

ROMAN DUDEK, ANDRZEJ STOBIECKI*

HAMOWANIE PRZECIWWŁĄCZENIEM PRZEWODOWEJ LOKOMOTYWY KOPALNIANEJ Z TRANZYSTOROWYM UKŁADEM STEROWANIA

COUNTER-CURRENT BRAKING OF THE MINE TROLLEY LOCOMOTIVE EQUIPPED WITH THE TRANSISTOR- BASED CONTROL SYSTEM

Streszczenie

Lokomotywa kopalniana Ld 30 zasilana jest z sieci trakcyjnej napięciem 250 V DC i napędzana dwoma silnikami szeregowymi o łącznej mocy 83 kW. Hamulcem podstawowym jest hamulec mechaniczny, a jako pomocnicze stosuje się elektryczne hamowanie dynamiczne. Brak hamulca pneumatycznego i niezbyt poręczny hamulec mechaniczny powodują, że w lokomotywach Ld 30 maszyniści stosunkowo często stosują zabronione przepisami hamowanie przeciwwłoczeniem, szczególnie przy pracach manewrowych. W artykule przedstawiono konsekwencje wykonania hamowania przeciwwłoczeniem w przypadku rezystorowego układu sterowania oraz układu regulacji impulsowej z tranzystorami mocy IGBT (IPM), opracowanego do modernizacji lokomotyw Ld 30. Zaprezentowano rozwiązanie zapobiegające negatywnym skutkom takiego hamowania. Podano wyniki symulacji komputerowych stanu hamowania przeciwwłoczeniem dla lokomotywy Ld30 i dla powszechnie stosowanej w górnictwie lokomotywy Ld31 oraz wyniki badań laboratoryjnych.

Słowa kluczowe: Słowa kluczowe: napęd trakcyjny, układ sterowania impulsowego, hamowanie przeciwwłoczeniem

Abstract

The mine locomotive type Ld 30 is supplied from the 250 V DC overhead network and driven with 2 DC series motors with combined power of 83 kW. A hand brake is the main brake there and electric dynamic braking is used as the auxiliary braking. Lack of an air brake and the inconvenient in use hand brake are the reasons, that the Ld 30 engine drivers relatively frequently apply the banned counter-current braking, especially at shunting operations. Consequences of performing of the counter-current braking in both resistance control system and pulse-mode control system with the IGBT transistors (IPMs), which was developed to modernize this locomotive type, are shown in the paper. The solution preventing negative results of this braking is described. The results of computer simulations of the counter-current braking operation in cases of both Ld 30 locomotive type and the main mine locomotive type Ld 31 are shown and the results of laboratory tests are also given.

Keywords: traction drive, pulse-mode control system, counter-current braking

* Dr inż. Roman Dudek, dr inż. Andrzej Stobiecki, Katedra Automatyki Napędu i Urządzeń Przemysłowych, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie.

1. Wstęp

Kopalniana lokomotywa typu Ld 30 zasilana jest z sieci trakcyjnej napięciem 250 V DC i napędzana dwoma silnikami szeregowymi o łącznej mocy 83 kW. Rozruch i regulacja prędkości odbywają się poprzez zmianę wartości oporności w obwodzie silników, z możliwością zmiany połączenia silników z szeregowego na równoległe. Hamulcem podstawowym jest hamulec mechaniczny, a jako pomocnicze stosuje się elektryczne hamowanie dynamiczne.

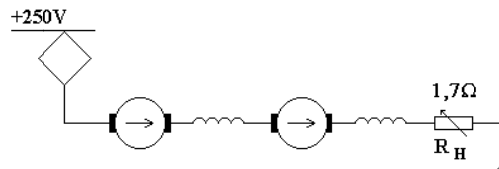
Brak hamulca pneumatycznego i niezbyt poręczny hamulec mechaniczny powodują, że w lokomotywach Ld 30, częściej niż w nowszych typach lokomotyw, maszyniści stosują zabronione przepisami hamowanie przeciwwłóceniem, zwłaszcza przy pracach manewrowych. Hamowanie przeciwwłóceniem stanowi źródło potencjalnych zagrożeń zarówno dla elementów obwodu elektrycznego lokomotywy, jak i mechanicznego układu przeniesienia napędu.

W Katedrze Automatyki Napędu i Urządzeń Przemysłowych Akademii Górniczo-Hutniczej opracowano, wykorzystujący moduły IPM, układ sterowania z przekształtnikiem impulsowym, przeznaczony do modernizacji lokomotywy Ld 30. Układ został wykonany przez firmę ELSTA i zabudowany w lokomotywie pracującej w Zakładach Górniczych „Polkowice”. Opis obwodu głównego i sposób realizacji podstawowych stanów pracy zmodernizowanej lokomotywy przedstawiono w [1].

W niniejszym artykule opisano konsekwencje wykonania niedozwolonego hamowania przeciwwłóceniem w układzie regulacji impulsowej oraz zaprezentowano przyjęte rozwiązanie zapobiegające negatywnym skutkom takiego hamowania.

2. Hamowanie przeciwwłóceniem

Hamowanie przeciwwłóceniem polega na zestawieniu (stykami nastawnika) obwodu silników do pracy dla przeciwnego – w stosunku do istniejącego – kierunku obrotów. Jest to bardzo intensywne hamowanie, wiążące się zwykle z przekroczeniem dopuszczalnych obciążeń elementów elektrycznych i mechanicznych. Wykorzystywane jest przede wszystkim przy pracach manewrowych, między innymi z powodu nieskuteczności hamowania dynamicznego przy małych prędkościach.



Rys. 1. Uproszczony schemat obwodu głównego lokomotywy Ld 30 dla stanu hamowania przeciwwłóceniem

Fig. 1. Simplified diagram of the main circuit of the Ld 30 locomotive at counter-current braking mode

Podczas hamowania przeciwwłączeniem do silników dostarczana jest energia elektryczna ze źródła zasilania, a prąd w lokomotywach ze sterowaniem oporowym jest ograniczany przez włączenie w obwód rezystancji o odpowiednio dużej wartości. Uproszczony schemat obwodu głównego lokomotywy Ld 30 ze sterowaniem oporowym dla stanu hamowania przeciwwłączeniem przedstawiono na rys. 1.

Lokomotywa Ld 30 wyposażona jest w dwa silniki typu LD 055 o następujących parametrach:

$$U_N = 250 \text{ V}, P_N = 41,5 \text{ kW}, I_N = 185 \text{ A}, n_N = 520 \text{ obr./min} (\omega_N = 54,4 \text{ rad/s}), M_N = 762 \text{ Nm}, R_T = 0,081 \Omega, R_W = 0,029 \Omega$$

gdzie:

- R_T – łączna rezystancja obwodu twornika i biegunów komutacyjnych,
- R_W – rezystancja obwodu wzbudzenia.

Podane wartości znamionowe są wartościami znamionowymi jednogodzinnymi.

Korzystając z uproszczonych wzorów:

$$U_N = E_N + I_N R_S \quad (1)$$

$$E_N = c \varphi_N \omega_N \quad (2)$$

gdzie:

- U – napięcie zasilania,
- E – siła elektromotoryczna rotacji twornika,
- I – natężenie prądu silnika,
- R_S – rezystancja silnika, $R_S = R_T + R_W$,
- c – stała konstrukcyjna silnika,
- φ – strumień biegunów głównych,
- ω – prędkość kątowna silnika,

można wyznaczyć wartość parametru $c\varphi_N$ dla silnika LD 055: $c\varphi_N = 4,22 \text{ Wb}$.

Pozwala to, po zapisaniu równań (3) i (4) dla obwodu hamowania przeciwwłączeniem (rys. 1), obliczyć prędkość, przy której podczas hamowania popłynie w obwodzie prąd znamionowy.

$$U_N + 2E = 2I_N R_S + I_N R_H \quad (3)$$

$$E = c \varphi_N \omega \quad (4)$$

gdzie: R_H – maksymalna wartość rezystancji rozruchowej równa $1,7 \Omega$.

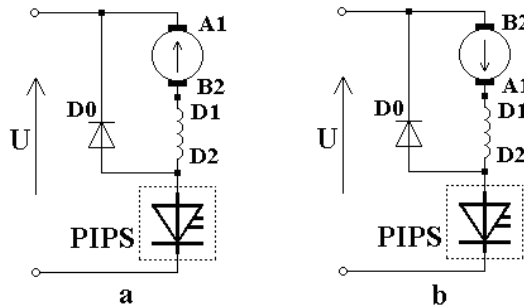
Wynik obliczeń: $\omega = 12,5 \text{ rad/s}$ (co stanowi 23% prędkości znamionowej) wskazuje, że podczas hamowania przeciwwłączeniem to nie maksymalna wartość prądu stanowi podstawowy problem. Wykonanie hamowania przeciwwłączeniem jest zagrożeniem przede wszystkim dla mechanicznych elementów przeniesienia napędu (głównie przekładni) i dla pociągu (niebezpieczeństwo wykołowania), co wiąże się z szybkością narastania momentu i siły hamującej.

Wartości prądu i momentu zwarcia ($\omega = 0 \text{ rad/s}$) dla I stopnia jazdy lokomotywy Ld 30 ze sterowaniem oporowym wynoszą odpowiednio 130 A i około 400 Nm. Tak więc przy hamowaniu od prędkości $12,5 \text{ rad/s}$ popłynie początkowo prąd nieprzekraczający wartości

znamionowej, ale moment hamujący wytworzony przez silnik w sposób praktycznie skokowy (stała elektryczna obwodu hamowania lokomotywy dla jego sumarycznej rezystancji $1,92 \Omega$ jest rzędu 10 ms) będzie blisko dwukrotnie większy niż podczas rozruchu. Co więcej, często będzie się to działo w sytuacji istniejących, a powstałych po zmianie kierunku momentu wytwarzanego przez silniki, luzów w przekładni i w sprzęgach. Problem zwielokrotnia się przy większych prędkościach lub hamowaniu z mniejszą rezystancją włączoną w szereg z silnikami.

W przypadku napędów z przekształtnikami impulsowymi prądu stałego zagrożenia wywołane hamowaniem przeciwwłączeniem mają nieco odmienny charakter.

Na rysunku 2 przedstawiono uproszczone schematy obwodów pojedynczego silnika zasilanego impulsowo dla stanu pracy silnikowej (a) i dla hamowania przeciwwłączeniem (b). Spośród elementów przekształtnika na schematach wyróżniono diodę zerową (D0) ze względu na jej wyjątkową rolę w procesie hamowania. Inne elementy obwodu głównego, jak filtr wejściowy, zabezpieczenia nadmiarowe czy styki nastawnika wykorzystywane do zmiany struktury obwodu (w lokomotywie Ld 30 nawrót realizowany jest przez przełączenie obwodu twornika) pominięto jako mniej istotne z punktu widzenia rozpatrywanego zjawiska.



Rys. 2. Schematy obwodów pojedynczego silnika zasilanego impulsowo: a) praca silnikowa, b) hamowanie przeciwwłączeniem

Fig. 2. Fig. 2. Block diagrams of circuits of a pulse-mode supplied single motor a – motoring mode, b – counter-current braking mode

Dla pracy silnikowej można zapisać równania:

$$U = E + iR_S + L_S \frac{di_S}{dt} \quad \text{dla czasu } \Delta t_z \quad (5)$$

$$0 = E + iR_S + L_S \frac{di_S}{dt} \quad \text{dla czasu } \Delta t_w \quad (6)$$

$$T = \Delta t_z + \Delta t_w \quad (7)$$

gdzie:

L_S – indukcyjność silnika,

Δt_z – czas załączenia łącznika głównego przekształtnika (dostarczanie energii ze źródła),

Δt_w – czas wyłączenia łącznika głównego przekształtnika (obwód prądu silnika zamyka się przez diodę zerową D0).

Dla hamowania przeciwwłóceniem:

$$U + E = iR_S + L_S \frac{di_S}{dt} \quad \text{dla czasu } \Delta t_z \quad (8)$$

$$E = iR_S + L_S \frac{di_S}{dt} \quad \text{dla czasu } \Delta t_w \quad (9)$$

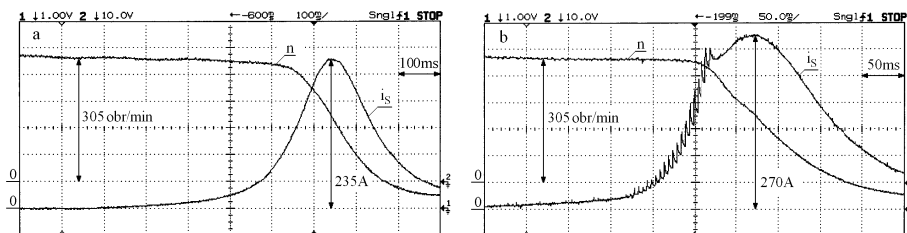
Tak więc, o ile podczas pracy silnikowej w przedziale czasu Δt_w przepływ prądu przez diodę zerową (D0) wymuszony jest rozładowywaniem energii zgromadzonej w polu magnetycznym elementów indukcyjnych, o tyle w przypadku hamowania przeciwwłóceniem w przedziale czasu Δt_w realizowana jest praca prądnicowa maszyny szeregowej, i to praca na zwarcie (w obwodzie obciążenia jest tylko dioda D0). Stąd, nawet dla małych prędkości, natężenie prądu ograniczane tylko rezystancją silnika i w konsekwencji moment hamujący mogą osiągać niedopuszczalne wartości.

Już samo zestawienie obwodu silnika do hamowania przeciwwłóceniem – pod warunkiem, że SEM remanentu ma wartość większą od napięcia progowego diody zerowej – nawet bez załączania łącznika głównego przekształtnika, może prowadzić do pojawienia się niebezpiecznych wartości prądu i momentu. Na rys. 3 przedstawiono oscylogramy przebiegów prądu silnika i prędkości, uzyskane w warunkach laboratoryjnych dla dwóch przypadków hamowania przeciwwłóceniem:

- a – występuje tylko zjawisko samowzbudzenia maszyny szeregowej pracującej na zwarcie,
- b – w początkowym okresie dostarczana jest również energia elektryczna do obwodu (łącznik główny przekształtnika pracuje do momentu osiągnięcia przez prąd wartości ograniczenia prądowego).

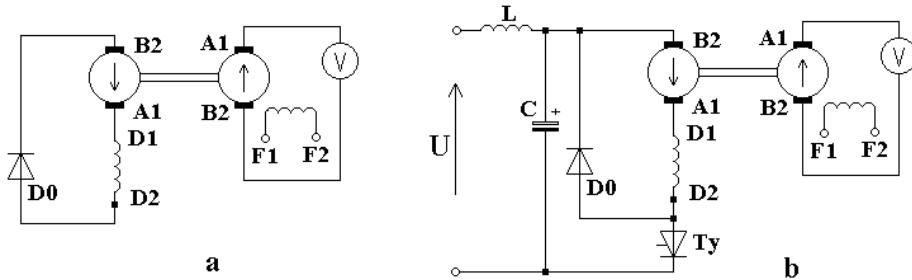
Oba te przypadki ilustrują schematy podane na rys. 4. Do badań wykorzystano silnik trakcyjny typu LDa 327a (stosowany w lokomotywach kopalnianych typu Ld 31) o następujących parametrach:

$$U_N = 250 \text{ V}, P_N = 45 \text{ kW}, I_N = 205 \text{ A}, n_N = 1080 \text{ obr./min} (\omega_N = 113 \text{ rad/s}), M_N = 398 \text{ Nm}, R_T = 0,038 \Omega, R_W = 0,0802 \Omega$$



Rys. 3. Przebiegi prądu silnika (i_S) i prędkości (n) dla hamowania przeciwwłóceniem: a) bez impulsowania łącznika głównego; b) z impulsowym zasilaniem maszyny szeregowej

Fig. 3. Waveforms of motor current (i_S) and rotational speed (n) at counter-current braking mode a – with main switch turned off, b – at pulse-mode supply of the series motor



Rys. 4. Schemat układu laboratoryjnego

Fig. 4. Diagram of the laboratory system

Napęd laboratoryjny tworzył silnik LDa 327a napędzający maszynę obcowzbudną typu MP-41 oraz przerywacz tyrystorowy o komutacji szeregowej (element składowy tyrystorowego układu sterowania TUSDELK dla lokomotyw Ld 31) pracujący ze stałą częstotliwością impulsowania 200 Hz. Siła elektromotoryczna prądnicy była wykorzystywana jako sygnał pomiaru prędkości. Moc maszyny obcowzbudnej (12 kW) nie zezwalała na ewentualne jej zasilenie i wykorzystanie do stabilizacji prędkości podczas hamowania przeciwwłączeniem silnika.

Oscylogramy z rys. 3 ukazują interesujące zjawisko, w zasadzie nie możliwe do wywołania w warunkach kopalnianych ze względu na bezwładność i opory ruchu lokomotywy (pociągu). W momencie spadku prędkości napędu do zera wartość prądu silnika, a więc i momentu hamującego, są nadal większe od zera, co skutkuje krótkotrwałym nawrotem silnika.

Wartość stałej czasowej obwodu silnika (L_s/R_s) można szacować na około 100 ms [2]. W efekcie, mimo przekroczenia przez prąd silnika wartości ograniczenia prądowego (200 A) i zablokowania przewodzenia tyrystora Ty przez układ regulacji prądu, prąd silnika narasta dalej do wartości wynikającej z bieżącej wartości SEM rotacji.

W napędzie laboratoryjnym wraz ze wzrostem prądu (momentu) następował szybki spadek prędkości, a więc i SEM rotacji wymuszającej przepływ prądu w obwodzie silnika. W konsekwencji przebieg hamowania odbiegał od przebiegu w warunkach kopalnianych, gdzie bezwładność lokomotywy (pociągu) zapewnia praktycznie stałą prędkość hamowania, co najmniej przez czas kilkukrotnie przekraczający stałą elektromagnetyczną obwodu silnika.

W tyrystorowych układach przekształtników impulsowych dioda zerowa jest diodą prostowniczą o dużej przeciążalności prądowej. Osiągane podczas hamowania przeciwwłączeniem, a przed zadziałaniem zabezpieczeń nadmiarowych, wartości prądu są dla niej dopuszczalne. W układach ze sterowaniem tyrystorowym przyrost wartości momentu hamującego – choć nadal może uzyskiwać duże wartości (wynikające z wartości prądu zadziałania zabezpieczeń) – jest znacznie wolniejszy niż w lokomotywach ze sterowaniem oporowym. Wynika to z zasilania o charakterze impulsowym oraz z proporcji stałych czasowych obwodu silnika dla obu rozwiązań.

3. Hamowanie przeciwwłączeniem zmodernizowanej lokomotywy Ld 30 z tranzystorowym układem sterowania

W zmodernizowanej lokomotywie Ld 30 zastosowano przekształtnik impulsowy z inteligentnymi modułami mocy IPM [1]. Moduł IPM, oprócz tranzystora IGBT pełniącego funkcję łącznika głównego, zawiera w swej strukturze diodę zwrotną FWD oraz obwody sterowania, sygnalizacji i zabezpieczeń. Poprawna praca tranzystora IGBT wymaga, by dioda zerowa przekształtnika była diodą szybką, charakteryzującą się miękkim wyłączeniem. Warunki te spełnia dioda FWD włączona przeciwsobnie z tranzystorem w module IPM.

Moduły o obciążalnościach odpowiadających potrzebom przekształtnika lokomotywy Ld 30 są zwykle wykonywane jako dwuelementowa gałąź mostka. Taką strukturę (por. rys. 5c) mają też zastosowane w przekształtniku lokomotywy Ld 30 moduły IPM PM300DSA060 ($I_C = 300$ A, $U_{CES} = 600$ V). Niewykorzystane diody zwrotne dwutranzystorowych modułów IPM użyto jako diody zerowe w przekształtniku lokomotywy Ld 30.

Dioda FWD modułu IPM – w stosunku do diod prostowniczych czy szybkich – ma jednak zdecydowanie mniejszą obciążalność prądową (zwłaszcza niska jest wartość całki cieplnej), nie gwarantującą jej bezpieczeństwa w przypadku hamowania przeciwwłączeniem przy zabezpieczeniach nadprądowych obwodu dobieranych dla prądów dopuszczalnych silnika. Ponadto prąd diody zwrotnej nie jest kontrolowany przez zabezpieczenia przeciążeniowe OC i SC modułu IPM. W tabeli 1 podano dla porównania parametry przeciążalności prądowej elementów półprzewodnikowych firmy EUPEC (o wyborze firmy zdecydowała dostępność danych): diod prostowniczej i szybkiej, wykonanych w formie bloków elektroizolacyjnych, oraz diody zwrotnej modułu IGBT.

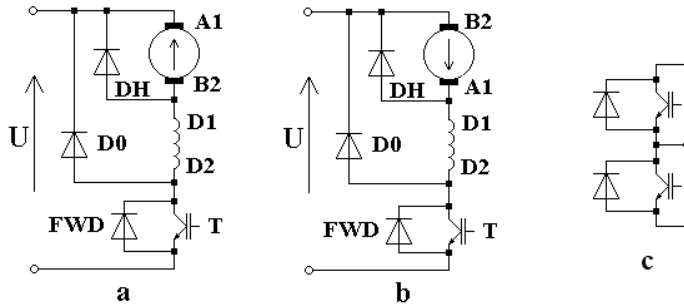
W układzie przekształtnika impulsowego lokomotywy Ld 30, w celu ochrony przed negatywnymi skutkami hamowania przeciwwłączeniem, zastosowano diodę prostowniczą bocznikującą sam twornik silnika, włączoną (analogicznie jak dioda zerowa bocznikująca cały obwód silnika) tak, by napięcie zasilające (sieci) polaryzowało ją wstecznie. Dioda, zwierając podczas hamowania twornik, znacznie ogranicza prąd obwodu wzbudzenia, a tym samym siłę elektromotoryczną. Dzięki temu nie tylko chroniona jest dioda zerowa (wykorzystana do tego celu dioda FWD), ale przede wszystkim nie powstaje moment hamujący o znacznej wartości. Włączenie równoległe do twornika diody nie zmienia przy tym przebiegów poszczególnych wielkości podczas pracy silnikowej maszyny szeregowej. Dioda ta nie ma także wpływu na przebieg hamowania dynamicznego. Usytuowanie w tranzystorowym układzie sterowania lokomotywy Ld 30 diody bocznikującej twornik (oznaczonej jako DH) przedstawiono, dla jednego silnika, na rys. 5.

Tabela 1

Porównanie parametrów przeciążalności prądowej różnych rodzajów diod

Dioda prostownicza DD260N	Dioda szybka DD242S	Dioda zwrotna FWD modułu IGBT BSM300GB60DLC
$I_{FAVM} = 260$ A	$I_{FAVM} = 240$ A	$I_C = 300$ A*
$V_{RRM} = 1000 \div 1800$ V	$V_{RRM} = 600 \div 1000$ V	$V_{CES} = 600$ V*
$I_{FSM} = 8300$ A	$I_{FSM} = 7500$ A	$I_{FRM} = 600$ A*
$I^2t = 344$ kA ² s	$I^2t = 281$ kA ² s	$I^2t = 19,2$ kA ² s

* maksymalne wartości prądu i napięcia tranzystora IGBT są jednocześnie maksymalnymi wartościami dla diody zwrotnej [6]



Rys. 5. Usytuowanie diody bocznikującej twornik w obwodzie przekształtnika tranzystorowego: a) praca silnikowa; b) hamowanie przeciwwłóceniem; c) moduł dwutranzystorowy

Fig. 5. Location of the diode shunting the armature in the transistor-based converter system: a – motor mode, b – counter-current braking mode, c – two-transistor module

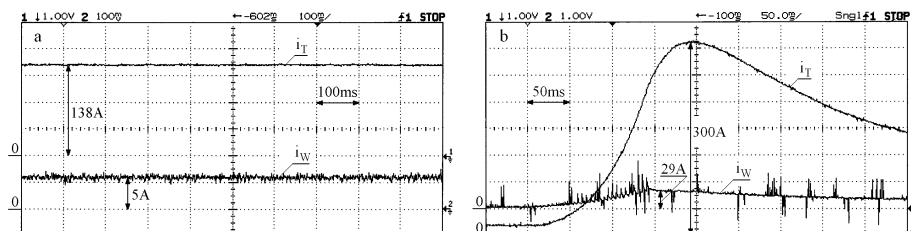
Wykorzystywany wcześniej układ laboratoryjny (rys. 4), po uzupełnieniu obwodu o diodę bocznikującą twornik, ponownie użyto do zarejestrowania przebiegów oscylograficznych prezentujących przebieg hamowania przeciwwłóceniem (rys. 6 i 7). Przebiegi z rys. 6a uzyskano (podobnie jak przebiegi z rys. 3a) po przełączeniu układu od pracy silnikowej do hamowania przeciwwłóceniem bez wprowadzania w stan przewodzenia łącznika głównego przekształtnika. Analogicznie przebiegi z rys. 6b odpowiadają przebiegom z rys. 3b i przedstawiają stan hamowania z impulsowym dostarczaniem energii ze źródła zasilania.

Przebiegi przedstawione na rys. 6a bardzo dobrze ilustrują funkcję, jaką pełni dioda bocznikująca twornik. Po zestawieniu obwodu do hamowania, pod wpływem indukowanej w tworniku siły elektromotorycznej remanentu, płynie prąd przez diodę DH bocznikującą twornik, praktycznie z pominięciem obwodu wzbudzenia. Nawet dla dużych wartości prędkości prąd ten nie przekracza wartości dopuszczalnych. Z oscylogramu można odczytać, iż przez obwód wzbudzenia przepływa prąd o niewielkiej (w stosunku do prądu twornika) wartości. Wartość prądu płynącego w obwodzie wzbudzenia zależy od charakterystyk prądowo-napięciowych użytych diod – zerowej (D0) i bocznikującej twornik (DH). W układzie laboratoryjnym, gdzie łącznikiem głównym był tyrystor typu SCR, jako obu diod użyto diod prostowniczych. Wzrost napięcia przewodzenia na diodzie DH, wraz z narastającym prądem, skutkowało pojawieniem się prądu w obwodzie wzbudzenia.

Przebiegi zaprezentowane na rys. 6a mogą występować w lokomotywie Ld 30 podczas hamowania nawet po przestawieniu przez maszynistę zadajnika na dalsze pozycje dla stanu jazdy (na I pozycji następuje tylko skonfigurowanie obwodu stykami nastawnika, bez wysterowania tranzystorów). W tranzystorowym układzie sterowania lokomotywy Ld 30 wartością zadawaną dla stanu jazdy jest prędkość lokomotywy, a zastosowany do pomiaru prędkości enkoder nie wykrywa jej kierunku. Maszyniści, świadomi zagrożeń związanych z hamowaniem przeciwwłóceniem, decydując się na nie, przestawiają zadajnik na pierwsze pozycje jazdy. Tymczasem, dopóki zadana zadajnikiem prędkość będzie mniejsza od rzeczywistej (co do wartości bezwzględnej), dopóty układ regulacji prędkości będzie blokował wysterowanie tranzystorów.

Przebiegi z rys. 6b ilustrują sytuację podobną do prezentowanej na rys. 3b (układ bez diody DH). Duża wartość stałej czasowej obwodu twornika w stosunku do okresu impulsu

sowania przekształtnika (5 ms) sprawia, że pomimo zablokowania impulsów przez układ regulacji prądu (po przekroczeniu przez prąd twornika wartości ograniczenia prądowego), prąd twornika i diody DH (lecz nie wzbudzenia i diody zerowej) nadal narasta.



Rys. 6. Przebiegi prądu twornika (i_T) i prądu wzbudzenia (i_W) dla hamowania przeciwwłazaniem z diodą bocznikującą twornik: a) bez impulsowania łącznika głównego (prędkość początkowa 500 obr./min), b) z impulsowym zasilaniem maszyny szeregowej (prędkość początkowa 320 obr./min)

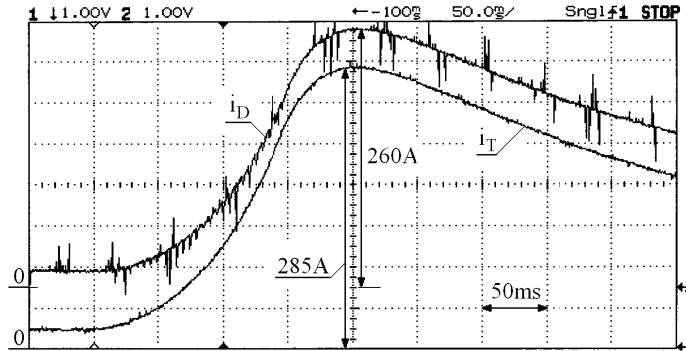
Fig. 6. Waveforms of armature current (i_T) and field current (i_W) at counter-current braking with the diode shunting the armature a – with main switch turned off (initial rotational speed 500 rpm) b – at pulse-mode supply of the series motor (initial rotational speed 320 rpm)

W zwartym diodą DH obwodzie twornika prąd narasta szybciej niż wynikający z impulsowego zasilania prąd wzbudzenia. Dlatego też w przebiegu prądu twornika nie ma zmian o charakterze impulsowym widocznych w przebiegu prądu wzbudzenia (rys. 6b). Prąd pobierany impulsowo ze źródła przepływa bowiem wstecznie przez diodę DH, co ukazują przebiegi z rys. 7.

Zamieszczone wyniki badań laboratoryjnych stanowią potwierdzenie wcześniejszych doświadczeń zespołu badawczego, którego członkami są autorzy, iż zastosowanie diody bocznikującej twornik silnika szeregowego skutecznie zapobiega wytwarzaniu przez silnik momentu o nadmiernych wartościach podczas hamowania przeciwwłazaniem oraz nie dopuszcza do nadmiernych wartości prądu diody zerowej, co ma istotne znaczenie w przypadku wykorzystania do tego celu diody zwrotnej modułu IPM.

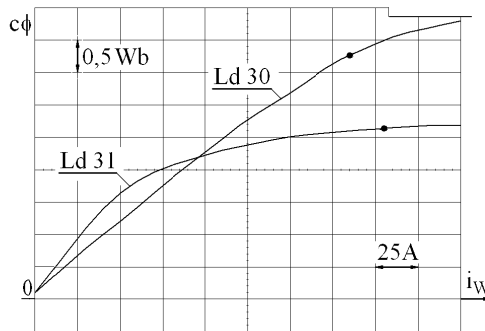
Porównanie oscylograficznych przebiegów prądu twornika, uzyskanych podczas hamowania z impulsowym dostarczaniem energii ze źródła do silnika w układzie bez diody bocznikującej twornik (rys. 3b) i w układzie z diodą (rys. 6b), nie wykazuje większych różnic pomiędzy wartościami maksymalnymi prądu twornika. Ponadto wyniki symulacji przedstawione na rys. 10a i 11a wskazują, iż hamowanie przeciwwłazaniem lokomotywy Ld 31 z układem przekształtnikowym, nawet dla prędkości stosowanych przy pracach manewrowych, spowoduje przekroczenie dopuszczalnych wartości prądu i zadziałanie zabezpieczeń nadmiarowych. Tymczasem wyniki uzyskane podczas realizacji przez wspomniany zespół układów sterowania impulsowego z zastosowaniem diody bocznikującej twornik prowadzą do nieco odmiennych wniosków. Tyristorowy układ sterowania TUSLA został zastosowany w kopalnianej lokomotywie akumulatorowej typu Ldag-05M, wyposażonej w dwa silniki LDs-05a o łącznej mocy 11 kW. Wykorzystanie diod bocznikujących tworniki silników umożliwiło wykonywanie hamowania przeciwwłazaniem, bez konsekwencji zadziałania zabezpieczeń nadmiarowych, praktycznie w całym zakresie prędkości. Również inne zespoły stosowały diodę bocznikującą twornik silnika szeregowego w pojazdach

o mniejszych mocach [3]. Próby ruchowe lokomotywy Ld 30 z tranzystorowym układem sterowania wyposażonym w diody bocznikujące, wykonywane przy prędkościach manewrowych, także wykazały możliwość przeprowadzenia hamowania przeciwwłączeniem bez zadziałania zabezpieczeń. Oczywiście, również bez efektu hamowania.



Rys. 7. Przebiegi prądu twornika (i_T) i prądu diody DH (i_D) dla hamowania przeciwwłączeniem (prędkość początkowa 320 obr./min)

Fig. 7. Waveforms of armature current (i_T) and current of the diode DH (i_D) at counter-current braking mode (initial rotational speed 320 rpm)



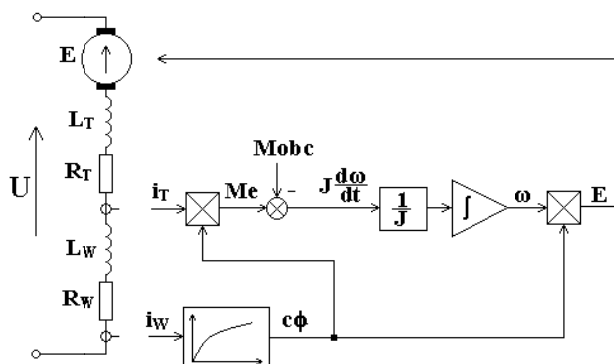
Rys. 8. Porównanie charakterystyk magnesowania $c\phi = f(i_W)$ lokomotyw Ld 31 i Ld 30 [4]

Fig. 8. Comparison of magnetisation curves $c\phi = f(i_W)$ of Ld 31 and Ld 30 locomotives [4]

Silnik LDa 327a (użyty do badań laboratoryjnych) stosowany w lokomotywach Ld 31 i silnik starszego typu LD 055 stosowany w lokomotywach Ld 30 mają zbliżone moce i wartości prądów znamionowych. Inne parametry wykazują już jednak znaczne różnice. Parametry silnika LD 055 pozwalają określić go jako typowy silnik trakcyjny. Natomiast silnik LDa 327a jest silnikiem wysokoobrotowym przystosowanym do pracy ciągłej tylko przy znacznym stopniu osłabienia pola (dla pracy znamionowej ciągłej przewidziano 65% osłabienie pola). Stąd odwrócone – w stosunku do typowych – proporcje rezystancji obwo-

dów twornika i wzbudzenia. Znamienne jest porównanie charakterystyk magnesowania $c\phi = f(i_w)$ obu silników, które przedstawiono na rys. 8. Silnik LDa 327a punkt pracy – prąd znamionowy jednogodzinny – strumień (na charakterystyce zaznaczony pogrubionym punktem) – ma umieszczony praktycznie już w obszarze nasycenia. W efekcie, dla małych wartości prądu wzbudzenia niewielki przyrost prądu wywołuje znaczny przyrost wartości strumienia i SEM rotacji twornika, a w konsekwencji i prądu twornika.

Symulacje wykonane z wykorzystaniem programu IsSpice potwierdziły, że na przebieg zjawiska hamowania przeciwwłóceniem można oddziaływać, aczkolwiek w ograniczonym ze względu na jakość podstawowych stanów pracy lokomotywy zakresie (jazda, hamowanie dynamiczne), na przykład przez dobór stałych czasowych układów regulacji prądu i zadawania względnego czasu wysterowania tranzystorów. Jednak kluczowe znaczenie w przebiegu hamowania przeciwwłóceniem w układzie z diodą bocznikującą twornik i decydujące o uzyskiwanych wartościach prądu twornika wydają się mieć parametry silnika, a przede wszystkim charakterystyka magnesowania.

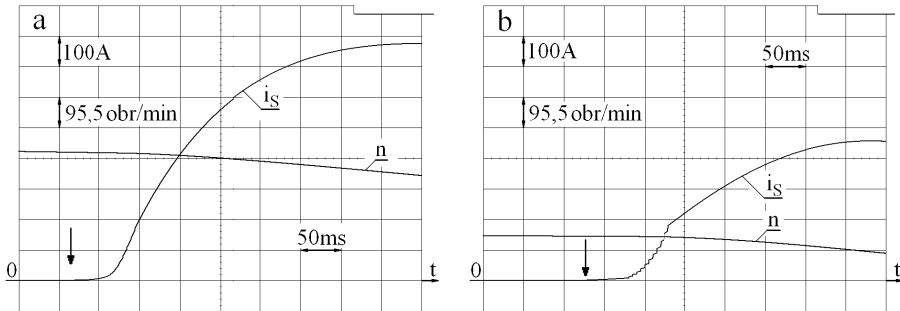


Rys. 9. Schemat blokowy modelu silnika szeregowego

Fig. 9. Block diagram of the simulation model of a series motor

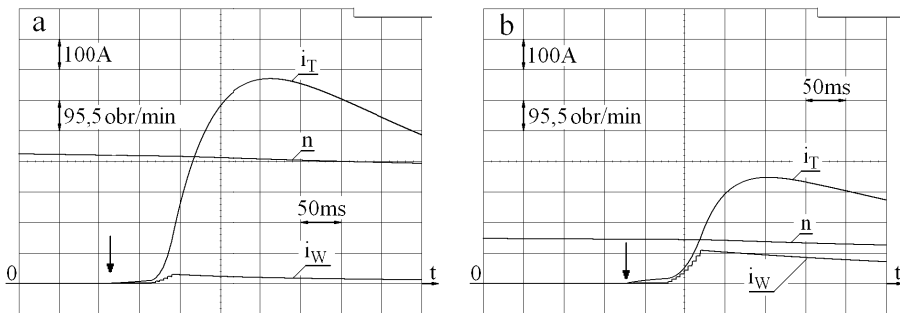
Model silnika przeznaczony do symulacji komputerowych zbudowano na podstawie schematu podanego na rys. 9 [5]. Model, uwzględniając wiele parametrów silnika, pozwala między innymi kształtować zależność strumienia od prądu. Użyty do symulacji program korzysta także z modelu układu sterowania zawierającego między innymi układ regulacji i ograniczenia prądu oraz blok zadawania względnego czasu załączenia przekształtnika (wartości średniej napięcia podawanego na silnik). Takie rozwiązanie układu sterowania stosowano w starszych wersjach układu TUSDELK (również w wykorzystywanym układzie laboratoryjnym). W celu łatwiejszego porównania poszczególnych przypadków zrezygnowano z modelowania zabezpieczeń nadmiarowych, dopuszczając, by w przebiegu symulowanego zjawiska prądy osiągały wartości maksymalne.

Na rysunkach 10 i 11 przedstawiono w celach porównawczych wyniki symulacji stanu hamowania przeciwwłóceniem dla jednakowych prędkości jazdy dla lokomotyw Ld 31 i Ld 30 w układach sterowania impulsowego bez i z diodą bocznikującą twornik.



Rys. 10. Porównanie przebiegów prądu silnika (i_s) w układzie hamowania bez diody bocznikującej twornik, dla jednakowej prędkości lokomotyw – 3,15 km/h: a) przebiegi dla lokomotywy Ld 31; b) przebiegi dla lokomotywy Ld 30

Fig. 10. Comparison of waveforms of motor current (i_s) in the braking system without the diode shunting the armature, at the same speed of locomotives – 3.15 km/h: a – waveforms in case of Ld 31 locomotive, b – waveforms in case of Ld 30 locomotive



Rys. 11. Porównanie przebiegów prądu twornika (i_T) i prądu wzbudzenia (i_w) w układzie hamowania z diodą bocznikującą twornik, dla jednakowej prędkości lokomotyw – 3,15 km/h: a) przebiegi dla lokomotywy Ld 31; b) przebiegi dla lokomotywy Ld 30

Fig. 11. Comparison of waveforms of armature current (i_T) and field current (i_w) in the braking system with the diode shunting the armature, at the same speed of locomotives – 3.15 km/h: a – waveforms in case of Ld 31 locomotive, b – waveforms in case of Ld 30 locomotive

Literatura

- [1] Dudek R., Żuchowicz M., *Układ sterowania elektrycznej lokomotywy kopalnianej z inteligentnymi modułami mocy*, Materiały XII Ogólnopolskiej Konferencji Naukowej Trakcji Elektrycznej SEMTRAK 2006, Zakopane, październik 2006.
- [2] Dudek W., Machowski J., *Sieci trakcyjne w górnictwie*, Wydawnictwo „Śląsk”, Katowice 1967.

- [3] Giziński Z., Czapla J., Kowalski J., Szczepiórkowski K., *Energoelektronika w taborze trakcji elektrycznej prądu stałego. Regulacja impulsowa*, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1976
- [4] Miedziński B., Okraszewski Z., Szymański A., Wandzio J., *Badania silników elektrycznych układu napędowego lokomotyw dołowych Ld-30 (Ld-31)*, Górnictwo Odkrywkowe 2003, R. 45 nr 4–5.
- [5] Stobiecki A., Dudek K., *Modelling of DC Series Motor In IsSpice program*, EDPE 2005.
- [6] *3rd generation IGBT and Intelligent Power Module. Application manual*, Mitsubishi Electric, 1995.