

Zbigniew STEIN^{*}, Maria ZIELIŃSKA^{*}, Ryszard NAWROWSKI^{*}
Robert PIETRACHO^{*}

AWARYJNE ZASILANIE Z TRÓJFAZOWYCH PRĄDNIC SYNCHRONICZNYCH ZESPOŁÓW SPALINOWO-ELEKTRYCZNYCH

W artykule przedstawiono wybrane zagadnienia związane z pracą autonomiczną trójfazowych prądnic synchronicznych użytkowanych, w zespołach spalinowo-elektrycznych przeznaczonych do awaryjnego zasilania różnego rodzaju odbiorców energii elektrycznej zlokalizowanych w obiektach stacjonarnych, komunalnych bądź przemysłowych, podczas braku zasilania podstawowego z sieci elektroenergetycznej. Przedstawiono zbiór równań przystosowanych do analizowania warunków pracy autonomicznej trójfazowych prądnic synchronicznych. Równania przedstawiono w formie umożliwiającej analizę warunków pracy prądnic napędzanych silnikami spalinowymi. Równania zapisano w taki sposób, że nadają się do analizowania pracy prądnic w różnych sytuacjach eksploatacyjnych, zwłaszcza wymuszonych przez niesymetryczne impedancje odbiorników. Równania pozwalają obliczanie mocy czynnej i biernej oddawanej przez prądnice przy różnych wartościach częstotliwości i w stanach niesymetrycznych. Opracowane równania wykorzystano do obliczenia charakterystycznych parametrów prądnic w różnych stanach ich pracy.

SŁOWA KLUCZOWE: prądnica synchroniczna, zespoły prądotwórcze, stany niesymetryczne, wskaźnik niesymetrii napięć.

1. WPROWADZENIE

Synchroniczne maszyny trójfazowe są użytkowane jako prądnice lub silniki. O ile silniki muszą być zawsze zasilane ze źródła energii elektrycznej, najczęściej z sieci elektroenergetycznej, to prądnice są wykorzystywane do zasilania różnych odbiorników przyłączonych do nich bezpośrednio lub poprzez z sieć elektroenergetyczną.

Aktualnie, w coraz większym stopniu, prądnice prądu przemiennego, synchroniczne i asynchroniczne, małych i średnich mocy, są wykorzystywane jako awaryjne źródła energii elektrycznej do zasilania różnych obiektów stacjonarnych, komunalnych bądź przemysłowych, podczas braku zasilania podstawowe-

^{*} Politechnika Poznańska

go z sieci elektroenergetycznej [6, 7]. Większość zespołów spalinowo-elektrycznych użytkowanych do awaryjnego zasilania różnych odbiorników jest wyposażona w prądnice synchroniczne, które mają znacznie korzystniejsze właściwości eksploatacyjne niż prądnice asynchroniczne. Prądnice synchroniczne są też chętnie stosowane w pojazdach, jako podstawowe źródło energii elektrycznej. Prądnice synchroniczne przeznaczone do pojazdów, z wbudowanymi prostownikami, są nazywane alternatorami. Dla oceny pracy prądnic w zespołach prądotwórczych, zwłaszcza przy obciążeniach niesymetrycznych, najważniejsza jest analiza ich pracy w stanach ustalonych, decydujących nie tylko o wyjściowych parametrach maszyny, ale przede wszystkim o nagrzewaniu uzwojeń oraz rdzenia wirnika. Analiza pracy agregatów w stanach nieustalonych, elektromagnetycznie jak elektromechanicznie, jest bardzo złożona i możliwa tylko wtedy, gdy znane są wszystkie parametry nie tylko prądnicy z jej regulatorami wzbudzenia, ale również parametry regulatorów silnika spalinowego. Stany nieustalone trwają w agregatach bardzo krótko, i dlatego przy ocenie warunków ich pracy podstawowe znaczenie mają stany ustalone, którym poświęcony jest artykuł. W obowiązującym systemie normalizacyjnym dotyczącym prądnic do agregatów prądotwórczych najwięcej postanowień dotyczy stanów ustalonych.

W różnych obowiązujących dokumentach prawnych dopuszczalne odchylenia napięcia i częstotliwości od wartości znamionowej nie są podane w jednolity sposób. W rozporządzeniu [3] dotyczącym wymagań dla sieci elektroenergetycznej dopuszczalne wartości odchyleń są wprawdzie wyraźnie określone, lecz sposób ich wyznaczania jest dość skomplikowany i nie jednoznaczny.

Specyficzną cechą prądnic synchronicznych jest to, że zależnie od tego, czy pracują w systemie elektroenergetycznym czy autonomicznie (samotnie), wykazują inne właściwości (ruchowe) eksploatacyjne. Prądnica synchroniczna pracuje autonomicznie, gdy zasilają jeden lub kilka odbiorników przyłączonych bezpośrednio do jej zacisków wyjściowych, bez pośrednictwa sieci elektroenergetycznej. W zespołach prądotwórczych napędzanych silnikami spalinowymi, przeznaczonych do awaryjnego zasilania odbiorników stacjonarnych, bądź użytkowanych w pojazdach trakcyjnych czy w obiektach pływających, prądnice synchroniczne praktycznie zawsze pracują autonomicznie. Występują przypadki współpracy zespołów prądotwórczych napędzanych silnikami spalinowymi z siecią elektroenergetyczną, gdy:

- dla zapewnienia niezawodności ciągłego zasilania odbiorników większych mocy, prądnice zespołu są stale włączone do sieci,
- konieczne jest znamionowe obciążenie zespołu w celu dokonania okresowego przeglądu technicznego, a bez połączenia z siecią uzyskanie takiego obciążenia nie jest możliwe.

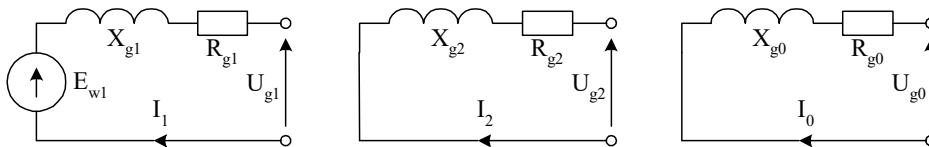
Analizując warunki pracy prądnic w stanach niesymetrycznych trzeba stale sprawdzać stopień niesymetrii prądów oraz napięć, ponieważ dopuszczalne wartości tych wskaźników są różne. Prądnice synchroniczne, przeznaczone do agre-

gatów prądotwórczych, muszą być tak skonstruowane, by mogły być obciążone niesymetrycznie jednak w takim stopniu, by stosunek składowej symetrycznej kolejności przeciwnej do prądu znamionowego nie przekraczał wartości 0,1. Podczas pracy autonomicznej prądnic trzeba równocześnie sprawdzać wartości prędkości obrotowej silników napędowych, gdyż zmiany tych prędkości powodują wahania częstotliwości napięcia chyba, że odbiorniki są zasilane poprzez prostowniki, jak jest to stosowane w alternatorach pojazdów. Do występowania stanów niesymetrycznych nie należy dopuszczać zwłaszcza w uzwojeniach tworników alternatorów, gdyż mogą one spowodować nadmierne nagrzewania rdzenia wirnika. W alternatorach przyczyną stanów niesymetrycznych są zwłaszcza uszkodzenia poszczególnych diod mostka prostownikowego lub przerwy w ich połączeniach.

Ze względu na szkodliwe skutki niesymetrycznych obciążeń prądnic, zalecane jest stosowanie zabezpieczeń reagujących na wartość stosunku składowej kolejności przeciwnej do prądu nominalnego. Szacowanie tego stosunku na podstawie obserwacji prądów fazowych jest trudne, a praktycznie nawet nie możliwe. Wartość tego stosunku można łatwo oszacować tylko podczas jednofazowego obciążenia prądnicy (do przewodu neutralnego), przy którym składowa kolejności przeciwnej jest równa 1/3 prądu fazowego.

2. RÓWNANIA WYJŚCIOWE DO ANALIZY PRACY PRĄDNICY W STANACH NIESYMETRYCZNYCH

Analizę pracy prądnicy można prowadzić posługując się równaniami prądowo-napięciowymi, w których muszą być uwzględnione impedancje włączone do poszczególnych fazowych uzwojeń twornika połączonego w układ gwiazdy. Ponieważ prądnice w zespołach prądotwórczych są maszynami niskiego napięcia punkt neutralny twornika musi być doprowadzony do tabliczki zaciskowej i uziemiony. Takie połączenie uzwojeń umożliwia dołączanie odbiorników w układzie trójfazowym czteroprzewodowym, czyli przy wykorzystaniu napięć fazowych i międzyfazowych. Do analizy pracy tak obciążanej prądnicy najdogodniejsze jest posługiwanie się metodą składowych symetrycznych przy wykorzystaniu schematów zastępczych (rys. 1) dla składowych symetrycznych kolejności zgodnej, przeciwnej oraz zerowej, w których wyodrębnione są siły elektromotoryczne poszczególnych składowych symetrycznych.



Rys. 1. Schematy zastępcze maszyny synchronicznej dla składowych symetrycznych

Z tego powodu muszą znane być parametry prądnicy dla wszystkich trzech składowych (symetrycznych). Aby umożliwić analizowanie pracy prądnic przy różnych częstotliwościach wprowadzono współczynnik $k_f = f / f_n$, w którym f jest częstotliwością indukowanej siły elektromotorycznej, proporcjonalną do prędkości obrotowej n silnika napędowego, czyli $f = (n \cdot p) / 60$, gdzie p jest liczbą par biegunów, natomiast f_n jest częstotliwością znamionową. Występujące w schematach zastępczych impedancje maszyny $Z_g(k_f)$ obejmują część rzeczywistą (rezystancje) oraz urojoną (reaktancję indukcyjną zależną od częstotliwości f). W wyrażeniu na reaktancję indukcyjną przyjęto zapis $k_f X_g$, w którym X_g jest reaktancją maszyny przy częstotliwości znamionowej. Postępując wg tych zasad impedancję maszyny dla składowej symetrycznej kolejności zgodnej zapisano następująco:

$$Z_{g1}(k_f) = R_{g1} + jk_f X_{g1}, \quad \text{impedancję dla składowej przeciwnej}$$

$$Z_{g2}(k_f) = R_{g2} + jk_f X_{g2} \quad \text{oraz impedancję dla składowej zerowej}$$

$$Z_{g0}(k_f) = R_{g0} + jk_f X_{g0}.$$

Jako parametr wymuszający wartość napięcia oraz natężenie prądu przy obciążeniach niesymetrycznych przyjmowano prąd wzbudzenia I_w przeliczony do wartości siły elektromotorycznej E_w odniesionej do napięcia znamionowego $E_w = k_u U_n$. Siłę elektromotoryczną indukowaną podczas obciążenia znamionowego (symetrycznego) obliczano wg wzoru $E_{wn} = U_n + I_n Z_{g1}$, w którym jako odniesienie przyjęto fazor napięcia znamionowego $U_n \exp j0$. Fazor prądu stojana $I \exp -j\phi$ jest przesunięty względem fazora napięcia o kąt ϕ , który jest kątem odpowiadającym wartości znamionowego współczynnika mocy.

Występujące w schemacie zastępczym SEM dla poszczególnych składowych symetrycznych opisują związki: dla składowej zgodnej $E_1(k_f, k_{u1}) = k_f k_{u1} U_n$, dla składowej przeciwnej $E_2(k_f, k_{u2}) = k_f k_{u2} U_n$, oraz dla składowej zerowej $E_0(k_f, k_{u0}) = k_f k_{u0} U_n$. Występujące w tych zależnościach wielkości: k_{u1}, k_{u2} oraz k_{u0} są odpowiednio współczynnikami określającymi wartość każdej ze składowej symetrycznej sił elektromotorycznych odniesionych do napięcia znamionowego.

Obciążenie prądnicy reprezentują impedancje o charakterze czynno-indukcyjnym włączone do obwodów poszczególnych faz. Przyjmując, że reaktancje indukcyjne obciążenia również zależą od częstotliwości, impedancje włączone do poszczególnych faz zapisano w następującej postaci: dla fazy pierwszej (U) $Z_{zu}(k_f) = R_{zu} + jk_f X_{zu}$, drugiej (V) $Z_{zv}(k_f) = R_{zv} + jk_f X_{zv}$, oraz trzeciej (W) $Z_{zw}(k_f) = R_{zw} + jk_f X_{zw}$.

Moc znamionową prądnicy przedstawia związek $S_n = 3U_n I_n$, gdzie U_n jest znamionowym napięciem fazowym, a I_n jest znamionowym prądem twornika $I_n \exp -j\phi$. Zgodnie z wymaganiami normy [1] kąt ϕ powinien odpowiadać wartościom współczynnika mocy $\cos\phi_1 = 0.8, 0.9$ lub 1.0 (przy przewzbudzeniu).

Składowe symetryczne kolejności zgodnej, przeciwnej i zerowej impedancji odbiornika oblicza się ze wzoru:

$$\begin{pmatrix} Z_1(k_f) \\ Z_2(k_f) \\ Z_0(k_f) \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Z_{zu}(k_f) \\ Z_{zv}(k_f) \\ Z_{zw}(k_f) \end{pmatrix} \quad (1)$$

Fazowe napięcia poszczególnych składowych symetrycznych opisują zależności:

$$\begin{aligned} U_1 &= E_1 - I_1 Z_{g1} = I_1 Z_1, \\ U_2 &= E_2 - I_2 Z_{g2} = I_2 Z_2, \\ U_0 &= E_0 - I_0 Z_{g0} = I_0 Z_0. \end{aligned}$$

Dla poszczególnych obwodów składowych symetrycznych otrzymuje się następujący układ równań napięciowo-prądowych:

$$\begin{pmatrix} E_1(k_f, k_{u1}) \\ E_2(k_f, k_{u2}) \\ E_0(k_f, k_{u0}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{g1}(k_f) + Z_0(k_f) & Z_2(k_f) & Z_1(k_f) \\ Z_1(k_f) & Z_{g2}(k_f) + Z_0(k_f) & Z_2(k_f) \\ Z_2(k_f) & Z_1(k_f) & Z_{g0}(k_f) + Z_0(k_f) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_1(k_f, k_{u1}, k_{u2}, k_{u0}) \\ I_2(k_f, k_{u1}, k_{u2}, k_{u0}) \\ I_0(k_f, k_{u1}, k_{u2}, k_{u0}) \end{pmatrix} \quad (2)$$

Równania prądów składowych symetrycznych otrzymuje się po przekształceniach równania (2) do postaci:

$$\begin{pmatrix} I_1(k_f, k_{u1}, k_{u2}, k_{u0}) \\ I_2(k_f, k_{u1}, k_{u2}, k_{u0}) \\ I_0(k_f, k_{u1}, k_{u2}, k_{u0}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M_{11}(k_f) & M_{12}(k_f) & M_{13}(k_f) \\ M_{21}(k_f) & M_{22}(k_f) & M_{23}(k_f) \\ M_{31}(k_f) & M_{32}(k_f) & M_{33}(k_f) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_1(k_f, k_{u1}) \\ E_2(k_f, k_{u2}) \\ E_0(k_f, k_{u0}) \end{pmatrix} \frac{1}{D(k_f)} \quad (3)$$

gdzie:

$$\begin{aligned} M_{11}(k_f) &= (Z_{g2}(k_f) + Z_0(k_f))(Z_{g0}(k_f) + Z_0(k_f)) - Z_1(k_f)Z_2(k_f) \\ M_{12}(k_f) &= Z_1(k_f)^2 - Z_2(k_f)(Z_{g0}(k_f) + Z_0(k_f)) \\ M_{13}(k_f) &= Z_2(k_f)^2 - Z_1(k_f)(Z_0(k_f) + Z_{g2}(k_f)) \\ M_{21}(k_f) &= Z_2(k_f)^2 - Z_1(k_f)(Z_0(k_f) + Z_{g0}(k_f)) \\ M_{22}(k_f) &= (Z_0(k_f) + Z_{g1}(k_f))(Z_0(k_f) + Z_{g0}(k_f)) - Z_1(k_f)Z_2(k_f) \end{aligned}$$

$$M_{23}(k_f) = Z_1(k_f)^2 - Z_2(k_f)(Z_0(k_f) + Z_{g1}(k_f))$$

$$M_{31}(k_f) = Z_1(k_f)^2 - Z_2(k_f)(Z_0(k_f) + Z_{g2}(k_f))$$

$$M_{32}(k_f) = Z_2(k_f)^2 - Z_1(k_f)(Z_0(k_f) + Z_{g1}(k_f))$$

$$M_{33}(k_f) = (Z_0(k_f) + Z_{g1}(k_f))(Z_0(k_f) + Z_{g2}(k_f)) - Z_1(k_f)Z_2(k_f)$$

$$D_1(k_f) = (Z_0(k_f) + Z_{g1}(k_f))(Z_0(k_f) + Z_{g2}(k_f))(Z_0(k_f) + Z_{g0}(k_f))$$

$$D_2(k_f) = -Z_1(k_f)Z_2(k_f)[3Z_0(k_f) + (Z_{g1}(k_f) + Z_{g2}(k_f) + Z_{g0}(k_f))]$$

$$D_3(k_f) = Z_1(k_f)^3 + Z_2(k_f)^3$$

$$D(k_f) = D_1(k_f) + D_2(k_f) + D_3(k_f)$$

Prądy fazowe oblicza się ze wzorów:

$$\begin{pmatrix} I_u(k_f, k_{u1}, k_{u2}, k_{u0}) \\ I_v(k_f, k_{u1}, k_{u2}, k_{u0}) \\ I_w(k_f, k_{u1}, k_{u2}, k_{u0}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_1(k_f, k_{u1}, k_{u2}, k_{u0}) \\ I_2(k_f, k_{u1}, k_{u2}, k_{u0}) \\ I_0(k_f, k_{u1}, k_{u2}, k_{u0}) \end{pmatrix} \quad (4)$$

Prąd w przewodzie neutralnym ma postać:

$$I_{p0}(k_f, k_{u1}, k_{u2}, k_{u0}) = 3I_0(k_f, k_{u1}, k_{u2}, k_{u0})$$

W normach podano, że prądnice nie powinny być obciążane prądem większym od znamionowego oraz, że stosunek składowej przeciwnej prądu do prądu znamionowego nie powinien być większy niż 0.08 lub 0.1 natomiast stosunek składowej przeciwnej lub zerowej prądu do składowej zgodnej nie powinien przekraczać 0.05.

Ze względu na warunki pracy odbiorników zasilanych z prądnic synchronicznych, zwłaszcza podczas obciążeń niesymetrycznych, bardzo ważne są wartości napięć fazowych oraz taki wskaźnik jak stosunek składowej kolejności przeciwnej lub zerowej napięcia do składowej zgodnej. Jeśli z prądnicy zasilane są silniki trójfazowe to stosunek składowej przeciwnej napięcia do składowej zgodnej nie powinien być większy niż 0.01. Dla sieci elektroenergetycznej wskaźnik ten nie powinien przekraczać wartości 0.02 lub 0.03. Korzystając z podanych wzorów do obliczenia napięć fazowych można posłużyć się następującymi związkami:

$$\begin{aligned} U_u(k_f, k_{u1}, k_{u2}, k_{u0}) &= I_u(k_f, k_{u1}, k_{u2}, k_{u0})Z_{zu}(k_f) \\ U_v(k_f, k_{u1}, k_{u2}, k_{u0}) &= I_v(k_f, k_{u1}, k_{u2}, k_{u0})Z_{zv}(k_f) \\ U_w(k_f, k_{u1}, k_{u2}, k_{u0}) &= I_w(k_f, k_{u1}, k_{u2}, k_{u0})Z_{zw}(k_f) \end{aligned} \quad (5)$$

Napięcia składowych symetrycznych można obliczyć ze wzorów:

$$\begin{pmatrix} U_1(k_f, k_{u1}, k_{u2}, k_{u0}) \\ U_2(k_f, k_{u1}, k_{u2}, k_{u0}) \\ U_0(k_f, k_{u1}, k_{u2}, k_{u0}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \frac{1}{3} \begin{pmatrix} U_u(k_f, k_{u1}, k_{u2}, k_{u0}) \\ U_v(k_f, k_{u1}, k_{u2}, k_{u0}) \\ U_w(k_f, k_{u1}, k_{u2}, k_{u0}) \end{pmatrix} \quad (6)$$

Wskaźnik niesymetrii napięć opisuje zależność:

$$k_{nu} = \frac{|U_2(k_f, k_{u1}, k_{u2}, k_{u0})|}{|U_1(k_f, k_{u1}, k_{u2}, k_{u0})|} \quad (7)$$

Wskaźnik ten zależy od stopnia niesymetrii odbiornika oraz od stopnia wewnętrznej niesymetrii prądnicy. Jeśli prądnica jest wewnętrznie symetryczna to współczynniki k_{u2} oraz k_{u0} są równe 0.

Jeśli znane są napięcia międzyfazowe U_{uv} , U_{vw} oraz U_{wu} , zmierzone lub obliczone np. ze wzorów

$$\begin{aligned} U_{uv}(k_f, k_{u1}, k_{u2}, k_{u0}) &= U_u(k_f, k_{u1}, k_{u2}, k_{u0}) \\ &\quad - U_v(k_f, k_{u1}, k_{u2}, k_{u0}) \\ U_{vw}(k_f, k_{u1}, k_{u2}, k_{u0}) &= U_v(k_f, k_{u1}, k_{u2}, k_{u0}) \\ &\quad - U_w(k_f, k_{u1}, k_{u2}, k_{u0}) \\ U_{wu}(k_f, k_{u1}, k_{u2}, k_{u0}) &= U_w(k_f, k_{u1}, k_{u2}, k_{u0}) \\ &\quad - U_u(k_f, k_{u1}, k_{u2}, k_{u0}) \end{aligned} \quad (8)$$

to wskaźnik niesymetrii napięć można obliczać ze wzoru:

$$k_{nu} = \sqrt{6 \frac{U_{uv}^2 + U_{vw}^2 + U_{wu}^2}{(U_{uv} + U_{vw} + U_{wu})^2} - 2} \quad (9)$$

Przedstawione wzory na prądy i napięcia można wykorzystać do obliczania wartości mocy czynnej, biernej i pozornej oraz współczynnika mocy.

Przy niesymetrycznych obciążeniach prądnicy moce, czynna, bierna oraz pozorna, oddane przez prądnice są sumą mocy pobranych przez odbiorniki włączone do poszczególnych faz U, V oraz W.

Oddana moc czynna ma postać:

$$P_{od} = \sum (P_u + P_v + P_w) = P(k_f, k_{u1}, k_{u2}, k_{u0}). \quad (10)$$

Moc czynną pobraną przez odbiorniki włączone do fazy U oblicza się ze wzoru:

$$P_u(k_f, k_{u1}, k_{u2}, k_{u0}) = P_u'(k_f, k_{u1}, k_{u2}, k_{u0}) + P_u''(k_f, k_{u1}, k_{u2}, k_{u0}) \quad (11)$$

gdzie: $P_u'(k_f, k_{u1}, k_{u2}, k_{u0}) = \text{Re}(U_u(k_f, k_{u1}, k_{u2}, k_{u0})) \cdot \text{Re}(I_u(k_f, k_{u1}, k_{u2}, k_{u0}))$,

$P_u''(k_f, k_{u1}, k_{u2}, k_{u0}) = \text{Im}(U_u(k_f, k_{u1}, k_{u2}, k_{u0})) \cdot \text{Im}(I_u(k_f, k_{u1}, k_{u2}, k_{u0}))$.

Według analogicznych wzorów oblicza się moce pobrane przez odbiorniki włączone do faz V oraz W. Obliczoną moc całkowitą $P(k_f, k_{u1}, k_{u2}, k_{u0})$ jest dogodnie odnieść do mocy znamionowej prądnicy (P_n). Wartość względną mocy czynnej opisuje związek:

$$p(k_f, k_{u1}, k_{u2}, k_{u0}) = \frac{P(k_f, k_{u1}, k_{u2}, k_{u0})}{|P_n|} \quad (12)$$

Moc bierna oddana przez prądnice ma postać:

$$Q_{od} = \sum (Q_u + Q_v + Q_w) = Q(k_f, k_{u1}, k_{u2}, k_{u0}). \quad (13)$$

Moc bierną pobraną przez odbiorniki włączone do fazy U oblicza się ze wzoru:

$$Q_u(k_f, k_{u1}, k_{u2}, k_{u0}) = Q_u'(k_f, k_{u1}, k_{u2}, k_{u0}) + Q_u''(k_f, k_{u1}, k_{u2}, k_{u0}) \quad (14)$$

gdzie: $Q_u'(k_f, k_{u1}, k_{u2}, k_{u0}) = \text{Im}(U_u(k_f, k_{u1}, k_{u2}, k_{u0})) \cdot \text{Re}(I_u(k_f, k_{u1}, k_{u2}, k_{u0}))$,

$$Q_u''(k_f, k_{u1}, k_{u2}, k_{u0}) = -\text{Re}(U_u(k_f, k_{u1}, k_{u2}, k_{u0})) \cdot \text{Im}(I_u(k_f, k_{u1}, k_{u2}, k_{u0})).$$

Według analogicznych wzorów oblicza się moce bierne pobrane przez odbiorniki włączone do faz V oraz W. Obliczoną moc całkowitą $Q(k_f, k_{u1}, k_{u2}, k_{u0})$ jest dogodnie odnieść do znamionowej mocy biernej prądnicy (Q_n). Wartość względną mocy biernej opisuje związek:

$$q(k_f, k_{u1}, k_{u2}, k_{u0}) = \frac{Q(k_f, k_{u1}, k_{u2}, k_{u0})}{|Q_n|} \quad (15)$$

Dla obliczenia mocy pozornej można posłużyć się związkiem:

$$S(k_f, k_{u1}, k_{u2}, k_{u0}) = \sqrt{P(k_f, k_{u1}, k_{u2}, k_{u0})^2 + Q(k_f, k_{u1}, k_{u2}, k_{u0})^2} \quad (16)$$

Obliczoną moc pozorną, odniesioną do znamionowej mocy pozornej, określa związek:

$$s(k_f, k_{u1}, k_{u2}, k_{u0}) = \frac{S(k_f, k_{u1}, k_{u2}, k_{u0})}{|S_n|} \quad (17)$$

Zastępczy współczynnik mocy $\cos\varphi$ oraz $\text{tg}\varphi$ można obliczać ze wzorów:

$$\cos\Theta(k_f, k_{u1}, k_{u2}, k_{u0}) = \frac{|P(k_f, k_{u1}, k_{u2}, k_{u0})|}{|S(k_f, k_{u1}, k_{u2}, k_{u0})|} \quad (18)$$

$$\text{tg}\Theta(k_f, k_{u1}, k_{u2}, k_{u0}) = \frac{|Q(k_f, k_{u1}, k_{u2}, k_{u0})|}{|P(k_f, k_{u1}, k_{u2}, k_{u0})|} \quad (19)$$

Straty mocy w uzwojeniach maszyny, odniesione do znamionowych strat mocy, można obliczać ze wzorów:

$$DP_c(k_f, k_{u1}, k_{u2}, k_{u0}) = \frac{DP_c(k_f, k_{u1}, k_{u2}, k_{u0})}{DP_{cn}} \quad (20)$$

$$DP_{c1}(k_f, k_{u1}, k_{u2}, k_{u0}) = 3R_{g1}[|I_1(k_f, k_{u1}, k_{u2}, k_{u0})|^2] \quad (21)$$

$$DP_{c2}(k_f, k_{u1}, k_{u2}, k_{u0}) = 3R_{g2}[|I_2(k_f, k_{u1}, k_{u2}, k_{u0})|^2] \quad (22)$$

$$DP_{c0}(k_f, k_{u1}, k_{u2}, k_{u0}) = 3R_{g0}[|I_0(k_f, k_{u1}, k_{u2}, k_{u0})|^2] \quad (23)$$

3. WYBRANE WYNIKI OBLICZEŃ

Równania przedstawione w punkcie 2 wykorzystano dla przeprowadzenia analizy pracy prądnic w stanach niesymetrycznych. Do wykazania przydatności

przedstawionych wzorów do obliczeń i analizy pracy prądnic, zwłaszcza w stanach niesymetrycznych i przy odchyleniach częstotliwości, wykorzystano parametry dwóch prądnic synchronicznych. Jedna o mocy znamionowej 16 kVA, znamionowym napięciu międzyprzewodowym 400 V, prądzie znamionowym 23,1 A, znamionowym współczynniku mocy $\cos\varphi = 0,8$ oraz druga o mocy znamionowej 630 kVA, znamionowym napięciu międzyprzewodowym 400 V, prądzie znamionowym 910 A, znamionowym współczynniku mocy $\cos\varphi = 0,8$.

Impedancje prądnicy o mocy 16 kVA dla składowych symetrycznych, przy znamionowej częstotliwości, przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Impedancje dla składowych symetrycznych prądnicy o mocy 16 kVA.

Impedancja	Symbol	Wartość
dla składowej zgodnej	$Z_{g1}(k_f) = R_{g1} + jk_f X_{g1}$	$1,0 + jk_f 17$
dla składowej przeciwnej	$Z_{g2}(k_f) = R_{g2} + jk_f X_{g2}$	$0,5 + jk_f 1,6$
dla składowej zerowej	$Z_{g0}(k_f) = R_{g0} + jk_f X_{g0}$	$0,5 + jk_f 1,8$

Impedancja odniesienia prądnicy wynosi $Z_{odn} = 10 \Omega$.

Impedancje prądnicy o mocy 630 kVA dla składowych symetrycznych, przy znamionowej częstotliwości, przedstawia tabela 2.

W artykule przedstawiono wybrane wyniki obliczeń dla dwóch wariantów tak dobranych impedancji odbiornika, by stosunek składowej przeciwnej do prądu znamionowego był zawsze równy 0,1, czyli dopuszczalnej wartości określonej w przepisach. Obliczenia przeprowadzono przy częstotliwości znamionowej $k_f = 1,00$, przy częstotliwości obniżonej o 5%, czyli przy wartości współczynnika $k_f = 0,95$ oraz przy częstotliwości podwyższonej o 5%, czyli o wartości współczynnika $k_f = 1,05$. Obniżka częstotliwości o 5% jest dopuszczalna w stanie ustalonym dla zespołów klasy G2.

Tabela 2. Impedancje dla składowych symetrycznych prądnicy o mocy 630 kVA.

Impedancja	Symbol	Wartość
dla składowej zgodnej	$Z_{g1}(k_f) = R_{g1} + jk_f X_{g1}$	$0,0010 + jk_f 0,512$
dla składowej przeciwnej	$Z_{g2}(k_f) = R_{g2} + jk_f X_{g2}$	$0,0005 + jk_f 0,048,$
dla składowej zerowej	$Z_{g0}(k_f) = R_{g0} + jk_f X_{g0}$	$0,0005 + jk_f 0,030.$

Impedancja odniesienia prądnicy wynosi $Z_{odn} = 0,254 \Omega$.

Wyniki obliczeń dla prądnicy o mocy 16 kVA

Przyjęte do obliczeń wartości impedancji odbiornika (w wartościach względnych) przedstawia tabela 3.

Tabela 3. Wartość impedancji odbiornika prądnicy o mocy 16 kVA.

Faza	Impedancja	Wartość
Pierwsza	Z_{zu}	0,99 expj36,8
Druga	Z_{zv}	1,20 expj39,6
Trzecia	Z_{zw}	1,45 expj34,8

Obliczone wartości prądów w uzwojeniach twornika, przy prądzie wzbudzenia o wartości 0,91 znamionowego prądu wzbudzenia I_{wN} , zestawiono w tabeli 4.

Tabela 4. Obliczone wartości prądów przy wzbudzeniu 0,91 I_{wN} .

k_f	Faza pierwsza		Faza druga		Faza trzecia		I_2/I_1
	A	I/I_n	A	I/I_n	A	I/I_n	
0,95	22,9	0,992	19,3	0,838	16,3	0,706	0,118
1,00	23,1	1,000	19,5	0,843	16,5	0,714	0,117
1,05	23,3	1,008	19,6	0,848	16,6	0,721	0,117

Obliczony stosunek składowej symetrycznej kolejności przeciwnej prądu do prądu znamionowego wynosi 0.1 i jest zgodny z wymaganiami przepisów. Obliczony stosunek składowej symetrycznej kolejności przeciwnej prądu do składowej zgodnej wynosi 0,117 oraz 0,118 i przekracza wymaganą wartość = 0,05. Stosunek składowej symetrycznej kolejności zerowej prądu do składowej zgodnej wynosi 0,079, 0,080 oraz 0,081 i przekracza wymaganą wartość = 0,05. Prąd w przewodzie neutralnym ma wartość 0,204 prądu znamionowego. Obliczone wartości fazowych napięć twornika zestawiono w tabeli 5.

Tabela 5. Obliczone wartości napięć fazowych twornika.

k_f	Faza pierwsza		Faza druga		Faza trzecia		U_2/U_1
	A	U/U_n	A	U/U_n	A	U/U_n	
0,95	222,9	0,965	227,5	0,985	232,8	1,008	0,016
1,00	228,8	0,990	233,7	1,012	239,2	1,036	0,017
1,05	234,6	1,016	239,9	1,039	245,6	1,063	0,017

Stosunek składowej symetrycznej kolejności przeciwnej napięcia do składowej zgodnej wynosi 0,016 oraz 0,017. Ta wartość spełnia wymagania przepisów w zakresie układów zasilania dla sieci komunalnych i przemysłowych. Silniki trójfazowe prądu przemiennego powinny być zasilane napięciem, w którym podany stosunek składowych symetrycznych U_2/U_1 nie przekracza wartości 0,01.

Obliczone obciążenie prądnicy dla przyjętych wartości impedancji odbiornika przedstawiono w tabeli 6.

Tabela 6. Obliczone obciążenie prądnicy 16 kVA.

k_f	P/P_n	Q/Q_n	S/S_n	$\Delta P_{cu}/\Delta P_{cun}$	$\cos\theta_{sr}$
0,95	0,843	0,811	0,831	0,721	0,810
1,00	0,857	0,868	0,861	0,733	0,797
1,05	0,870	0,925	0,890	0,744	0,782

Wyniki obliczeń dla prądnicy o mocy 630 kVA

Przyjęte do obliczeń wartości impedancji odbiornika dla prądnicy o mocy 630 KVA przedstawiono w tabeli 7.

Tabela 7. Wartości impedancji odbiornika prądnicy o mocy 630 kVA.

Faza	Impedancja	Wartość
Pierwsza	Z_{zu}	0,255 expj36,8
Druga	Z_{zv}	0,300 expj39,6
Trzecia	Z_{zw}	0,204 expj34,8

Obliczone wartości prądów w uzwojeniach twornika, przy znamionowej wartości prądu wzbudzenia I_{wN} zestawiono w tabeli 8.

Obliczony stosunek składowej symetrycznej kolejności przeciwnej prądu do prądu znamionowego wynosi 0,1 i jest zgodny z wymaganiami przepisów. Obliczony stosunek składowej symetrycznej kolejności przeciwnej prądu do składowej zgodnej wynosi 0,098 oraz 0,099 i przekracza wymaganą wartość 0,05. Stosunek składowej symetrycznej kolejności zerowej prądu do składowej zgodnej wynosi 0,111 i przekracza wymaganą wartość 0,05. Prąd w przewodzie neutralnym ma wartość 0,335 prądu znamionowego. Obliczone wartości fazowych napięć twornika zestawiono w tabeli 9.

Tabela 8. Obliczone wartości prądów w uzwojeniach twornika przy znamionowym wzbudzeniu I_{wN} .

k_f	Faza pierwsza		Faza druga		Faza trzecia		I_2/I_1
	A	I/I_n	A	I/I_n	A	I/I_n	
0,95	887,7	0,976	770,0	0,846	1096	1,204	0,098
1,00	891,9	0,980	772,5	0,849	1101	1,210	0,099
1,05	895,5	0,984	774,7	0,851	1106	1,216	0,099

Tabela 9. Obliczone wartości fazowych napięć twornika.

k_f	Faza pierwsza		Faza druga		Faza trzecia		U_2/U_1
	A	U/U_n	A	U/U_n	A	U/U_n	
0,95	222,4	0,963	226,4	0,980	219,9	0,952	0,018
1,00	228,1	0,985	238,7	1,003	239,2	0,973	0,019
1,05	232,5	1,007	237,2	1,027	229,4	0,993	0,020

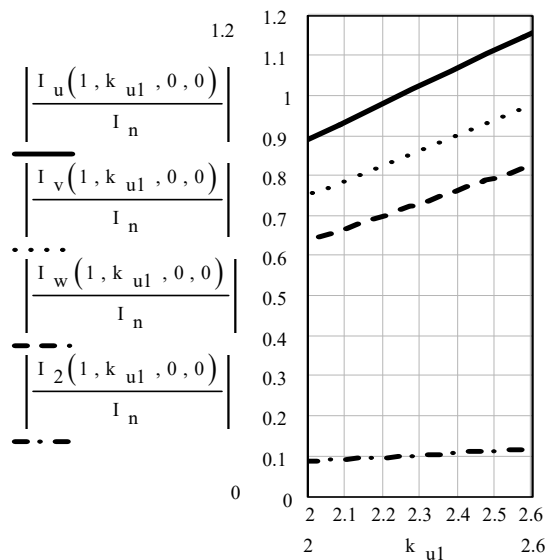
Stosunek składowej symetrycznej kolejności przeciwnej napięcia do składowej zgodnej wynosi 0,018, 0,019 oraz 0,020. Ta wartość spełnia wymagania przepisów w zakresie układów zasilania dla sieci komunalnych i przemysłowych. Silniki trójfazowe prądu przemiennego powinny być zasilane napięciem, w którym podany stosunek składowych symetrycznych U_2/U_1 nie przekracza wartości 0.01. Obliczone obciążenie prądnicy dla przyjętych wartości impedancji odbiornika przedstawiono w tabeli 10.

Na rysunkach 2–6 przedstawiono wybrane charakterystyki ilustrujące wpływ różnych parametrów prądnicy na jej wielkości wyjściowe.

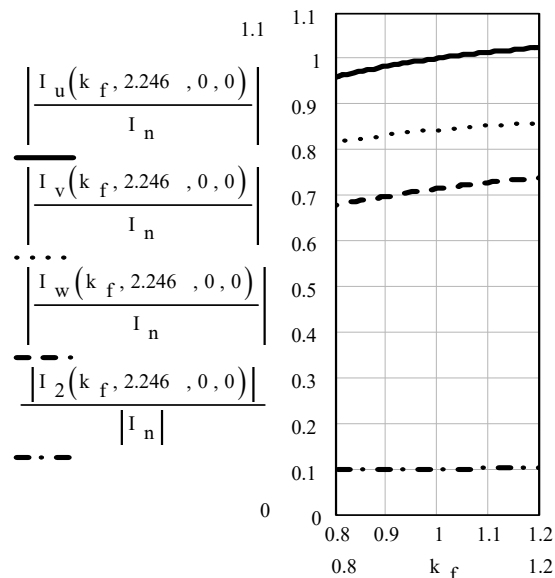
Wpływ prądu wzbudzenia na wartości prądów w uzwojeniach twornika oraz na wartość składowej symetrycznej kolejności przeciwnej dla prądnicy o mocy 16 kVA przedstawiono na rysunku. 2 natomiast dla prądnicy o mocy 630 kVA na rysunku 3.

Tabela 10. Obliczone obciążenie prądnicy 630 kVA.

k_f	P/P_n	Q/Q_n	S/S_n	$\Delta P_{cu}/\Delta P_{cun}$	$\cos\theta_{sr}$
0,95	0,989	0,939	0,971	1,028	0,815
1,00	0,998	0,997	0,977	1,037	0,801
1,05	1,006	0,105	1,023	1,046	0,786



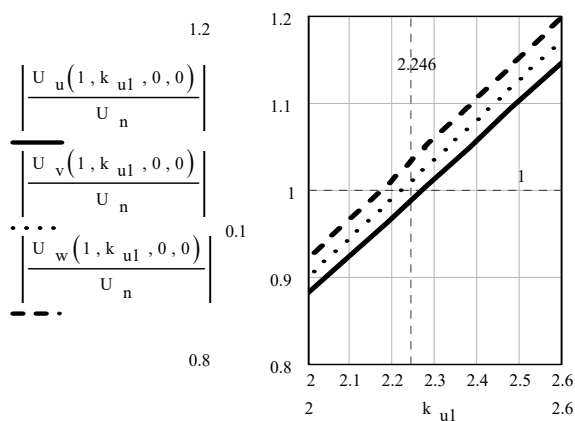
Rys. 2. Prądy w uzwojeniu twornika i składowa kolejności przeciwnej prądnicy 16 kVA przy różnym wzbudzeniu



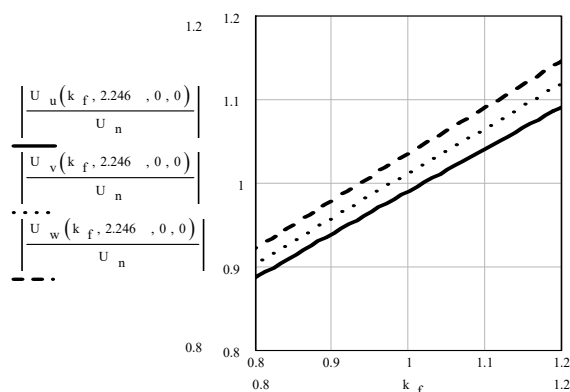
Rys. 3. Prądy w uzwojeniu twornika prądnicy 630 kVA przy różnym wzbudzeniu

Na rysunku 4 przedstawiono charakterystykę ilustrującą wpływ prądu wzbudzenia na wartości napięć fazowych prądnicy o mocy 16 kVA.

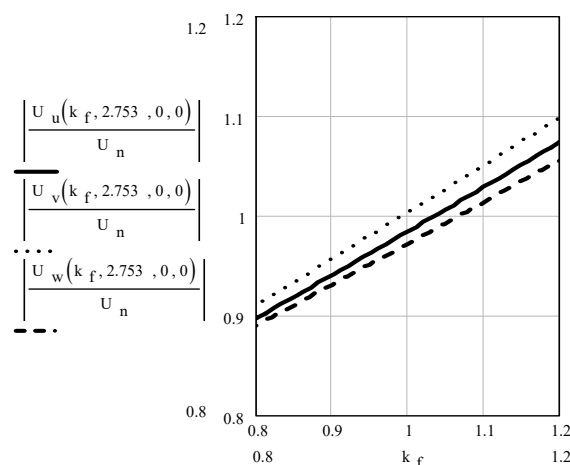
Na rysunkach 4 i 5 przedstawiono charakterystyki napięć wyjściowych (obu prądnic) w funkcji współczynnika k_f . Łatwo zauważyć, że przy niewielkich odchyleniach częstotliwości, wielkości wyjściowe prądnic nie ulegają istotnym zmianom.



Rys. 4. Napięcia fazowe prądnicy 16 kVA przy różnym wzbudzeniu



Rys. 5. Napięcia wyjściowe prądnicy 16 kVA w funkcji częstotliwości



Rys. 6. Napięcia wyjściowe prądnicy 630 kVA w funkcji częstotliwości

4. WNIOSKI

Wyniki symulacji różnych stanów niesymetrycznych są trudne do porównywania, ponieważ cytowane normy nie określają dopuszczalnego obciążenia prądem poszczególnych uzwojeń, ograniczając się wyłącznie do wymagania ograniczenia wartości składowej przeciwnej. W punkcie 3 artykułu zestawiono najbardziej charakterystyczne wyniki symulacji obciążeń niesymetrycznych prądnicy małej (16 kVA) oraz średniej mocy (630 kVA). Na przykładzie obu prądnic pokazano, że wymagania obowiązujących przepisów w zakresie obciążeń niesymetrycznych są tak mało precyzyjne, że spełniając przepisy dotyczące dopuszczalnej wartości stosunku składowej symetrycznej kolejności przeciwnej do prądu znamionowego można w uzwojeniach prądnicy wymuszać różne rozkłady prądów.

Rozpływy te powodują występowanie różnych wartości strat mocy w uzwojeniach, a tym samym różnego ich nagrzewania. W pokazanych przykładach, dla tej samej wartości stosunku $I_2/I_n = 0,1$, w przypadku prądnicy o mocy 16 kVA, przy załączonym odbiorniku stosunek strat mocy w uzwojeniach wynosi 73,3%, natomiast podczas obciążenia prądnicy o mocy 630 kVA, stosunek strat mocy w uzwojeniach jest równy aż 103,7%. Ponieważ podczas trójfazowych obciążeń prądnicy wartość stosunku $I_2/I_n = 0,1$ zależy od wielu zmiennych, przyłączając odbiornik trudno przewidywać, przy jakich wartościach prądów w poszczególnych uzwojeniach uzyska się wymaganą wartość tego stosunku. Koniecznością wydaje się wprowadzenie wymagania, że całkowite straty mocy w uzwojeniach nie mogą przekraczać wartości znamionowej tych strat. Za łatwy do zdefiniowania można by uznawać tylko przypadek niesymetrycznego obciążenia jednofazowego, przy którym stosunek $I_2/I_n = 0,1$ występuje przy prądzie obciążenia wynoszącym 0,3 znamionowego prądu twornika. W takim jednak przypadku, spełniającym wymagania przepisów, prądnica jest w wyraźny sposób niedociążona.

LITERATURA

- [1] PN-EN 60034–1/2001 Maszyny elektryczne wirujące. Dane znamionowe i parametry.
- [2] PN-EN 60034–22/2000 Maszyny elektryczne wirujące. Prądnice prądu przemiennego do zespołów prądotwórczych napędzanych tłokowymi silnikami spalinowymi.
- [3] ROZPORZĄDZENIE MINISTRA GOSPODARKI I PRACY z dnia 20 grudnia 2004 r. W sprawie szczegółowych warunków przyłączenia podmiotów do sieci elektroenergetycznej, ruchu i eksploatacji tych sieci (Dz. U. z 2005 r. Nr 2, poz. 6).
- [4] Stein Z., Eksploatacja Maszyn Elektrycznych. WUPP, Poznań, 1991.
- [5] Stein Z., Zielińska M., Równania wyjściowe do analizy warunków pracy autonomicznej trójfazowej prądnicy synchronicznej w stanach niesymetrycznych. Materiały Konferencji ŻKwE, Poznań, 2006.
- [6] Bednarek K., Kasprzyk L., Supper session of higher harmonic components introduction to the networks and improvement of the conditions of electric supply of electrical equipment. Przegląd Elektrotechniczny, Vol. 88, Issue 12B, 2012, pp. 236–239.
- [7] Kasprzyk L., Bednarek K., Electromagnetism and power accumulation issue. Przegląd Elektrotechniczny, Vol. 90, Issue 12, 2014, pp. 221–224.

**EMERGENCY POWER SUPPLY FROM THREE-PHASE SYNCHRONOUS
GENERATORS OF DIESEL-ELECTRIC ASSEMBLIES**

The paper presents selected problems related to autonomous operation of three-phase synchronous generators used in diesel-electric sets appropriated to emergency supply of various receivers of electric power located in stationary, communal, or industrial objects in case of failure of the basic electric power supply. A set of equations adapted to analyzing the conditions of autonomous operation of three-phase synchronous generators is presented. The equations are presented in the form enabling analysis of the operation conditions of the generators driven by combustion engines. The equations are so formulated as to allow for analyzing operation of the generators under various operation conditions, particularly forced by asymmetric impedances of the receivers. The equations enable calculating the active and reactive power delivered by the generators under various frequency values and asymmetric conditions. The formulated equations were used for calculating characteristic parameters of generators under various operation conditions.

(Received: 22.01.2019, revised: 05.03.2019)