

STANOWISKO DO WYZNACZANIA PARAMETRÓW SCHEMATU ZASTĘPCZEGO MASZYN ELEKTRYCZNYCH METODĄ CZĘSTOTLIWOŚCIOWĄ

A MEASUREMENT SET FOR DETERMINING EQUIVALENT CIRCUIT PARAMETERS OF THE ELECTRICAL MACHINES BY STANDSTILL FREQUENCY RESPONSE TEST

Krzysztof Ludwinek

Politechnika Świętokrzyska

Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki

Al. 1000-lecia Państwa Polskiego 7

25-314 Kielce

e-mail: k.ludwinek@tu.kielce.pl

Marek Jaśkiewicz

Politechnika Świętokrzyska

Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn

Al. 1000-lecia Państwa Polskiego 7

25-314 Kielce

e-mail: m.jaskiewicz@tu.kielce.pl

Abstract: The article presents and discusses the practical application of an integrated circuit power amplifier working in a bridge circuit in a measurement set to determine the electromagnetic parameters and time constants of electric machines by Standstill Frequency Response test. The practical utilization example of the power amplifier is to determine the electromagnetic parameters of electrical machines based on approximation of frequency characteristics in direct and quadrature axes of 5.5 kVA salient pole synchronous generator.

Keywords: StandStill Frequency Response test, equivalent circuit parameters, power amplifier, synchronous generator.

Wprowadzenie

W modelowaniu obwodowym stanów ustalonych i nieustalonych maszyn elektrycznych znajomość parametrów elektromagnetycznych modelu jest bardzo ważna [1-6]. Najczęściej parametry modeli maszyn elektrycznych wyznacza się przy zastosowaniu modelu polowego i obliczeń rozkładu pola magnetycznego metodą elementów skończonych przy pomocy programów komercyjnych (np. Flux, Maxwell, Opera itp.) [7-10] lub nie komercyjnych [11, 12] lub programów własnych [13, 14], na podstawie danych konstrukcyjno-materiałowych (jeśli takie dane można uzyskać od producenta) w sposób analityczny [15-18]

lub na podstawie badań eksperymentalnych [19-26]. Model polowe wymagają szczegółowej znajomości danych konstrukcyjno-materiałowych, które nie zawsze są znane. Dlatego identyfikację parametrów schematu zastępczego często dokonuje się w sposób eksperymentalny [19-27]. W przypadku maszyn elektrycznych badania wykonuje się najczęściej:

- przy nieruchomej maszynie przy pomocy skoku jednostkowego, zanikania prądu stałego lub tzw. metody częstotliwościowej SSFR (StandStill Frequency Response) [19-24],
- przy ruchomej maszynie poprzez celowo wprowadzone zaburzenie np. do obwodu wzbudzenia maszyn synchronicznych sygnału

zakłóceńowego tzw. Pseudo-Random Binary Sequence (PRBS) [25, 26].

Eksperymentalny sposób wyznaczenia charakterystyk częstotliwościowych, a następnie parametrów schematu zastępczego i stałych czasowych jest przedstawiony w wielu pracach [19-23]. W przypadku poszukiwanych parametrów elektromagnetycznych modeli obwodowych badanych maszyn elektrycznych (których obwód magnetyczny jest nieliniowy) na podstawie wyznaczonych charakterystyk częstotliwościowych jedyną trudność w metodzie SSFR polega na utrzymywaniu dla różnych częstotliwości w miarę jednakowych wartości prądu do około $0,1 I_N$ [23]. Wartość ok. $0,1 I_N$ wynika stąd, iż poniżej tej wartości prądu charakterystyka magnesowania zaczyna wchodzić w część nieliniową wynikającą z remanentu szczątkowego. Natomiast wymuszanie prądu powyżej wartości $0,1 I_N$ szczególnie dla niskich częstotliwości (w zakresie do 0,05 Hz z uwagi na długi czas trwania pomiaru) powoduje widoczny wpływ temperatury na zmiany wartości rezystancji (występującej w modelach) [23]. Ponieważ zakresie częstotliwości do 0,05 Hz charakter obwodu jest prawie rezystancyjny nawet niewielkie zmiany wartości rezystancji w modelu obwodowym [23] powodują znaczne odkształcenia w przebiegach charakterystyk częstotliwościowych w stosunku do charakterystyk uzyskanych np. w sposób polowy (gdzie tego efektu nie ma).

Otrzymane charakterystyki częstotliwościowe badanej maszyny elektrycznej mogą być wykorzystywane do numerycznej identyfikacji parametrów schematu zastępczego (lub parametrów równań różniczkowych), stałych czasowych [19-23]. Przy czym identyfikację przeprowadza się najczęściej przy pomocy gotowych algorytmów lub za pomocą własnych programów [23].

Eksperymentalne wyznaczenie charakterystyk częstotliwościowych maszyn elektrycznych prądu przemiennego wymaga zakupu lub zbudowania wzmacniacza mocy, który powi-

nien posiadać szeroki zakres wzmacnianych częstotliwości od bliskich 0,001 Hz do kilku kHz [19-23]. Na rynku istnieją jedno- lub trójfazowe programowalne źródła (AC Programmable Power Sources) np. firmy Chroma czy firmy Elgar and California Instruments Supplies, które umożliwiają wygenerowanie sygnału wyjściowego [27, 28]:

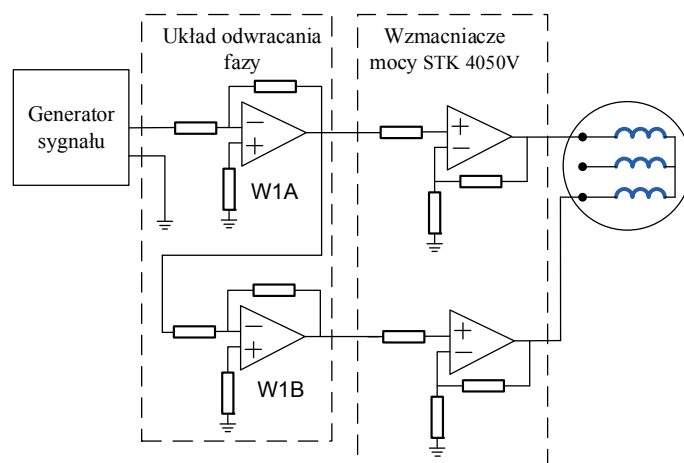
- o zadanym kształcie napięcia w zakresie od 0 do ± 300 V [27] lub od 0 do ± 400 V [28];
- o mocy 0,5 kVA- 18 kVA [27] lub o mocy 0,5 kVA - 22 kVA [28];
- o częstotliwości napięcia wyjściowego 12 - 1000 Hz [27] lub 16 - 8000 Hz [28].

Wspomniane programowalne źródła są o większej mocy niż prezentowany w niniejszym artykule układ, który bez modyfikacji posiada moc wyjściową regulowaną od 0 W do 400 W i amplitudę napięcia wyjściowego od 0 do ± 190 V. Jednak te programowalne źródła mają zasadniczą wadę nie umożliwiającą wytwarzania sygnałów wyjściowych o częstotliwości poniżej 12 Hz i powyżej 8 kHz, a ponadto są bardzo drogie [27, 28].

W niniejszym artykule autorzy zasadniczą uwagę skupili na praktycznym zastosowaniu zbudowanego wzmacniacza mocy (na bazie dwóch scalonych układów) do wyznaczenia parametrów elektromagnetycznych metodą częstotliwościową. Parametry schematu zastępczego wyznaczono dla trójfazowego generatora synchronicznego wydatnobiegunowego o danych znamionowych $S_N = 5,5$ kVA, $U_N = 400$ V, $\cos \varphi_N = 0,8$, $n_N = 3000$ obr/min.

Schemat blokowy wzmacniacza mocy

Na rys. 1 przedstawiono uproszczony schemat blokowy układu wzmacniacza mocy, który zrealizowano poprzez mostkowe połączenie dwóch scalonych wzmacniaczy mocy STK 4050V. Wzmacniacze STK 4050V charakteryzują się maksymalnym napięciem zasilania ± 95 V i maksymalną mocą wyjściową 200 W [29].



Rys. 1. Schemat blokowy wzmacniacza mocy do wyznaczania charakterystyk częstotliwościowych maszyny elektrycznej.

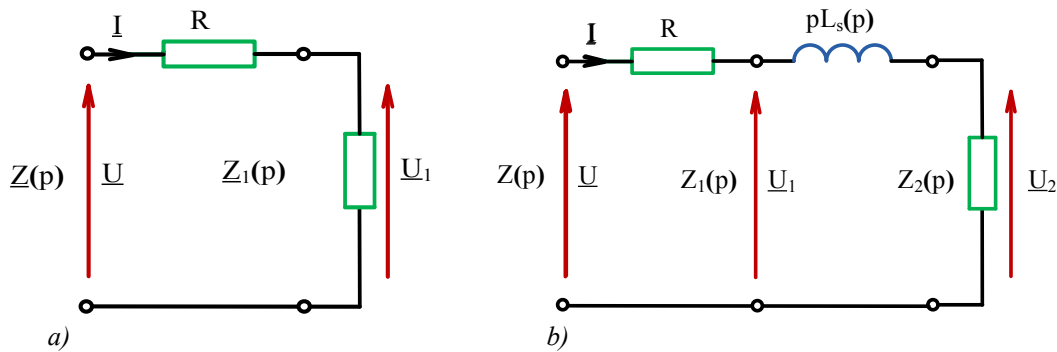
Połączenie mostkowe dwóch scalonych wzmacniaczy mocy STK 4050V (rys. 1) umożliwi uzyskanie na wyjściu amplitudy napięcia zasilania do ± 190 V o mocy do 400 W. W przypadku sygnałów prądowych i napięciowych o mocy większych niż 400 W lub o sygnałach napięciowych wyższych niż ± 190 V należy rozbudować końcowy stopień wzmacniaczy (rys. 1) poprzez dołączenie do wyjść np. komplementarnej pary tranzystorów i wykonanie nowego sprzężenia zwrotnego tj. z wyjścia pary tranzystorów. Podstawowy schemat aplikacyjny układu STK 4050V podano w [29].

Sygnal z zewnętrznego generatora o regulowanej częstotliwości np. od 0,01 Hz do 1000 Hz doprowadzony jest do wejść wzmacniaczy operacyjnych W1A i W1B (rys. 1) tzn. do układów, w których na wyjściu W1B otrzymuje się odwrócenie fazy sygnału względem W1A. Doprowadzenie odwróconej fazy dwóch sygnałów (z wyjść W1A i W1B) do scalonych wzmacniaczy mocy STK4050V umożliwia uzyskanie podwójnej wartości amplitudy napięcia (jako różnica sygnałów na ich wyjściach). Z przeprowadzonych badań z wykorzystaniem scalonych wzmacniaczy STK4050V wynika, że w zakresie niskich częstotliwości (poniżej 0,1 Hz) układy te mogą pracować jak typowe wzmacniacze operacyjne stosowane w układach elektronicznych np. [30]. Aby przedstawiony w niniejszym artykule

układ wzmacniacza mocy mógł być zastosowany do wyznaczania charakterystyk częstotliwościowych również w zakresie niskich częstotliwości poniżej 0,1 Hz należy usunąć filtr składowej stałej i niskich częstotliwości, który jest w schemacie aplikacyjnym podanym przez producenta układu STK4050V [29].

Parametry schematu zastępczego

Na rys. 2 przedstawiono schemat zastępczy, w którym z impedancji widmowej $\underline{Z}(p = j\omega)$ badanej maszyny elektrycznej wyodrębniono znane wartości np. rezystancję uzwojenia R (rys. 2a) lub rezystancję uzwojenia R i reaktancję rozproszenia pL_s (rys. 2b). Pozostałe parametry wchodzące w skład impedancji $Z_1(p)$ (rys. 2.a) lub impedancji $Z_2(p)$ (rys. 2b) stanowią poszukiwany zbiór parametrów badanego modelu, różny w zależności od konstrukcji maszyny elektrycznej i stopnia uproszczenia poszukiwanych parametrów schematu zastępczego. Jeśli badana maszyna elektryczna posiada niesymetrię magnetyczną np. wirnika poszukiwane parametry określa się na podstawie wyznaczonych charakterystyk częstotliwościowych przy ustawieniu wirnika w osi podłużnej i poprzecznej względem wytworzonego strumienia poprzez uzwojenia stojana.



Rys. 2. Schemat zastępczy impedancji widmowej $Z(p = j\omega)$ badanego modelu z wyodrębnioną znaną wartością a) rezystancji uzwojenia R , b) rezystancji R i reaktancji rozproszenia pL_s uzwojenia.

Na rys. 3 przedstawiono widok zbudowanego wzmacniacza mocy w stanowisku do wyznaczania charakterystyk częstotliwościowych maszyn elektrycznych metodą SSFR. W skład stanowiska wchodzi następujące urządzenia:

- zbudowany w ramach pracy dyplomowej [31] wzmacniacz mocy, którego schemat blokowy przedstawia rys. 1;
- generator o regulowanej częstotliwości i amplitudzie sygnałów sinusoidalnych HMF 2525 firmy Hameg;

- dwa zasilacze Power Supply EA-PS 8360-15T (0-360 V, 0-15 A, 1500 W);
- generator synchroniczny wydawniegunowy o danych $S_N = 5,5$ kVA, $U_N = 400$ V, $\cos\varphi_N = 0,8$, $n_N = 3000$ obr/min oraz silnik indukcyjny o mocy 11 kW (obie maszyny elektryczne niewidoczne na rys. 3 znajdują się w zabudowie wygłuszającej ich pracę);

- oscyloskop cyfrowy MSO 3014 Tektronix;
- zestaw przetworników Halla do pomiaru napięć i prądów [32, 33].



Rys. 3. Widok stanowiska do wyznaczania charakterystyk częstotliwościowych maszyn elektrycznych metodą SSFR.

Impedancję widmową badanego obiektu wyznacza się na podstawie zarejestrowanych przebiegów czasowych napięcia i prądu przy zasilaniu uzwojenia stojana (badanego generatora synchronicznego wydawniegunowego przy

nieruchomym wirniku) napięciem sinusoidalnym o regulowanej częstotliwości. Przy czym, dla maszyn elektrycznych z niesymetrią magnetyczną wirnika impedancję widmową jednej fazy uzwojenia twornika wyznacza się

przy ustawieniu osi podłużnej d np. wirnika w osi przepływu lub prostopadle do przepływu (czyli w osi poprzecznej q). W ten sposób wyznacza się dwie impedancje widmowe Z_d w osi d oraz Z_q w osi q . W przypadku wyznaczania charakterystyk częstotliwościowych od strony twornika dla lepszego rozkładu strumie-

nia wzdłuż obwodu magnetycznego najczęściej zasila się dwa uzwojenia (dla trójfazowych maszyn elektrycznych). Wówczas dla $p = j\omega_1 v$ impedancja widmowa jednego pasma uzwojenia wynosi [22, 23]:

$$Z(j\omega_1 v) = \frac{1}{2} \frac{U_{am}(v)}{I_{am}(v)} e^{j\varphi(v)} = \operatorname{Re}\{Z(j\omega_1 v)\} + j \operatorname{Im}\{Z(j\omega_1 v)\} \quad (1)$$

gdzie:

$U_{am}(v)$, $I_{am}(v)$ – odpowiednio amplituda napięcia zasilającego i prądu płynącego w uzwojeniu twornika,
 $\varphi(v)$ kąt przesunięcia fazowego między przebiegami napięcia i prądu,
 $\omega_1 = 2\pi f_1$ – pulsacja podstawowa,

$v = f/f_1$ – częstotliwość względna odniesiona do częstotliwości podstawowej f_1 ($f_1 = 50$ Hz),
 f – częstotliwość zasilania,

Charakterystyki częstotliwościowe impedancji widmowych $Z_1(p)$ (rys. 2.a) i $Z_2(p)$ (rys. 2.a) zdefiniowane są następująco:

$$Z_1(j\omega_1 v) = Z(j\omega_1 v) - R = \operatorname{Re}\{Z_1(j\omega_1 v)\} - j \operatorname{Im}\{Z_1(j\omega_1 v)\} \quad (2)$$

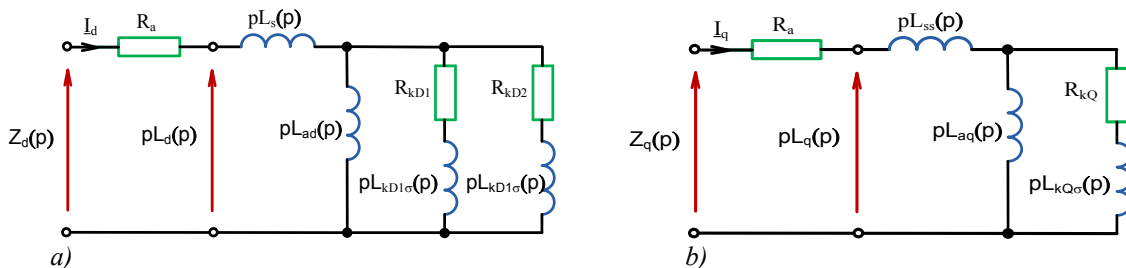
$$Z_2(j\omega_1 v) = Z(j\omega_1 v) - R - j\omega_1 v L_s = \operatorname{Re}\{Z_2(j\omega_1 v)\} - j \operatorname{Im}\{Z_2(j\omega_1 v)\} \quad (3)$$

$$\omega_1 L_d(j\omega_1 v) = \frac{Z_d(j\omega_1 v) - R_a}{jv} = \frac{\operatorname{Im}\{Z_d(j\omega_1 v)\}}{v} - j \frac{\operatorname{Re}\{Z_d(j\omega_1 v)\} - R_a}{v} \quad (4)$$

$$\omega_1 L_q(j\omega_1 v) = \frac{Z_q(j\omega_1 v) - R_a}{jv} = \frac{\operatorname{Im}\{Z_q(j\omega_1 v)\}}{v} - j \frac{\operatorname{Re}\{Z_q(j\omega_1 v)\} - R_a}{v} \quad (5)$$

Na rys. 4 przedstawiono schemat zastępczy generatora synchronicznego wydawnobiegunowego w osi podłużnej - d i w osi poprzecznej - q o parametrach skupionych. Schemat zastępczy w osi podłużnej reprezentowany jest przez parametry R_a , $L_{s\sigma}$, L_{ad} , R_{kD1} , $L_{kD1\sigma}$, R_{kD2} ,

$L_{kD2\sigma}$ które nie zależą od częstotliwości. Schemat zastępczy w osi poprzecznej reprezentowany jest przez parametry R_a , $L_{s\sigma}$, L_{aq} , R_{kQ} , $L_{kQ\sigma}$ które również nie zależą od częstotliwości.



Rys. 4. Schemat zastępczy generatora synchronicznego wydawnobiegunowego: a) w osi podłużnej d ; b) w osi poprzecznej q .

Parametry schematu zastępczego (rys. 4) oraz stałe czasowe wyznacza się na podstawie pomiarów impedancji widmowych. Charakterystyki częstotliwościowe wyznacza na

podstawie parametrów schematu zastępczego (rys. 2 i rys. 4) po odjęciu rezystancji uzwojenia stojana R_a od impedancji [23]:

$$j\omega L_d(j\omega) = j\omega L_\sigma + \frac{1}{\frac{1}{j\omega L_{ad}} + \frac{1}{R_f + j\omega L_{f\sigma}} + \frac{1}{R_{kD} + j\omega L_{kD\sigma}}} \quad (6)$$

$$j\omega L_q(j\omega) = j\omega L_\sigma + \frac{1}{\frac{1}{j\omega L_{aq}} + \frac{1}{R_{kQ} + j\omega L_{kQ\sigma}}} \quad (7)$$

Charakterystyki widmowe badanego generatora synchronicznego można również otrzymać na podstawie znajomości stałych czasowych transmitancji operatorowych. Przy przyjęciu schematu zastępczego jak na rysunku 4a będą to cztery stałe czasowe T_d'' , T_{d0}'' , T_d' , T_{d0}' , natomiast dla przypadku z rysunku 4b będą to dwie stałe czasowe T_q' , T_{q0}' [23]

$$\omega L_d(j\omega) = X_d \frac{(1 + j\omega T_d')(1 + j\omega T_d'')}{(1 + j\omega T_{d0}') (1 + j\omega T_{d0}'')} \quad (8)$$

$$\omega L_q(j\omega) = X_q \frac{1 + j\omega T_q'}{1 + j\omega T_{q0}'} \quad (9)$$

Wyznaczone wartości reaktancji X_d , X_q , stałych czasowych T_d'' , T_{d0}'' , T_d' , T_{d0}' oraz T_q' , T_{q0}' umożliwiają również wyznaczenie parametrów schematu zastępczego [16, 23].

Identyfikacja parametrów schematu zastępczego

Na podstawie wyznaczonych w sposób numeryczny lub eksperymentalny charakterystyk częstotliwościowych badanego silnika indukcyjnego przeprowadza się identyfikację parametrów schematów zastępczych w osi d i q (rysunek 1 i rysunek 2) dokonując aproksymacji charakterystyk modułowych oraz fazowych impedancji widmowych $Z_d(j\omega)$ i $Z_q(j\omega)$. Identyfikacja parametrów schematu zastępczego (lub stałych czasowych) polega na takim doborze wektora parametrów w osi d $\chi_d = \{L_{s\sigma}, L_{ad}, R_{kD1}, L_{kD1\sigma}, R_{kD2}, L_{kD2\sigma}\}$, w osi q $\chi_q = \{L_{s\sigma}, L_{aq}, R_{kQ}, L_{kQ\sigma}\}$ lub w przypadku stałych czasowych w osi d $\chi_d = \{X_d, T_d'', T_{d0}'', T_d', T_{d0}'\}$ oraz w osi q $\{X_q, T_q', T_{q0}'\}$, tak aby moduły i fazy funkcji określonych wyrażeniami (10) i (11) lub (12) i (13) przybliżyły z możliwie najmniejszym błędem przebiegi modułu i fazy wyznaczone z pomiarów. Zagadnienie to można rozwiązać korzystając z metod optymalizacji [34, 35]. Zgodnie z minimalizacją średniokwadratową za najlepsze parametry wektorów χ_d i χ_q uważa się te, dla których suma kwadratów odchyleń ε_{dm} , ε_{qm} , $\varepsilon_{d\varphi}$, $\varepsilon_{q\varphi}$ jest najmniejsza [4, 23]:

$$\varepsilon_{dm} = \sum_{i=1}^m \left\{ |L_d(j\omega_i)| - |L_d^*(j\omega_i, \chi_d)| \right\}^2 \quad (10)$$

$$\varepsilon_{qm} = \sum_{i=1}^m \left\{ |L_q(j\omega_i)| - |L_q^*(j\omega_i, \chi_q)| \right\}^2 \quad (11)$$

$$\varepsilon_{d\varphi} = \sum_{i=1}^m \left\{ \varphi_d(j\omega_i) - \varphi_d^*(j\omega_i, \chi_d) \right\}^2 \quad (12)$$

$$\varepsilon_{q\varphi} = \sum_{i=1}^m \left\{ \varphi_q(j\omega_i) - \varphi_q^*(j\omega_i, \chi_q) \right\}^2 \quad (13)$$

gdzie:

$|L_{d,q}(j\omega_i)|$, $\varphi_{d,q}(j\omega_i)$ – odpowiednio moduł

oraz argument indukcyjności widmowej w osi d i q wyznaczony z pomiarów,

$|L_{d,q}^*(j\omega_i, \chi_{d,q})|$, $\varphi_{d,q}^*(j\omega_i, \chi_{d,q})$ – odpowiednio

moduł oraz argument indukcyjności

widmowej w osi d i q obliczony w oparciu

o wyznaczone parametry schematu

zastępczego (rys. 1 i rys. 2) lub na

podstawie transmitancji operatorowych (6) i (7),

m – liczba punktów pomiarowych,

ω_i – pulsacja.

Funkcje (10)÷(13) są wyrażeniami nieliniowymi ze względu na poszukiwane wartości. Zagadnienie minimalizacji średniokwadratowej sprowadza się do zadania programowania nieliniowego. Średniokwadratowe procentowe uchyby charakterystyk modułowych – δ_{dm} , δ_{qm} i fazowych – $\delta_{d\varphi}$, $\delta_{q\varphi}$ w osi podłużnej i poprzecznej określone są zależnościami [4, 23, 34]:

$$\delta_{dm} = 100 \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left[\frac{|L_d(j\omega_i)| - |L_d^*(j\omega_i, \chi_d)|}{|L_d(j\omega_i)|} \right]^2} \quad (19)$$

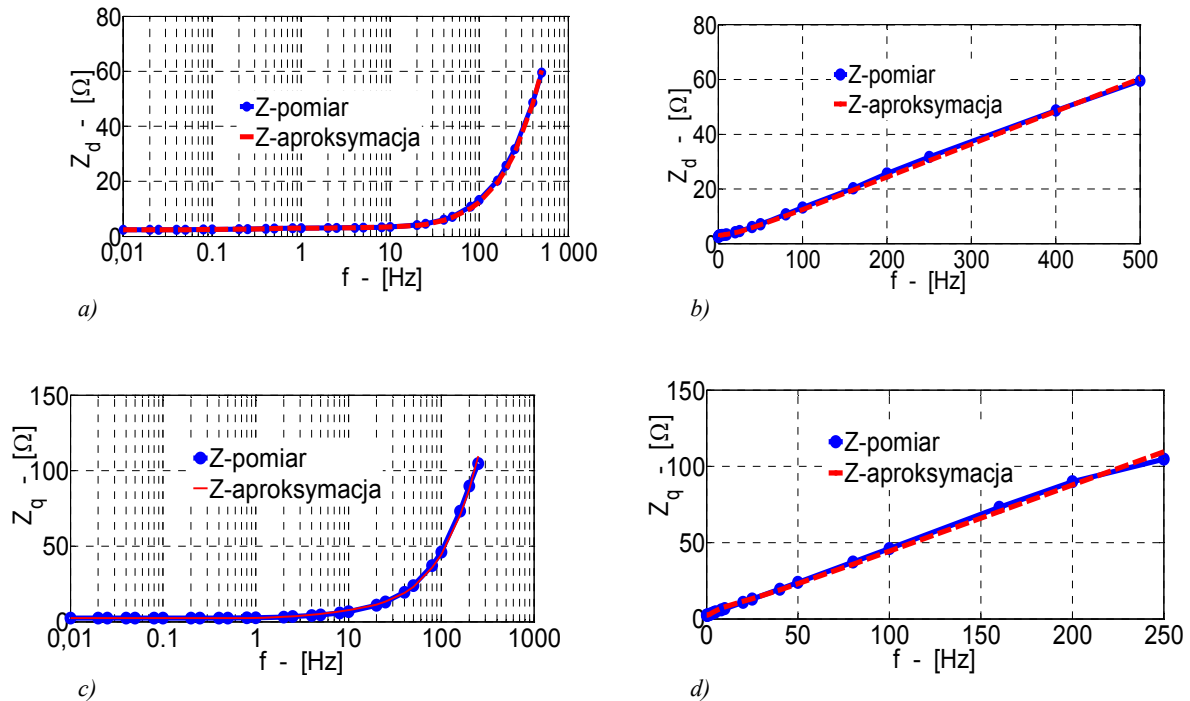
$$\delta_{d\varphi} = 100 \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left[\frac{\varphi_d(j\omega_i) - \varphi_d^*(j\omega_i, \chi_d)}{\varphi_d(j\omega_i)} \right]^2} \quad (20)$$

$$\delta_{qm} = 100 \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left[\frac{|L_q(j\omega_i)| - |L_q^*(j\omega_i, \chi_q)|}{|L_q(j\omega_i)|} \right]^2} \quad (21)$$

$$\delta_{q\varphi} = 100 \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left[\frac{\varphi_q(j\omega_i) - \varphi_q^*(j\omega_i, \chi_q)}{\varphi_q(j\omega_i)} \right]^2} \quad (22)$$

Na rys. 5 przedstawiono charakterystyki impedancji widmowej badanego generatora synchronicznego wydatnobiegunowego w osi d dla przypadku zwartego obwodu wzbudzenia oraz w osi q wyznaczone z pomiarów (kolor niebieski linia ciągła) oraz uzyskane w wyniku

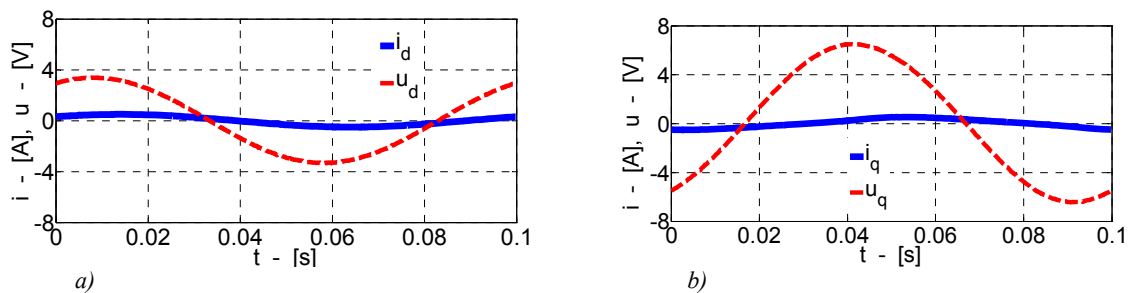
aproxymacji (kolor czerwony linia przerywana). Najczęściej charakterystyki impedancji widmowej przedstawia się, jako półlogarytmiczne (które w zakresie niskich częstotliwości wyraźniej obrazują charakterystykę impedancji widmowej). Charakterystyki impedancji widmowej rzadziej przedstawia się jako liniowe [19-23].



Rys. 5. Charakterystyki impedancji widmowej badanego generatora synchronicznego wydatnobiegunowego wyznaczone z pomiarów (kolor niebieski linia ciągła) oraz uzyskane w wyniku aproxymacji (kolor czerwony linia przerywana): a) w osi d skala półlogarytmiczna, b) w osi d skala liniowa, c) w osi q skala półlogarytmiczna, d) w osi q skala liniowa

Na rys. 6 przedstawiono zarejestrowane (podczas badań generatora synchronicznego) przebiegi napięcia (kolor niebieski linia ciągła)

i prądu (kolor czerwony linia przerywana) dla częstotliwości 10 Hz w osi d (dla przypadku zwartego obwodu wzbudzenia) oraz w osi q .



Rys. 6. Zarejestrowane przebiegi napięcia i prądu dla częstotliwości 10 Hz w osi d dla przypadku zwartego obwodu wzbudzenia oraz w osi q .

W wyniku przeprowadzonych badań eksperymentalnych oraz aproksymacji uzyskano następujące parametry schematu zastępczego generatora synchronicznego wydatno biegunowego o mocy 5,5 kVA. W osi podłużnej - d: $R_a = 1,9 \Omega$, $L_{s\sigma} = 0,016 \text{ H}$, $L_{ad} = 0,296 \text{ H}$, $R_{kD1} = 1,9 \Omega$, $L_{kD1\sigma} = 0,016 \text{ H}$, $R_{kD2} = 1 \Omega$, $L_{kD2\sigma} = 0,026 \text{ H}$.

W osi poprzecznej - q: $R_a = 1,9 \Omega$, $L_{s\sigma} = 0,016 \text{ H}$, $L_{aq} = 0,204 \text{ H}$, $R_{kQ} = 98 \Omega$, $L_{kQ\sigma} = 0,065 \text{ H}$.

Suma kwadratów odchyłek dla parametrów w osi d $\varepsilon_{dm} = 0,017$, w osi q $\varepsilon_{qm} = 0,019$.

Średniokwadratowe procentowe uchyby charakterystyk modułowych w osi d $\delta_{dm} = 0,4 \%$, w osi q $\delta_{qm} = 0,45 \%$.

Podsumowanie

Dokładna znajomość parametrów elektromagnetycznych schematu zastępczego jest podstawą do analizy zachowania się badanej maszyny elektrycznej w stanach statycznych jak i dynamicznych pracy. Dlatego w artykule omówiono praktyczne zastosowanie zbudowanego wzmacniacza o mocy 400 W i amplitudzie napięcia wyjściowego $\pm 190 \text{ V}$. Zbudowany wzmacniacz mocy pracuje w układzie mostkowym na dwóch scalonych wzmacniaczach przy maksymalnym napięciu zasilania $\pm 95 \text{ V}$. W niniejszym artykule wzmacniacz mocy zastosowano w zbudowanym stanowisku dydaktycznym do wyznaczania charakterystyk częstotliwościowych generatora synchronicznego wydatnobiegunowego o mocy 5,5 kVA. W prawdzie na rynku istnieją programowalne źródła sygnałów napięciowych (nawet o mocy do kilkunastu

kW) czyli o znacznie większej mocy niż opisany w niniejszym artykule wzmacniacz mocy, jednak źródła te mają zasadniczą wadę - nie umożliwiają wytwarzania sygnałów wyjściowych poniżej 12 Hz a ponadto są bardzo drogie. Właśnie zakres niskich częstotliwości poniżej 0,1 Hz umożliwia określenie głównych parametrów generatora synchronicznego wydatnobiegunowego, jakim są reaktancje synchroniczne w osi podłużnej i poprzecznej. Uzyskuje się je po odjęciu rezystancji uzwojenia stojana od wyznaczonych impedancji.

Omawiany wzmacniacz mocy ze względu na to, iż umożliwia uzyskanie wartości amplitudy napięcia zasilającego do 190 V nadaje się zarówno do badania maszyn elektrycznych małej mocy i średniej mocy do kilku kilowatów, dla których rezystancja uzwojenia stojana wynosi kilka omów. W przypadku niskich częstotliwości poniżej 0,1 Hz i rezystancji badanej maszyny elektrycznej poniżej 2 Ω sygnał ulega zniekształceniu. W takich przypadkach do wyjścia zbudowanego wzmacniacza należy dołączyć szeregowo z badanym uzwojeniem dodatkową rezystancję tak, aby sumaryczna impedancja nie była mniejsza niż 4 Ω .

Z uwagi na szerokie zakresy wzmacnianych częstotliwości zbudowanego wzmacniacza mocy dla sygnałów prądowych i napięciowych (nawet powyżej 100 kHz) w stanowisku tym można przeprowadzić badania porównawcze kształtu mierzonych sygnałów napięciowych różnego typu przetworników i sond do pomiaru napięcia i prądu, co m.in. już zostało przedstawione w pracach [32, 33].

Bibliografia

1. Berhausen, S., Boboń, A., Paszek, S., A methodology for determining electromagnetic parameters of a synchronous machine based on analysis of transient waveforms obtained by the finite element method under no-load conditions, *Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne*, published by Komel Katowice, No. 84, 2009, Poland, pp. 29-32.
2. Demenko, A., Obwodowe modele układów z polem elektromagnetycznym, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2004.
3. Kutt, F., Michna, M., Ronkowski, M., Chrzan, P.J., Polyharmonic model of synchronous generator for analysis of autonomous power generation systems, *Zeszyty Problemowe Maszyny Elektryczne*, published by Komel Katowice, Poland, No. 92, 2011, pp. 109-114.
4. Ludwinek, K., Analiza współpracy generatora synchronicznego z siecią o napięciu odkształconym i niesymetrycznym z uwzględnieniem rzeczywistej struktury wirnika. Rozprawa doktorska. Politechnika Świętokrzyska, Kielce 2002.

5. Ludwinek, K., Propozycja sposobu modelowania obwodów tłumiących na wirniku generatora synchronicznego jawnobiegunowego, *Zeszyty Problemowe Maszyny Elektryczne*, Wydawnictwo Komel Katowice, Nr 104, 2014, s. 179-186.
6. Staszak, J., Kształtowanie charakterystyk elektromechanicznych trójfazowego silnika indukcyjnego klatkowego poprzez dobór uzwojenia stojana oraz układu zasilania. Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Monografia M31, Kielce 2012.
7. Zalas, P., Zawilak, J., Wpływ przemiennego napięcia wzbudzenia na synchronizację dwubiegunowego silnika synchronicznego, *Zeszyty Problemowe Maszyny Elektryczne*, Wydawnictwo Komel Katowice, No. 85, 2010, s. 13-16.
8. Bastos, J.P.A., Sadowski, N., *Electromagnetic Modeling by Finite Element Methods*. Marcel Dekker, New York, 2003.
9. Lee, K., De Bortoli, M.J., Lee, M.J., Salon, S.J., Coupling Finite Elements and Analytical Solution in the Air Gap of Electric Machines, *IEEE Transaction on Magnetics*, Vol. 27, No. 5, 1991, pp. 3955-3957.
10. Zawilak, J., Zawilak, T., Minimization of higher harmonics in line-start permanent magnet synchronous motor. *Micromachines and servosystems. MiS '06, International XV Symposium*, 17-21 September, 2006, pp. 201–207.
11. Ludwinek, K., FEMM utilisation in representation of inductance distributions in a salient pole synchronous generator circuit model in no-load state, *Technical Transactions - Electrical Engineering*, 1-E/2015, pp. 325-341.
12. Ludwinek, K., Some aspects of inductance distributions modeling in dq0-axes and damping circuits on the rotor of a salient pole synchronous generator, *Technical Transactions - Electrical Engineering*, 2-E/2015, pp. 37-52.
13. Demenko, A., Nowak, L., Pietrowski, W., Mikołajewicz, J., Wyznaczenie indukcyjności głównej maszyny indukcyjnej z nasyconym obwodem magnetycznym metodą elementów krawędziowych, *Przegląd Elektrotechniczny*, Nr 6, 2009, s. 13-16.
14. Demenko, A., Pietrowski, W., Stachowiak, D., Flux density calculation in permanent magnet machine using edge element method, *Przegląd Elektrotechniczny*, No. 10, 2005, pp. 2-7.
15. Dąbrowski, M., *Projektowanie maszyn elektrycznych prądu przemiennego*, WNT, Warszawa 1994.
16. Pyrhönen, J., Jokinen, T., Hrabcová, V.P., *Design of rotating electrical machines*. John Wiley & Sons, 2014.
17. Sobczyk, T.J., *Metodyczne Aspekty modelowania matematycznego maszyn indukcyjnych*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2004.
18. Sobczyk, T.J., Warzecha, A., Alternative approaches to modelling of electrical machines with nonlinear magnetic circuit, *Archives of Electrical Engineering*, Vol. 46, No 1, 1997, pp. 421-434.
19. Dandeno, P.L., Poray A.T., Development of detailed turbogenerator equivalent circuits from standstill frequency response measurement, *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*, Vol. Pas – 100, No. 4, 1981, pp. 1646 – 1655.
20. Coultes, M.E., Watson, W., Synchronous Machine Models by Standstill Frequency Response Tests, *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*, Vol. 100, No 4, 1981, pp. 1480-1489.
21. Nadolski, R., Staszak, J., Ludwinek, K., Metoda częstotliwościowa identyfikacji parametrów maszyn elektrycznych, *Metrologia i Systemy Pomiarowe*, Vol. V, Nr 3, 1998, PAN, s. 165-172.
22. Wiak, S., Nadolski, R., Ludwinek, K., Staszak, J., Influence of the synchronous cylindrical machine damping cage on content of higher harmonics in armature currents during co-operation with the distorted and asymmetrical electric power system, *Computer Engineering in Applied Electromagnetism*, IOS Press, 2006, pp. 520-527.
23. Ludwinek, K., Staszak, J., Possibility of graphical environment applications for evaluating of equivalent circuit parameters and time constants, *Przegląd Elektrotechniczny*, No. 12a, 2011, pp. 195-200.
24. Orłowska-Kowalska, T., Bos, A., Zagadnienia wyznaczania parametrów schematu zastępczego silnika indukcyjnego w stanie nieruchomym, *Przegląd Elektrotechniczny*, Nr 9, 2001, s. 222-226.
25. Paszek, S., Berhausen, S., Boboń, A., Majka, Ł., Nocoń, A., Pasko, M., Pruski, P., Kraszewski, T., Pomiarowa estymacja parametrów dynamicznych generatorów synchronicznych i układów

- wzbudzenia pracujących w krajowym systemie elektroenergetycznym, Monografia, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2013.
26. Vermeulen, H.J., Strauss, J.M., Shikoana, V., Online estimation of synchronous generator parameters using PRBS perturbations, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 17, No. 3, 2002, pp. 674-700.
27. Chroma - AC Power Sources, <http://www.chromausa.com/instruments/ac-sources/> (access 10.09.2015).
28. Elgar and California Instruments-AC Power Sources, <http://www.programmablepower.com/ac-power-source> (access 10.09.2015).
29. STK 4050V. AF Power Amplifier (Split Power Supply) EN 4592A, www.EEworld.com.cn (access 10.09.2015).
30. TL 071, TL071A-TL071B. Low Noise J-FET Single Operational Amplifiers. <http://www.datasheetcatalog.com/> (access 10.09.2015).
31. Pedrycz, S., Projekt oraz wykonanie wzmacniacza końcowego mocy do przeprowadzania badań własności przetworników do pomiaru prądu, Politechnika Świętokrzyska Kielce 2010. Opiekun pracy dr inż. Krzysztof Ludwinek.
32. Ludwinek, K., Measurement of momentary currents by Hall linear sensor, *Przegląd Elektrotechniczny*, No. 10, 2009. pp. 182-187.
33. Ludwinek, K., Practical application of a linear Hall-effect sensor in contactless measuring of current temporary values, *International Review of Electrical Engineering (I.R.E.E.)*, Vol. 8, No. 5. 2013, pp. 1631-1640.
34. Kręglewski, T., Rogowski, T., Ruszyński, A., Szymanowski, J., Metody optymalizacji w języku FORTRAN. PWN, Warszawa 1984.