

Tomasz Binkowski\*

Bogdan Kwiatkowski\*\*

## STEROWANIE ZE SPRZĘŻENIEM ZWROTNYM OD SKŁADOWEJ AKTYWNEJ PRĄDU TRÓJFAZOWEGO

### CLOSED-LOOP CONTROL WITH THE ACTIVE COMPO- NENT OF THE THREE-PHASE CURRENT

**Streszczenie:** Stosowane w elektrotechnice układy regulacji potrzebują do właściwej i bezpiecznej pracy informacji o wartościach prądów płynących w sterowanych obiektach. W przypadku prądów zmiennych trójfazowych ich wartości chwilowe zmieniają się w czasie, często pozostając w przesunięciu fazowym względem napięcia. W artykule przedstawiono metodę pozyskiwania informacji o wartości składowej aktywnej prądu, która to w głównej mierze odpowiada za wykonywaną pracę. Zmierzona wartość składowej aktywnej prądu wykorzystywana jest jako sygnał sprzężenia zwrotnego w procesie regulacji prądu silnika indukcyjnego. Przedstawiony w artykule sposób pomiaru prądu został zamodelowany i przebadany w środowisku Power Sim.

**Słowa kluczowe:** składowa aktywna, prąd, sprzężenie zwrotne, silnik indukcyjny, regulacja

Received: 05.2017

**Abstract.** The control systems used in electrical engineering need an information about values of currents flowing in the controlled objects for the correct and safe operation. In the case of three-phase currents their momentary values change over time, often remaining in the moving phase relative to the voltage. This article presents a method of obtaining information about the active component, which is largely responsible for the load operation. The measured value of active component is used as a feedback signal in the process of adjusting current induction motor. The current measurement method described in the article has been modeled and examined in a Power Sim environment

**Key words:** activecomponent, current, feedback, induction motor control.

Accepted: 08.2017

---

\* Katedra Energoelektroniki, Elektroenergetyki i Systemów Złożonych Politechnika Rzeszowska

\*\* Katedra Inżynierii Komputerowej Uniwersytet Rzeszowski

## WSTĘP

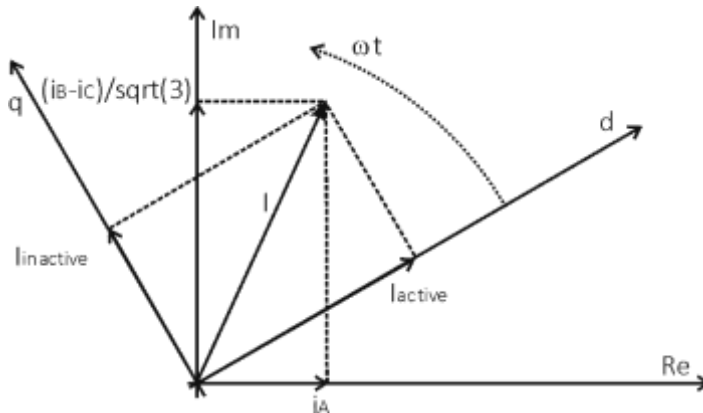
Urządzenia elektryczne w większości przypadków przetwarzają energię elektryczną na energię elektryczną o zmienionych parametrach. Parametry te dopasowują posiadane źródło energii do wymagań obciążenia. Wśród parametrów elektrycznych charakteryzujących potrzeby obciążenia są wartości napięcia, prądu, częstotliwości, liczby faz, itp. Procesom przetwarzania energii towarzyszy jej przekazywanie, związane relacją pomiędzy chwilowymi wartościami napięcia, prądu i czasem. Zdolność przekazywania energii w określonym przedziale czasu opisuje moc, która posiada wiele interpretacji. W artykule skupiono się wyłącznie na zagadnieniach związanych z mocami w obwodach trójfazowych, najczęściej stosowanych w przemyśle [Piróg 2006]. Jako przykład ilustrujący problem pomiarowy wykorzystano problem sterowania trójfazowym silnikiem indukcyjnym. Obecnie trudno sobie wyobrazić urządzenie elektryczne działające bez sprzężeń zwrotnych, dzięki którym uzyskuje się pożądane parametry wielkości elektrycznych. Niemal zawsze układ regulacji musi kontrolować wartość prądu, ze względu na to, że zgodnie z prawem Ampera jest on odpowiedzialny za wydzielanie ciepła w rezystancyjnych elementach przewodzących. W przypadku obwodów prądu stałego kontrola prądu nie stanowi problemu. Wystarcza wtedy kontrola wartości skutecznej prądu, która to wartość z definicji jest nośnikiem informacji o wydzielanej energii cieplnej. W wielu przypadkach nie jest to właściwa metoda sterowania. Wartość skuteczna prądu definiowana jest raz na okres prądu i nie stanowi informacji o rzeczywistej pracy wykonywanej przez obciążenie. Wynika to przede wszystkim z możliwości występowania przesunięcia fazy prądu względem napięcia. O tym jakie są relacje pomiędzy wykonywaną pracą, a wartościami chwilowymi prądów i napięć, mówią teorie mocy. W zakresie teorii mocy trwa ciągła dyskusja środowiska naukowego, która doprowadziła w przypadku obwodów prądu przemiennego do sformułowania trzech, budzących w wielu przypadkach kontrowersje, teorii: teorii mocy Budeanu, teorii mocy Fryzego i teorii mocy Akagiego [Pasko 1995]. Przedstawione interpretacje mocy w wielu przypadkach okazują się błędne, zwłaszcza w dobie zasilaczy impulsowych i stosowania układów energoelektronicznych, które wprowadzają dodatkowe składowe odkształcenia do prądów i napięć. Biorąc jednak

pod uwagę fakt, że w pewnych warunkach zaprezentowane teorie mają potwierdzenie w obserwowanych zjawiskach, mogą one być stosowane jeżeli te warunki zostaną przez inne układy lub działania zapewnione. Przykładowo teoria bazująca na sinusoidalnych przebiegach może być zastosowana w przypadku obciążenia, które w sposób naturalny charakteryzuje się niesinusoidalnymi przebiegami, pod warunkiem zastosowania dodatkowych działań powodujących eliminację lub ograniczenie niesinusoidalności. W rozważanym przypadku niesinusoidalność prądów silnika indukcyjnego może być korygowana poprzez zastosowanie układów korekcyjnych wykorzystujących logikę rozmytą, podwójną modulację, czy skalowanie sygnałów modulujących [Binkowski 2016]. Zapewniając kołową trajektorię prądów silnika układami zewnętrznymi można założyć, że obciążenie jest trójfazowe symetryczne, nawet w przypadku czynników powodujących jej deformację. Zastosowanie teorii prądów sinusoidalnych nie będzie błędem, a odpowiedni pomiar składowych prądu pozwoli na bezpośrednie sterowanie przekazywaną energią. Zakładając sinusoidalność prądów silnika, wymuszoną układem sterowania, zaproponowany został układ sprzężenia zwrotnego od wartości składowej aktywnej, w oparciu o który prowadzony jest podstawowy układ regulacji.

### SKŁADOWA AKTYWNA PRĄDU

Obserwacja prądów układu trójfazowego może odbywać się w dowolnym układzie współrzędnych. Definiując układ współrzędnych wirujący z prędkością kątową  $\omega$ , o osiach  $d$  i  $q$ , prądy trójfazowe interpretowane są jako wektor. Przekształcenie matematyczne, które opisuje obserwację wielkości trójfazowych w wirującym układzie współrzędnych jest dobrze znane i często stosowane. Szczegóły przekształcenia podaje literatura [Piróg 2006]. Prądy sinusoidalne reprezentowane wektorami wirującymi z prędkością kątową  $\omega$  w układzie współrzędnych wirujących z tą samą prędkością będą wektorami stacjonarnymi. Składowe stacjonarnego wektora prądu opisywane są wartościami stałymi, nazywanymi składową aktywną i nieaktywną. Sterowanie momentem silnika będącego obciążeniem wymaga kontroli składowej aktywnej prądu, a co za tym idzie wykonania transformacji układu współrzędnych. Proces transformacji jest matematycznie

prosty do rozwiązania. Problem techniczny dotyczący uzyskania sinusoidalnych, jednostkowych przebiegów synchronizacji stanowi jednak bardzo dużą przeszkodę aplikacyjną. Jednym ze stosowanych rozwiązań jest wykorzystanie pętli synchronizacji fazy, co dodatkowo komplikuje strukturę układu sterowania. W artykule przedstawiono alternatywne rozwiązanie, niewymagające transformacji układu współrzędnych, obarczone kosztem okresu aktualizacji wartości składowej aktywnej. Zakładając, że obciążenie jest układem trójfazowym, trójprzewodowym, wektor prądów można przedstawić w formie dwuwymiarowej. Dwuwymiarowość prądów trójfazowych pozwala na interpretację zjawisk w dziedzinie liczb zespolonych, co w formie graficznej pokazano na rysunku 1. Składowa aktywna prądów trójfazowych powstaje w wyniku rzutowania wektora prądów, obserwowanego w wirującym układzie współrzędnych, na jego osie. Jak łatwo wydedukować, rzuty te są stałe tylko wtedy, gdy prędkość układu współrzędnych jest taka sama jak prędkość wirowania wektora prądów, pod warunkiem sinusoidalności jego składowych. Wszelkie zmiany dotyczące składowych wektora prądów odnoszą się do braku synchroniczności układu współrzędnych lub do występowania w prądach innych składowych harmonicznych niż składowa podstawowa. Przy synchronicznej prędkości kątowej wirowania układu współrzędnych ważną rolę odgrywa przesunięcie kątowe wektora prądów względem osi rzeczywistej układu współrzędnych.



Rysunek 1. Interpretacja graficzna składowej aktywnej i nieaktywnej (biernej) prądów trójfazowych

Figure 1. Graphical interpretation of active and inactive components of three phase currents

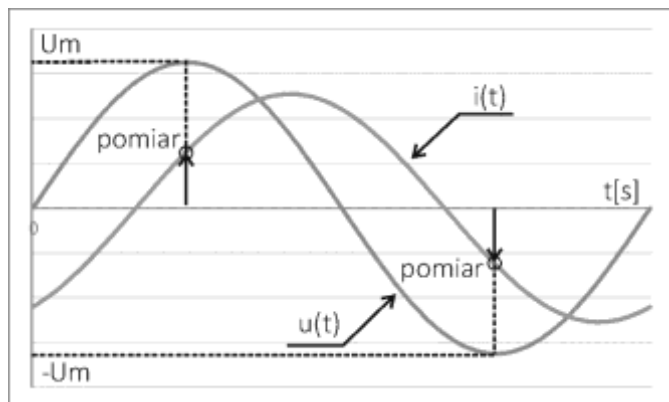
Źródło: opracowanie własne.

Tylko w przypadku, gdy układ współrzędnych jest synchroniczny z napięciami, można stwierdzić, że składowe stałe obserwowanego prądu są składowymi aktywną i bierną. Dysponując prawidłowo wyodrębnioną składową aktywną można odsprzęglić zmienne stanu opisujące obiekt trójfazowy. Pozwala to na niezależne sterowanie wartościami składowych wektora. Możliwość niezależnej kontroli składowych wektora prądów pozwala na kontrolę nie tylko jego modułu, ale także jego fazy. Przekształcenie prądów trójfazowych do postaci wektora obserwowanego w wirującym synchronicznie z napięciami układu współrzędnych pokazano wzorem (1).

$$\mathbf{I}_{dq} = \begin{bmatrix} I_{active} \\ I_{inactive} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & -\sin(\omega t) \\ \sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A(t) \\ 3^{-\frac{1}{2}}(i_B(t) - i_C(t)) \end{bmatrix} \quad (1)$$

Jak wspomniano, przekształcenie prądów nie jest skomplikowaną operacją matematyczną. Problem techniczny dotyczy wytworzenia sygnałów synchronizacji  $\sin(\omega t)$  i  $\cos(\omega t)$  skojarzonych z napięciami, które często są odkształcone i mogą zmieniać swoją częstotliwość i amplitudę. Wymaga to stosowania dodatkowego układu regulacji z zamkniętą pętlą sprzężenia zwrotnego, którego rolą jest sprowadzanie uchybu prędkości i fazy do zera. Jednostkowość sygnałów synchronizacji uzyskuje się wtedy poprzez wykorzystanie zapisanych w pamięci przebiegów wzorcowych, co uniezależnia synchronizator od zmian amplitudy przebiegów mierzonych.

Zaproponowane w artykule rozwiązanie problemu pomiaru składowej aktywnej prądu pomija stosowanie układu regulacji przebiegów synchronizacji. Idea pozyskiwania składowej aktywnej prądu, przy założeniu jego sinusoidalności, pokazana jest na rysunku 2.



Rysunek 2. Interpretacja graficzna pomiaru składowej aktywnej prądu

Figure 2. Graphical interpretation of active current component measurement

Źródło: opracowanie własne.

Przyjmując, że trójfazowe obciążenie, np. silnik indukcyjny, zasilane jest z falownika napięcia, informacja o składowej podstawowej napięcia pozyskiwana może być bezpośrednio w sterowniku. Na podstawie sygnałów modulujących można wytworzyć sygnały synchronizacji układu współrzędnych, które z powodzeniem zastąpią pomiar napięcia realizowany w synchronizatorach. W oparciu o sygnał synchronizacji, który nie musi być sygnałem sinusoidalnym, determinowane są chwile pomiaru wartości chwilowych prądów. Zakładając, że składowa podstawowa napięcia jest wyrażona zależnością (2), składowa podstawowa prądu płynącego przez impedancję obciążenia jest przesunięta o kąt  $\varphi$ , co wyraża ogólna zależność (3).

$$u(t) = U \sin(\omega t) \quad (2)$$

$$i(t) = I \sin(\omega t - \varphi) \quad (3)$$

Realizując pomiar prądu w charakterystycznych chwilach na osi czasu można uzyskać dodatkowe informacje o składowych wektora prądu. Zakładając, że próbki prądu uzyskuje się wtedy, gdy napięcie osiąga wartości ekstremalne, można wykazać, że stanowią one wartość składowej aktywnej. Pokazano to wzorem (4).

$$i\left(n\pi + \frac{\pi}{2}\right) = I \sin\left(n\pi + \frac{\pi}{2} - \varphi\right) = I \cos(\varphi) = I_{active}, \text{ gdzie } n = 0, 1, 2, \dots \quad (4)$$

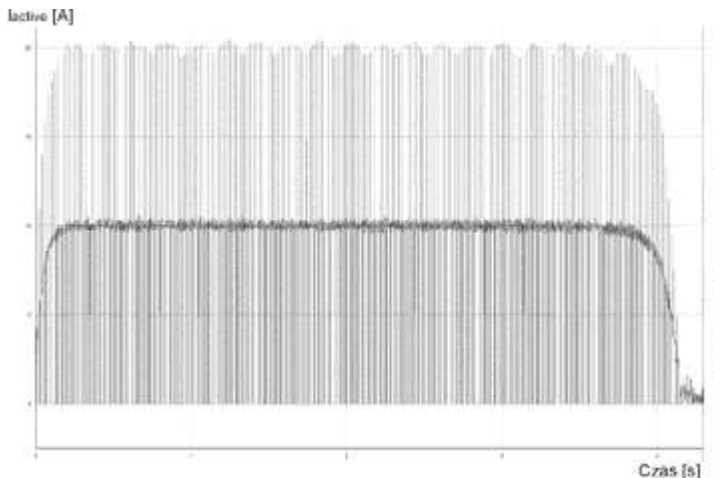
Z założeń wykonanego eksperymentu wynika, że do sprzężenia zwrotnego niezbędna jest tylko składowa aktywna prądu. W przypadku składowej nieaktywnej (biernej) sposób jej pozyskiwania byłby analogiczny do sposobu dla składowej aktywnej. Z rysunku 1. wynika, że składowa aktywna prądu jest równa wartości wektora prądu przemnożonego przez sinus kąta przesunięcia fazowego. Aby pozyskać jej wartość na drodze pomiarów należałoby wykonywać pomiar w chwilach przejścia przez zero napięcia zasilającego. Wtedy, analogicznie do wzoru (4), wartość zmierzona odpowiadałaby wartości składowej nieaktywnej. Zmierzona wartość składowej aktywnej dla prądu jednofazowego jest uaktualniana dwa razy na okres napięcia. W wielu przypadkach jest to wystarczające, gdyż kontrola momentu jest wtedy zapewniona. W wielu przypadkach, np. w sprzęcie AGD lub elektronarzędziach dynamika nie jest kluczowym elementem. Dopuszczalne są błędy ustalone prędkości, natomiast kontrola prądu musi charakteryzować się zerowym błędem ustalonym. Stosując proponowaną metodę pomiaru składowej aktywnej prądu uzyskuje się możliwość ujęcia jej w postaci sprzężenia zwrotnego i kontroli regulatorem proporcjonalno-całkowym. Daje to efekt w postaci eliminacji błędu ustalonego składowej aktywnej, a stałość wartości w stanie ustalonym pozwala na zastosowanie regulacji ciągłej, bez konieczności stosowania algorytmów nadążnych. W przypadku prądów trójfazowych pomiar składowej aktywnej odbywa się analogicznie do wyjaśnień przytoczonych dla przypadku jednofazowego. Na korzyść metody dla prądów trójfazowych przemawia fakt występowania sześciu punktów ekstremalnych w napięciach. Daje to trzy razy większą częstotliwość uaktualniania wartości prądu wykorzystywanego w pętli sprzężenia zwrotnego. Dodatkowo pomiar chwilowej wartości prądów obciążenia może być przeniesiony na stronę stałoprądową. Zyskuje się wtedy na liczbie sensorów prądu i na ich typie. W przypadku pomiarów potrzebnych do realizacji klasycznych metod regulacji potrzebne są trzy sensory prądu mierzące wielkości przemienne. W przypadku synchronizacji pomiaru prądu w punktach ekstremalnych napięć wystarczające jest zastosowanie jednego czujnika prądu mierzącego wartości unipolarne.

## **BADANIE UKŁADU ZE SPRĘŻENIEM OD SKŁADOWEJ AKTYWNEJ PRĄDU**

Weryfikacja idei pomiaru składowej aktywnej prądu na podstawie wartości ekstremalnej napięć przeprowadzona została poprzez wykonanie symulacji modelu w środowisku PowerSim. Przebadany został obiekt w postaci trójfazowego silnika indukcyjnego, którego prądy i moment kontrolowane były w oparciu o zaproponowany układ pomiaru składowej aktywnej prądu. Silnik indukcyjny zasilany był z falownika napięcia o topologii 3P-3W, który źródło napięcia stałego przekształcał do postaci trójfazowego źródła napięcia zasilającego silnik. Jako półprzewodnikowe przyrządy mocy falownika zastosowano tranzystory mocy typu IGBT. Tranzystory sterowane były w układzie współrzędnych naturalnych ABC na podstawie trójfazowych, sinusoidalnych funkcji modulujących. W oparciu o wartość chwilową napięcia modulującego dla każdej fazy obciążenia wyznaczony był przebieg prostokątny, który zaczynał się w chwili, gdy napięcie osiągało wartość maksymalną, a kończył w chwili osiągnięcia przez sygnał modulujący wartości minimalnej. Sygnał ten powstawał w wyniku wyznaczenia znaku sygnału modulującego przesuniętego w fazie o  $\frac{1}{4}$  okresu. Sygnał ten podawany był na układ przerzutnika monostabilnego, który reagował na zbocze narastające i opadające jednocześnie inicjalizując układ pomiarowy i zatrzymując wartość zmierzonego prądu w obwodzie wejściowym falownika (prądu płynącego przez DC-link). Połączenie próbek prądu obwodu pośredniczącego zmierzonych synchronicznie z osiąganiem przez funkcje modulujące wartości ekstremalnych dawało sygnał proporcjonalny do wartości składowej aktywnej prądów trójfazowych obciążenia, czyli silnika indukcyjnego. Sygnał ten traktowany był jako sygnał pomiaru prądu dla regulatora ciągłego typu PI. Regulator ten reagując na uchyb zmierzonego prądu w odniesieniu do wartości referencyjnej wypracowywał sygnał zadawanego w modulatorze wzmocnienia napięciowego. Sygnał wzmocnienia napięciowego zdefiniowany jest w uniwersum od wartości zera do jedności, przez co stosowany jako amplituda jednostkowego sygnału modulującego bezpośrednio wpływał na amplitudy napięć wyjściowych falownika. Zmiana amplitud napięć wyjściowych falownika skutkowałą zmianą amplitud prądów płynących do obciążenia, a tym samym zmianą momentu. Przebadano różne warianty pracy silnika ze sprzężeniem od wartości składowej aktywnej. W



pierwszej kolejności przetestowano stan jałowy silnika (bez obciążenia mechanicznego na wale). Sprawdzono reakcję układu na skokową zmianę wartości referencyjnej składowej aktywnej prądu. Rysunek 3 przedstawia przebieg zmierzonej wartości składowej aktywnej prądu uzyskanej dla wartości referencyjnej  $I_{active(ref)}=10A$ . Zarejestrowany przebieg dotyczy rozruchu silnika indukcyjnego bez obciążenia mechanicznego, dlatego wartość składowej aktywnej jest utrzymywana na poziomie referencyjnym tylko wtedy, gdy potrzebna jest energia ze źródła na uzyskanie przez silnik prędkości ustalonej. W stanie jałowym silnik indukcyjny wirujący z prędkością ustaloną potrzebuje jedynie energii na podtrzymanie prędkości i pokonanie sił tarcia i strat elektrycznych. Wtedy można zaobserwować spadek składowej aktywnej prądu poniżej wartości referencyjnej, która w stanie jałowym nie może być uzyskana. W stanie rozruchu silnika wartość składowej aktywnej będzie determinowała czas rozruchu silnika, jednocześnie nie pozwalając na przepływ zbyt dużych wartości prądów. Kontrola prądów jest niezbędna z uwagi na bezpieczną pracę układów elektrycznych.

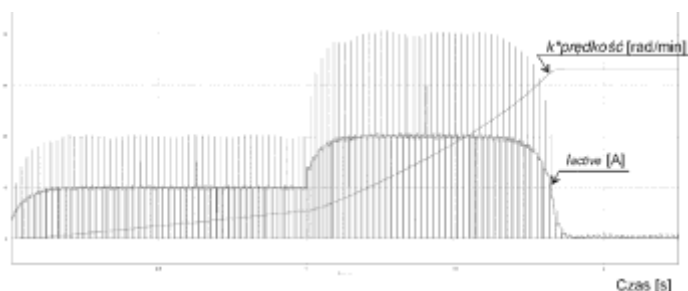


Rysunek 3. Przebieg zmierzonej wartości składowej aktywnej prądu trójfazowego dla silnika indukcyjnego

Figure 3. Three phase current active component measured for induction motor

Źródło: opracowanie własne.

Niedoskonałość pomiarów wynikająca z opóźnień i zakłóceń widoczna jest w postaci wysokoczęstotliwościowych składowych nałożonych na zmierzoną wartość składowej aktywnej. Nie stanowi to problemu ze względu na zastosowany układ regulacji ciągłej typu PI. Stała całkowania regulatora jest tak dobrana, aby szybkozmienne zmiany sygnału pomiarowego w sprzężeniu zwrotnym nie odgrywały roli w procesie regulacji. Przeprowadzono także testy pokazujące reakcję układu regulacji przy zmianach wartości referencyjnej. Skokowa zmiana referencyjnej składowej aktywnej prądu skutkuje jej zmianą w postaci odpowiedzi inercyjnej, odpowiednią do rodzaju zastosowanego regulatora. Przebieg zmierzonej składowej aktywnej dla skoków wartości referencyjnej na tle przeskalowanej prędkości silnika pokazano na rysunku 4.



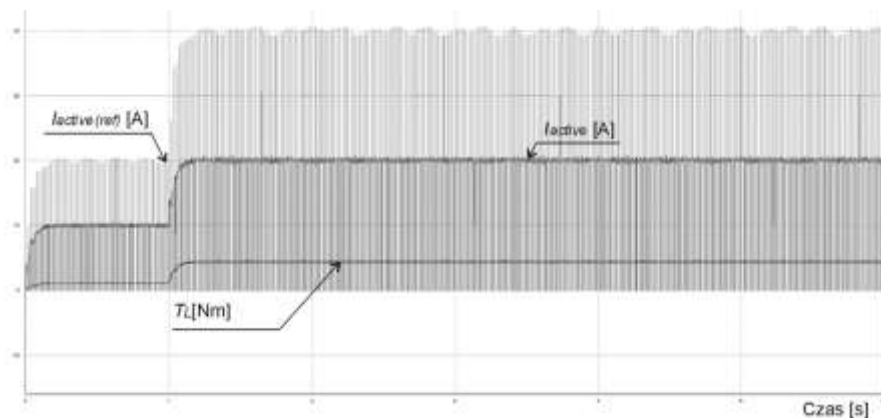
Rysunek 4. Przebieg zmierzonej wartości składowej aktywnej prądu trójfazowego dla silnika indukcyjnego

Figure 4. Three phase current active component measured for induction motor

Źródło: opracowanie własne.

W przypadku, gdy istnieje stałe zapotrzebowanie na energię w obciążeniu wynikające z wykonywanej pracy, składowa aktywna prądu musi mieć odpowiednią wartość zapewniającą np. odpowiedni moment w silniku indukcyjnym. Wtedy zapotrzebowanie na składową aktywną wynika ze stanu dynamicznego obciążenia wynikającego z różnic pomiędzy prędkością bieżącą a prędkością ustaloną oraz wynika z wykonywania pracy związanej z obciążeniem mechanicznym. Bez sprzężenia zwrotnego składowe te w wyniku sumowania powodowałyby znaczny wzrost prądów zagrażających bezpiecznej pracy układu. Uwzględnienie sprzężenia zwrotnego od składo-

wej aktywnej prądu w procesie regulacji pozwala na utrzymywanie go w zadanym punkcie referencyjnym pracy. Przebiegi prądu mierzonego, traktowanego jako sprzężenie zwrotne składowej aktywnej prądów trójfazowych na tle przebiegu referencyjnego składowej aktywnej prądów silnika, którego moment obciążenia jest zmienny, pokazano na rysunku 5. Jak łatwo zaobserwować, zapotrzebowanie na energię jest utrzymywane przez cały, analizowany przedział czasu, obejmujący proces rozruchowy i pracę ustaloną. Występujące na wale dodatkowe obciążenie momentem mechanicznym sprawia, że składowa aktywna prądu odpowiadająca za przekazywanie energii powinna być odpowiednio duża. W przypadku zastosowania sprzężenia zwrotnego nie dopuszcza się do przekroczenia wartości referencyjnej przez składową aktywną prądu trójfazowego, co wpływa jedynie na dynamikę pracy maszyny indukcyjnej.



Rysunek 5. Przebieg zmierzonej wartości składowej aktywnej prądu trójfazowego, wartości referencyjnej składowej aktywnej prądu i momentu obciążenia dla silnika indukcyjnego

Figure 5. Measured three phase current active component, referenced current active component and load torque for induction motor

Źródło: opracowanie własne.

## PODSUMOWANIE

Przedstawiona w artykule idea pozyskiwania wartości składowej aktywnej prądu układu trójfazowego obciążenia odnosi się do przypadku prądów sinusoidalnych i wiedzy na temat składowej podstawowej napięcia przyłożonego do odbiornika. W przypadku niesymetrycznych prądów stosowanie korektorów trajektorii umożliwia wykorzystanie proponowanego układu jako sprzężenia zwrotnego. Dodatkowo, stosowanie zaproponowanego układu pomiarowego w przypadku falowników sterowanych metodą modulacji naturalnej umożliwia prostą implementację realizacji sprzężenia zwrotnego. Zaproponowana metoda została zweryfikowana poprzez wykonanie badań dla falownika napięcia zasilającego trójfazowy silnik indukcyjny. Otrzymane wyniki potwierdzają słuszność założeń i możliwość stosowania sprzężenia zwrotnego od składowej aktywnej prądów silnika, dając w zamian uproszczenie obliczeń i prostą strukturę układu pomiarowego sprowadzonego do pomiaru prądu wyłącznie w obwodzie pośredniczącym.

## SPIS LITERATURY

- Binkowski T., *Application of double-modulation to correct currents trajectory of voltage source inverter*, 13<sup>th</sup> selected issues of electrical engineering and electronics, 2016.
- Pasko M., Kuczewski Z., Walczak J., *Moce w obwodach z przebiegami niesinusoidalnymi*, Jakość i Użytkowanie Energii Elektrycznej, Tom I, Zeszyt 1, 1995.
- Piróg St., *Energoelektronika: układy o komutacji sieciowej i o komutacji twarde*, Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne Akademii Górniczo-Hutniczej, 2006.