

## Oslabianie strumienia magnetycznego w trakcyjnych napędach z silnikami asynchronicznymi

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono zagadnienie osłabiania strumienia magnetycznego w trakcyjnych silnikach asynchronicznych. Dokonano analizy stanów dynamicznych napędu z silnikiem asynchronicznym pracującego z osłabionym strumieniem wzbudzenia. Zaprezentowano problematykę odwzbudzenia silnika związaną z ograniczeniami źródła zasilającego układ napędowy. Omówiono możliwość poprawy sprawności napędu poprzez pracę z niższą wartością strumienia magnetycznego. W ramach podsumowania przedstawiono wnioski, płynące z przeprowadzonych analiz, użyteczne podczas konstruowania napędów trakcyjnych wyposażonych w silniki asynchroniczne.

**Abstract.** The aim of this paper is to present the problem of weakening the magnetic flux in traction asynchronous motors. An analysis of the dynamic states of a drive with asynchronous motor with magnetic field weakening is presented. Problems associated with the limits of the supply source of the drive system are described. Possible improvement of efficiency by working with a lower value of the magnetic flux is discussed. Finally, the conclusions from the performed analyses are presented. (**Field weakening in asynchronous motors traction drives**).

**Słowa kluczowe:** trakcyjne napędy z silnikami asynchronicznymi, sterowanie napędu, osłabianie pola magnetycznego.

**Keywords:** asynchronous motors traction drives, control of drive, magnetic field weakening.

### Wstęp

Oslabianie strumienia magnetycznego w trakcyjnych silnikach indukcyjnych było niejednokrotnie poruszane przez autorów publikacji naukowych, jako niezwykle ważne z praktycznego punktu widzenia zagadnienie. Omawiano je zazwyczaj w kontekście optymalizacji parametrów napędu pracującego w szerokim zakresie zmian prędkości przy jednoczesnych dużych zmianach wartości napięcia zasilającego [1,2], bądź też energooszczędności układu napędowego [5, 6]. Niniejszy artykuł stanowi próbę całościowego spojrzenia na tę problematykę.

Napędy elektryczne stosowane w pojazdach trakcyjnych powinna cechować duża wartość momentu w całym zakresie prędkości kątowej wału. Przy doborze układu napędowego należy brać pod uwagę szereg aspektów zarówno natury technicznej jak i ekonomicznej. Najprostszym rozwiązaniem, z technicznego punktu widzenia, było by takie dobranie silnika, aby zapewniał maksymalny moment przy maksymalnej dopuszczalnej prędkości. Wiąże się to jednak z zapewnieniem znacznego zapasu mocy silnika, co z kolei nie ma uzasadnienia ekonomicznego. Dlatego powszechnie przyjętą praktyką jest wybór silnika, którego moc znamionowa jest dopasowana do średnich prędkości z którymi pojazd porusza się najczęściej [4]. Konsekwencją takiego rozwiązania jest konieczność osłabiania strumienia powyżej tych prędkości. Dzieje się tak dlatego, iż wraz ze wzrostem prędkości kątowej wału silnika rośnie wartość siły elektromotorycznej indukowanej w uzwojeniach stojana. Napięcie w obwodzie pośredniczącym falownika staje się wówczas zbyt niskie aby zapewnić możliwość poprawnej pracy regulatorów prądu, a co za tym idzie możliwość utrzymania zadanej wartości momentu. Sytuacja staje się jeszcze gorsza, gdy napięcie sieci trakcyjnej spada poniżej wartości znamionowej. Duże chwilowe spadki napięć sieci dochodzące do kilkuset woltów są powszechne zwłaszcza w przypadku napędów tramwajowych i trolejbusowych.

Kolejnym argumentem przemawiającym za osłabianiem wzbudzenia silnika asynchronicznego jest ograniczenie strat wywołanych przepływem prądu magnesującego. Ma to bardzo istotne znaczenie. Jak pokazały wyniki badań przeprowadzonych przez koleje niemieckie w ramach projektu PROSPER ponad 45% nakładów poniesionych podczas eksploatacji lokomotyw dla ruchu pasażerskiego to koszty zużytej energii [5].

Oslabienie wzbudzenia wiąże się jednak z obniżeniem maksymalnej wartości momentu napędowego, a więc pogorszeniem dynamicznych właściwości pojazdu. Ma ono duży wpływ na bezpieczeństwo ponieważ decyduje o długości drogi hamowania.

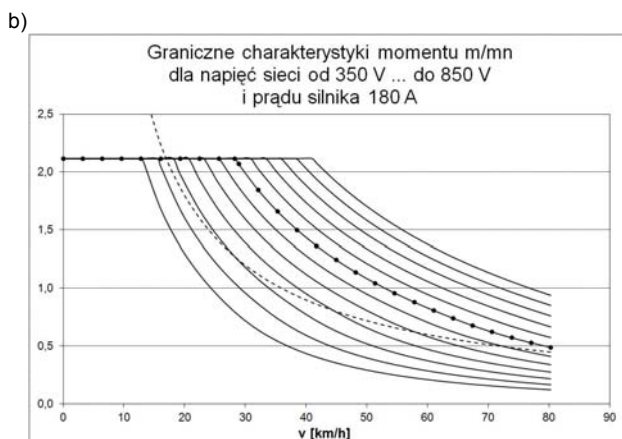
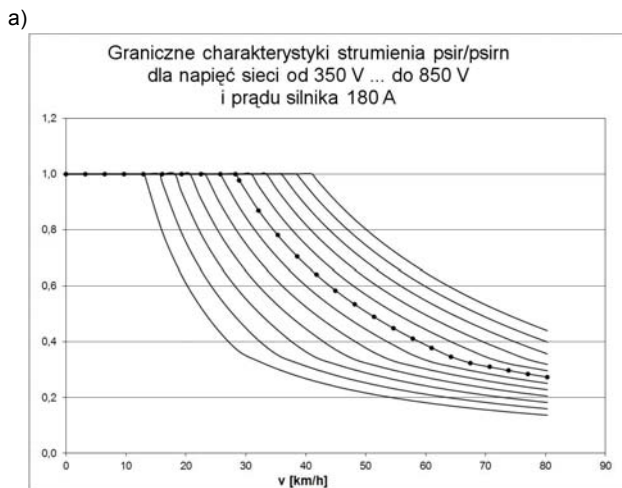
### Optymalizacja parametrów napędu

Konieczność odwzbudzenia silnika asynchronicznego, związana z ograniczeniami napięcia zasilającego falownik, została już zasygnalizowana we wprowadzeniu do niniejszego artykułu.

Najmniej skomplikowaną strategią sterowania wzbudzeniem jaką można przyjąć jest zadawanie do układu regulacji wartości zadanej strumienia wprost proporcjonalnej do napięcia panującego w obwodzie pośredniczącym i odwrotnie proporcjonalnej do prędkości kątowej wirnika. Wynika ona z analizy równań opisujących stan elektromagnetyczny maszyny dla stanów ustalonych i stanowi podstawę sterowania skalarnego  $U/f=\text{const}$ . Zachowanie takiego prawa sterowania jest możliwe tylko do pewnej wartości prędkości kątowej wirnika, odpowiadającej maksymalnemu napięciu pośredniczącemu, która odpowiada pełnemu wysterowaniu kluczy falownika. Powyżej tej prędkości silnik ulega odwzbudzeniu w „naturalny” sposób, bez konieczności uwzględnienia tego faktu w algorytmie sterowania. Takie podejście do zagadnienia odwzbudzenia powoduje pogorszenie jakości sterowania napędem zarówno pod względem mechanicznym jak i elektrycznym.

W napędach trakcyjnych powszechnie wykorzystywane są metody sterowania wektorowego z podporządkowanymi regulatorami prądu stojana, takie jak sterowanie polowo zorientowane FOC [5] oraz sterowanie prądowo zorientowane COC [8], oraz bezpośrednie sterowanie strumienia i momentu DTC [9]. Zapewniają one możliwość niezależnej regulacji strumienia magnetycznego maszyny asynchronicznej oraz momentu rozwijanego na jej wale. Dzięki tej ortogonalności kontrolowanie wzbudzenia staje się prostsze. Jednym z rozwiązań jakie można wykorzystać w takim przypadku jest metoda wyznaczania zadanego wzbudzenia i dopuszczalnej wartości momentu jako funkcji prędkości kątowej wału. Jest to podejście dość złożone ze względu na uwikłaną postać równań opisujących model napędu trakcyjnego z silnikiem asynchronicznym. Konieczne jest wykorzystanie narzędzi optymalizacyjnych. W Instytucie Automatyki Politechniki Łódzkiej opracowano

specjalny program komputerowy wykorzystujący pakiet Microsoft Excel. Narzędzie to pozwala na znaczne zmniejszenie nakładu czasu potrzebnego do przygotowania końcowego programu wspomagającego praktycznych napędów trakcyjnych z silnikami o różnych wielkościach i pracujących w różnych warunkach zasilania [2]. Najprostszą z możliwych metod wykorzystania danych uzyskanych przy pomocy tego programu jest ich zaimplementowanie w programie komputerowym nadzorującym pracę napędu w postaci tablic pozwalających wyznaczyć wartość zadaną strumienia magnetycznego w danych warunkach zasilania, przy danej prędkości.



Rys.1. Rodziny granicznych charakterystyk opisujących dopuszczalny obszar pracy napędu z silnikiem STDa 200L4 firmy EMIT w funkcji prędkości liniowej pojazdu trakcyjnego:

a) charakterystyki dla zadanych wartości modułu wektora strumienia wirnika, wyrażonego w jednostkach względnych (w stosunku do strumienia znamionowego silnika), zapewniające wymagane ograniczenie napięcia zasilającego silnik,

b) charakterystyki możliwych do uzyskania wartości maksymalnych momentu, wyrażonego w jednostkach względnych (w stosunku do momentu znamionowego silnika), zapewniające spełnienie istniejących ograniczeń prądu i napięcia zasilania silnika. Linia przerywaną zaznaczono położenie krzywej, której punkty (moment-prędkość), odpowiadają znamionowej mocy na wale rozważanego silnika.

Najistotniejszą wadą takiego podejścia do projektowania napędów z silnikami indukcyjnymi zasilanymi z falowników napięcia jest to, że dane wyznaczone w tabeli dotyczą określonych wartości parametrów silnika odpowiadających ustalonym warunkom jego pracy, które przyjęto jako stałe, nie zmieniające się w czasie. Jest to pewnym

uproszczeniem, gdyż wiele z nich (np. rezystancja uzwojeń wirnika) znacząco zależy od zmian temperatury. Szczególnie w napędach trakcyjnych, gdzie silniki napędowe umieszczone są zwykle w podwoziach pojazdów i narażone na wpływ warunków atmosferycznych, zmieniających się w szerokich granicach, jakość działania układu sterowania można poprawić poprzez modyfikację danych zawartych w tabelach, przed ich wykorzystaniem do aktualnych obliczeń, na podstawie odpowiednich sygnałów pochodzących z układu napędowego (np. pomiarów temperatury uzwojeń, lub modułów falownika), co zaproponowano m.in. w artykule [3].

### Poprawa sprawności napędu

W większości eksploatowanych obecnie napędów trakcyjnych z silnikami asynchronicznymi wartość strumienia magnetycznego wytwarzanego w szczelinie powietrznej silnika jest uzależniona jedynie od aktualnie panujących warunków zasilania oraz prędkości kątowej kół pojazdu. Nie jest to rozwiązanie optymalne pod względem energetycznym. Dzięki zastosowaniu dodatkowych metod regulacji silnika, można uzyskać wymierne korzyści ekonomiczne.

Metody te powodują zmniejszenie wartości strumienia przy małych obciążeniach silnika, mniejszych od momentu znamionowego. Optymalizacja taka jest praktycznie możliwa do przeprowadzenia tylko w dwóch pierwszych strefach pracy napędu: strefie I (przy niskich wartościach prędkości obrotowej) – gdy dopuszczalny moment na wale silnika jest stały i równy wartości maksymalnej, przewidzianej przez producenta maszyny) i strefie II (przy wyższych wartościach prędkości obrotowej) – gdy dopuszczalny moment zmienia się w funkcji prędkości obrotowej tak, by moc silnika była równa maksymalnej wartości mocy przewidzianej przez producenta dla tej maszyny). W strefie III, czyli strefie osłabiania mocy, moc przepływająca przez napęd maleje co znacząco ogranicza możliwości optymalizacji energetycznej pracy silnika.

W praktyce dla sterowania skalarnego stosowało się dwie wartości poślizgu: zapewniającą największy moment przy danej wartości prądu silnika lub zapewniającą największą wartość sprawności. Ta druga wartość poślizgu zapewniała regulację optymalną pod względem energetycznym w odniesieniu do napędów trakcyjnych.

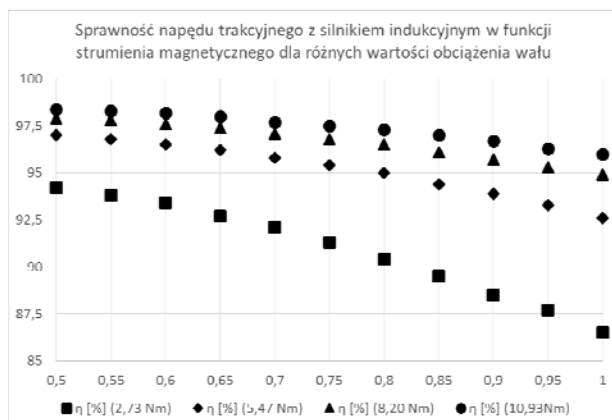
W przypadku wykorzystania metod wektorowych układ sterowania napędem po detekcji stanu ustalonego zadaje nową wartość strumienia zapewniającą maksymalną sprawność.

Stosuje się dwie podstawowe metody poszukiwania optymalnego punktu pracy: metodę regulacji bezpośredniej i metodę regulacji pośredniej. W pierwszej z nich szuka się bezpośrednio wartości minimalnych strat lub maksymalnej sprawności napędu. Optymalny punkt pracy można wyznaczyć na podstawie modelu matematycznego opisującego straty w silniku bądź też mierząc moc pobieraną i oddawaną przez napęd. W przypadku metod pośrednich regulacji podlega inny, dodatkowy parametr silnika, np. współczynnik mocy. Dla dowolnej maszyny możliwe jest wyznaczenie takiego współczynnika mocy, przy którym osiągane jest maksimum jej sprawności. Stosowane w tym przypadku algorytmy sterowania są dużo prostsze i sprowadzają się przeważnie do układów stabilizacji. Optymalizacja energetyczna jest możliwa do przeprowadzenia zarówno w napędach sterowanych skalarnie jak i wektorowo. W drugim przypadku najlepszym rozwiązaniem jest zastosowanie regulatorów ekstremalnych, bazujących na pomiarze mocy wejściowej i wyjściowej napędu trakcyjnego. Metody bazujące na modelu silnika są znacznie mniej dokładne ze względu

na straty, wynikające z wyższych harmoniczných napięć i prądów silnika, nie uwzględniane w równaniach opisujących model. W praktyce w początkowej fazie pracy napędu wykorzystuje się mało dokładny, lecz umożliwiający szybko uzyskać przybliżone wyniki, model strat silnika, a następnie przechodzi do metody wykorzystującej pomiary mocy, która to z dużą dokładnością znajduje optymalny punkt pracy układu napędowego [5, 6].

Badania napędu trakcyjnego z silnikiem asynchronicznym pracującego z osłabionym strumieniem wzbudzenia zostały zrealizowane na drodze symulacji komputerowych przy wykorzystaniu programu PSIM firmy Powersys Ltd. Wykorzystano w nich dane silnika indukcyjnego Sg132-S4 BOBRME Komel.

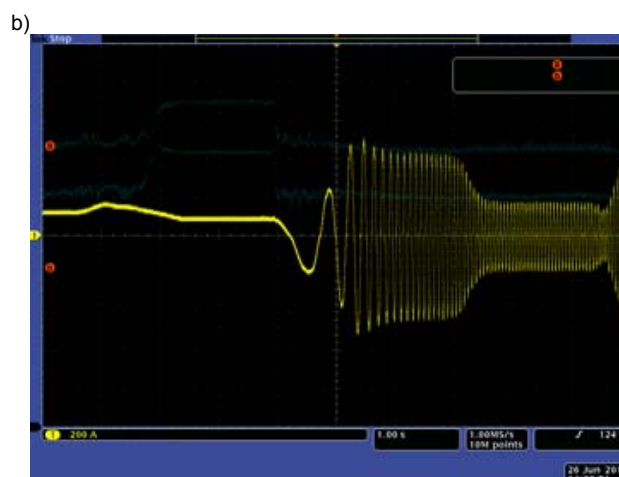
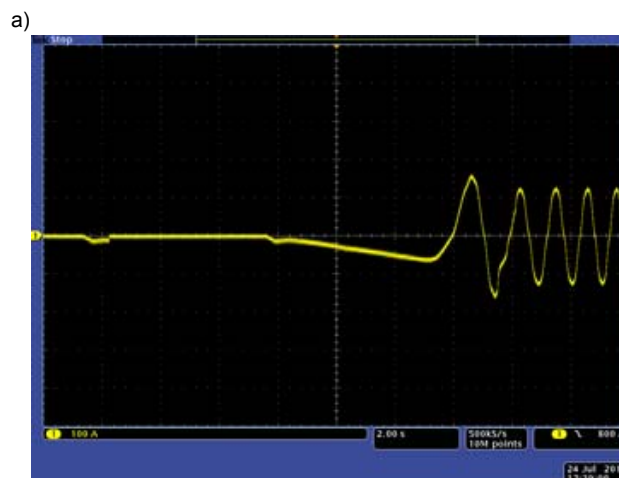
W ramach prowadzonych prac badawczych wyznaczono sprawność układu napędowego pracującego z różnymi wartościami strumienia magnetycznego w zależności od wartości obciążenia wału silnika. Wyniki zaprezentowano na rysunku 2. Wynika z nich że znaczącą poprawę sprawności można uzyskać jedynie w przypadku silnika pracującego z małym obciążeniem, wraz z jego wzrostem obniżanie wartości strumienia magnetycznego odgrywa coraz mniejszą rolę.



Rys.2. Rodzina charakterystyk sprawności napędu trakcyjnego z silnikiem indukcyjnym w funkcji strumienia magnetycznego dla różnych wartości obciążenia wału silnika.

Jednym z ważniejszych zastosowań odwzbudzenia napędu jest przypadek jazdy awaryjnej i manewrowej. Jazda tego typu odbywa się z bardzo małymi prędkościami i wiąże się często ze znacznymi ograniczeniami napięcia zasilania. W przypadku trolejbusów stosuje się specjalny tryb jazdy przez myjnię, gdzie ze względów bezpieczeństwa dopuszcza się napięcie zasilania o maksymalnej wartości 60V. Coraz częściej spotyka się również napędy trakcyjne z bateriami superkondensatorów pozwalającymi na poprawę efektywności energetycznej dzięki możliwości magazynowania energii z hamowania [7]. Dodatkową funkcjonalnością takich napędów jest możliwość wykonania krótkotrwałej jazdy w celu opuszczenia skrzyżowania lub dowiezienia pasażerów do przystanku przy braku napięcia zasilania trakcji. Istnieją też konstrukcje, szczególnie w trolejbusach, gdzie montuje się specjalne zasobniki bateryjne przeznaczone do jazdy awaryjnej lub manewrowej na terenie zajezdni, gdzie w przypadku trolejbusów poprzeczny przejazd przez kilka odcinków zasilania wymaga wielokrotnego przekładania odbieraków. W tego typu przypadkach jazdy ze znacznymi ograniczeniami mocy wyjątkowo ważne staje się zapewnienie napędowi jak najmniejszych strat. Generowanie prądu „wzbudzenia” na poziomie znamionowym powoduje, że straty powstające w falowniku i silniku są zbyt duże dla urządzeń dostarczających energię.

W tego typu rozwiązaniach stosuje się istotne ograniczenia strumienia wzbudzenia. Na rysunku 3a zamieszczono oscylogram pokazujący prąd fazowy silnika tramwajowego, zasilanego z baterii jazdy awaryjnej, w którym zastosowano ograniczenie wzbudzenia. Na rysunku 3b zamieszczono dla porównania oscylogram z przebiegiem prądu fazowego w czasie pracy ze strumieniem znamionowym.



Rys.3. Oscylogramy przebiegów prądu fazowego silnika trakcyjnego : a) w stanie znacznego odwzbudzenia podczas jazdy z zasilaniem baterijnym- przed rozpoczęciem ruchu wartość prądu fazowego wynosi 10A, b) podczas typowej jazdy z pełnym wzbudzeniem - przed rozpoczęciem ruchu wartość prądu fazowego wynosi 90A.

### Stany dynamiczne związane ze zmianami strumienia maszyny

Istotnym elementem różniącym elektryczne napędy kolejowe od trolejbusowych i tramwajowych jest znaczenie hamowania dynamicznego. W pojazdach biorących udział w ruchu miejskim hamowanie dynamiczne pełni rolę hamowania zasadniczego a to oznacza, że jest głównym czynnikiem zapewniającym bezpieczeństwo pasażerów. Każdy nowo projektowany pojazd podlega specjalnym próbom mającym na celu sprawdzenie skuteczności hamowania w „stanach nagłych”. Próba polega na rozpędzeniu pojazdu i natychmiastowym wymuszeniu maksymalnej dopuszczalnej siły hamującej. na suchych szynach podczas hamowania z prędkości 30km/h do zatrzymania. W czasie testów poza drogą hamowania mierzone są również przyspieszenia jakim podlega pojazd, dzięki czemu można ocenić, czy hamowanie odbywa się

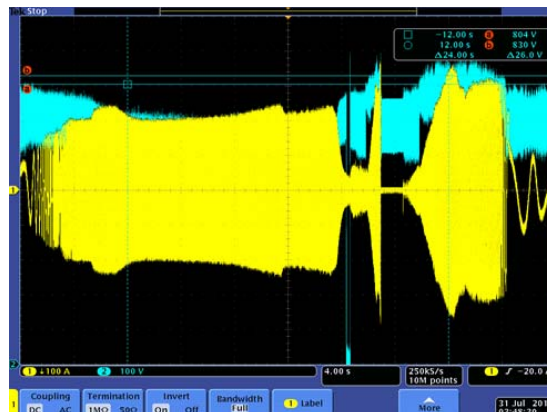
w sposób jednolity, czy występują nierównomierności siły hamowania, objawiające się niekorzystnymi oscylacjami.

W ramach prowadzonych w Instytucie Automatyki Politechniki Łódzkiej prac wykonano analizę stanów dynamicznych uzyskanych podczas charakterystycznych stanów napędu trakcyjnego. Rysunek 4 obrazuje przebiegi trzech wielkości: momentu elektromagnetycznego, strumienia wirnika oraz prędkości kątowej wału silnika. Można zauważyć, że na skutek zmiany wartości zadanej momentu pojawiają się oscylacje w przebiegu momentu wewnętrznego. Są one spowodowane oscylacjami strumienia magnetycznego wywołanymi szybkim przestawieniem wektora przestrzennego [1].

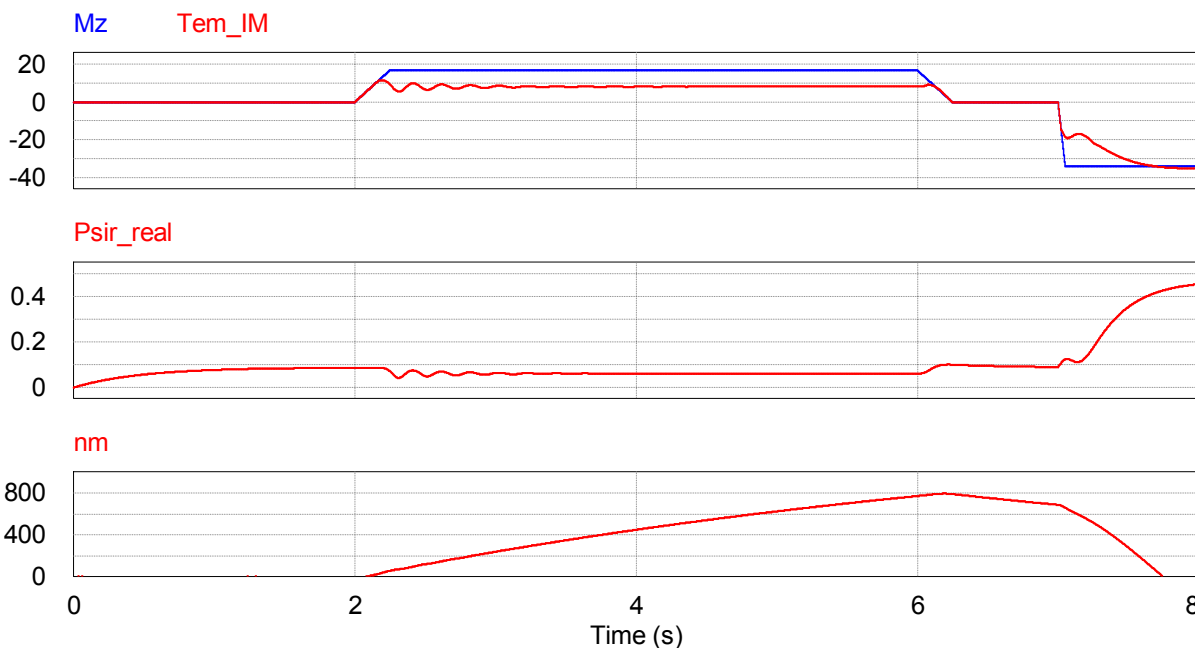
Ze względu na szansę wystąpienia nieprzewidywalnych zdarzeń drogowych napęd musi w każdej chwili swojej pracy dysponować możliwością wygenerowania pełnej wartości momentu hamującego, niezależnie od aktualnego stanu pracy. Oscylacyjny charakter układu związanego z regulacją strumienia powoduje, że dynamiczne zmiany wartości strumienia powodują znaczne ograniczenia w kształtowaniu momentu. Oscylacje mogą w najgorszym przypadku doprowadzić nawet do awaryjnego wyłączenia napędu. Z tego powodu układy kształtowania strumienia muszą podlegać bardzo starannemu doborowi parametrów.

Potrzeba „utrzymywania” napędu w gotowości do natychmiastowego hamowania podczas jazdy powoduje, że w napędach tramwajowych i trolejbusowych nie jest stosowane dodatkowe zmniejszanie wartości strumienia magnetycznego poza tym, które wynika z konieczności jego

obniżenia przy wysokich prędkościach. Ograniczenia dynamiczne nie stanowią również przeszkody do odzwbudzenia strumienia silnika indukcyjnego przy jeździe manewrowej, która odbywa się z bardzo małymi prędkościami.



Rys.5. Oscylogram prądu fazowego (kolor żółty) silnika trakcyjnego zarejestrowany podczas hamowania naglego przy niepoprawnie dobranych nastawach układu regulacji. (w tle zarejestrowano przebieg napięcia zasilania pojazdu podczas badań).



Rys.4. Stany przejściowe w trakcyjnym napędzie asynchronicznym pracującym z osłabionym strumieniem, wykresy uzyskano na drodze symulacji komputerowych w programie PSIM przy zastosowaniu idealnych źródeł prądowych w obwodzie stojana silnika indukcyjnego.

### Podsumowanie

Podstawowym celem osłabiania strumienia magnetycznego jest zapewnienie możliwości uzyskania maksymalnej wartości momentu elektromagnetycznego, przy dużych zmianach napięcia, jakie występują w trakcyjnych układach zasilania. Kluczowa jest tutaj stabilna praca napędu, gdyż od niej zależą dynamiczne możliwości pojazdu poruszającego się w ruchu ulicznym.

Dzięki osłabieniu strumienia wzbudzenia silnika indukcyjnego można także ograniczać ilość energii biernej

wymienianej pomiędzy źródłem zasilania a maszyną. Powoduje to zwiększenie sprawności układu napędowego, jednak pogorszeniu ulegają przebiegi dynamiczne. Dlatego odzwbudzenie w celu poprawy własności energetycznych ma sens w pojazdach, w których nie jest wymagane zapewnienie naglego hamowania dynamicznego realizowanego przez maszynę elektryczną, takich jak pociągi, trolejbusy, samochody elektryczne, pojazdy bateryjne oraz pojazdy z napędem hybrydowym. W tramwajach uzasadnione jest to jedynie podczas jazd

awaryjnych, manewrowych, zwłaszcza jazdy z baterii, gdy rzeczywiście straty „magnesowania” niepotrzebnie obciążają źródło energii.

**Autorzy:** dr inż. Rafał Nowak, Politechnika Łódzka, Instytut Automatyki, ul. Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź, E-mail: rafal.nowak@p.lodz.pl; prof. PŁ dr hab. inż. Andrzej Dębowski, Politechnika Łódzka, Instytut Automatyki, ul. Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź, E-mail: debowski@p.lodz.pl; dr inż. Piotr Chudzik, Politechnika Łódzka, Instytut Automatyki, ul. Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź, E-mail: pchudzik@p.lodz.pl; mgr inż. Marcin Drozd, Zakład Elektroniki Przemysłowej ENIKA Sp. z o. o., ul. Morgowa 11, 91-223 Łódź, E-mail: enika@enika.pl

#### LITERATURA

- [1] Dębowski A., Chudzik P., Control of rotor flux in AC tram drive during sudden braking operation, *EPE-PEMC* (2008), 1568-1574.
- [2] Dębowski A., Nowak R., Wyznaczanie dopuszczalnego obszaru pracy trakcyjnego napędu asynchronicznego, *Przegląd Elektrotechniczny*, 88 (2012), nr 4b, str. 47-52
- [3] Radecki A., Chudzik P., Badania porównawcze wybranych metod odwzbudzenia silnika indukcyjnego zasilanego z sieci o dużych chwilowych spadkach napięcia, *Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne* Nr 90/2011, 23-28
- [4] Dębowski A., Chudzik P., Kobos W., Osłabianie strumienia magnetycznego w trakcyjnych silnikach indukcyjnych, *Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne*, nr 80/2008, 39-44.
- [5] Lipiński L.: Praktyczne metody regulacji trakcyjnych silników indukcyjnych optymalnych pod względem energetycznym”, *Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne* nr 78/2007, str. 109-114.
- [6] Lipiński L., Regulacja optymalna pod względem energetycznym asynchronicznych napędów trakcyjnych regulowanych wektorowo, *Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Gdyni*, (2013), nr 78, marzec 2013, str. 53-65
- [7] Drozd M., Kobos W., Chudzik P.: „Tramwaj z superkondensatorowym zasobnikiem energii - ocena efektywności algorytmu sterowania, *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe* nr 2/2015 (106), 171-177
- [8] Chudzik P., Dębowski A., Kobos W, Lisowski G., Szafran J.: Asynchroniczny napęd tramwajowy z prądowo-zorientowanym sterowaniem wektorowym, *Technika Transportu Szynowego* (2004), nr 3, 52-55
- [9] Swierczyński D., Kaźmierkowski M., Wójcik P., Janaszek M.: Zastosowanie metody Bezpośredniej Regulacji Momentu z Modulacją Wektorową dla napędów tramwajowych, *Przegląd Elektrotechniczny*, (2008), nr 12/2008, str. 115-118