Prof. dr inż. Władysław Kołek, mgr inż. Jerzy Kubek,
mgr inż. Władysław Paszek

Zakład Maszyn Elektrycznych

Pomiary dla określenia warunków stosowania samosynchronizacji

Streszczenie: Decyzja wprowadzenia samosynchronizacji jako podstawowego lub awaryjnego sposobu przyłączania generatorów do sieci wymaga uprzedniego wykonania pomiarów.

Autorzy rozpatrują warunki stosowalności samosynchronizacji, ustalają na ich podstawie plan pomiarów, a następnie omawiają poszczególne metody pomiarowe.

Dalsze rozważania poświęcone są typowym przykładom przeprowadzonych pomiarów oraz zestawieniu wynikających z nich wniosków praktycznych.

1. Wstęp

Zagadnienia samosynchronizacji mają duże znaczenie praktyczne dla eksploatacji zakładów energetycznych, siłowni oraz całych systemów i to zarówno w zakresie wielkich zakładów i jednostek prądotwórczych, jak też w tzw. „małej energetyce".

W eksploatacji dużych systemów możność szybkiego włączenia dużych jednostek w awaryjnych stanach systemu, możność szybkiego dołączania generatorów szczytowych, w małych zaś elektrowniach wodnych łatwość automatycznego przyłączania hydrogeneratorów przy dużej prostocie aparatury zachęcają do stosowania tych sposobów łączenia w jak najszerszym zakresie.

O dużym znaczeniu tego problemu dla energetyki świadczy przegląd literatury radzieckiej z ostatnich lat, z której wynika, że w ZSRR prowadzi się intensywne badania w dziedzinie samosynchronizacji, publikuje ich wyniki, omawianiu zaś doświadczeń praktycznych poświęca się specjalne konferencje.

Z jednej strony duże korzyści, jakie daje energetyce wprowadzenie sposobu przyłączania generatorów do sieci metodą samosynchronizacji, z drugiej strony duże straty, o jakie może przyprawić niewłaściwe zastosowanie tego sposobu łączenia, sprawiają, że decyzja wprowadzenia względnie niedopuszczenia tego sposobu przyłączania dla poszczególnych

zakładów albo poszczególnych generatorów jest bardzo ważna i musi być powzięta w poczuciu pełnej odpowiedzialności.

Wynika stąd konieczność właściwego podejścia do pomiarów, w których wyniku ma zapaść tak ważna decyzja. Pomiary muszą być dostatecznie szerokie i staranne, aby wyniki ich były rzetelne i jednoznaczne. Również po powzięciu decyzji i wprowadzeniu nowego schematu łączenia należy przeprowadzić odpowiednie pomiary kontrolne.

2. Warunki i zasięg stosowalności samosynchronizacji

Proces przyłączania generatorów synchronicznych do pracy równoległej metodą samosynchronizacji odznacza się — w porównaniu z synchronizacją dokładną — dużą prostotą i da się łatwo przeprowadzić zarówno ręcznie, jak i automatycznie. Jednakże decyzja przyjęcia metody samosynchronizacji musi być każdorazowo poprzedzona pomiarami próbnymi, gdyż w niektórych wypadkach duże wartości prądów łączeniowych mogłyby zagrażać mechanicznej wytrzymałości uzwojenia.

Najwyższa wartość prądu łączeniowego zależy od parametrów generatora, sposobu powiązania generatora z systemem (np. bezpośrednie przyłączenie do szyn, przyłączenie przez transformator blokowy), oraz od sztywności sieci. W najbardziej niekorzystnym wypadku przyłączenia generatora bezpośrednio do szyn o sztywnym napięciu przebieg łączeniowy prądu jest taki, jak w wypadku trójfazowego zwarcia na zaciskach przy biegu jałowym.

Tak dużych wartości prądu łączeniowego oczywiście nie można dopuszczać, trzeba tu jednak podkreślić, że przebieg łączeniowy, jaki może wystąpić w najbardziej niekorzystnym wypadku synchronizacji pomyłkowej (łączenie w chwili przesunięcia fazy o 180°), obciąża uzwojenie prądem dwukrotnie większym, dając czterokrotnie wyższe siły dynamiczne między połączeniami czołowymi. Pomyłkowe łączenie maszyny wzbudzonej obciąża również turbinę znacznie większym momentem. Na podstawie dwuletnich prób i badań przeprowadzonych początkowo w laboratorium Zakładu Maszyn Elektrycznych Politechniki Śląskiej, a następnie w wielu elektrowniach przemysłowych stwierdzono celowość przyjęcia samosynchronizacji jako podstawowego sposobu przyłączania do pracy równoległej dla:

a) kompensatorów i silników synchronicznych do mocy 6 MVA,

b) generatorów pracujących w bloku z transformatorami, dla których podprzejściowa składowa zmienna nie przekracza czterokrotnej wartości prądu znamionowego,

c) generatorów dowolnej mocy pracujących na szyny zbiorcze, dla

których podprzejściowa składowa zmienna nie przekracza czterokrotnej wartości prądu znamionowego.

Jeżeli nawet istnieją względy pozostawienia dotychczasowego sposobu przyłączania do pracy równoległej (zabudowany synchronizator automatyczny lub inne), jest jednak celowe przyjęcie metody samosynchronizacji dla przypadków awaryjnych.

Wyszczególnione wyżej ograniczenia podprzejściowej składowej zmiennej prądu łączeniowego podane są z zapasem.

W toku dalszych badań i pomiarów można się spodziewać poszerzenia podanej granicy maksymalnych prądów łączeniowych.

Turbogeneratory z wirnikami posiadającymi bandaże na połączeniach czołowych zaleca się przyłączyć do pracy równoległej za pomocą samosynchronizacji półautomatycznej, ograniczającej do minimum czas pracy asynchronicznej generatora, oraz przy ograniczeniu dopuszczalnych przyśpieszeń w momencie samosynchronizacji do około 0,5 Hz/sek. W Związku Radzieckim samosynchronizację przyjęto jako podstawowy sposób łączenia do pracy równoległej dla wszystkich generatorów pracujących w bloku z transformatorami, dla wszystkich generatorów wodnych, dla wszystkich generatorów pracujących na szyny zbiorcze, o ile moc maszyny nie przekracza 3 MVA, a dla maszyn większych — o ile składowa zmienna udarowego prądu łączeniowego nie przekracza 3,5 J_N, przy czym wartość jej obliczona jest tam w stosunku do reaktancji przejściowej X'_d z pominięciem początkowej wartości składowej podprzejściowej.

3. Program badań i metody pomiarowe

Pomiary i badania możliwości przyłączania generatorów synchronicznych do pracy równoległej metodą samosynchronizacji dzielimy na wstępne i kontrolne.

3.1. Pomiary i badania wstępne

Przed pomiarami należy zapoznać się z istniejącą dokumentacją generatora i wzbudnicy, historią maszyny (awarie, naprawy, notowane okresowe pomiary stanu izolacji), oraz z ideowym schematem elektrowni z punktu widzenia powiązania generatora z systemem. Należy również (o ile to nie jest znane) ocenić moc zwarcia na szynach elektrowni. Przy braku odpowiedniej dokumentacji trzeba przeprowadzić w miarę możliwości pomiary reaktancji podprzejściowej (podłużnej i poprzecznej w przypadku hydrogeneratorów), przejściowej X'_d i synchronicznej X_d, oraz stałych czasowych generatora przy biegu jałowym (T'_{do}, $T'_{do\,gasz}$).

Pomiary powyższe najwygodniej przeprowadzić w warunkach ruchowych metodą oscylograficzną. Zasadniczo dwoma podstawowymi pomia-

rami stanów nieustalonych maszyny synchronicznej wyznacza się potrzebne parametry.

a) Pomiar odbudowy napięcia. W stanie ustalonego zwarcia trójfazowego generatora zasila się uzwojenie wzbudzenia prądem odpowiadającym napięciu znamionowemu stojana przy biegu jałowym.

Prąd ten należy określić ze zdjętej uprzednio charakterystyki biegu jałowego. Po odłączeniu zwarcia za pomocą wyłącznika napięcie stojana narasta wykładniczo z charakterystyczną szybkością dla danego pomiaru do wartości określonej nastawionym prądem wzbudzenia.

Szybkość narastania napięcia określa się stałą czasową T'_{do} przy otwartym uzwojeniu stojana generatora. Reaktancję podprzejściową i przejściową generatora oblicza się z podskoku napięcia stojana po odłączeniu zwarcia.

b) Pomiar gaszenia pola. Generator na biegu jałowym albo przy obciążeniu mocą bierną odłącza się ze sieci i jednocześnie wtrąca się w obwód uzwojenia wzbudzenia generatora opór gaszący. Napięcie generatora zanika wykładniczo ze stałą czasową $T'_{do\,gasz}$, a następnie ustala się odpowiednio do napięcia remanentu.

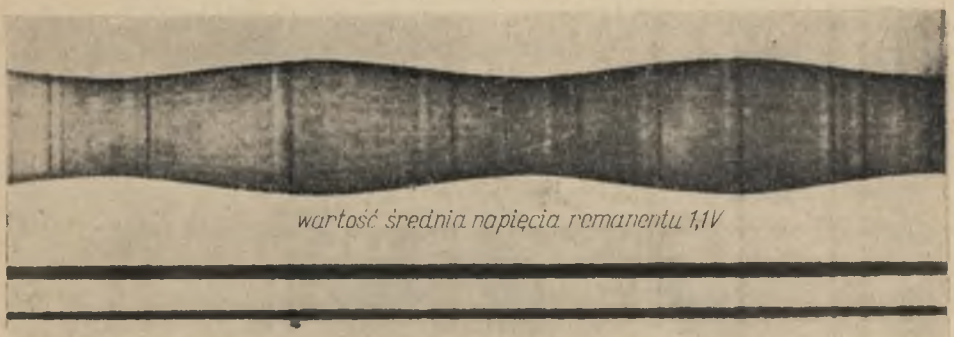
Powyższe dwa pomiary oscylograficzne wraz z prostym pomiarem charakterystyki biegu jałowego i ustalonego zwarcia trójfazowego wyznaczają reaktancję stanu podprzejściowego, przejściowego, reaktancję synchroniczną, stałą czasową podprzejściową i przejściową generatora oraz udział klatki tłumiącej i bloku litego wirnika w przepływie wyrównawczym wirnika w stanie nieustalonym.

Z pomiaru gaszenia pola generatora obciążonego przed wyłączeniem ze sieci mocą bierną można ocenić zastępczą reaktancję sieci z podskoku napięcia sieci w momencie wyłączania generatora.

Na podstawie znajomości mocy zwarcia na szynach elektrowni, reaktancji linii i transformatorów wiążących badany generator z szynami elektrowni (zwykle tylko transformator blokowy) oraz wyznaczonej reaktancji podprzejściowej (dla hydrogeneratorów reaktancji podprzejściowej podłużnej, względnie przejściowej podłużnej dla wirników bez uzwojeń tłumiących) można obliczyć największą podprzejściową składową zmienną prądu łączeniowego, maksymalny początkowy spadek napięcia zasilania oraz na podstawie znajomości $T'_{do\,gasz}$ czy T'_{do} maksymalne przepięcie wirnika. Po zaznajomieniu się z układem automatu gaszenia pola generatora (AGP) należy stwierdzić poprawny dobór oporu gaszącego.

Za duża wartość oporu gaszącego może spowodować nadmierne przepięcie na uzwojeniu wzbudzenia, występujące przy samosynchronizacji analogicznie jak przy gaszeniu pola w warunkach bezzwłocznego zadziałania ochrony od zwarć wewnętrznych. (Dla przybliżonej oceny można przyjąć $R_{gasz} = 3 \ldots 4 R_{wzb}$).

Automatyka samosynchronizacji sterowana jest przekaźnikiem kontroli poślizgu zasilanym napięciem remanentu generatora. W związku z tym do badań wstępnych należy również pomiar napięcia remanentu. W tym celu należy zmierzyć napięcie remanentu wyłączając *AGP* z różnych stanów wzbudzenia generatora (z obciążenia czysto biernego, z biegu jałowego przy znamionowym napięciu, z biegu jałowego przy obniżonym napięciu generatora do napięcia rzędu 0,5 U_N), by wyznaczyć średnie napięcie remanentu oraz maksymalne odchylenia od wartości średniej. Przy pomiarach remanentu trzeba zwrócić uwagę na istnienie ewentualnych prądów pasożytniczych pochodzących od sprzężeń galwanicznych, ewentualnie indukcyjnych od obwodów związanych z pracującymi równolegle sąsiednimi generatorami, posiadających częstotliwość sieci (należy przyłączać się tylko do nie uziemionych zacisków przekładników napięciowych). Dla wykrycia prądów pasożytniczych wskazane jest obniżyć o kilka procent (1...3%) obroty badanego generatora odłączonego od sieci względem obrotów synchronicznych sieci i obserwować woltomierz mierzący napięcie remanentu. W wyniku zdudnienia napięcia generatora i napięć pasożytniczych częstotliwości sieci obserwuje się kołysanie wskazań woltomierza z częstotliwością poślizgu.



Rys. 1. Oscylogram napięcia remanentu zniekształconego napięciami pasożytniczym

Na rysunku 1 przedstawiono oscylogram napięcia remanentu zniekształconego wspomnianymi napięciami pasożytniczymi.

W przypadku silnego zniekształcenia napięcia remanentu napięciami pasożytniczymi może nastąpić wadliwe działanie automatyki samosynchronizacji.

Dla uniknięcia wadliwych wyłączeń w czasie samosynchronizacji należy zapoznać się z układem zabezpieczeń generatora i przeanalizować możliwość wadliwego ich działania wskutek niewłaściwego doboru charakterystyk przekładników, czasów nastawień, braku blokady podnapięciowej itp.

Przy dużych wartościach prądu łączeniowego może zdarzyć się błędne działanie ochrony różnicowej z powodu niewłaściwego dopasowania przekładników prądowych, jeżeli duża składowa aperiodyczna prądu twornika generatora nasyca nierównomiernie oba układy transformatorków prądowych układu różnicowego. Ta sama ochrona działałaby również błędnie w wypadku zwarcia na szynach albo bliskiego zwarcia. Próba samosynchronizacji stanowi zatem jednocześnie próbę właściwego stanu zabezpieczeń różnicowych.

Przez zastosowanie przekaźników stabilizowanych albo przekładników prądowych nasyceniowych w ochronie różnicowej można łatwo uniknąć takich błędnych wyłączeń.

Należy również skontrolować nastawienie czasowe ochrony nadmiarowo-prądowej, która w przypadku sieci słabo powiązanej ze sztywnym systemem mogłaby działać przy małych czasach nastawienia. Przy ogólnie wprowadzonej w naszym systemie blokadzie podnapięciowej zabezpieczeń nadmiarowych nie zachodzi praktycznie obawa o zadziałanie tej ochrony przy samosynchronizacji.

Ze względu na ograniczenie dopuszczalnych przyśpieszeń wirnika generatora w czasie samosynchronizacji wskazane jest pomierzyć maksymalne przyśpieszenie turbiny przy załączeniu serwomotoru dopływu pary (czy wody w hydroelektrowniach) na biegu jałowym turbiny w pobliżu obrotów synchronicznych. Pomiar przyśpieszeń najwygodniej przeprowadzić mierząc oscylograficznie albo za pomocą woltomierza zdudnione napięcie sieci i generatora. Obwiednia oscylografowanego przebiegu lub wskazania woltomierza wykazuje kołysania z częstotliwością poślizgu.

Z wyznaczonej zmienności poślizgu w czasie oblicza się przyśpieszenie zespołu. W przypadku przyśpieszeń większych od dopuszczalnych trzeba obliczyć konieczny dodatkowy opór, który należy włączyć w szereg z uzwojeniem serwomotoru regulacji turbiny dla obniżenia szybkości silnika. Dla hydrogeneratorów nadających się do pełnej automatyzacji samosynchronizacji należy zmierzyć najniższe obroty turbiny, jakie można nastawić mechanicznym regulatorem obrotów.

W przypadku stosowania samosynchronizacji generatorów przeciwbieżnych systemu Ljungström należy zmierzyć czas zaniku napięcia przy gaszeniu pola na biegu jałowym od wartości U_N do 0,1 U_N oraz maksymalne różnice prędkości wirników w funkcji czasu po wyłączeniu *AGP* na biegu jałowym aż do spadku napięcia generatora do wartości remanentu. Różnice prędkości obu wirników najłatwiej mierzyć oscylografując prądy wyrównawcze zamykające się między stojanami obu generatorów połączonych równolegle.

Przy samosynchronizacji takiego zespołu rozruch do obrotów podsynchronicznych zostaje dokonany w stanie wzbudzonym ze względu na

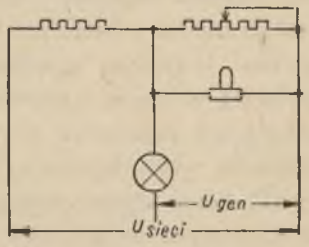
konieczność utrzymania jednakowych obrotów obu generatorów (przy braku wzbudzenia generatory rozbiegają się nierównomiernie). Przy obrotach rzędu 0,8 obrotów znamionowych wyłącza się automat gaszenia pola turbozespołu i po spadku napięcia generatora do napięcia rzędu 10% U_N przyciskiem sterowania serwomotoru dopływu pary przyśpiesza się generator do obrotów synchronicznych. Przy napięciu rzędu 0,1 U_N wirniki utrzymują się jeszcze praktycznie w synchronizmie, ewentualnie niewielkie różnice poślizgu obu generatorów nie wpływają na przebieg i skutki samosynchronizacji. W momencie przechodzenia przez obroty określone dopuszczalnym nastawionym poślizgiem przekaźnika kontroli poślizgu następuje załączenie wyłącznika mocy i wzbudzenie generatora.

Wskutek istnienia napięcia generatora rzędu 0,1 U_N w chwili samosynchronizacji maksymalny prąd łączeniowy zwiększony jest o 10% w stosunku do prądów łączeniowych zwykłych generatorów.

3.2. Pomiary kontrolne samosynchronizacji

Po ocenie maksymalnych prądów łączeniowych, spadków napięcia i przepięć wirnika należy przeprowadzić kontrolny pomiar oscylograficzny przebiegu samosynchronizacji. Zaleca się mierzyć i oscylografować prąd generatora, prąd w uzwojeniu wirnika, napięcie zasilania, napięcie na pierścieniach wirnika oraz poślizg za pomocą zdudnionego napięcia sieci i generatora.

Dla ochrony pętli przed przeciążeniem w chwili samosynchronizacji (napięcie generatora rośnie nagle od wartości remanentu do napięcia sieci) zaleca się układ pomiarowy jak na rysunku 2.



Rys. 2. Układ połączenia pętli oscylografu przy pomiarze napięcia generatora

Jeżeli nie przeprowadza się pomiarów oscylograficznych, można dla małych jednostek (generatory przemysłowe, kompensatory, silniki synchroniczne) mierzyć wprost obroty generatora dokładnym, sprawdzonym tachometrem (możliwe są duże błędy pomiarowe) albo frekwencjomierzem uczulonym na napięcie remanentu (wymontowane wewnętrzne opory dodatkowe).

Samosynchronizację próbną przeprowadza się ręcznie za pomocą następującej prawidłowej kolejności łączenia:

1) uzwojenie wirnika zamknąć oporem gaszącym (*AGP*),

2) ręczny regulator wzbudzenia wzbudnicy ustawić na położenie odpowiadające wzbudzeniu biegu jałowego generatora albo średniemu obciążeniu biernemu,

3) zregulować obroty generatora do poślizgu dopuszczalnego bez przyśpieszeń turbiny,

4) załączyć wyłącznik mocy generatora,

5) załączyć automat gaszenia pola *AGP*.

Pomiary przeprowadza się dla kilku przebiegów i różnych przyśpieszeń generatora w granicach wartości dopuszczalnych.

Jeżeli generator jest wyposażony w automatykę forsowania wzbudzenia, należy przeprowadzić pomiar samosynchronizacji przy załączonym forsowaniu wzbudzenia.

Przy pomiarach generatorów przeciwbieżnych systemu Ljungströma wskazane jest mierzyć, o ile to możliwe, oddzielnie prądy każdego generatora. W czasie pomiaru samosynchronizacji należy zwrócić uwagę na pracę zabezpieczeń generatora (szczególnie różnicowych z powodu nasycenia się przekładników prądowych zabezpieczeń od składowej aperiodycznej prądu łączeniowego) oraz pracę silników potrzeb własnych (wpływ spadku napięcia przy samosynchronizacji generatorów słabo sprzężonych z systemem elektroenergetycznym).

4. Przykłady wykonanych pomiarów

W kilku elektrowniach ZEOPd oraz zakładach przemysłowych przeprowadzono pomiary wstępne na turbogeneratorach i maszynach synchronicznych z biegunami jawnymi, na podstawie tych pomiarów oszacowano ilościowo przebiegi łączeniowe, maksymalne wartości prądów, spadków napięcia i przepięć na pierścieniach wirnika. Na podstawie tych wstępnych pomiarów i obliczeń wytypowano kilka maszyn do przeprowadzenia prób samosynchronizacji.

W czasie prób oscylografowano przebiegi w zasadniczym układzie pomiarowym przedstawionym na rysunku 3.

Przykład 1. Turbogenerator o danych znamionowych:

BBC, $P = 40$ MVA, $U = 10\,500$ V, $I = 2200$ A, $\cos\varphi = 0{,}7$, $n = 3000$ obr/min. Wzbudnica: $U = 275$ V, $I = 455$ A, wirnik z kołpakami (kapami). Generator pracuje w bloku z transformatorem $X_T = 9{,}25\,\%$. Schemat systemu, w jakim pracuje generator badany (oznaczony liczbą V) (rys. 4).

Pomierzone parametry generatora:

Prąd wzbudzenia biegu jałowego — $I_{wzb_0} = 144$ A.

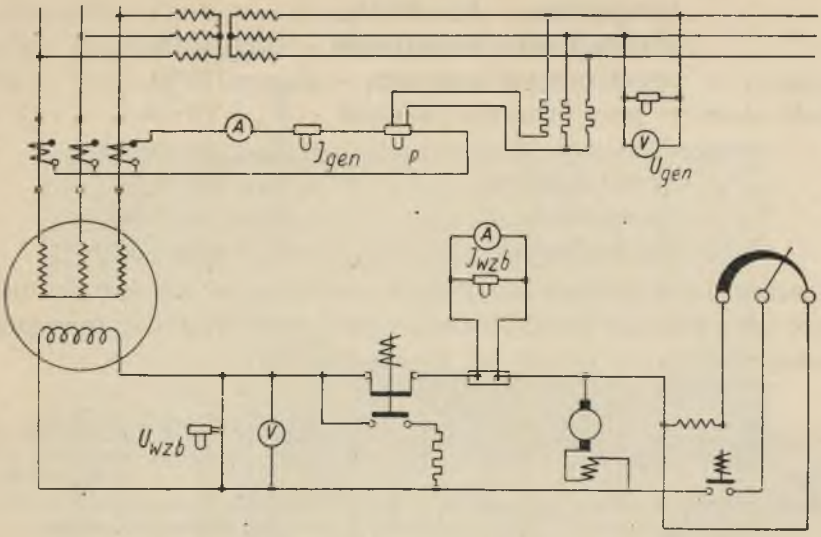
Prąd wzbudzenia przy obciążeniu znamionowym — $I_{wzbN} = 355$ A.

Napięcie wzbudzenia przy obciążeniu znamionowym — $U_{wzb_N} = 170$ V.

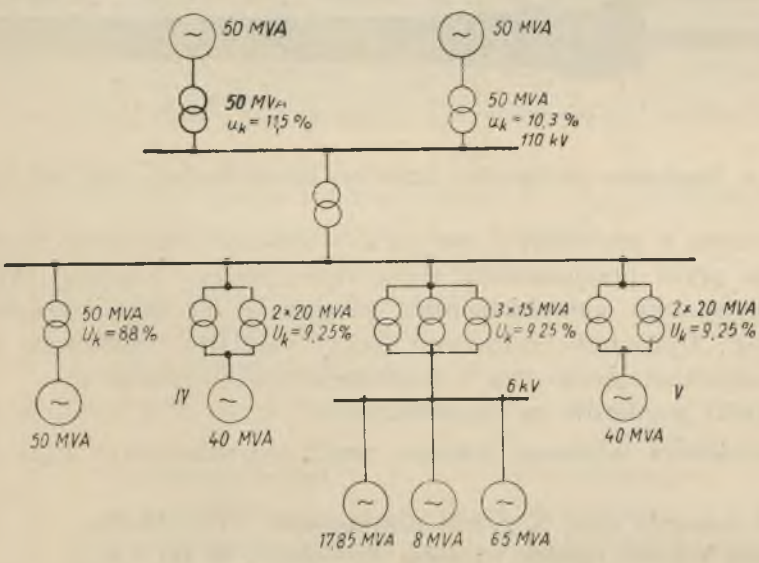
Opór uzwojenia wzbudzenia generatora — $R_{wzb} = 0{,}44\ \Omega$.

Opór gaszenia pola generatora — $R_{gasz} = 2{,}45\ \Omega$.

Reaktancje: podprzejściowa — $X''_d = 13{,}3\,\%$,



Rys. 3. Układ pomiarowy przy badaniu samosynchronizacji

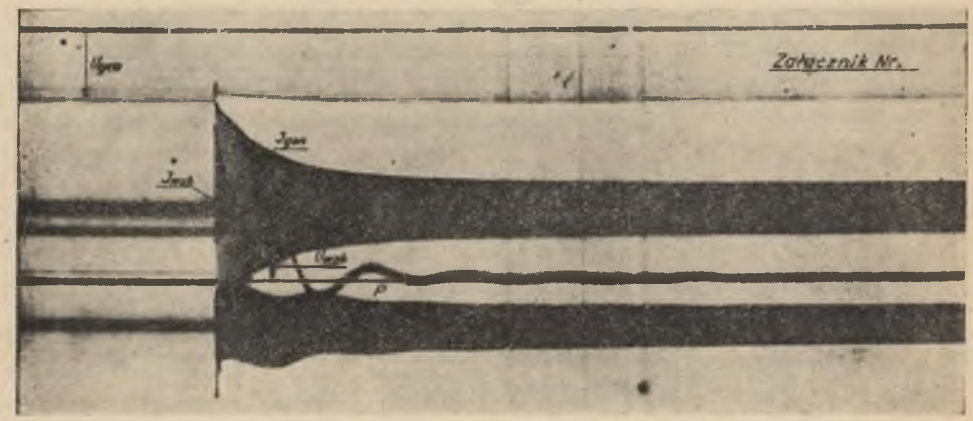


Rys. 4. Schemat systemu, w jakim pracuje generator z przykładu 1 i 2

przejściowa — $X'_d = 25{,}3\,\%$,
synchroniczna nienasycona — $X_{d_{\text{nien}}} = 186\,\%$,
synchroniczna nasycona — $X_{d_{\text{nas}}} = 172\,\%$.

Stałe czasowe: przy otwartym stojanie — $T'_{d_0} = 10$ sek.,
— $T'_{d_{0\,\text{gasz}}} = 4{,}4$ sek.,
podprzejściowa — $T''_d = 0{,}059$ sek.,
przejściowa — $T'_d = 1{,}36$ sek.,
aperiodyczna — $T_a = 0{,}09$ sek.

Rysunek 5 przedstawia oscylogram przyłączania generatora niewzbudzonego przy poślizgu przed przyłączeniem $s \simeq 0$. Włączony opór gaszący. Położenie wirnika na pewno nie poprzeczne.



Rys. 5. Oscylogram przyłączenia generatora niewzbudzonego przy poślizgu $s \simeq 0$

Rysunek 6 przedstawia oscylogram samosynchronizacji ręcznej przy poślizgu przed przyłączeniem $s \simeq 0$. Opór gaszący włączony. W 2,7 sek. po przyłączeniu niewzbudzonego generatora do sieci załączono ręcznie *AGP*. Uprzednio nastawiono ręczny regulator wzbudzenia do położenia odpowiadającego 281 A ustalonego prądu wzbudzenia.

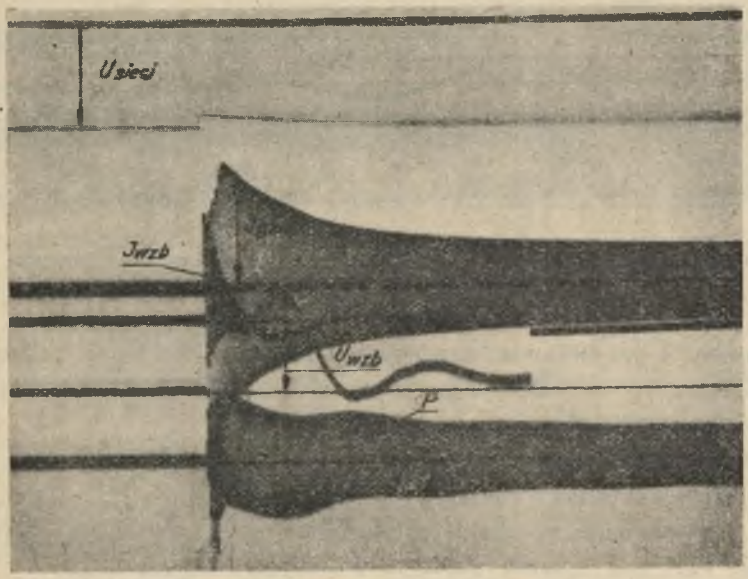
Wyniki pomiarów oscylograficznych:

Podprzejściowa składowa zmienna prądu łączeniowego — $I''_{zm} = 8400$ A $= 3{,}82\, I_N$.

Spadek napięcia sieci w chwili przyłączania $\Delta U_s = 14{,}4\,\%$.
Po czasie 0,2 sek spadek napięcia zmniejszył się do 9,6 %.
Ustalony prąd asynchroniczny $I_{\text{ust}} = 1310$ A.
Ustalenie prądu nastąpiło po czasie 2,58 sek.

Przykład 2. Turbogenerator o danych znamionowych:
BBC, $P = 40$ MVA, $U = 10\,500$ V, $I = 2200$ A, $\cos\varphi = 0{,}7$, $n = 3000$ obr/min.

Wzbudnica $U = 258$ V, $I = 440$ A, wirnik z kołpakami.
Generator pracuje w bloku z transformatorem $X_T = 9{,}25\%$.
Generator pracuje w systemie przedstawionym na rys. 4 (oznaczony liczbą IV).



Rys. 6. Oscylogram samosynchronizacji ręcznej przy poślizgu $s \simeq 0$

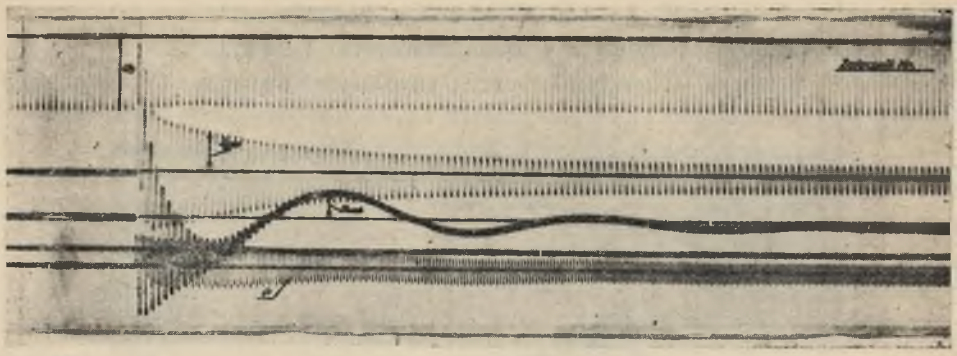
Pomierzone parametry generatora:

Prąd wzbudzenia biegu jałowego — $I_{wzb_0} = 145$ A.
Prąd wzbudzenia przy obciążeniu znamionowym — $I_{wzb_N} = 353$ A.
Opór uzwojenia wzbudzenia generatora R_{wzb} — 0,44 Ω.
Opór gaszenia pola generatora — $R_{gasz} = 3{,}0$ Ω.

Reaktancje: podprzejściowa — $X''_d = 13{,}1\%$,
przejściowa — $X'_d = 26{,}0\%$,
synchroniczna nasycona — $X_{d_{nas}} = 174\%$.

Stałe czasowe: przy otwartym stojanie — $T'_{d_0} = 10$ sek.,
— $T'_{d_{0\,gasz}} = 4{,}5$ sek.,
podprzejściowa — $T''_d = 0{,}06$ sek.,
przejściowa — $T'_d = 1{,}38$ sek.,
aperiodyczna — $T_a = 0{,}15$ sek.

Rysunek 7 przedstawia oscylogram przyłączenia niewzbudzonego generatora do sieci przy poślizgu dodatnim $s = 0{,}005$ (nadsynchronizm). Opór gaszący włączony. Przepięcie na oporze gaszącym wynosi 540 V. Składowa periodyczna (częstotliwości generatora) pochodzi od składowej aperiodycznej prądu twornika wytwarzającej nieruchome pole stojana.



Rys. 7. Oscylogram przyłączenia niewzbudzonego generatora przy poślizgu dodatnim $s = 0{,}005$ (nadsynchronizm)

Rysunek 8 przedstawia oscylogram samosynchronizacji półautomatycznej. Załączenie wzbudzenia nastąpiło po czasie 0,3 sek. od chwili przyłączenia generatora do sieci.

Wyniki pomiarów oscylograficznych:

Podprzejściowa składowa zmienna prądu łączeniowego — $I''_{zm} = 8800$ A $= 4\,I_N$.
Spadek napięcia sieci w chwili załączenia generatora — $\Delta U_s = 10{,}5\,\%$.
Po czasie 0,37 sek. spadek napięcia zmniejszył się do 7%.
Ustalony prąd asynchroniczny — $I_{ust} = 1300$ A.
Ustalenie prądu nastąpiło po czasie 2,25 sek.

Przykład 3. Turbogenerator o danych znamionowych:

SSW, $P = 6{,}5$ MVA, $U = 6300$ V, $I = 595$ A, $\cos\varphi = 0{,}8$, $n = 3000$ obr/min.
Wzbudnica: $I = 291$ A, $U = 110$ V, wirnik z kołpakami.
Schemat systemu, w jakim pracuje badany generator (rys. 9).

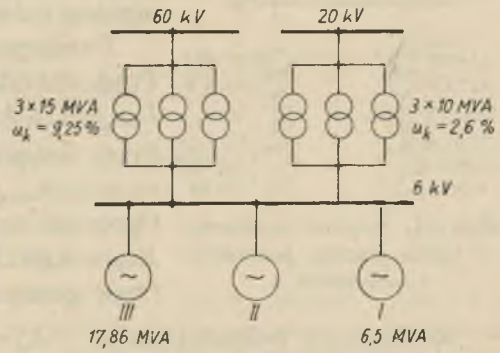
Pomierzone parametry generatora:

Prąd wzbudzenia biegu jałowego — $I_{wzb_0} = 105$ A.
Oporność uzwojenia wzbudzenia generatora — $R_{wzb} = 1{,}36\ \Omega$.

Rys. 8. Oscylogram samosynchronizacji półautomatycznej

Reaktancje: podprzejściowa — $X''_d = 15\%$,
przejściowa — $X'_d = 29\%$,
synchroniczna nienasycona — $X_{d_{nien}} = 111\%$,
synchroniczna nasycona — $X_{d_{nas}} = 100\%$.

Rysunek 10 przedstawia oscylogram przyłączenia niewzbudzonego generatora na szyny zbiorcze 6 kV przy poślizgu ujemnym $s = 1\%$ (podsynchronizm). Ze względu na nieprzystosowanie blokady *AGP* do prób samosynchronizacji wirnik załączony był ciągle na odwzbudzoną wzbudnicę.



Rys. 9. Schemat, w jakim pracuje generator z przykładu 3

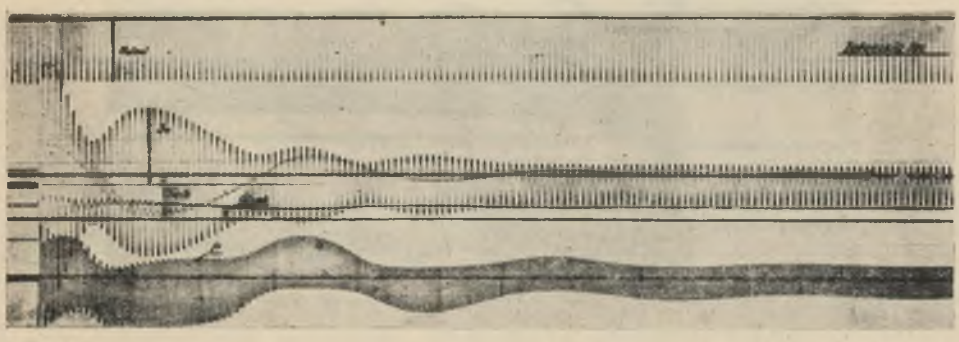
Podprzejściowa składowa zmienna prądu łączeniowego: $I''_{zm} = 2560\,A = 4{,}3\,I_N$. Spadek napięcia sieci w chwili załączenia generatora $\Delta U_s = 12\%$ trwający 1 okres. Po czasie 0,24 sek. spadek napięcia zmniejszył się do 8,3%. Prąd ustalony asynchroniczny — $I_{ust} = 465$ A.

Maksymalna wartość prądu w uzwojeniu wzbudzenia generatora w chwili przyłączenia: $I_{rot_{max}} = 400$ A.

Składowa aperiodyczna prądu rotora: $I_{rot_{ap}} = 314$ A.

Oscylogram wykazuje silne kołysania prądu i mocy zanikające po 2,0 sek.

Silne kołysanie oraz stosunkowo znaczny prąd łączeniowy stojana spowodowane są małym oporem czynnym uzwojenia wzbudzenia (nie wyłączono *AGP*).

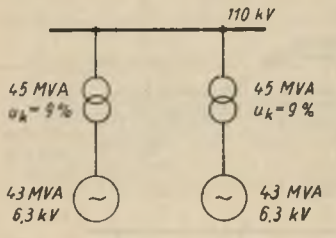


Rys. 10. Oscylogram przyłączania niewzbudzonego generatora na szyny 6 kV przy poślizgu ujemnym $s = 1\%$ (podsynchronizm)

Przykład 4. Turbogenerator firmy Škoda o danych znamionowych: $P = 43{,}75$ MVA, $U = 6300$ V, $I = 4015$ A, $\cos\varphi = 0{,}8$, $n = 3000$ obr/min.

Wzbudnica: $U = 320$ V, $I = 625$ A, wirnik z kołpakami (kapami).

Generator pracuje w bloku z transformatorem o reaktancji $X_T = 9\%$.



Rys. 11. Schemat systemu, w jakim pracuje generator z przykładu 4

Schemat systemu, w jakim pracuje badany generator (oznaczony liczbą I) — rysunek 11.

Pomierzone parametry generatora:

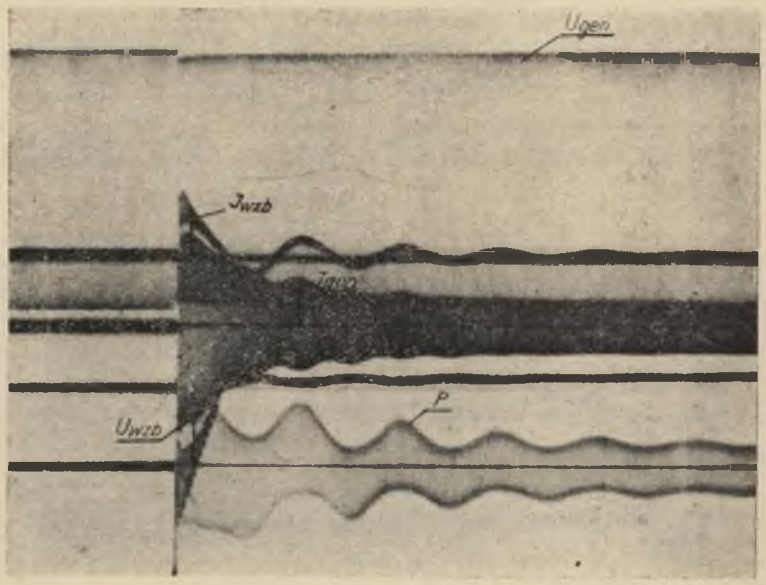
Prąd wzbudzenia przy biegu jałowym — $I_{wzb_0} = 175$ A.

Prąd wzbudzenia przy obciążeniu znamionowym — $I_{wzb_N} = 472$ A.

Oporność uzwojenia wzbudzenia generatora — $R_{wzb} = 0{,}39\ \Omega$.

Opór gaszący — $R_{gasz} = 0{,}6\ \Omega$.

Reaktancje: podprzejściowa — $X''_d = 12{,}7\%$,
przejściowa — $X'_d = 20{,}5\%$,
synchroniczna nienasycona — $X_{d_{nien}} = 192\%$,
synchroniczna nasycona — $X_{d_{nas}} = 163\%$,
rozproszenia — $X_s = 12\%$,
odwrotnej kolejności — $X_2 = 12{,}7\%$,
zerowej kolejności — $X_0 = 4{,}7\%$.



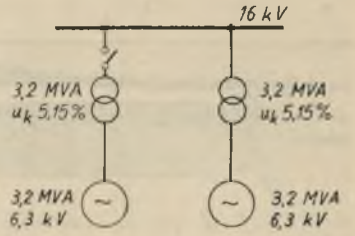
Rys. 12. Oscylogram samosynchronizacji półautomatycznej przy poślizgu $s = 1\%$ (podsynchronizm)

Stałe czasowe: przy otwartym stojanie — $T'_{d_0} = 6$ sek.,
— $T'_{d_{0\,gasz}} = 3{,}5$ sek.,
przejściowa — $T'_d = 0{,}64$ sek.

Rysunek 12 przedstawia oscylogram samosynchronizacji półautomatycznej. Przed załączeniem poślizg $s = 1\%$ (podsynchronizm). Załączenie wzbudzenia nastąpiło po czasie 0,25 sek.

Wyniki pomiarów oscylograficznych:

Maksymalna wartość podprzejściowej składowej zmiennej prądu łączeniowego — $I''_{zm} = 12100\ A = 3 \cdot I_N$. Spadek napięcia sieci w chwili załączenia generatora $\Delta U_s = 8{,}65\%$. Po czasie 0,388 sek. spadek napięcia sieci zmalał do $4{,}8\%$. Prąd ustalony asynchroniczny — $I_{ust} = 2325$ A. Ustalenie prądu nastąpiło po czasie 1,3 sek. Przepięcie na uzwojeniu wzbudzenia w chwili włączenia 640 V.



Rys. 13. Schemat systemu, w jakim pracuje hydrogenerator z przykładu 5

Przykład 5. Hydrogenerator *SSW* o danych znamionowych: $P = 3{,}2$ MVA, $U = 6300$ V, $I = 294$ A, $\cos\varphi = 0{,}7$, $n = 300$ obr/min. Wirnik jawnobiegunowy z uzwojeniem tłumiącym niesymetrycznym. Wzbudnica — $U = 110$ V, $I = 345$ A. Generator pracuje w bloku z transformatorem $X_T = 5{,}15\%$. Schemat systemu, w jakim pracuje badany generator (oznaczony liczbą I) — rysunek 13.

Pomierzone parametry generatora:

Prąd wzbudzenia generatora przy biegu jałowym — $I_{wzb_0} = 126$ A.
Oporność uzwojenia wzbudzenia — $R_{wzb} = 0{,}22\ \Omega$.

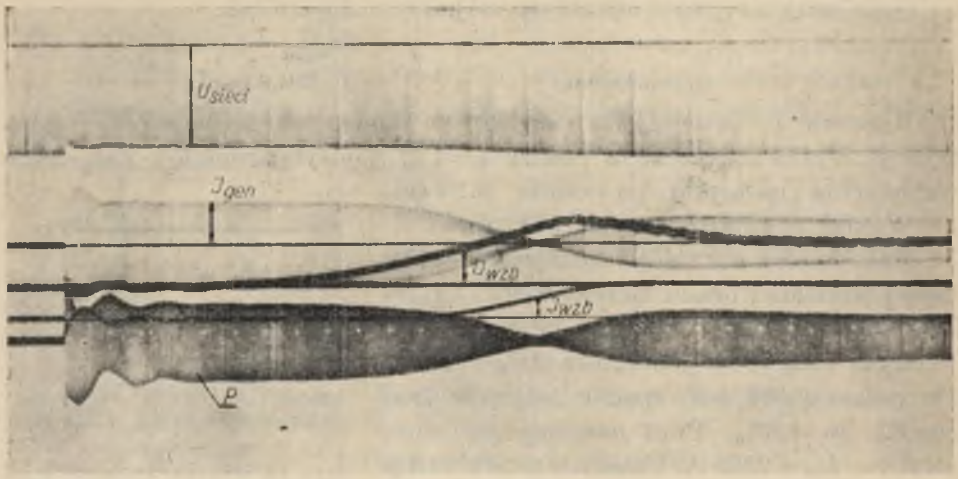
Reaktancje: podprzejściowa — $X''_d = 26\%$,
przejściowa — $X'_d = 38\%$,
synchroniczna nienasycona — $X_{d_{nien}} = 124{,}7\%$,
$X_q = 75\%$,
synchroniczna nasycona — $X_{d_{nas}} = 110{,}2\%$,
odwrotnej kolejności — $X_2 = 34{,}0\%$.

Stałe czasowe: przy otwartym stojanie — $T'_{d_0} = 2{,}9$ sek.,
przejściowa — $T'_d = 0{,}6$ sek.

Rysunek 14 przedstawia oscylogram samosynchronizacji ręcznej przy poślizgu $s = 0{,}3\%$ (podsynchronizm). Uzwojenie wzbudzenia generatora przyłączone bezpośrednio na twornik wzbudnicy.

Po czasie 6,3 sek. prąd wzbudzenia osiągnął wartość odpowiadającą obciążeniu czysto czynnemu generatora; minimum prądu widoczne na oscylogramie odpowiada punktowi $\cos\varphi = 1$.

Na krzywej napięcia wzbudzenia odbija się wpływ pracy automa-



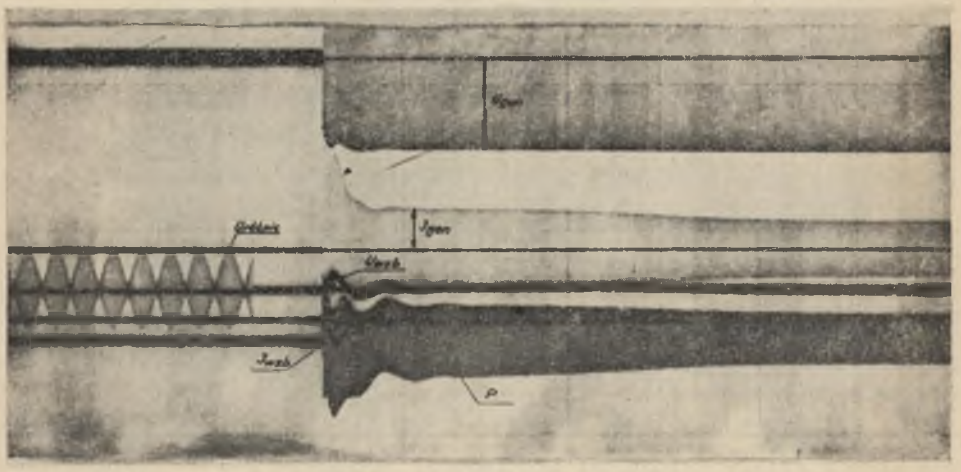
Rys. 14. Oscylogram samosynchronizacji ręcznej przy poślizgu $s = 0{,}3\,\%$ (podsynchronizm)

tycznego regulatora napięcia (typ BBC), który przeregulował napięcie wzbudzenia.

Rysunek 15 przedstawia oscylogram przyłączenia niewzbudzonego generatora do sieci przy poślizgu przed przyłączeniem $s = 5\,\%$ (podsynchronizm). Uzwojenie wzbudzenia generatora przyłączone bezpośrednio na twornik wzbudnicy.

Wyniki pomiarów oscylograficznych:

Podprzejściowa składowa zmienna prądu łączeniowego — $I''_{zm} = 650\,A = 2{,}2\,I_N$.



Rys. 15. Oscylogram przyłączenia niewzbudzonego generatora przy poślizgu $s = 5\,\%$ (podsynchronizm)

Spadek napięcia sieci w chwili przyłączenia generatora — $\Delta U_s = 27{,}5\%$. Po czasie 0,2 sek. spadek napięcia zmniejszył się do 7%.

Ustalony prąd asynchroniczny: $I_{ust} = 176$ A. Ustalenie prądu nastąpiło po czasie 4,0 sek.

5. Wnioski końcowe

Przeprowadzenie odpowiednich pomiarów i przeliczeń jest koniecznym warunkiem podjęcia właściwej decyzji dopuszczenia lub niedopuszczenia przyłączania generatorów metodą samosynchronizacji do eksploatacji. Konieczna jest również kontrola oscylograficzna układu po jego zabudowaniu.

Właściwie przeprowadzone pomiary oraz obliczenia dają dostatecznie dokładne wyniki przebiegu prądów łączeniowych i pozwalają na powzięcie właściwej decyzji.

Koszty i trudy dokonanych pomiarów są w znikomym stosunku do korzyści, jakie przynoszą gospodarce systemu.

Wpłynęło 30. VI. 1954.