej oceny jest określenie zdolności badanego układu do wykonania synchronizacji z określoną dokładnością, w określonych warunkach pracy, wyznaczenie terminu kolejnego przeglądu oraz ewentualne określenie czasu, przez jaki urządzenie to może pozostać w eksploatacji.

Z kolei jeszcze inne wymogi powinny spełniać urządzenia badawczo-diagnostyczne stosowane podczas opracowywania nowych metod synchronizacji i późniejszego ich implementowania w UASP. Wówczas bowiem niezwykle istotne jest sprawdzenie działania metody w różnych warunkach pracy, jakie mogą wystąpić ze strony obydwu synchronizowanych obiektów elektroenergetycznych. Dlatego też celowe jest wówczas wyposażanie urządzeń testujących w odpowiednie narzędzia (strukturę sprzętową oraz oprogramowanie) umożliwiające narzucenie badanemu synchronizatorowi różnych warunków pracy - nawet takich, które pod wieloma względami są ostrzejsze od tych, które mogą wystąpić na rzeczywistych obiektach elektroenergetycznych, celem zachowania pewnego marginesu bezpieczeństwa.

3.2. Podział nowoczesnych urządzeń badawczo-diagnostycznych

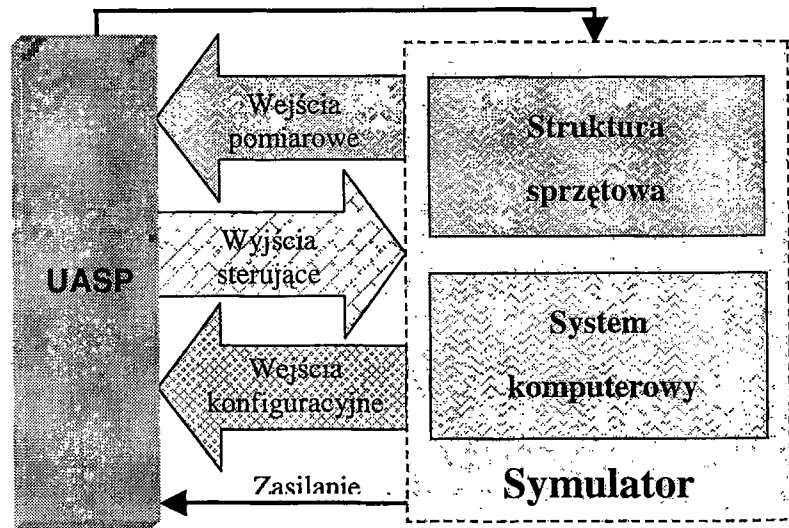
Nowoczesne urządzenia badawczo-diagnostyczne UASP stanowią obecnie grupę urządzeń sterowanych mikroprocesorowo lub za pomocą komputera PC. Znane urządzenia, np. [2, 4], można podzielić na dwie grupy. Pierwszą grupę stanowią systemy diagnostyczne, działające w tzw. pętli otwartej. Oznacza to brak sprzężenia zwrotnego pomiędzy urządzeniem testującym, a badanym UASP. Metodykę prowadzenia badań UASP w pętli otwartej przedstawiono na bazie rys. 3. Do wejść pomiarowych UASP są doprowadzone odpowiednie układy pomocnicze umożliwiające generację napięć reprezentujących synchronizowane obiekty elektroenergetyczne. Natomiast do

odpowiednich zacisków testowych UASP jest dołączony system diagnostyczny, który umożliwia rejestrację wartości i przebiegów istotnych parametrów procesu synchronizacji, wizualizację i interpretację uzyskanych wyników, a tym samym wykrywanie ewentualnych nieprawidłowości działania oraz uszkodzeń UASP.



Rys. 3. Metodyka badań UASP w pętli otwartej

Z kolei drugą grupę urządzeń badawczo-diagnostycznych UASP stanowią symulatory pracujące w tzw. pętli zamkniętej. Oznacza to, iż pomiędzy urządzeniem badawczo-diagnostycznym (symulatorem), a badanym układem automatycznej synchronizacji prądnic występuje sprzężenie zwrotne. Metodykę prowadzenia badań UASP w pętli zamkniętej, z udziałem symulatora wyjaśniono na rys. 4.



Rys. 4. Metodyka badań UASP w pętli zamkniętej

W tej grupie urządzeń badawczo-diagnostycznych UASP symulator stanowi niezależne urządzenie. Posiada on własną strukturę sprzętową oraz system komputerowy. Strukturę sprzętową stanowią układy, które umożliwiają połączenie badanego UASP z symulatorem i przepływ sygnałów w czasie rzeczywistym oraz zasilanie obu urządzeń. Natomiast system komputerowy pozwala na pracę urządzenia w czasie rzeczywistym w pętli zamkniętej, narzucenie badanemu układowi warunków pracy zbliżonych do rzeczywistych, dzięki zaimplementowaniu w nim modeli synchronizowanych obiektów elektroenergetycznych oraz wizualizację i interpretację uzyskanych wyników.

4. OCENA UASP Z UDZIAŁEM NOWOCZESNYCH URZĄDZEŃ BADAWCZO-DIAGNOSTYCZNYCH

Ocena UASP z udziałem nowoczesnych urządzeń badawczo-diagnostycznych jest możliwa dzięki odpowiednio opracowanemu podsystemowi wizualizacji tychże urządzeń, który to zapewnia ciągłą komunikację pomiędzy operatorem a procesem. W ogólnym zarysie podsystemy wizualizacji takich urządzeń składają się z trzech grup okien, stanowiących graficzny interfejs użytkownika (GUI), tj.:

- okien konfiguracyjnych – które umożliwiają konfigurację zarówno urządzenia badawczo-diagnostycznego, jak i badanego UASP,
- okien parametrów synchronizacji – które umożliwiają rejestrację podstawowych i dodatkowych parametrów synchronizacji, prowadzenie obliczeń statystycznych oraz zapis do pliku celem dalszej ich obróbki,
- okien przebiegów sygnałów – umożliwiających rejestrację przebiegów istotnych parametrów procesu synchronizacji.

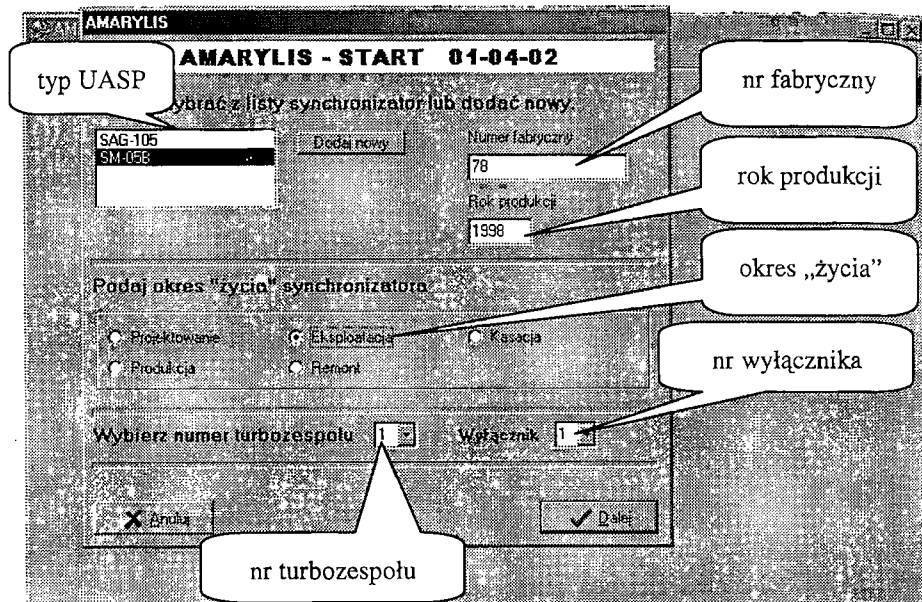
Przykładowe realizacje w/w okien lub też wybrane fragmenty tych okien, zostaną przedstawione i omówione na bazie dwu opracowanych i wykonanych urządzeń badawczo-diagnostycznych, którymi są: komputerowy system diagnostyczny *AMARYLIS* [4] oraz komputerowy symulator procesu synchronizacji prądnic [2].

4.1. Okna konfiguracyjne GUI

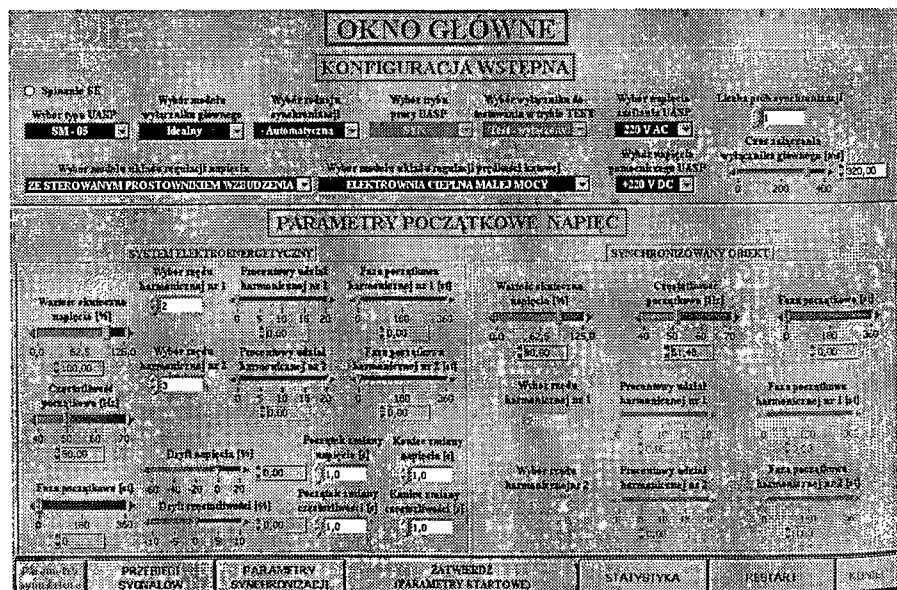
Jak wspomniano okna konfiguracyjne umożliwiają dokonywanie konfiguracji, zarówno samego urządzenia badawczo diagnostycznego, jak i badanego UASP. Liczba parametrów, których nastaw należy dokonać, jest zależna m.in. od przeznaczenia i zadań, jakie stawia się przed urządzeniem testującym. System diagnostyczny *AMARYLIS* jest urządzeniem pracującym w pętli otwartej, służącym głównie do diagnostyki UASP na różnych etapach „życia” tych układów. Natomiast komputerowy symulator procesu synchronizacji prądnic jest urządzeniem pracującym w pętli zamkniętej, umożliwiającym prowadzenie badań UASP w stanach dynamicznych związanych ze zrównywaniem napięć i prędkości kątowych synchronizowanych obiektów elektroenergetycznych, w stanach normalnych i zakłócenionych w SEE.

Na rys. 5 przedstawiono widok okna startowego *AMARYLIS-START* systemu diagnostycznego *AMARYLIS*. Konfiguracja parametrów występujących w tym oknie jest niezbędna do rozpoczęcia badań diagnostycznych UASP. Natomiast na rys. 6 i rys. 7 przedstawiono jedynie widok dwóch z trzech okien konfiguracyjnych symulatora, których każdorazowa konfiguracja jest niezbędna przed rozpoczęciem badań. Parametry, które zawsze należy wprowadzić do systemu - z wyjątkiem realizacji badań

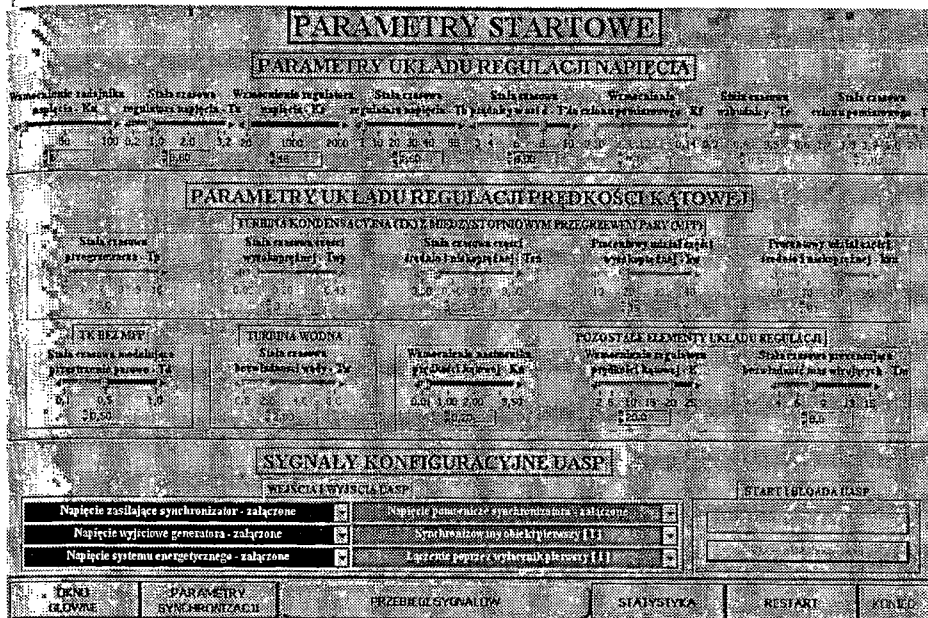
statystycznych - to: typ UASP, wartość napięcia zasilającego oraz napięć pomocniczych UASP, czas załączania wyłącznika głównego. Dodatkowo, jest możliwe określenie parametrów początkowych napięć synchronizowanych obiektów, modeli układów regulacji napięcia i prędkości kątowej synchronizowanego zespołu oraz parametrów tychże modeli.



Rys. 5. Widok okna startowego AMARYLIS-START



Rys. 6. Widok OKNA GŁÓWNEGO symulatora



Rys. 7. Widok okna symulatora o nazwie *PARAMETRY STARTOWE*

4.2. Okna parametrów synchronizacji GUI

Okna parametrów synchronizacji pozwalają na rejestrację podstawowych parametrów synchronizacji (różnica napięć, częstotliwości i faz napięć synchronizowanych obiektów elektroenergetycznych) oraz pewnych parametrów dodatkowych. W przypadku urządzenia, jakim jest symulator, tymi dodatkowymi parametrami są: wartość dryftu różnicy faz (bardzo istotny parametr podczas spinania przez UASP wydzielonych SEE), czas trwania procesu synchronizacji (szczególnie ważny podczas wprowadzania do ruchu jednostek w interwencyjnych szczytowo-pompowych elektrowniach wodnych), współczynniki szczytu oraz kształtu napięć reprezentujących synchronizowane obiekty. Ponadto okna parametrów synchronizacji umożliwiają zwykle prowadzenie obliczeń statystycznych parametrów synchronizacji i zapis uzyskanych wyników do pliku, w celu ich dalszej obróbki.

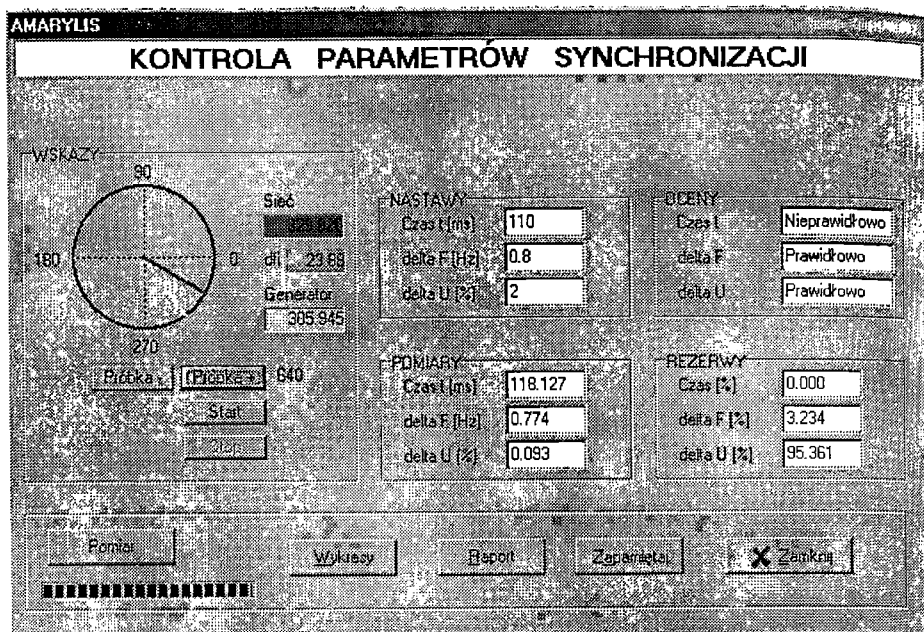
Na rys. 8 przedstawiono okno dialogowe kontroli parametrów synchronizacji, systemu diagnostycznego *AMARYLIS*. Tu parametry synchronizacji, są przedstawiane w formie wartości liczbowych oraz w formie graficznej, gdzie napięcia są reprezentowane przez dwa wektory, a kąt rozchyłu pomiędzy nimi oznacza błąd kąta niezgodności fazowej. Różnica wartości skutecznych napięć ΔU jest obliczana ze wzoru

$$\Delta U \% = \frac{U_g - U_s}{U_s} \quad (2)$$

gdzie U_g i U_s – oznaczają wartość skuteczną napięcia synchronizowanej prądnicy oraz wartość napięcia sieci elektroenergetycznej, natomiast różnica częstotliwości ze wzoru

$$\Delta f = f_g - f_s \quad (3)$$

gdzie f_g i f_s – to częstotliwość napięcia prądnicy oraz częstotliwość napięcia sieci.

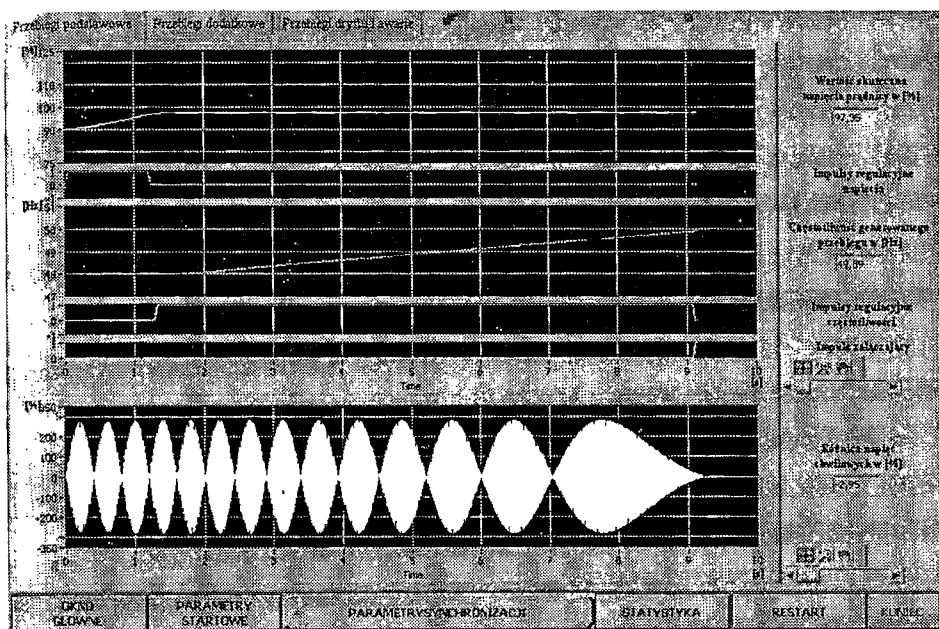


Rys. 8. Okno *KONTROLI PARAMETRÓW SYNCHRONIZACJI* systemu *AMARYLIS*

4.3. Okna przebiegów sygnałów GUI

Okna przebiegów sygnałów urządzeń badawczo-diagnostycznych UASP powinny umożliwiać rejestrację najistotniejszych parametrów podczas łączenia synchronizowanych obiektów elektroenergetycznych. Naturalnie nieco inne przebiegi powinny być rejestrowane podczas spinania wydzielonych systemów elektroenergetycznych, kiedy to szczególnie istotna jest zmiana różnicy częstotliwości napięć synchronizowanych obiektów (tzw. dryft fazy), inne też podczas badań wpływu zakłóceń napięcia sieci na przebieg synchronizacji zespołu prądotwórczego z siecią, a jeszcze inne w sytuacji, bezzakłóceniowej, kiedy jest dokonywana ocena prawidłowości pracy samego UASP. Jednakże w każdej z wyżej wymienionych sytuacji UASP wysyła sygnał załączający wyłącznik główny oraz dokonuje pomiaru napięć reprezentujących synchronizowane obiekty elektroenergetyczne, toteż rejestracja właśnie tych parametrów powinna odbywać się każdorazowo.

Na podstawie powyższego opisu należy stwierdzić, że dobór zestawu rejestrowanych przebiegów podczas synchronizacji może być dość różnorodny i zależny w znacznym stopniu od inicjatywy programisty tworzącego interfejs użytkownika. Na przykład, w symulatorze zostało wyodrębnione tylko jedno okno umożliwiające rejestrację przebiegów podczas synchronizacji, podzielone na trzy zakładki. Widok jednej z zakładek przedstawiono na rys. 9. Narzędzia zlokalizowane w zakładce pozwalają na rejestrację: przebiegu napięcia synchronizowanego obiektu i impulsów sterujących napięciem wysyłanych z UASP; częstotliwości napięcia synchronizowanego obiektu oraz impulsów sterujących częstotliwością wysyłanych z UASP; sygnału załączającego wyłącznik główny oraz różnicy wartości napięć chwilowych obu obiektów (tzw. napięcia dudnień).



Rys. 9. Widok zakładki *Przebiegi podstawowe* okna przebiegów sygnałów symulatora

5. PODSUMOWANIE

Przedstawiona w referacie tematyka stanowi jedynie wąski wycinek zagadnienia związanego z prowadzeniem badań UASP, na różnych etapach „życia” tych układów. Jednakże w sposób jednoznaczny wskazuje ona na możliwość i potrzebę prowadzenia badań UASP przy użyciu opracowanych i wykonanych nowoczesnych urządzeń komputerowych. Przedstawione w referacie systemy badawczo-diagnostyczne, dzięki odpowiednio opracowanej architekturze sprzętowej oraz oprogramowaniu, pozwalają już we wczesnym etapie produkcji wykryć szereg nieprawidłowości, co w znaczący sposób skraca czas powstawania nowego wyrobu i z punktu widzenia producentów UASP z pewnością nie jest bez znaczenia. W okresie eksploatacji, urządzenia te pozwalają dokonać oceny badanego UASP podczas pracy na rzeczywistym obiekcie elektroenergetycznym, w określonych warunkach pracy oraz określić termin kolejnego przeglądu, co z kolei nie jest bez znaczenia z punktu widzenia bezpieczeństwa SEE.

LITERATURA

- [1] Grono A. J.: Komputerowa synchronizacja prądnic. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej – Monografie, Gdańsk 2001.
- [2] Redlarski G.: Komputerowy symulator procesu synchronizacji prądnic. Rozprawa doktorska. Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, 2003.
- [3] Szczerba Z.: Warunki łączenia do pracy równoległej po awarii w systemie elektroenergetycznym. Automatyka Elektroenergetyczna 1999, nr 1, str. 10-15.
- [4] Zawalich J.: Diagnostyka układów automatycznej synchronizacji prądnic. Rozprawa doktorska. Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, 2001.