CZASOPISMO TECHNICZNE E
WYDAWNICTWO POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

z. 1-E/2007
ISSN 0011-4561
ISSN 1897-6301

ROMAN DUDEK, MAREK ŻUCHOWICZ*

UKŁAD STEROWANIA ELEKTRYCZNEJ LOKOMOTYWY KOPALNIANEJ Z INTELIGENTNYMI MODUŁAMI MOCY

CONTROL SYSTEM WITH INTELLIGENT POWER MODULES FOR ELECTRIC MINE LOCOMOTIVE

Streszczenie

W artykule zaprezentowano układ sterowania elektrycznej przewodowej lokomotywy kopalnianej Ld 30 z przekształtnikami impulsowymi, zrealizowanymi z zastosowaniem inteligentnych modułów mocy IPM. Lokomotywa zasilana jest z sieci trakcyjnej napięciem 250 V DC i napędzana dwoma silnikami szeregowymi o łącznej mocy 83 kW. Istnieje, uzasadniona wartościami parametrów modułów IPM, tendencja do zwiększania częstotliwości pracy przekształtników impulsowych, co pozwala na obniżenie wagi, wymiarów i kosztu elementów filtru wejściowego LC. Przedstawiono zagadnienie konieczności uwzględnienia przy doborze parametrów filtru wejściowego awaryjnych stanów pracy, wynikających ze zwarć i przepięć w obwodzie silników napędowych lokomotywy lub w obwodzie przekształtnika. Zaprezentowano wyniki badań symulacyjnych i laboratoryjnych. Szczególną uwagę zwrócono na zabezpieczenie baterii kondensatorów filtru przed przepięciami w stanie hamowania dynamicznego przy przerwie w obwodzie rezystora hamowania. Do badań laboratoryjnych wykorzystano silniki trakcyjne przewodowych lokomotyw kopalnianych Ld 31 o mocy 45 kW i Ld 21 o mocy 32,1 kW.

Słowa kluczowe: napęd trakcyjny, układ sterowania impulsowego, filtr wejściowy

Abstract

The control system with pulse-mode converters built using intelligent power modules IPM for the electric trolley mine locomotive type Ld 30 is presented in this paper. The locomotive is supplied with 250 V DC traction network and is driven by two series motors with total power of 83 kW. The values of parameters of IPM modules give the reasons for tendency to increase the operating frequency of the pulse-mode converters what makes decreasing of weight, dimensions and elements' cost of the LC input filter possible. The problem of necessity to take into consideration, at selection of parameters of the input filter, the fault operating states resulting from short-circuits and overvoltages in the circuits of the locomotive's motors and in the circuits of power electronic converters is discussed in the paper. Results of simulations and laboratory tests are also presented. Specific attention is paid to the protection of the capacitor of the input filter against the overvoltages in dynamic braking mode at the gap in the braking resistor circuit. The traction motors with rated power of 45 kW and 31,2 kW used in trolley mine locomotives type Ld 31 and Ld 21 respectively were applied during laboratory tests.

Keywords: traction drive, pulse-mode control system, input filter

* Dr inż. Roman Dudek, dr inż. Marek Żuchowicz, Katedra Automatyki Napędu i Urządzeń Przemysłowych, Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

1. Wstęp

Przekształtniki prądu stałego należą do grupy tych układów energoelektronicznych, których struktura obwodów oraz zasady sterowania uległy zmianom z chwilą pojawienia się na rynku w pełni sterowalnych przyrządów półprzewodnikowych dużych mocy.

W przekształtnikach dedykowanych układom napędowym o mocach poniżej 1 MW szczególną pozycję, ze względu na swoje uniwersalne własności, zajmuje tranzystor bipolarny z izolowaną bramką IGBT. Jest on stosowany jako samodzielny element lub jako podstawowy element obwodu głównego inteligentnego modułu mocy IPM. Moduł IPM tworzą – umieszczone w jednej monolitycznej obudowie – tranzystor IGBT wraz z diodą zwrotną oraz układami sterowania, zabezpieczeń i sygnalizacji. W przypadku elementów IPM o mniejszych mocach, w jednym module zabudowanych jest kilka tranzystorów IGBT z kompletem zabezpieczeń.

Przez wiele lat w przekształtnikach impulsowych prądu stałego używano tyrystorów typu SCR. Przykładem mogą tu być – opracowane w Katedrze Automatyki Napędu i Urządzeń Przemysłowych (KANiUP) AGH, produkowane do dziś przez Zakład Urządzeń Elektrycznych ELSTA – układy TUSDELK, stosowane w kopalnianych elektrycznych lokomotywach przewodowych [1].

Stosowanie w przekształtnikach impulsowych modułów IPM pozwala, poprzez wyeliminowanie obwodów komutacyjnych niezbędnych w przypadku tyrystorów SCR, na budowę przekształtników o uproszczonej strukturze oraz zasadzie sterowania. Maleją gabaryty przekształtnika, a jego praca staje się praktycznie bezgłośna.

Często jednak nie jest możliwa bezpośrednia podmiana w strukturze przekształtnika modułu IPM za tyrystor SCR. Jednym z powodów jest na przykład znacznie mniejsza przeciążalność prądowa modułu IPM w stosunku do tyrystora SCR.

2. Tranzystorowy układ sterowania zmodernizowanej lokomotywy Ld 30

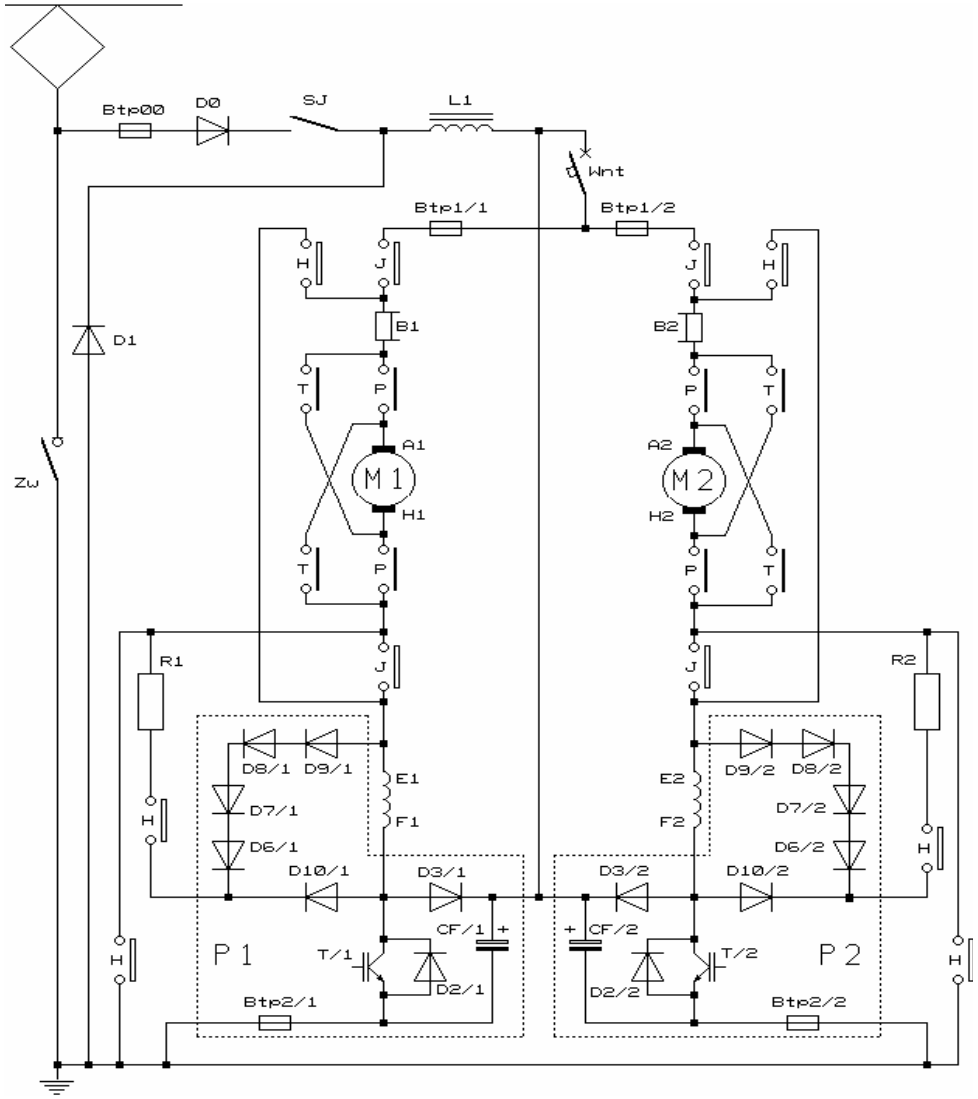
Kopalniana lokomotywa typu Ld 30 napędzana jest dwoma silnikami szeregowymi prądu stałego typu LD 055 o mocy 41,5 kW każdy. Lokomotywa zasilana jest z sieci trakcyjnej napięciem stałym 250 V. Rozruch i regulacja prędkości odbywają się poprzez zmianę wartości oporności w obwodzie silników z możliwością zmiany połączenia silników z szeregowego na równoległe.

W KANiUP AGH opracowano dla lokomotyw Ld 30 układ sterowania z przekształtnikiem wykonanym z zastosowaniem modułów IPM. Przekształtnik ten zachowuje eksploatacyjne zalety przekształtników o komutacji szeregowej z tyrystorami SCR, używanymi w układach TUSDELK (stosowanymi również do modernizacji lokomotyw Ld 30), a więc zapewnia:

- szeroki zakres regulacji napięcia wyjściowego niezależnie od parametrów i własności obciążenia, przy czym dolna granica tego zakresu może być dowolnie mała,
- możliwość pracy w charakterze łącznika statycznego,
- kształt napięcia wyjściowego w formie ciągu impulsów prostokątnych, których amplituda nie przekracza wartości napięcia zasilania.

Schemat obwodu głównego zmodernizowanej lokomotywy Ld 30 z modułami IPM przedstawiono na ryc. 1.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ



Ryc. 1. Schemat obwodu głównego lokomotywy Ld 30 z modułami IPM

Fig. 1. Main circuit diagram of the locomotive type Ld 30 with IPM module

Zastosowany w układzie sterowania przekształtnik składa się z dwóch modułów (P1, P2 – ryc. 1) o jednakowej strukturze układu i geometrii. Moduł oprócz elementów półprzewodnikowych zawiera gałęzie wspomagania komutacji (niewidoczne na schemacie), bezpiecznik szybki Btp2 i baterię kondensatorów filtru sieciowego CF.

Wybór kierunku jazdy lokomotywy dokonywany jest za pomocą styków P lub T nawrotnika, wybór stanu jazdy albo hamowania umożliwiają styki J i H walca głównego i hamulcowego nastawnika. Możliwa jest praca obu silników lub tylko jednego.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Energia z sieci trakcyjnej dostarczana jest do silników M1 i M2 oraz do kondensatorów filtru CF poprzez diodę D0, styk główny stycznika jazdy SJ oraz dławik filtru L1. Styk stycznika jazdy SJ jest otwierany w stanie hamowania i uniemożliwia hamowanie odzyskowe napędu. Również dioda D0 uniemożliwia przekazywanie energii do sieci trakcyjnej np. z kondensatora filtru CF.

Rozruch i regulację prędkości silników realizuje się przez zmianę średniej wartości napięcia podawanego na silniki za pomocą tranzystorów T/1 i T/2, pracujących ze stałą częstotliwością impulsowania równą 200 Hz. Przy czym impulsy bramkowe tranzystorów, a w konsekwencji także przebiegi wielkości elektrycznych obu silników są przesunięte względem siebie o połowę okresu. Zatem częstotliwość składowych zmiennych przebiegów prądu i napięcia filtru wejściowego oraz sieci trakcyjnej wynosi 400 Hz.

W omawianym układzie sterowania przekształtnika wielkością zadawaną dla stanu jazdy jest prędkość lokomotywy. Tak więc czas przewodzenia tranzystorów T/1 i T/2 zależy nie tylko od wartości zadanej prędkości, ale zależy także od sygnałów wypracowanych przez blok automatycznej regulacji prądu silników i blok sterowania lokomotywą podczas przejazdu przez przerwy sekcyjne w sieci trakcyjnej.

Przejście od stanu jazdy do stanu hamowania dynamicznego (otwarcie styków J, zamknięcie styków H) odbywa się w stanie bezprądowym obwodu głównego. Przy prędkościach poniżej charakterystyki naturalnej siła hamowania regulowana jest przez zmianę prądów silników za pomocą tranzystorów T/1 i T/2, pracujących w charakterze modulatorów rezystancji R1 i R2. Dla dużych prędkości uaktywnia się układ samoczynnego osłabiania pola zrealizowany na diodach D6–D10.

3. Pewne aspekty doboru parametrów filtru sieciowego

Parametry tyrystorów typu SCR oraz obwodów zapewniających ich prawidłową komutację sprawiały, że wykorzystujące je przekształtniki impulsowe prądu stałego pracowały z częstotliwością zwykle nieprzekraczającą kilkuset herców.

Tranzystory IGBT oraz moduły IPM pozwalają na pracę przekształtników ze znacznie wyższymi częstotliwościami. Zastosowane w przekształtniku lokomotywy Ld 30 moduły IPM typu PM300DSA060 (I_C = 300 A, U_{CES} = 600 V) mogą pracować z częstotliwością $f_{\max}$ = 20 kHz.

Stosowane w pojazdach trakcyjnych filtry wejściowe mają ograniczać negatywne skutki przepływu impulsowego prądu przekształtnika przez sieć trakcyjną (tętnienia prądu, straty mocy, zakłócenia radioelektryczne) oraz zapewnić stabilne warunki zasilania przekształtnika. Zwiększenie częstotliwości impulsowania przekształtnika, przy zachowaniu wartości tętnień prądu i napięcia w ustalonych stanach pracy, umożliwia zmniejszenie wartości pojemności C i indukcyjności L elementów filtru. W przypadku najprostszego, zwykle używanego, dolnoprzepustowego filtru biernego (LC) typu Γ stosuje się zależności [2, 6]

$$C \approx \frac{I_{\max}}{8 f \Delta U_{C\max}} \tag{1}$$

$$L \approx \frac{\Delta U_{C\max}}{8 f \Delta I_{L\max}} \tag{2}$$

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

gdzie:

f – częstotliwość impulsowania przekształtnika,
$\Delta U_{C\max}$ – dopuszczalne wahania napięcia kondensatora filtru,
$\Delta I_{L\max}$ – dopuszczalne wahania prądu dławika filtru,
$I_{\max}$ – maksymalna wartość prądu odbiornika.

Biorąc pod uwagę, iż koszt filtru stanowi istotną część kosztu przekształtnika, dążenie do zwiększenia częstotliwości impulsowania wydaje się uzasadnione. Jednak, w przypadku pojazdów trakcyjnych, nie jest dopuszczalne znaczne zmniejszanie pojemności kondensatora filtru wraz ze wzrostem częstotliwości pracy przekształtnika – tak jak to wskazuje wzór (1). Świadczy o tym analiza warunków stabilnej pracy trakcyjnych układów napędowych w stanach nieustalonych, których źródłem jest zmiana obciążenia układu napędowego lokomotywy, zmiana parametrów sieci trakcyjnej (indukcyjność i rezystancja), przerwy sekcyjne, spadki napięcia, praca innych lokomotyw [3, 4].

W stacjach prostownikowych, zasilających kopalnianą trakcję elektryczną, stosowane są zabezpieczenia różniczkujące, powodujące wyłączenie stacji przy nadmiernej szybkości wzrostu prądu. Tak więc przy doborze indukcyjności dławika filtru – niezależnie od przyjętej częstotliwości impulsowania przekształtnika – musi być uwzględniona dopuszczalna szybkość narastania prądu stacji prostownikowej. W przypadkach niższego napięcia na kondensatorze filtru – w stosunku do napięcia zasilającego (pierwsze załączenie lokomotywy pod napięcie, przejazd przez przerwę sekcyjną) – indukcyjność dławika filtru ogranicza stromość narastania prądu sieci, szczególnie w bliskiej odległości lokomotywy od stacji zasilającej.

Przeciwko znacznemu zwiększaniu częstotliwości pracy przekształtnika przemawia także hałas, jaki jest wywoływany przepływem prądu impulsowego w obwodach głównych lokomotywy, zwłaszcza przez uzwojenia silników [5]. Hałas ten maleje przy wzroście częstotliwości do około 1 kHz, by następnie rosnąć wraz z częstotliwością. Dla częstotliwości powyżej 1 kHz zmienia się też, niekorzystnie dla organizmu ludzkiego, widmo hałasu.

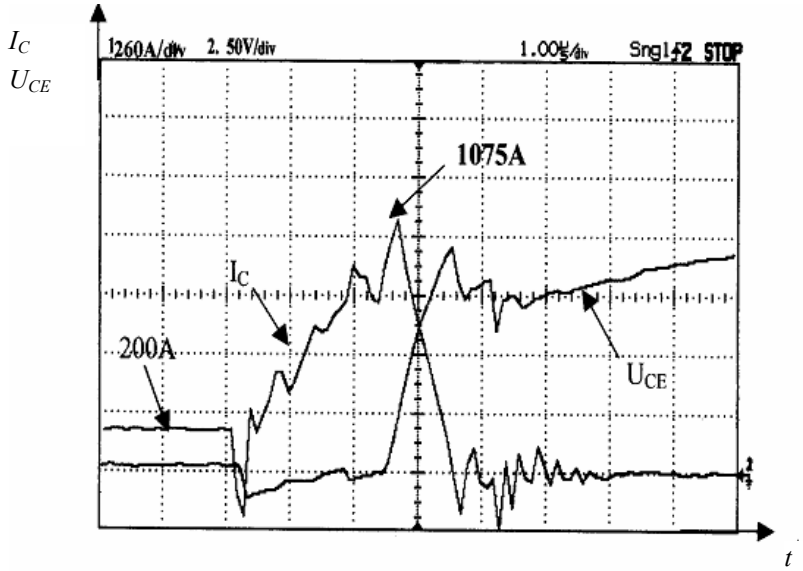
Przy określaniu parametrów filtru, głównie pojemności kondensatora, konieczne jest uwzględnienie stanów awaryjnych – zwarć (znacznych przetężeń) w obwodach lokomotywy, skutkujących zadziałaniem zabezpieczeń nadmiarowych. W przypadku zwarć, mających miejsce w obwodach silników napędowych (ryc. 1), możliwe są dwie sytuacje:

– prąd przepływający przez tranzystor modułu IPM zostanie przerwany w wyniku zadziałania zabezpieczenia przeciążeniowego OC (*Over Current*) lub zwarciowego SC (*Short Circuit*) modułu IPM,
– przepływ prądu zamykającego się poza tranzystorem spowoduje zadziałanie trakcyjnego wyzwalacza zapadkowego TWZ (Wnt – ryc. 1). Z praktyki wynika, że w przypadku szeregowego połączenia wyzwalacza i topikowego bezpiecznika szybkiego, z reguły, prąd jest przerywany wyzwalaczem.

Przebieg wyłączenia prądu zwarciowego w wyniku zadziałania zabezpieczenia SC modułu IPM przedstawiono na ryc. 2. Oscylogram uzyskano na stanowisku laboratoryjnym podczas zwarcia stycznikiem próżniowym SV-5 obwodu silnika typu Lda 280 (silnik o mocy 32,1 kW i prądzie znamionowym 150 A stosowany w lokomotywach Ld 21), przy przepływie prądu o wartości 200 A. Jako półprzewodnikowego łącznika użyto modułu IPM typu PM200DSA060 (I_C = 200 A, U_{CES} = 600 V). W czasie przepływu prądu zwarciowego rzędu kilku mikrosekund ani prąd sieci trakcyjnej i dławika filtru, ani napięcie na kondensatorze filtru praktycznie nie zmienią swych wartości. Po natychmiastowym przerwaniu

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

prądu silnika, kondensator filtru zostanie zatem doładowany energią, której wartość wynika z wartości prądu dławika filtru przed wystąpieniem zwarcia.



Ryc. 2. Przebiegi prądu (I_C) i napięcia (U_{CE}) tranzystora w stanie zwarcia

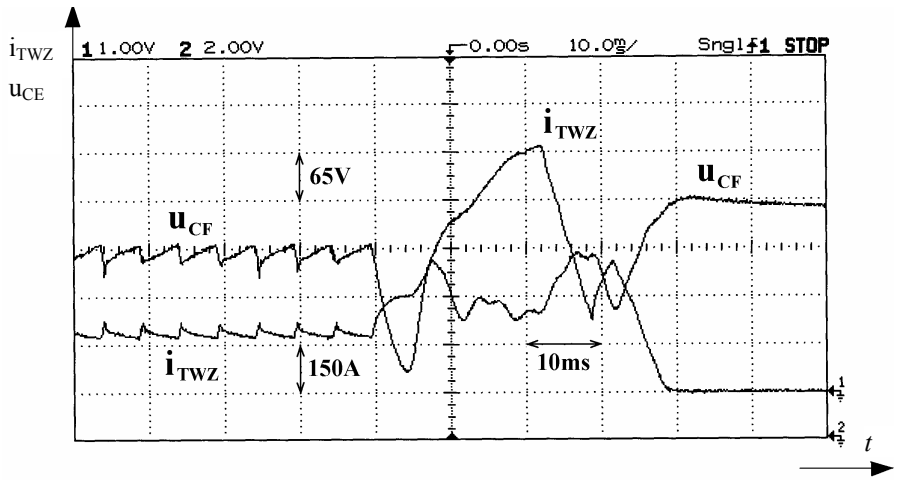
Fig. 2. Waveforms of transistor current (I_C) and voltage (U_{CE}) at short-circuit

Drugą możliwość, czyli zwarcie wyłączane wyzwalaczem TWZ, zilustrowano na ryc. 3. Oscylogram przedstawiający przebiegi prądu wyzwalacza i napięcia na kondensatorze filtru uzyskano podczas badań laboratoryjnych prowadzonych na stanowisku z silnikiem trakcyjnym LDa 327a (silnik stosowany w lokomotywach Ld 31). Silniki LD 055 i LDa 327a charakteryzuje podobna moc (41,5 kW i 45 kW) oraz prąd znamionowy (185 A i 205 A), a zatem również parametry filtrów sieciowych lokomotyw Ld 30 i Ld 31 z przekształtnikami impulsowymi niewiele się różnią. Zastosowany do badań filtr wejściowy typu Γ miał indukcyjność 2 mH i pojemność 10 mF. W momencie zainicjowania zwarcia – przy zerowej prędkości silnika – średnia wartość prądu wynosiła 190 A, a napięcia na kondensatorach filtru 250 V. Nastawa prądu zadziałania wyzwalacza była na poziomie 400 A. Deklarowany przez producenta czas wyłączenia prądu zwarciowego, dla wyzwalacza TWZ-3, wynosi 25 ms. Zbliżoną wartość można odczytać z ryc. 3.

Wykorzystując program IsSpice symulacji zjawisk w obwodach elektrycznych, przeanalizowano wpływ odległości pojazdu trakcyjnego (lokomotywa Ld 30) od źródła napięcia zasilania (stacja APSP) na maksymalną wartość napięcia kondensatora filtru w przypadku zaistnienia zwarcia skutkującego zadziałaniem wyzwalacza trakcyjnego. Wyniki przeprowadzonych symulacji wskazują, że decydujący wpływ na uzyskiwane wartości napięcia kondensatora filtru mają:

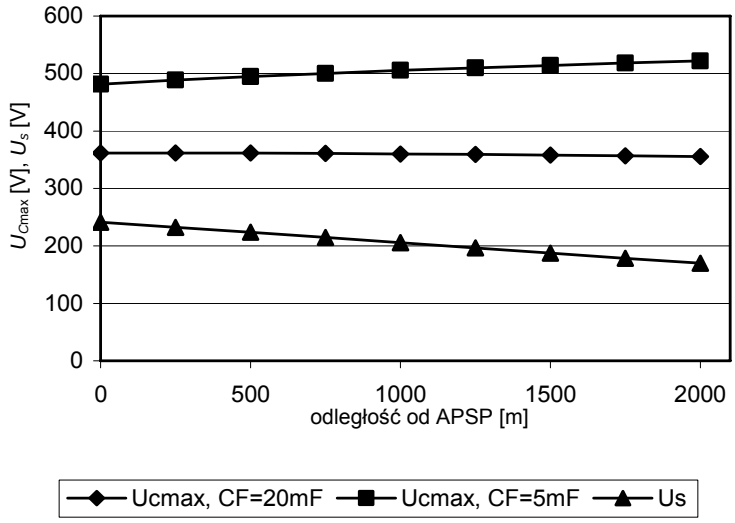
– wartość prądu w momencie zaistnienia zwarcia,
– pojemność i indukcyjność filtru,
– indukcyjność i rezystancja sieci trakcyjnej (z uwzględnieniem parametrów źródła napięcia).

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ



Ryc. 3. Przebiegi prądu wyzwalacza TWZ i napięcia na kondensatorach filtru w stanie zwarcia

Fig. 3. Waveforms of the TWZ (electromagnetic) trip current and voltage across filter capacitors at short-circuit



Ryc. 4. Wpływ odległości lokomotywy od stacji zasilającej APSP na wartość napięcia na kondensatorze filtru przed zwarciem (U_s) i po zwarciu (U_{Cmax}) wyłączanym wyzwalaczem TWZ

Fig. 4. Influence of distance between the locomotive and the APSP supply station on voltage value across filter capacitors before short-circuit (U_s) and after short-circuit (U_{Cmax})

Tętniący charakter napięcia źródła (stacja APSP wyposażona jest w trójfazowy prostownik w układzie mostka) oraz parametry silników pojazdu trakcyjnego mają drugorzędne znaczenie. Obliczenia prowadzono dla dwóch różnych pojemności kondensatora filtru: 20 mF (pojemność kondensatorów filtru lokomotywy Ld 30) i 5 mF. Na rycinie 4

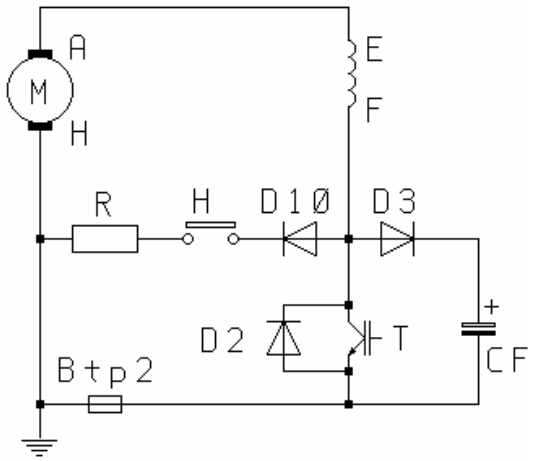
BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

przedstawiono wyniki symulacji dla: prądu o wartości początkowej 2×185 A = 370 A, indukcyjności dławika filtru 2 mH i linii dwutorowej (Djp 120, szyny 115/24,4) o rezystancji 97 mΩ/km i indukcyjności 1 mH/km.

Wyniki symulacji wskazują, że w przypadku filtru o pojemności 5 mF zwarcie, nawet w pobliżu stacji zasilającej, powoduje wzrost napięcia kondensatora $U_{C\max}$ powyżej 450 V, czyli do wartości niebezpiecznych (w prezentowanym przekształtniku lokomotywy Ld 30 stosowane są kondensatory elektrolityczne o napięciu znamionowym 450 V). W przypadku pojemności filtru 20 mF, pomimo wzrostu odległości lokomotywy od stacji zasilającej, uzyskiwane wartości napięcia na kondensatorze filtru $U_{C\max}$ praktycznie nie zmieniają się, choć rośnie indukcyjność sieci. Jest to skutek narastającego, wraz ze wzrostem odległości, spadku napięcia na rezystancji sieci. Ilustruje to trzecia z charakterystyk na ryc. 4 – zależność napięcia sieci trakcyjnej U_s w funkcji odległości od stacji APSP (przy prądzie 370 A).

4. Stany awaryjne

Wśród możliwych do wystąpienia stanów awaryjnych obwodu głównego lokomotywy jest również uszkodzenie obwodu hamowania jednego z silników. Przeanalizowano przypadek polegający na zaistnieniu przerwy w obwodzie hamowania (nie zamknięcie się styku nastawnika, pęknięcie rezystora hamowania). Uproszczony schemat obwodów silnika w stanie hamowania dynamicznego przedstawiono na ryc. 5. Przy przełączeniu silnika do hamowania zamykane są 3 styki – na ryc. 1 są one oznaczone literą *H*. Rozważany przypadek dotyczy tylko wystąpienia przerwy w gałęzi rezystora hamowania *R*, dlatego też na ryc. 5 uwzględniono tylko styk połączony szeregowo, bezpośrednio z rezystorem. Niezamknięcie styku połączonego z twornikiem poprzez bocznik pomiaru prądu *B* i styk nawrotnika w ogóle uniemożliwi hamowanie (przy możliwości hamowania drugim silnikiem). Niezamknięcie zaś styku łączącego twornik z masą lokomotywy (ryc. 1) uniemożliwi zwieranie rezystancji hamowania poprzez tranzystor *T*, a pozwoli jedynie na efektywne hamowanie przy dużych prędkościach. Na rycinie 5 pominięto też diody samoczynnego osłabiania pola jako niebiorące udziału w przepływie prądu w sytuacji zaistnienia przerwy w gałęzi rezystora hamowania. Baterie kondensatorów filtru CF1 i CF2 obu modułów są połączone równolegle – stąd kondensator CF na ryc. 5 reprezentuje pojemność całej baterii filtru.

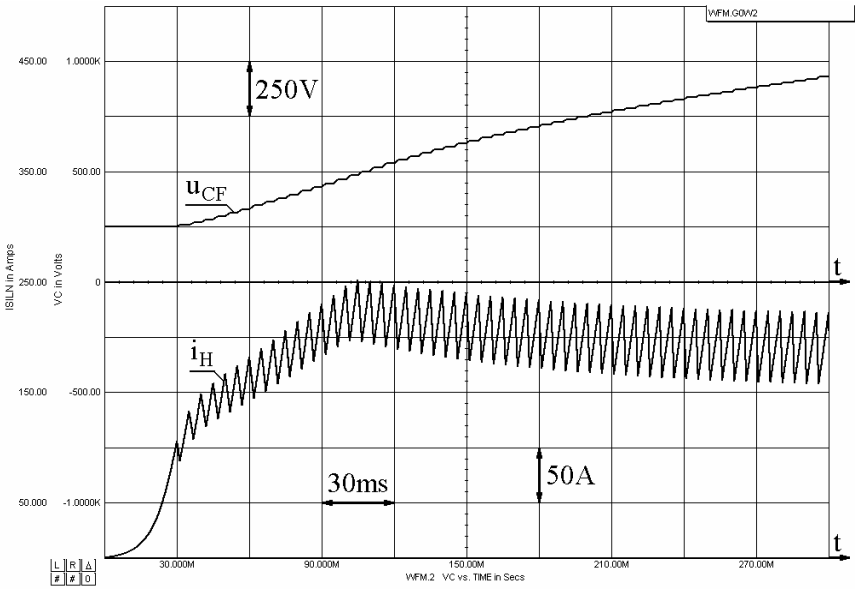


Ryc. 5. Uproszczony schemat obwodów silnika podczas hamowania

Fig. 5. Simplified diagram of motor circuits during the braking mode

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Przeanalizowano dwa przypadki uszkodzeń w gałęzi rezystora hamowania. Pierwszy – ilustrowany przebiegami na ryc. 6 – polega na rozpoczęciu hamowania w sytuacji istniejącej przerwy w gałęzi rezystora. Na rycinie 7 zilustrowano zaś drugi przypadek – sytuację, gdy do przerwy w gałęzi rezystora dochodzi w trakcie hamowania (np. w wyniku rozbryzgu wody na rozgrzaną opornicę). Prezentowane przebiegi prądu silnika podczas hamowania i_H, napięcia na kondensatorze filtru u_{CF} i napięcia sterującego u_T tranzystora uzyskano w wyniku symulacji realizowanych za pomocą programu IsSpice. Do symulacji wykorzystano dane silnika LD 055 oraz przyjęto CF = 20 mF, R = 1,2 Ω. Dla prezentowanych, przykładowych symulacji obu przypadków założono, że hamowanie odbywa się przy prędkości silnika n = 400 obr/min (prędkość znamionowa jednogodzinna wynosi 520 obr/min) oraz że początkowa wartość napięcia na kondensatorze filtru jest równa napięciu zasilania i wynosi 250 V.



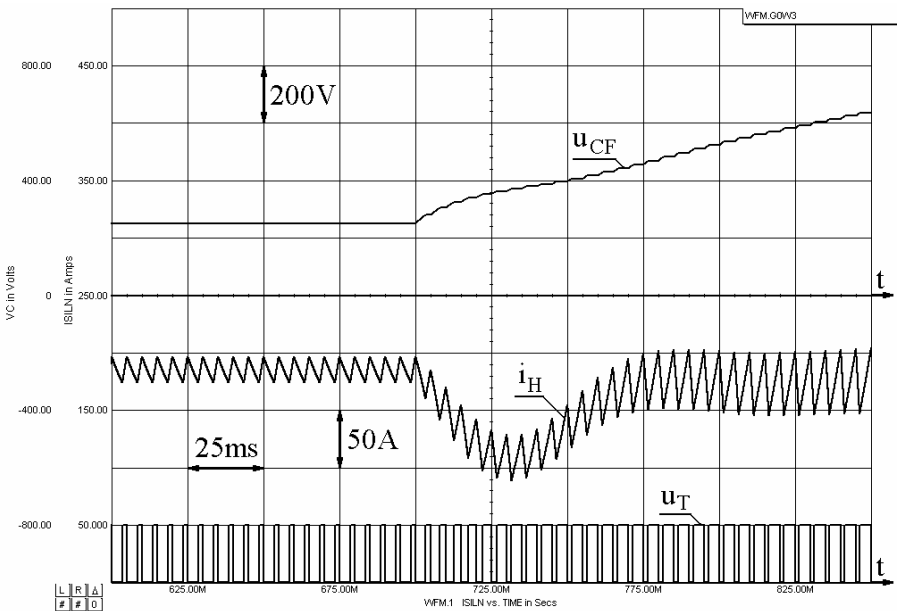
Ryc. 6. Hamowanie przy przerwie w gałęzi rezystora hamowania

Fig. 6. Braking mode at the gap in the braking resistor circuit

Dla drugiego przypadku (ryc. 7) przyjęto nadto, że do uszkodzenia dochodzi, gdy wartość średnia prądu hamowania utrzymuje się na poziomie 185 A (poziom ograniczenia prądowego).

Dla obu przypadków, w przebiegach prądu silnika, widoczne jest stabilizujące działanie układu regulacji prądu. W przypadku wystąpienia przerwy w gałęzi rezystora w trakcie hamowania czas narastania napięcia kondensatora filtru do wartości dopuszczalnych (450 V) wynosi 50 ms dla rozważanych warunków. W przypadku hamowania z istniejącą wcześniej przerwą czas ten jest około dwukrotnie dłuższy. Ponadto szybkość narastania napięcia kondensatora maleje dla mniejszych prędkości i wartości prądu silnika (rozważane, przykładowe warunki odpowiadają hamowaniu lokomotywy z maksymalną siłą), natomiast rośnie dla mniejszych wartości pojemności filtru.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ



Ryc. 7. Przerwanie gałęzi rezystora w trakcie hamowania

Fig. 7. Breaking of the resistor circuit during braking mode

Uzyskane wyniki symulacji wskazują na konieczność kontroli napięcia kondensatorów filtru również w stanie hamowania. Uszkodzenie (przerwa) w gałęzi rezystora hamowania jednego z silników, prowadzące do przekroczenia dopuszczalnej wartości napięcia na kondensatorach, w praktyce, skutkowałoby nie tylko zniszczeniem baterii kondensatorów filtru obu modułów, ale również elementów półprzewodnikowych przekształtnika. Zatem konieczne jest ograniczanie wartości napięcia kondensatora filtru, np. przez blokadę impulsów bramkowych tranzystorów mocy. Zmniejszenie pojemności kondensatora skraca czas dysponowany na realizację tej blokady.

Przedstawione wyniki – w aspekcie rozważań z rozdziału 3 – dowodzą, że przy doborze pojemności kondensatora filtru wejściowego, oprócz znanych kryteriów dotyczących stanów ustalonych oraz kryteriów wynikających z warunków stabilnej pracy, należy również uwzględnić stany awaryjne, np. związane z przerwą w obwodzie hamowania dynamicznego napędu.

Literatura

[1] Dudek R., Kosiorowski S., Żuchowicz M., *Impulsowy układ dwustrefowej regulacji prędkości kątowej silników trakcyjnych lokomotyw kopalnianych*, Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa nr 4–5, Katowice 1992.

[2] *Energoelektronika w taborze trakcji elektrycznej prądu stałego. Regulacja impulsowa*, PWN, Warszawa 1976.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

[3] Karwowski K., Skibicki J., *Wybrane stany przejściowe w trakcyjnym układzie zasilania i ich wpływ na energoelektroniczne pojazdy sieciowe*, Materiały 6 Międzynarodowej Konferencji Naukowej: „Nowoczesna Trakcja Elektryczna w zintegrowanej Europie XXI wieku" MET' 2003, Warszawa, 25–27 września 2003.

[4] Kosiorowski S., Stobiecki A., Żuchowicz M., Dudek R., *Stany przejściowe w filtrach wejściowych przekształtników impulsowych elektrycznych lokomotyw kopalnianych*, Materiały 7 Międzynarodowej Konferencji Naukowej: „Nowoczesna Trakcja Elektryczna w zintegrowanej Europie XXI wieku" MET' 2005, Warszawa, 29 września–1 października 2005.

[5] Kosiorowski S., Żuchowicz M., *Impulsowe zasilanie silników lokomotyw kopalnianych przy podwyższonej częstotliwości*, Materiały X Jubileuszowej Ogólnopolskiej Konferencji Naukowej Trakcji Elektrycznej SEMTRAK 2002, Zakopane–Kościelisko, październik 2002.

[6] Piróg S., *Energoelektronika. Negatywne oddziaływania układów energoelektronicznych na źródła energii i wybrane sposoby ich ograniczenia*, Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków 1998.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ