

Wpływ niejednoczesności działania styków styczników kierunkowych na pracę napędu urządzenia wyciągowego

Zgodnie z obowiązującymi zaleceniami, tzw. czas niejednoczesności załączania zestyków wyłączników mocy nie powinien przekraczać 10 ms. Ograniczenie to ma za zadanie nie dopuścić do powstania asymetrii zasilania urządzenia elektroenergetycznego, w tym przypadku maszyny elektrycznej.

Efekt ubocznym, niepożądanym asymetrii zasilania jest odkształcenie prądu zasilania, a co za tym idzie, powstanie wyższych harmonicznych prądów i napięć. W dotychczas publikowanych materiałach trudno jest spotkać opracowanie, które łączy rozważania teoretyczne niejednoczesności działania zestyków styczników w układach nawrotnych zasilania silników asynchronicznych pierścieniowych dużej mocy z praktycznym ich występowaniem, a szczególnie w maszynach wyciągowych. Z reguły opracowania mają charakter prac akademickich, w których budowane są modele matematyczne, w większości z parametrami niedostępnymi pomiarowo dla osób zajmujących się nadzorem urządzeń wyciągowych.

Od modelu matematycznego silnika asynchronicznego pierścieniowego, napędzającego urządzenie wyciągowe oczekuje się, aby można było wykazać zasadnicze związki zachodzące między napięciami, prądami płynącymi w uzwojeniach, momentami mechanicznymi i prędkością obrotową w dowolnych stanach eksploatacyjnych urzą-

TREŚĆ: Artykuł przedstawia uwagi i spostrzeżenia, wynikające z badań urządzeń wyciągowych, dotyczące niezawodności napędu urządzenia wyciągowego z wykorzystaniem silnika asynchronicznego pierścieniowego. Jednym z głównych problemów, związanych z tego typu napędami jest ich praca przy niejednoczesnym działaniu zestyków styczników kierunkowych w układzie zasilania silnika wyciągowego. Brak jednoczesności działania zestyków w danym styczniku kierunkowym skutkuje powstaniem m.in. przepięć łączeniowych i prądów udarowych. Efektem tego może być uszkodzenie izolacji uzwojeń silnika, kabla i innych urządzeń, a w konsekwencji unieruchomienie urządzenia wyciągowego na dłuższy czas. Doświadczenia pracowników zajmujących się tym zagadnieniem wskazują, że jednym z istotnych zabiegów poprawiających niezawodność eksploatacji styczników kierunkowych jest ich regularne sprawdzanie, a w razie potrzeby, regulacja pod kątem jednoczesności działania zestyków we wszystkich 3 fazach.

SŁOWA KLUCZOWE:

silnik asynchroniczny pierścieniowy maszyny wyciągowej, styczniki kierunkowe

dzenia wyciągowego. Ogólnie rzecz biorąc chodzi o to, aby przybliżyć poznanie stanów dynamicznych napędu urządzenia wyciągowego, jakie występują podczas załączeń i przełączeń styczników kierunkowych, tj.: podczas rozruchu, jazdy ustalonej i hamowania. W tych stanach przejściowych silnik może być wielokrotnie załączany/wyłączany, bądź przełączany w odwrotnym kierunku bez jego wcześniejszego zatrzymania. Analiza tych stanów ma szczególne znaczenie dla techniki zabezpieczeniowej i obliczeń wytrzymałościowych. W tym przypadku chodzi o to, aby nie dopuścić do powstania niekontrolowanych przepięć oraz powstania

prądów dynamicznych w układzie zasilania asynchronicznego silnika wyciągowego.

Skutki przepięć, zarówno cieplne, jak i mechaniczne, zostały zaobserwowane na komorach gasikowych styczników kierunkowych w postaci opaleń zestyków i przegród komór gasikowych, obniżenia stanu izolacji, uszkodzeń mechanicznych obudowy, a w krytycznych przypadkach rozerwania całych komór.

W związku z dużymi trudnościami technicznymi, jak i względami bezpieczeństwa, pomiarów napięć i prądów w stanach nieustalonych generalnie się nie przeprowadza. Trudności techniczne polegają na tym, że szybkie zmiany odkształconego prądu fazowego są możliwe do zmierzenia za pomocą przyrządów niekonwencjonalnych, stosowanych bardzo rzadko (np. cęgi Dietza z przetwornikiem hallotronowym). Ogólnie stosowane przekładniki prądowe i napięciowe, zabudowane w polach zasilających silniki wyciągowe nie przenoszą składowej stałej zawartej w odkształconym prądzie fazowym.

Wszelkie metody laboratoryjne przeprowadzania pomiarów opisywane w literaturze i stosowane w pracowniach akademickich nie przewidują sytuacji, w której powstałe przepięcie mogłoby przenieść się na aparaturę pomiarową osoby wykonującej pomiary, a szczególnie w przypadku występujących dużych mocy zwarciovych rzędu 100 MVA i większych.

Należy też wziąć pod uwagę fakt, że stosowane instrukcje przeprowadzania badań maszyn wyciągowych nie przewidują badania niejednoczesności działania zestyków (przebiegu prądów i napięć w stanach nieustalonych) w warunkach ruchowych. Zadaniem niniejszego artykułu jest zatem próba przedstawienia tej problematyki na drodze modelu matematycznego (w postaci powiązanych wzorów). Przedstawiono również symulacje dla kilku szczególnych przypadków w postaci przebiegów prądów i napięć. Jednak ze względów bezpieczeństwa wykonywania pomiarów przedstawiono symulację przebiegów.

W niniejszym artykule rozpatrzono przypadek silnika asynchronicznego pierścieniowego trójfazowego symetrycznego. Założono, że wytwarzane przez uzwojenia silnika pole indukcji magnetycznej w szczelinie złożone jest sinusoidalnie wzdłuż obwodu szczeliny powietrznej maszyny.

Poniżej przedstawiono kilka podstawowych wzorów i oznaczeń wykorzystanych w dalszej części artykułu.

$$u_1(t) = U_m \sin(\omega t + \psi - \varphi) \quad (1)$$

$$u_2(t) = U_m \sin(\omega t + \psi - 120^\circ - \varphi) \quad (2)$$

$$u_3(t) = U_m \sin(\omega t + \psi + 120^\circ - \varphi) \quad (3)$$

gdzie:

$u_1(t)$, $u_2(t)$, $u_3(t)$ – napięcia fazowe źródła zasilającego,

U_m – amplituda napięcia zasilającego,

$\omega = 2\pi f$ – prędkość kątowna (pulsacja),

f – częstotliwość sieci zasilającej (50 Hz),

t – czas,

ψ – faza początkowa przebiegu (włączenia),

φ – kąt fazowy (u , i).

Pozostałe symbole wykorzystywane w dalszej części artykułu:

$i_1(t)$, $i_2(t)$, $i_3(t)$ – prądy fazowe,

R_{s1} , R_{s2} , R_{s3} – rezystancje poszczególnych faz sieci zasilającej,

L_{s1} , L_{s2} , L_{s3} – indukcyjności poszczególnych faz sieci zasilającej,

R_{z1} , R_{z2} , R_{z3} – rezystancje poszczególnych faz silnika asynchronicznego będące sumą rezystancji stojana i rezystancja wirnika przeliczonej na stronę stojana,

L_{z1} , L_{z2} , L_{z3} – indukcyjności poszczególnych faz silnika asynchronicznego będące sumą wszystkich indukcyjności (własnych i wzajemnych) stojana i indukcyjności wirnika przeliczonych na stronę stojana.

W artykule ograniczono się do rozpatrzenia tylko jednego szczególnego przypadku, to jest przypadku, w którym załączenie stycznika kierunkowego następuje w momencie występowania jeszcze w silniku energii pola magnetycznego. Taki przypadek występuje w momencie powtórnego załączenia tego samego stycznika (np. w trakcie dojazdu urządzenia wyciągowego, robót szybowych przy przemieszczaniu dużych ładunków), tzn. najpierw nastąpiło wyłączenie, a następnie powtórne załączenie w bardzo krótkim czasie. Dla porównania przedstawiono też oscylogram prądów dla „pierwszego załączenia”, tj. w momencie niewystępowania w silniku energii pola magnetycznego.

Rozpatrywany przypadek dotyczy niejednoczesnego podania napięcia na zaciski (fazy) stojana (rys. 1). Założono, że zestyk 3 stycznika kierunkowego zostaje zamknięty jako ostatni. Do analizy powstających w tej sytuacji odkształconych przebiegów prądów i napięć wyodrębniono dwa przedziały czasowe. Pierwszy przedział obejmuje czas od chwili, w której zestyki 1 i 2 zostają zamknięte, do chwili zamknięcia zestyku 3. Natomiast drugi obejmuje czas od chwili zamknięcia zestyku 3 do czasu powstania stanu ustalonego.

Pierwszy przedział czasowy

Zagadnienie przebiegu stanu nieustalonego w tym przedziale czasowym sprowadza się do rozpatrzenia obwodu przedstawionego na rys. 2.

$$u_2(t) - u_1(t) = i(t)(R_{z1} + R_{z2}) + (L_{z1} + L_{z2}) \frac{di(t)}{dt} \quad (4)$$

W celu uproszczenia obliczeń posłużono się rachunkiem operatorowym (transformatą Laplace'a). Przekształcając powyższe równanie, otrzymuje się:

$$U_2(s) - U_1(s) = I(s)[(R_{z1} + R_{z2}) + s(L_{z1} + L_{z2})] - (L_{z1} + L_{z2})i(0^+) \quad (5)$$

gdzie

$$i(0^+) = i_1(0^+) - i_2(0^+)$$

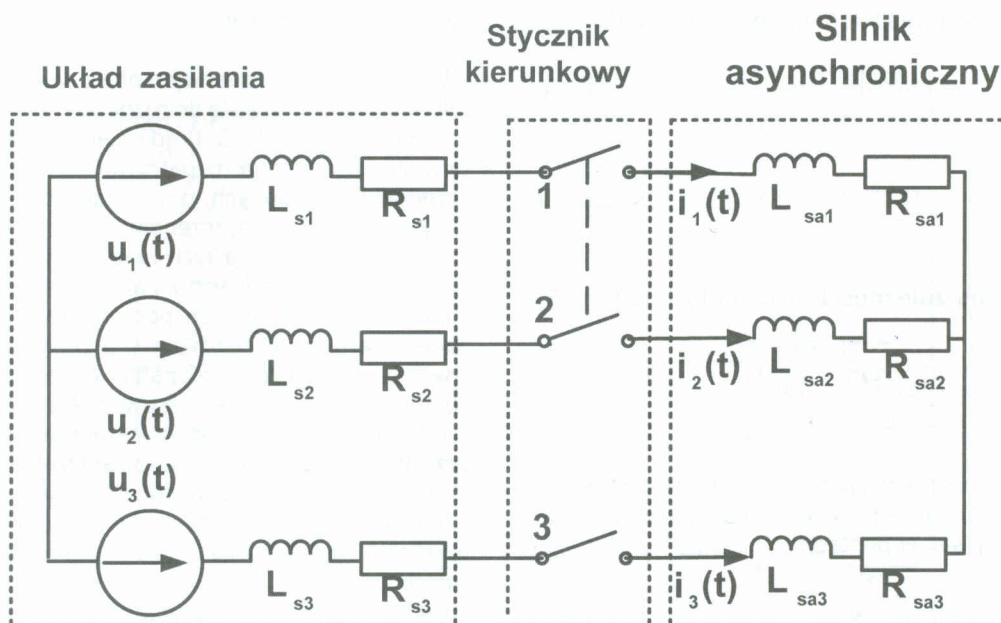
Dla uproszczenia przyjęto:

$$R_{z1} + R_{z2} = R_z \quad \text{oraz} \quad L_{z1} + L_{z2} = L_z$$

Równania wyjściowe przyjmują postać:

$$I(s) = \frac{U_2(s) - U_1(s) + L_z i(0^+)}{R_z + sL_z} \quad (6)$$

$$U_2(s) = -\frac{U_m(\sqrt{3}s + \omega)}{2(s^2 + \omega^2)} \quad (7)$$



Rys. 1. Niejednoczesne załączenie poszczególnych faz w układzie gwiazdowym

Fig. 1. Non-simultaneous start-up of particular phases in the star connection

$$U_1(s) = U_m \frac{\omega}{s^2 + \omega^2} \quad (8)$$

gdzie:

U_m – amplituda napięcia fazowego zasilania,

I – prąd fazowy,

R_z – rezystancja zastępcza przeliczona na fazę,

L_z – indukcyjność zastępcza przeliczona na fazę,

$i(0^+)$ – wartość prądu fazowego w chwili ponownego załączenia stycznika kierunkowego.

Wielkość $L_z i(0^+)$ odzwierciedla energię pola magnetycznego zawartego w silniku pozostałą po pracy wykonanej podczas podnoszenia nadwagi przez urządzenie wyciągowe.

Po przekształceniach wielkość prądu wynosi:

$$I(s) = \frac{U_2(s) - U_1(s)}{R_z + sL_z} + \frac{L_z i(0^+)}{R_z + sL_z} \quad (9)$$

Po podstawieniu (7) i (8) do (9) otrzymuje się:

$$I(s) = - \left[\frac{U_m(\sqrt{3}s + 3\omega)}{2(s^2 + \omega^2)(R_z + sL_z)} \right] + \frac{L_z i(0^+)}{R_z + sL_z} \quad (10)$$

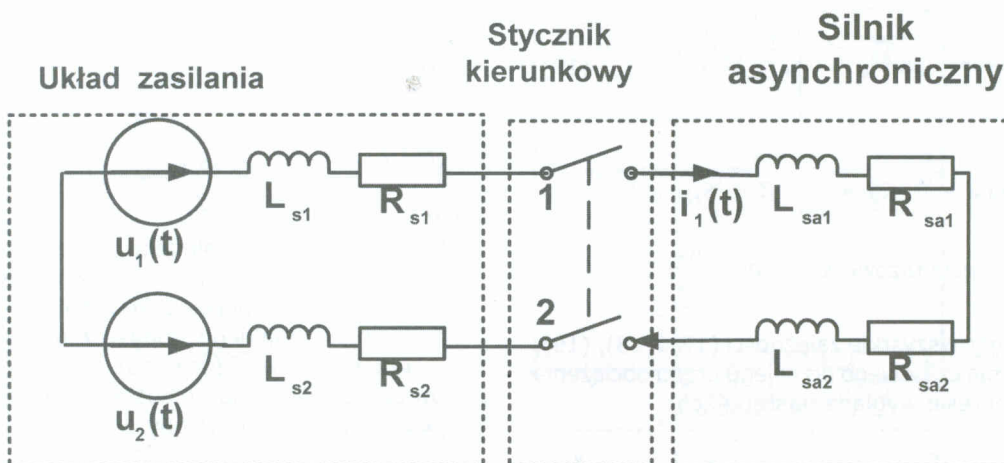
Przejdzie na postać czasową z powyższego równania może sprawiać pewne kłopoty. W celu obniżenia stopnia wielomianu w mianowniku pierwszego członu wzoru (10), zamiast wymuszenia sinusoidalnego rozpatrzono wymuszenie funkcją zespoloną w postaci:

$$U(t) = |U_m| e^{j(\omega t + \varphi)} \quad (11)$$

Przy czym $e(t) = \text{Im} \{E(t)\}$,

φ – kąt fazowy, określany jako $\arctg(R_z/\omega L_z)$.

Stosując własność przemienności transformacji Laplace'a i symbolicznych działań Im i Re , działanie Im zostanie wykonane dopiero w ostatnim etapie obliczeń.



Rys. 2. Układ pomocniczy dla obliczenia przebiegów nieustalonych w pierwszym przedziale czasowym

Fig. 2. Auxiliary system for calculation of current waveforms not registered in the first period of time

Transformata funkcji zespolonej przybiera postać:

$$U(s) = L\{U_m |e^{j(\omega t + \varphi)}\} = \frac{U_m |e^{j\varphi}}{s - j\omega} \quad (12)$$

oznaczając

$$U_m = |U_m| e^{j\varphi} \quad (13)$$

Po uwzględnieniu zależności (10), (11), (12) i (13) otrzymuje się:

$$I(s) = -\left[\frac{U_m(\sqrt{3}s + 3\omega)}{2(s^2 + \omega^2)(R_z + sL_z)} \right] + \frac{L_z i(0^+)}{R_z + sL_z} \quad (14)$$

Do przejścia na postać czasową wykorzystane jest twierdzenie Heaviside'a, które przy wyróżnionym pierwiastku $s = j\omega$ można zapisać w postaci:

$$\frac{K(s)}{(s - j\omega)H(s)} = \left[\frac{K(j\omega)}{H(j\omega)} e^{j\omega t} + \sum_{k=1}^n \frac{K(s_k)}{(s_k - j\omega)H'(s_k)} e^{s_k t} \right] \quad (15)$$

Przyjęto odpowiednie oznaczenia:

$$K(s) = E_m \quad (16)$$

$$H(s) = R_z + sL_z$$

$$s_1 = -\frac{R_z}{L_z}$$

$$H'(s_1) = L;$$

$$i(0^+) = I_{ust}$$

Korzystając z twierdzenia Heaviside'a, otrzymuje się przebieg czasowy prądu:

$$I(t) = -\frac{U_m}{R_z + j\omega L_z} e^{j\omega t} + I_{ust} e^{-\frac{R_z}{L_z} t} = \frac{U_m e^{-\frac{R_z}{L_z} t}}{(\frac{R_z}{L_z} + j\omega)L_z} + I_{ust} e^{-\frac{R_z}{L_z} t} \quad (17)$$

$$I(t) = \frac{U_m}{Z} \left[e^{j\omega t} - e^{-\frac{R_z}{L_z} t} \right] + I_{ust} e^{-\frac{R_z}{L_z} t} \quad (18)$$

$$I(t) = \frac{|U_m|}{|Z|} \left[e^{j(\omega t - \varphi)} - e^{j(-\varphi)} e^{-\frac{R_z}{L_z} t} \right] + I_{ust} e^{-\frac{R_z}{L_z} t} \quad (19)$$

gdzie :

$$Z - \text{impedancja } Z = R_z + j\omega L_z \quad Z = \sqrt{R_z^2 + (\omega L_z)^2}$$

$$\varphi - \text{kąt przesunięcia fazowego } \varphi = \arctg \frac{\omega L_z}{R_z}$$

Uwzględniając wszystkie zależności (17), (18), (19), ostateczna wersja czasowego przebiegu prądu obciążenia w pierwszym okresie wygląda następująco:

$$i(t) = \text{Im}\{I(t)\} = \frac{|U_m|}{|Z|} \left[\sin(\omega t - \varphi) + \sin\varphi e^{-\frac{R_z}{L_z} t} \right] + I_{ust} e^{-\frac{R_z}{L_z} t} \quad (20)$$

Drugi przedział czasowy

W tym przedziale czasowym obliczanie przebiegu nieustalonego sprowadza się do rozpatrzenia układu przedstawionego na rysunku 3. Prądy nieustalone powstające w tym układzie można rozpatrywać jako sumę:

- prądów nieustalonych, powstających przy jednoczesnym załączeniu poszczególnych faz i przy zerowych warunkach początkowych układu (rys. 3b),
- prądów zaburzeniowych wywołanych zwarciem tego, układu przy warunkach początkowych określonych przez wartości, w chwili $t = \tau$, przebiegów nieustalonych zachodzących w rozpatrywanym już poprzednio pierwszym przedziale czasowym (rys. 3c).

Analogicznie, tą metodą można przeprowadzić obliczenia w przypadku niejednoczesnego załączenia poszczególnych faz układów połączonych w trójkąt.

Zestyk 3 zostanie zamknięty po czasie τ od chwili zamknięcia zestyku 1 i 2. Prądy, które popłyną po zamknięciu zestyku 3 przedstawia się jako sumę:

- prądów nieustalonych płynących przy jednoczesnym załączeniu poszczególnych faz; prądy te oznaczono indeksem r , $i_{kr}(t)$ stąd

$$i_{1r}(t) = \frac{U_m}{Z} [\sin(\omega t - \varphi) + \sin\varphi] e^{-\frac{R_z}{L_z} t} \quad (21)$$

- prądów zanurzeniowych wywołanych zwarciem układu o warunkach początkowych $i_1(\tau)$ i $i_2(\tau)$; prądy te oznaczono indeksem w , $i_{kw}(t)$. stąd

$$I_{1w}(s) = \frac{L_z i_1(\tau)}{Z(s)} \quad (22)$$

$$I_{2w}(s) = \frac{L_z i_2(\tau)}{Z(s)} \quad (23)$$

$$I_{3w}(s) = 0 \quad (24)$$

Po przeprowadzeniu transformacji otrzymuje się przebiegi czasowe prądów:

$$i_{1w}(t) = i_1(\tau) e^{-\frac{R_z}{L_z} t} \quad (25)$$

$$i_{2w}(t) = -i_2(\tau) e^{-\frac{R_z}{L_z} t} \quad (26)$$

$$i_{3w}(t) = i_{ust}(\tau) \quad (27)$$

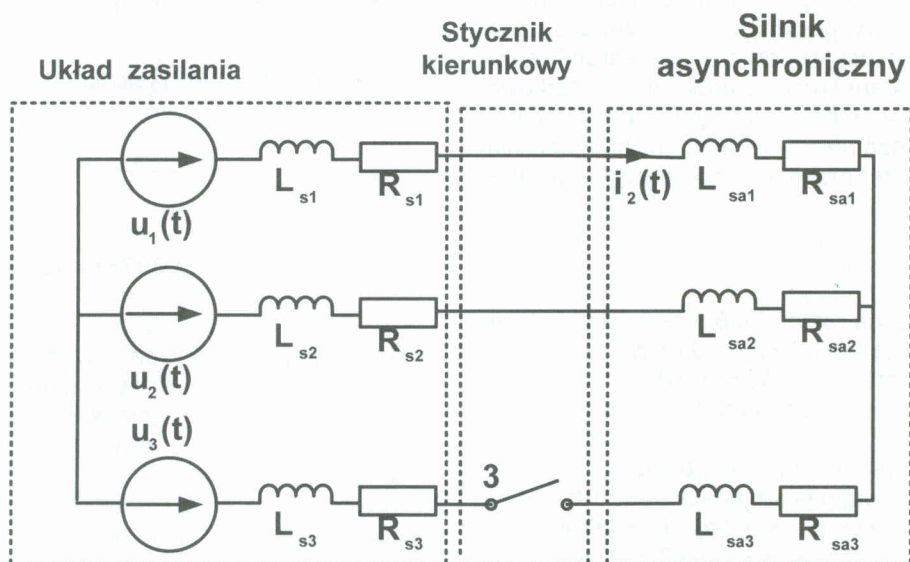
gdzie:

$i_{ust}(\tau)$ - wartość prądu ustalonego po czasie τ , pochodząca od obciążenia silnika urządzenia wyciągowego przy podnoszeniu ładunku znamionowego (ładunku maksymalnego dopuszczalnego dla danego urządzenia wyciągowego).

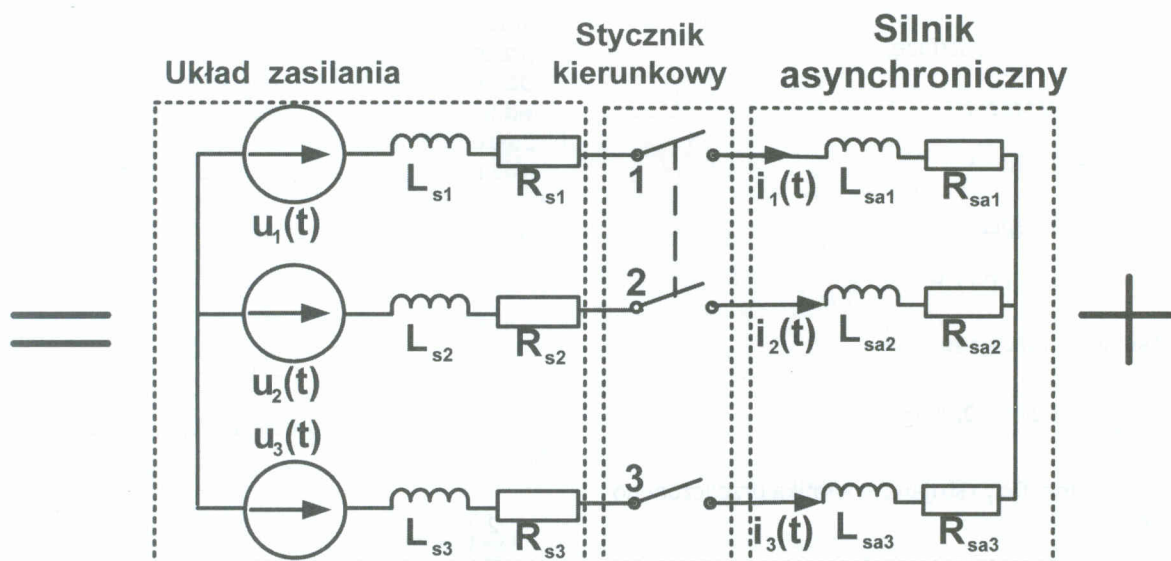
Całkowity przebieg prądu nieustalonego po zamknięciu zestyku 3 będzie zatem równy:

$$i_1(t) = i_{1r}(t) + i_{1w}(t) \quad (28)$$

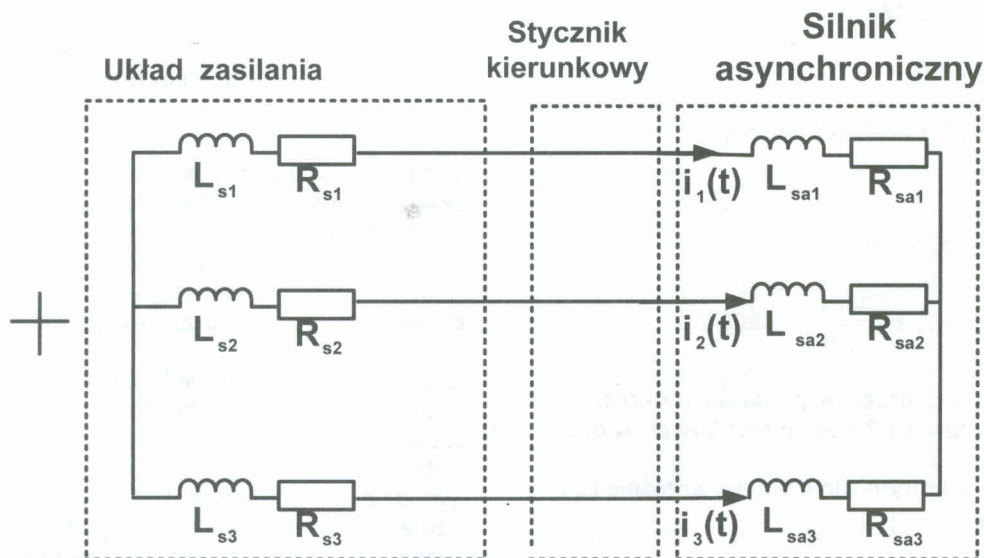
a)



b)



c)



Rys. 3. Układ pomocniczy dla obliczenia przebiegów nieustalonych w drugim przedziale czasowym
Fig. 3. Auxiliary system for calculation of current waveforms not registered in the second period of time

W celu porównania rozważań teoretycznych z rzeczywistymi warunkami wzięto pod uwagę jedno z urządzeń wyciągowych. Wyprecyzowano niezbędne dane z dokumentacji koncesyjnej oraz dokumentacji techniczno-ruchowej podanej przez producenta. Dodatkowo wykorzystano wszystkie dostępne wyniki pomiarów wykonane podczas badań rocznych i trzyletnich urządzenia wyciągowego. Poniżej przedstawiono przykład liczbowy.

Przykład P1

Moc zwarciova sieci na rozdzielni 6kV – $S_z=182,3$ MVA
 Reaktancja zastępcza sieci – $X_s = 0,216$ W
 Rezystancja zastępcza sieci – $R_s = 0,019$ Ω
 Moc silnika asynchronicznego urządzenia wyciągowego – $P=500$ kW
 Napięcie znamionowe stojana – $U_N=6000$ V
 Prąd znamionowy uzwojenia stojana – $I_{1N}=70$ A.
 Prąd znamionowy uzwojenia wirnika – $I_{2N}=492$ A.
 Znamionowa prędkość obrotowa – $n_N=365$ obr./min.
 Reaktancja jednej fazy (stojana + wirnika przeliczonego na stronę stojana)

$$X_f = X_{1f} + X_{2f}' = 14,63 \text{ } \Omega/\text{fazę},$$

stąd reaktancja zastępcza

$$X_z = X_s + X_f = 14,85 \text{ } \Omega$$

i indukcyjność zastępcza

$$L_z = L_{z1} = L_{z2} = L_{z3} = 0,047 \text{ H}$$

Kąt przesunięcia fazowego

$$\varphi = \arctg \frac{\omega L_z}{R_z} = 5,54^\circ = 0,097\pi$$

Rezystancja jednej fazy (stojana + wirnika przeliczonego na stronę stojana)

$$R_f = R_{1f} + R_{2f}' = 1,36 \text{ } \Omega$$

stąd rezystancja zastępcza

$$R_z = R_s + R_f = 1,38 \text{ } \Omega$$

Moduł impedancji przypadający na fazę

$$|Z|=14,91 \text{ } \Omega$$

Amplituda napięcia fazowego

$$U_{m1} = U_{m2} = U_{m3} = U_m = \frac{6000\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 4900 \text{ V}$$

Przebieg czasowy prądu w pierwszym okresie po zamknięciu zestyków 1 i 2 będzie przebiegał zgodnie ze wzorem:

– dla przypadku, w którym silnik nie był wcześniej załączony (rys. 4a)

$$i(t) = 329 \left[\sin(314t - 0,097\pi) + \sin(0,097\pi) e^{-\frac{1,38}{0,047}t} \right] \quad (29)$$

– dla przypadku, w którym silnik był wcześniej załączony (hamowanie dynamiczne rys. 4c)

$$i(t) = 329 \left[\sin(314t - 0,097\pi) + \sin(0,097\pi) e^{-\frac{1,38}{0,047}t} \right] + 70 e^{-\frac{1,38}{0,047}t} \quad (30)$$

ostatecznie

$$i(t) = 329 \sin(314t - 0,097\pi) + 33,1 e^{-\frac{1,38}{0,047}t} \quad (31)$$

Wyznaczając przybliżony przebieg odkształconego prądu stojana (31), przeprowadzono metodą klasyczną obliczenie wielkości napięcia występującego na otwartym zestyku 3 (rys. 1) przy zamkniętych zestykach 1 i 2.

Oznaczając napięcie na otwartym zestyku 3 jako $u_p(t)$, można z II prawa Kirchhoffa napisać równanie:

$$u_p(t) = u_3(t) - u_1(t) - i(t) R_z - L_z \quad (32)$$

Podstawiając dane oraz wartość prądu (30), otrzymuje się przebieg napięcia (rys. 5).

Ocenę wielkości odkształcenia prądu stojana przy niejednoczesnym zadziałaniu zestyków przeprowadzono pośrednio, wyznaczając wielkość składowej stałej i porównując z prądem znamionowym silnika. Przebieg czasowy prądu (30) rozłożono w szereg Fouriera w przedziale czasowym $0 \leq t \leq \tau$. Ogólna postać szeregu Fouriera:

$$i(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos kt + \sum_{n=1}^{\infty} B_n \sin kt \quad (33)$$

przy czym interesującą nas wielkość A_0 obliczono z zależności:

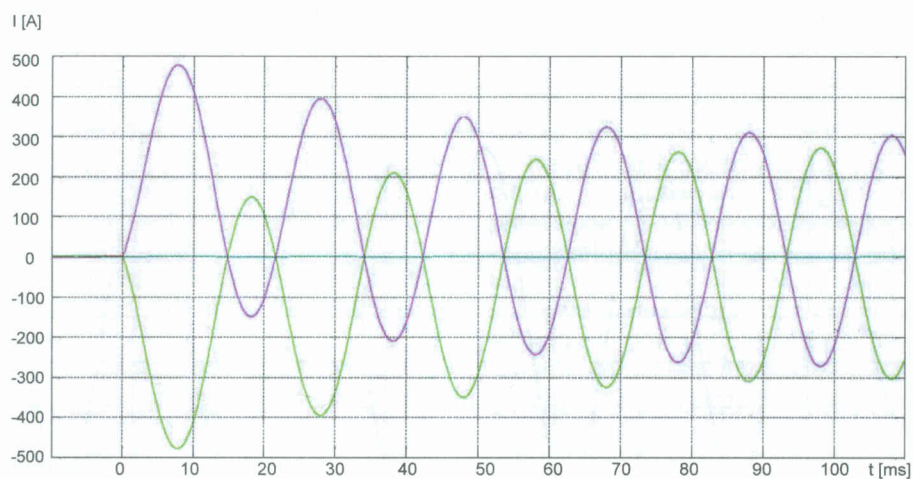
$$A_0 = \frac{2}{T} \int_0^T i(t) dt \quad (34)$$

Dla przykładu (P1):

$$A_0 = \frac{2}{T} \int_0^T i(t) dt = \frac{2}{T} \int_0^T \left[329 \sin(314t - 0,097\pi) + 33,1 e^{-\frac{1,38}{0,047}t} \right] dt \quad (35)$$

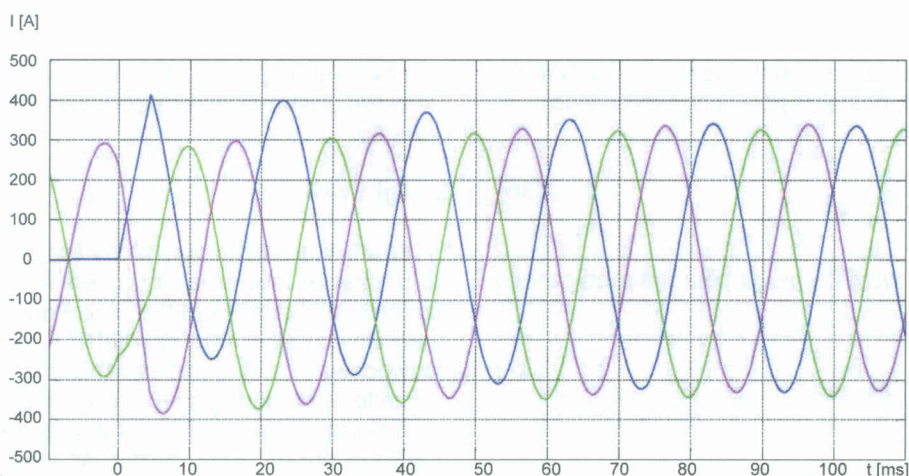
Przyjmując $\tau = 10$ ms, wielkość składowej stałej w odkształconym prądzie stojana wynosi około $A_0 = 228$ A (prąd znamionowy stojana silnika asynchronicznego $I_{1N} = 70$ A). Przy tak dużym udziale składowej stałej w odkształconym prądzie stojana należy wnioskować o powstawaniu i udziale zjawiska transduktorowego.

Dodatkowy, stały strumień magnetyczny, pochodzący od składowej stałej prądu, jako odmagnesowujący, przesuwając charakterystykę magnesowania w kierunku wzrastającego natężenia pola magnetycznego, a co za tym idzie powoduje wzrost indukcji magnetycznej. Ze względu na budowę silnika asynchronicznego (nabiegunki oraz wirnik silnika wykonane z izolowanych blach transformatorowych, stosunkowo duża szczelina powietrzna), pomimo wzrostu indukcji pola magnetycznego nie dochodzi do nasycenia żelaza (blach transfor-



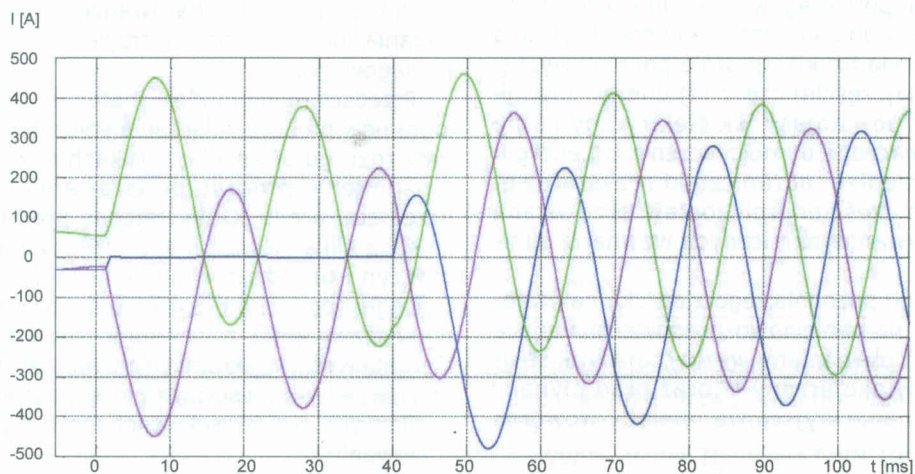
Rys. 4a. Przebieg prądu $i_1(t) = i_2(t)$ odpowiadający rys. 3, dla pierwszego jednoczesnego załączenia zestyków 1 i 2 stycznika (brak prądu $i(0^*)$)

Fig. 4a. Current waveform $i_1(t) = i_2(t)$ referring to Drawing No. 3 for the first simultaneous switching on of the contacts 1 and 2 of the contactor (no current $i(0^*)$)



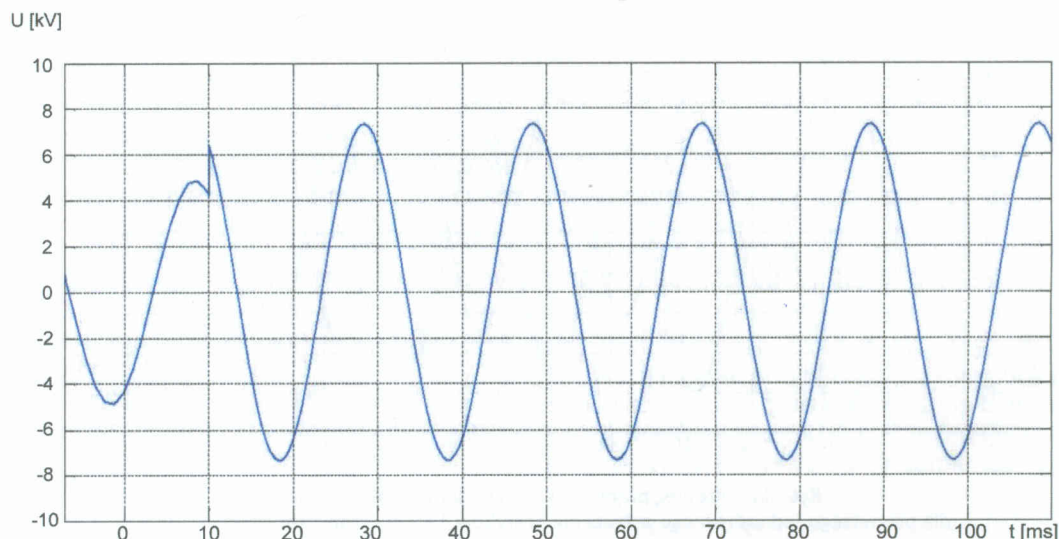
Rys. 4b. Przebieg prądu $i_1(t)$, $i_2(t)$, $i_3(t)$ odpowiadający rys. 3, dla załączenia zestyku 3 przy załączonych wcześniej zestykach 1 i 2 stycznika (brak prądu $i(0^*)$)

Fig. 4b. Current waveform $i_1(t)$, $i_2(t)$, $i_3(t)$ referring to Drawing No. 3 for switching on of the contact 3 with contacts 1 and 2 switched on previously (no current $i(0^*)$)



Rys. 4c. Przebieg prądu $i_1(t)$, $i_2(t)$, $i_3(t)$ odpowiadający rys. nr 3, dla ponownego załączenia zestyków stycznika przy wcześniejszym występowaniu ($i(0^*) = I_0$)

Fig. 4c. Current waveform $i_1(t)$, $i_2(t)$, $i_3(t)$ referring to Drawing No. 3 for switching on the contacts of the contactor again with previous occurrence ($i(0^*) = I_0$)



Rys. 5. Przebieg napięcia na zestyku 3 w pierwszym okresie (załączane są zestyki 1 i 2, otwarty zestyk 3)
Fig. 5. Voltage waveform on the contact 3 in the first period (contacts 1 and 2 switched on, contact 3 open).

matorowych) silnika asynchronicznego. Oddziaływanie to powoduje wzrost gęstości pola magnetycznego

$$E = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu\mu_0} \quad (36)$$

a w związku z tym wzrost energii pola magnetycznego

$$W_L = \frac{E}{l \cdot S} = \frac{1}{2} Li^2 \quad (37)$$

gdzie

l – długość obwodu magnetycznego,
 S – przekrój obwodu magnetycznego.

Biorąc pod uwagę rozważany przypadek, tj. rozwieranie i zwieranie zestyków, jest to zjawisko niekorzystne, ponieważ zgromadzona energia magnetyczna musi zostać wyzwolona, a następnie stłumiona. Zgromadzony nadmiar energii pola magnetycznego w obwodach magnetycznych dąży do zmniejszenia i ustabilizowania energii (znana zasada fizyki), głównie poprzez wystąpienie przebieg. Najczęściej część tej energii zostaje pochłonięta przez powstający łuk elektryczny i inne urządzenia, przeznaczone do ograniczenia tej energii, np. ochronniki przebieg, ograniczniki rezystorowe. Natomiast główna część energii zostaje przekazana w postaci oddziaływań dynamicznych wewnątrz silnika.

W celu głębszego poznania tego zjawiska należałoby zastąpić równania napięciowo-prądowe (opisujące przebieg zjawiska) równaniami wyznaczającymi strumień magnetyczny skojarzony ψ oraz prąd płynący w obwodzie. Równanie wyjściowe miałoby wówczas postać:

$$\frac{d\psi}{dt} + Ri = U_m \sin(\omega t + \varphi) \quad (38)$$

Jednak ze względu na zbyt obszerne zagadnienie problem ten zostanie przedstawiony w oddzielnym opracowaniu.

Uwagi i wnioski:

W artykule został poruszony temat, który jest znany od początku istnienia urządzeń wyciągowych napędzanych silnikami asynchronicznymi. Jednak sam mechanizm powstawania asymetrii w układzie zasilania, spowodowany niejednoczesnym zamknięciem zestyków, a przede wszystkim jego model i opis matematyczny jest dość skomplikowany. Proces poznawczy tego zjawiska pogarsza ograniczona możliwość jego pomiaru czy też rejestracji. Ze względu na przedstawione uwarunkowania, jedynym adekwatnym zobrazowaniem przebiegu prądu w obwodzie pierwotnym stojana wydaje się być przeprowadzenie obliczeń matematycznych. Można tego dokonać w różny sposób, analitycznie bądź za pomocą gotowych programów komputerowych, dedykowanych dla tego typu obliczeń. Należy to jednak czynić z należytą starannością, mając na uwadze wykonane wcześniej badania i pomiary podczas trzyletnich badań urządzenia wyciągowego.

Przedstawienie modelu matematycznego oraz oscylogramów procesu załączania styczników kierunkowych przy rozregulowanych zestykach pozwoliło przybliżyć zrozumienie procesu powstawania odkształconego przebiegu prądu. Odkształcony prąd fazowy pociąga za sobą kilka zjawisk niebezpiecznych dla eksploatacji maszyn i urządzeń elektroenergetycznych. Jednym z nich jest powstawanie przebieg, powodujących obniżenie wytrzymałości izolacji komór gasikowych styczników kierunkowych. W skrajnych przypadkach powoduje nadpalenia zestyków i ścianek przegród izolacyjnych komór gasikowych, a w konsekwencji może doprowadzić do ich rozerwania.

Do modelu matematycznego dołączono przykładowo dane liczbowe sieci zasilającej oraz silnika asynchronicznego eksploatowanego urządzenia wyciągowego. Obliczone wielkości przebiegu prądów oraz napięć występujących w trakcie nieprawidłowej pracy, a przede wszyst-

kim pokazanie ich na wykresach (rys. 4 i 5) pozwoliło obrazowo uzmysłowić procesy przejściowe występujące w urządzeniach. Oprócz przebiegu odkształconego prądu pokazano również przebieg napięcia występującego na rozwartych zestykach. Wartość szczytowa napięcia wynosi około 8 kV (rys. 5). Podwyższone napięcie występujące podczas załączania może być inicjatorem przepięć w niekorzystnych warunkach środowiskowych (zawilgocenie, temperatura).

Przeanalizowanie fabrycznej dokumentacji i katalogów urządzeń (produkcja została już zaniechana lub też zakłady przestały istnieć) oraz wyników badań rocznych i trzyletnich dostępnych urządzeń wyciągowych pozwoliło przedstawić prawdopodobny mechanizm powstawania odkształconych prądów oraz napięć.

Ostatni fragment artykułu, poświęcony wpływowi składowej stałej, występującej w odkształconym prądzie, na zjawisko transduktorowe (podmagnesowujące – kumulujące energię pola magnetycznego), jest zjawiskiem rzadko publikowanym w literaturze fachowej.

Przedstawione w artykule zagadnienie dotyczy styczników kierunkowych urządzeń wyciągowych. Należy jednak sądzić, że podobne zjawisko może zaistnieć przy załączaniu innych urządzeń za pomocą wyłączników mocy.

Ze względu na brak opracowań w literaturze fachowej przykładów obliczeniowych i symulacji przebiegu prądów, temat ten nie jest eksponowany wśród osób zajmujących się nadzorem układów zasilania urządzeń wyciągowych.

*Artykuł recenzował
dr hab. inż. Piotr GAWOR
prof. nzw Politechniki Śląskiej*

Literatura

1. Gogolewski Z., Kuczewski Z.: Napęd elektryczny, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne Warszawa 1972.
2. Koter T., Pełczewski W.: Maszyny elektryczne w zadaniach, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne Warszawa 1975.
3. Szklarski L., Zarudzki J.: Elektryczne maszyny wyciągowe, Wydawnictwo Naukowe PWN 1998.
4. Cichowska Z., Pasko M.: Przykłady i zadania z elektrotechniki teoretycznej, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej Gliwice 2007.
5. Walczak J., Pasko M.: Elementy dynamiki liniowych obwodów elektrycznych, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej Gliwice 2011.