

Andrzej Dembowski, Piotr Chudzik, Politechnika Łódzka, Łódź
Witold Kobos, ZEP Enika, Łódź

OSŁABIANIE STRUMIENIA MAGNETYCZNEGO W TRAKCYJNYCH SILNIKACH INDUKCYJNYCH

FIELD WEAKENING IN THE TRACTION AC MOTOR DRIVE

Abstract: Selection of the AC motor for traction applications depends strongly on economical reasons. That means, that it is important to keep the dynamical performance of the vehicle as well as possible but the low price of the drive is also required. Usually the compromise in this choice is achieved thanks to the selection of the AC drive nominal parameters corresponding to the middle velocities of the vehicle. Unfortunately, during the motor operation with higher velocities we observe then the lack of the voltage necessary for effective driving. The aim of this paper is to show the procedure of selection of 165kW AC motor for trolley-bus drive. There are given some reasons for choosing of the motor nominal data which do not correspond to the high speed working region. On the example of trolley-bus drive in Lublin it is shown how to adjust the reference frame for demanded flux vector and an algorithm which enables the drive control in the flux weakening region is also described.

1. Wstęp

Napędy elektryczne pojazdów trakcyjnych powinny posiadać bardzo elastyczną charakterystykę mechaniczną. Możliwe jest wtedy wylaminowanie drogiej i bardzo kłopotliwej przekładni mechanicznej o zmiennym przełożeniu (skrzyni biegów). Wiąże się to jednak z potrzebą wytwarzania przez silnik odpowiednio dużej wartości momentu napędowego w całym zakresie zmian prędkości obrotowej. Do niedawna tylko silniki prądu stałego potrafiły sprostać temu wymaganiu i były jedynym rozwiązaniem stosowanym w takich pojazdach jak tramwaj czy trolejbus. W ostatnich latach rozwój nowoczesnych metod sterowania sprawił, że w odpowiednio sterowanych silnikach indukcyjnych możliwe jest również uzyskanie dużej wartości momentu obrotowego, począwszy od rozruchu aż do prędkości znacznie przewyższających wartość znamionową. Dzięki temu silniki indukcyjne, bardziej niezawodne i tańsze w eksploatacji od silników prądu stałego są obecnie zdecydowanie chętniej montowane w napędach pojazdów trakcyjnych. Konieczność stosowania bardzo złożonych algorytmów sterowania niezbędnych do prawidłowej pracy napędu dzięki postępowi w dziedzinie techniki mikroprocesorowej nie stanowi tu ograniczenia.

Silniki prądu przemiennego i stałego wymagają odmiennego charakteru sygnałów i sposobu sterowania. Różnią się znacznie pod względem konstrukcyjnym. Podlegają jednak podobnym

ograniczeniom przy doborze mocy, prądów i napięć zasilania. O wielkości i mocy silników przeznaczonych do pojazdów trakcyjnych w obu przypadkach decydują takie same kryteria ekonomiczne. Wymuszają one stosowanie silników dobranych napięciowo do średnich zakresów prędkości, z którymi pojazd porusza się najczęściej. To z kolei powoduje, że napięcie sieci trakcyjnej jest za niskie do sterowania silnikiem przy prędkościach wyższych. Pojazd przeznaczony dla ruchu ulicznego musi jednak poruszać się sprawnie również z tymi prędkościami. Wtedy dostępne w sieci napięcie staje się zbyt małe do wytworzenia pełnej wartości strumienia magnetycznego, zapewniającego dużą wartość momentu obrotowego. Osiągalny przez silnik moment zaczyna maleć. Szybko pogarszają się możliwości dynamiczne pojazdu. Bardzo ważne jest w tej sytuacji znalezienie takiego algorytmu sterowania, który wymusi możliwie jak największą wartość momentu w nowych warunkach pracy.

Problem braku napięcia jest wyraźnie widoczny w przypadku napędów prądu stałego. Tutaj po przekroczeniu prędkości znamionowej siła elektromotoryczna wywołana w tworniku przez pole magnetyczne stojana osiąga wartość wyższą od napięcia zasilania i uniemożliwia poprawną kontrolę prądu twornika, odpowiedzialnego za wytwarzanie momentu na wale maszyny. Wiadomo, że wtedy jest potrzebne osłabienie wzbudzenia. Dzięki temu zmniejszony

strumień wywoła mniejszą wartość siły elektromotorycznej, a to z kolei pozwoli na odzyskanie kontroli nad prądem twornika i momentem. Podobny mechanizm „osłabiania strumienia magnetycznego” przy wzroście prędkości obrotowej wirnika, może być zastosowany w silnikach prądu przemiennego, które tak jak klasyczne trakcyjne silniki prądu stałego muszą często pracować ze względów ekonomicznych, z dużymi prędkościami, przy ograniczonej wartości napięcia.

2. Dobór silnika indukcyjnego dla napędu trakcyjnego jako element warunkujący potrzebę stosowania odwzbudzenia strumienia

Przy wyborze silnika do zastosowania w konkretnym pojeździe trakcyjnym bardzo dużą rolę odgrywają względy konstrukcyjne i ekonomiczne. Ograniczają one rozmiary, moc silnika oraz wielkość modułów energoelektronicznych przekształtnika. Jednym z najważniejszych parametrów określających przydatność silnika do zastosowania w napędzie jest wartość momentu maksymalnego jaki można przy jego pomocy uzyskać. Silnik ruszającego pojazdu przy małej prędkości obrotowej musi generować bardzo duży moment. Od wartości tego momentu zależy np. czy obciążony pojazd będzie mógł dynamicznie włączyć się do ruchu lub rozpocząć jazdę po zatrzymaniu na przystanku znajdującym się w nierównym terenie.

W przypadku opisywanego trolejbusu na podstawie jego danych technicznych i maksymalnych nachyleń jakie w Lublinie musi pokonywać przy pełnym obciążeniu określono, że moment obrotowy silnika zapewniający odpowiednie zachowanie pojazdu powinien przekraczać 2kNm. Utrzymywanie takiej wartości momentu w napędzie mogącym pracować w dużym zakresie prędkości wymaga jednak zapewnienia znacznego zapasu mocy silnika. Jeżeli w omawianym napędzie zachować wartość momentu na poziomie 2kNm dla prędkości maksymalnej (70km/h) moc silnika musiałaby wynosić ponad 430kW. Zastosowanie takiego silnika nie miałoby jednak uzasadnienia z ekonomicznego punktu widzenia, gdyż tak duża moc nie byłaby właściwie wykorzystywana przy niższych prędkościach pojazdu. Powszechnie spotykanym rozwiązaniem tego problemu w napędach trakcyjnych jest dobranie takiego silnika, by jego moc znamionowa była dopasowana do średnich prędkości, z którymi

pojazd porusza się najczęściej. W omawianym napędzie ograniczenia rozmiarów oraz kosztów napędu i falowników zdecydowały o zastosowaniu silnika o mocy 165kW.

Wartość momentu maksymalnego w silniku indukcyjnym wynika z przyjętych założeń konstrukcyjnych i jest parametrem zależnym między innymi od ilości par biegunów. Dla silników o tej samej mocy, ale o różnej liczbie par biegunów, ta sama wartość momentu stanowi inną krotność momentu znamionowego. Dla porównania silnik o mocy 165kW i dwu parach biegunów osiąga moment 2kNm przy 1,9-krotnym przeciążeniu, a silnik o trzech parach biegunów wymaga jedynie 1,3-krotnego przeciążenia momentem. Stan przeciążenia charakteryzuje znaczny pobór prądu z falownika. Silnik o dwu parach biegunów (korzystniejszy pod względem rozwijanej prędkości) o znamionowym prądzie na poziomie 300A wymaga przy pełnym obciążeniu momentem prądu o natężeniu ok. 550A. Silnik o trzech parach biegunów potrzebuje do rozwinięcia tej samej wartości momentu zaledwie ok. 370A natężenia prądu.

Tablica 1. Porównanie wybranych parametrów silników trakcyjnych o różnej liczbie par biegunów.

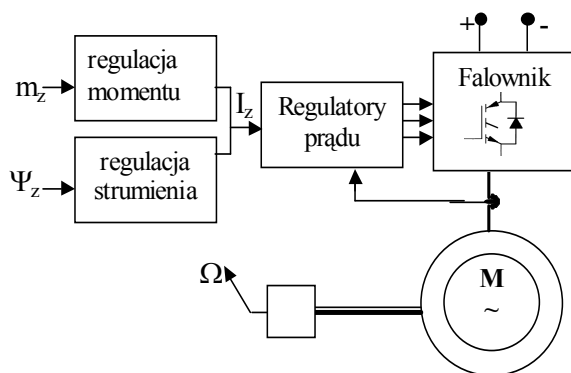
Parametr / liczba par biegunów	p=2	p=3
Moc znamionowa Pn (kW)	165	
Obroty znamionowe silnika n (obr/min)	1500	1000
Prędkość pojazdu dla warunków znamionowych Vn(km/h)	51	34
Zakres prędkości wymagający odwzbudzenia silnika (km/h)	51÷70	34÷70
Zakres prędkości wymagający odwzbudzenia silnika (%)	27	51
Moment znamionowy Mn (Nm)	1050	1576
Moment maksymalny Mmax (Nm)	2000	
Przeciążenie momentem	1,90	1,27
Prąd fazowy znamionowy Ifn (A)	292	
Prąd w warunkach maks. przeciążenia momentem Ifmax (A)	556	371

Dużą część ceny całego napędu stanowią koszty modułów energoelektronicznych. Rosną one w bardzo znaczący sposób, wraz ze wzrostem maksymalnego prądu dla jakiego są budowane. Z tego powodu zdecydowano się na

wyбір silnika o mniejszych wymaganiach prądowych, czyli silnika o trzech parach biegunów. Te same względy spowodowały wybór połączenia uzwojeń w gwiazdę. Skutkiem takiego doboru silnika jest znaczne ograniczenie prędkości przy której możliwe jest utrzymanie maksymalnego momentu. W tym przypadku do prędkości zaledwie ok. 35km/h. Powyżej tej prędkości silnikowi zaczyna „brakować napięcia” do wytworzenia znamionowej wartości strumienia magnetycznego. Zakres prędkości, w którym silnik znajduje się w stanie „niepełnego” wzbudzenia jest bardzo duży, bo obejmuje wartości od 35 do 70 km/h co stanowi aż 51% całego zakresu pracy napędu.

3. Sterowanie trakcyjnego układu napędowego pracującego w obszarze obniżonej wartości strumienia magnetycznego wirnika

Moment obrotowy w silniku indukcyjnym jest wynikiem wzajemnego oddziaływania prądów i strumieni magnetycznych w stojanie i wirniku klatkowym. Do jego poprawnego sterowania niezbędne jest więc utrzymywanie wartości chwilowych prądów i strumieni magnetycznych na określonym, narzuconym i kontrolowanym przez układ sterowania poziomie.



Rys. 1. Schemat blokowy układu sterowania wektorowego w napędzie z silnikiem indukcyjnym

Możliwe to jest do osiągnięcia jedynie dzięki zastosowaniu metod sterowania uwzględniających w sposób bardzo dokładny skomplikowany charakter zjawisk w silniku. Metody te nazywane są metodami wektorowymi. Ich zasada działania polega na wydzieleniu w sygnale sterującym odrębnych składników odpowiedzialnych za wytwarzanie momentu i wzbudzenie silnika. Realizacja tego typu sterowania jest

dosyć skomplikowana od strony technicznej i dopiero w ostatnich latach, dzięki rozwojowi mikrokontrolerów, stała się powszechnie dostępna w wykonaniach przemysłowych.

Sterowanie silnika za pomocą przedstawionej struktury sprowadza się do narzucania układom regulacji zadanych wartości momentu i strumienia. Sygnał momentu zadawanego stanowi najważniejszy element sterowania z punktu widzenia zastosowania silnika w układzie napędowym. Bezpośrednia możliwość jego kształtowania, za pomocą jednego sygnału pozwala na stosowanie silnika indukcyjnego w układach napędowych na tych samych prostych zasadach jakie obowiązują w przypadku silnika prądu stałego. Zadaniem drugiego toru, związanego z regulacją strumienia jest utrzymanie odpowiedniego wzbudzenia silnika. Najczęściej jako zadaną amplitudę strumienia wybiera się jego maksymalną wartość, osiągalną ze względów konstrukcyjnych, która nie powoduje nasycenia obwodu magnetycznego. Wtedy w sposób optymalny wykorzystywane są możliwości energetyczne silnika. Większość algorytmów sterowania stara się więc pracować przy tej amplitudzie strumienia we wszystkich obszarach pracy, w których jest to tylko możliwe.

W ten sposób działa również algorytm sterowania stosowany w omawianym układzie napędowym trolejbusu. Przy niskich prędkościach zadawana wartość modułu wektora strumienia skojarzonego z uzwojeniami wirnika (amplitudy strumienia) jest stała i równa wartości w warunkach znamionowych. W silniku indukcyjnym, podobnie jak w silniku prądu stałego, wraz ze wzrostem prędkości obrotowej wirnika rośnie siła elektromotoryczna indukowana w uzwojeniach stojana silnika. Napięcie na zaciskach staje się wtedy zbyt niskie do poprawnej kontroli prądu w uzwojeniach stojana. Układ sterowania nie ma możliwości wymuszenia zadawanego stanu elektromagnetycznego, a co za tym idzie nie ma możliwości utrzymywania zadanej wartości momentu.

Wydzielenie w układzie sterowania odrębnej struktury regulacji strumienia daje naturalną możliwość jego zmniejszenia. Należy tylko ustalić wartości amplitudy strumienia, którą będzie można zrealizować przy dostępnym napięciu, a która jednocześnie zapewni możliwie wysoką wartość momentu. Najprostszą zależność stosowaną w tym celu:

$$\Psi \sim \frac{V_{max}}{\omega_r}, \quad (1)$$

gdzie : Ψ - amplituda strumienia,

V_{max} - dostępne napięcie,

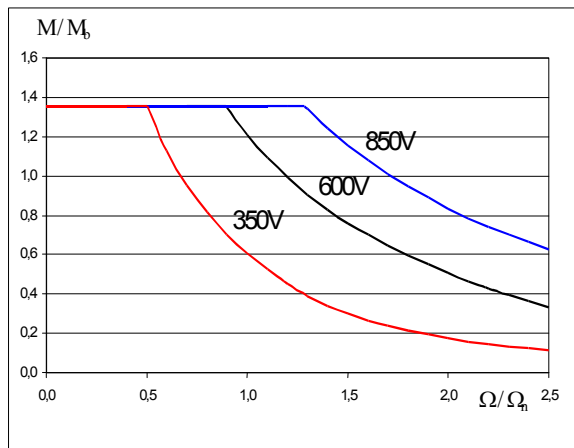
ω_r - prędkość wirnika.

otrzymuje się na podstawie schematu obwodowego silnika indukcyjnego.

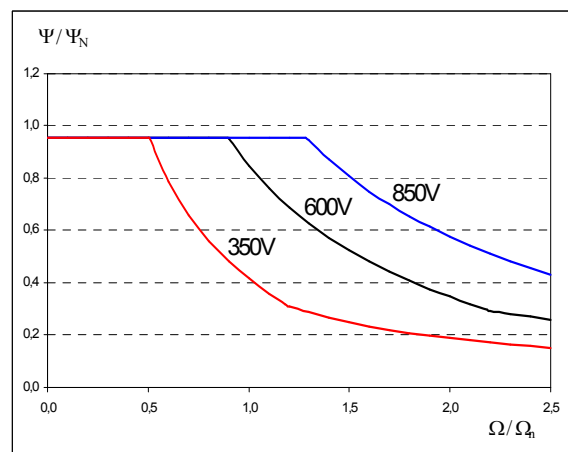
Innym bardziej efektywnym sposobem wyznaczenia wartości strumienia pozwalającej na uzyskanie największego możliwego momentu jest wykorzystanie do rozważań równań opisujących dynamikę silnika znanych jako równania Kovacza i Racza. Równania te mają dosyć złożony charakter, jednak wykorzystanie metod numerycznych pozwala w stosunkowo łatwy sposób wyznaczyć potrzebne wartości strumienia pozwalające rozwinąć maksymalny moment przy uwzględnieniu zarówno ograniczenia napięcia jak i prądu. Na rysunku 2 przedstawiono w jednostkach względnych zależność maksymalnego momentu, możliwego do uzyskania przy wskazanej wartości napięcia sieci trakcyjnej, od prędkości rozwijanej przez pojazd. Na rysunku 3, przedstawiono wartość amplitudy strumienia magnetycznego (modułu wektora) w silniku odniesioną do jego wartości znamionowej w analogicznych warunkach.

Uzyskane wartości liczbowe stanowią zestaw dwuwymiarowych tablic, pozwalających określić zadaną wartość strumienia wirnika dla danej prędkości i napięcia. Przy użyciu tych tablic można zbudować taką strukturę układu sterowania napędem, która w prosty sposób uwzględni zależność strumienia od chwilowej prędkości obrotowej wirnika oraz od maksymalnej wartości napięcia jaką można przyłożyć do zacisków silnika.

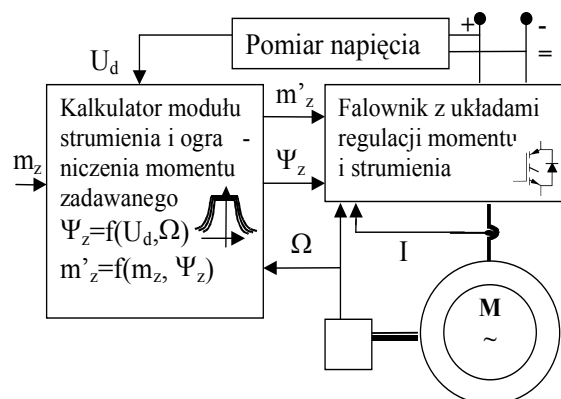
Na rysunku 4 przedstawiono schemat blokowy układu sterowania, w którym w obszarze odwzbudzenia zastosowano omawianą metodę. W stanie zmniejszonego strumienia utrzymanie momentu odbywa się kosztem zwiększania prądu. Ten z kolei podlega ograniczeniom technicznym i nie może przekraczać wartości dopuszczalnej.



Rys. 2. Rodzina charakterystyk momentu maksymalnego w funkcji prędkości dla kilku wartości napięcia zasilania



Rys. 3. Rodzina charakterystyk strumienia zadanego w funkcji prędkości dla kilku wartości napięcia zasilania



Rys. 4. Schemat blokowy układu realizującego „osłabianie strumienia”

Ograniczenie prądu i napięcia stojana silnika realizowane jest poprzez odpowiedni dobór zadawanych wartości momentu napędowego i strumienia magnetycznego silnika. Wartości zadawane zmieniają się w funkcji prędkości obrotowej silnika oraz w funkcji napięcia zasilającego sieci trakcyjnej. Ogólnie można powiedzieć, że maksymalny moment, jaki można uzyskać w silniku, szybko się zmniejsza wraz ze wzrostem prędkości i ze spadkiem napięcia zasilającego w sieci. Taka sytuacja w znaczący sposób ogranicza dynamikę napędu, szczególnie przy prędkościach znacznie przewyższających jej wartość znamionową.

Dokładna analiza zależności występujących między poszczególnymi sygnałami, uwzględniająca wszelkiego rodzaju ograniczenia występujące w silniku pokazuje, że po przekroczeniu pewnej prędkości ω_m , wartość strumienia optymalna z punktu widzenia możliwości rozwijania momentu nie jest wcale osiągana przy najwyższej dopuszczalnej wartości prądu. W tabelicy 2 pokazano na przykładzie rozważanego silnika, że dla bardzo dużych prędkości (III obszar), przyjęcie założenia, że maksymalny moment zostaje osiągnięty przy maksymalnym prądzie, jest błędne.

Tablica 2. Porównanie maksymalnych wartości momentu otrzymanych dla różnych metod wyznaczania strumienia zadawego.

	Wyniki dla maksymalnej wartości prądu	Wyniki dla algorytmu poprawionego
Prędkość wirnika	$2.5\omega_n$	
Napięcie (V)	367	
Amplituda prądu (A)	450	397
Amplituda strumienia	$0,218\Psi_n$	$0,259\Psi_n$
Moment maksymalny (Nm)	516,928	541,159

Wyznaczenie zależności, na podstawie której określa się zadaną wartość strumienia jako funkcję prędkości i napięcia musi uwzględniać zatem aż trzy odmienne obszary:

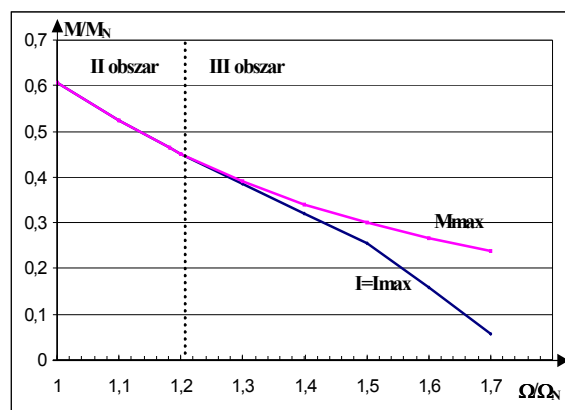
I - dla prędkości od 0 do ω_n , gdzie zadaje się stałą wartość amplitudy strumienia, równą wartości znamionowej,

II - dla prędkości od ω_n do ω_m , gdzie wartość amplitudy zadawanego strumienia jest funkcją

prędkości i napięcia sieci trakcyjnej, dobieganą tak, by i napięcie i prąd stojana silnika były równe swoim ograniczeniom, co w tym przypadku oznacza jednocześnie maksymalizację możliwego do osiągnięcia momentu,

III - dla prędkości powyżej ω_m , gdzie wartość amplitudy zadawanego strumienia i wartość maksymalna prądu są funkcjami prędkości i napięcia sieci trakcyjnej, dobieganymi tak, by maksymalizować możliwy do osiągnięcia moment z uwzględnieniem ograniczenia wartości napięcia stojana, co w tym przypadku wiąże się z wystąpieniem wartości prądu stojana mniejszych od wartości granicznych.

Na rysunku 5 przedstawiono fragment krzywej momentu maksymalnego, wyznaczony dla niskiej wartości napięcia (350V) w III obszarze prędkości na tle wartości momentu, obliczonej dla maksymalnego prądu.

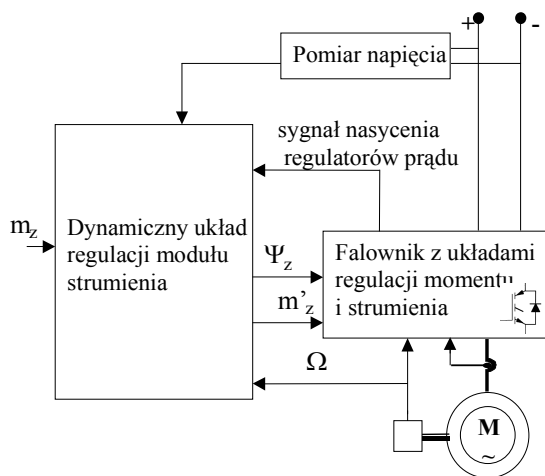


Rys. 5. Przykładowa krzywa momentu maksymalnego w III obszarze prędkości na tle wartości otrzymanej dla maksymalnego prądu

Krzywa wartości zadanej strumienia, na granicy wejścia w obszar nasycenia, zawiera ostre załamanie (rys. 4). Taka nagła zmiana wartości zadanej modułu strumienia w przypadku szybkiego wzrostu lub obniżania prędkości jest dla układu regulacji prądu stojana trudna do zrealizowania ze względu na ograniczoną szybkość działania tego układu regulacji. W celu uniknięcia zaburzeń pracy tego układu dokonano wygładzenia kształtu charakterystyki zadawanego strumienia magnetycznego na granicy strefy małych prędkości, gdy zadawany strumień jest stały i strefy większych prędkości, gdy zadawany strumień jest zmniejszany w funkcji prędkości obrotowej silnika.

4. Adaptacja odzwbudzenia strumienia w trakcyjnych układach napędowych z silnikiem indukcyjnym

Tradycyjny sposób wyznaczania zadanej wartości strumienia magnetycznego polega na stabilizowaniu wartości zadanych prędkości obrotowej silnika i napięcia sieci. Zadawane wartości strumienia magnetycznego jakie mają być realizowane w silniku przez układ sterowania wyznaczane są na ogół na podstawie parametrów jego schematu zastępczego. Parametry te są określane zwykle w wyniku użycia metod identyfikacji o ograniczonej dokładności. W rzeczywistości parametry te charakteryzują się dużą zależnością od temperatury i warunków obciążenia silnika. Bardzo istotnym czynnikiem, mającym wpływ na wybór zadanych wartości modułu strumienia dla większych prędkości, mają również trudne do przewidzenia zmiany napięcia sieci trakcyjnej. Poważną wadą układu wykorzystującego tabele jest to, że wartości umieszczone w nich wyznacza się zwykle przy założeniu, że silnik pracuje w stanie ustalonym. Takie postępowanie prowadzi do niedokładnego oszacowania optymalnych warunków pracy silnika dla stanów dynamicznych. Poprawę działania napędu można osiągnąć poprzez użycie do modyfikacji zadawanych wartości strumienia i momentu sygnałów pochodzących z układu sterowania [3]. Na rysunku 7 przedstawiono propozycję wykorzystania do tego celu sygnałów informujących o wchodzeniu wektorowych regulatorów prądu stojana silnika w stan nasycenia [4].



Rys. 7. Schemat blokowy układu sterowania z adaptacyjnym układem kształtowania modułu strumienia

5. Podsumowanie

Osiągnięcie maksymalnej wartości momentu przy dużych prędkościach określa możliwości dynamiczne pojazdu w ruchu ulicznym. Jest również bardzo ważne z punktu widzenia bezpieczeństwa, ponieważ ma bardzo duży wpływ na długość drogi hamowania. Stosowanie silników indukcyjnych w pojazdach przeznaczonych dla transportu zbiorowego wymaga jednak od układów sterujących odpowiedniej niezawodności. Duże zmiany napięcia, jakie występują w trakcyjnych układach zasilania, nie mogą powodować niestabilnej pracy napędu. Szczególnie ważne jest to podczas nagłego hamowania pojazdu. Moment uzyskiwany na wale silnika powinien być wtedy jak największy. Oznacza to, że jego wartość powinna bardzo szybko zwiększać się przy zmniejszającej się prędkości i wzrastającym napięciu zasilania. Celowe zatem jest podjęcie dalszych prac mających na celu poszukiwanie nowych rozwiązań zapewniających poprawę właściwości napędu przy pracy z dużymi prędkościami w warunkach raptownych zmian napięcia sieci.

Referat ten został przygotowany w ramach rozwojowego projektu badawczego MNiSW nr R01 014 01.

6. Literatura

- [1]. Chudzik P., Dębowski A., Lisowski G.: *Results of testing a vector controlled AC tram drive*. Proc. of Int. Conf. on Power Electronics and Intelligent Control for Energy Conservation, PELINCEC, Warsaw (Poland), 2005, pp.161-1 – 161-6.
- [2]. Dembowski A., Chudzik P., Lisowski G.: *State transitions in vector controlled AC tram drive*. Proc. of 12th Int. Power Electronics and Motion Control Conf., EPE - PEMC, Portorož (Slovenia), 2006, pp. 479 – 484.
- [3]. Kim S.H. , Sul S.K. , *Voltage Control Strategy for Maximum Torque Operation of an Induction Machine in the Field-Weakening Region* , IEEE Trans. Industrial Electronics, Vol. 44, No. 4 (Aug.), 1997, pp. 512 – 518.
- [4]. Peroutka Z., Zeman K., *Robust Field Weakening Algorithm for Vector-Control-led Induction Machine Traction Drives* Proc. IECON 2006, Paris (France), 2006, pp. 856 – 861.