

ROMAN DUDEK, ANDRZEJ STOBIECKI*

HAMOWANIE DYNAMICZNE SILNIKÓW TRAKCYJNYCH
STEROWANYCH IMPULSOWODYNAMIC BRAKING OF PULSE-MODE CONTROLLED
TRACTION MOTORS

Streszczenie

W polskich kopalniach podziemnych wykorzystywane są lokomotywy elektryczne wyposażone w energoelektroniczne układy sterowania z tyrystorami SCR albo z tranzystorami IGBT. Przekształtniki tranzystorowe są prostsze układowo, mniejsze i tańsze. Zwykle nie jest możliwe bezpośrednie zastąpienie tyrystora tranzystorem w strukturze przekształtnika, a z pracą układu tranzystorowego związane są problemy występujące podczas eksploatacji układu tyrystorowego. Niniejszy artykuł poświęcony jest jednemu z takich problemów. Uruchamiając przewodową lokomotywę górniczą typu Ld 30 z tranzystorowym układem sterowania stwierdzono, że podczas hamowania dynamicznego tego pojazdu napięcie na kondensatorach filtru wejściowego narasta do wartości niebezpiecznych dla elementów układu. W artykule zamieszczono zwięzły opis układu napędowego lokomotywy Ld 30, podano uproszczoną analizę zjawisk powodujących wzrost napięcia kondensatorów filtru oraz zaprezentowano zastosowaną metodę przeciwdziałania temu zjawisku. Przedstawiono także wyniki wybranych badań laboratoryjnych tranzystorowego układu napędowego pracującego w stanie hamowania dynamicznego. Wyjaśniono, dlaczego wzrost napięcia na kondensatorach nie jest obserwowany w przypadku lokomotywy z przekształtnikowym układem tyrystorowym.

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

Abstract

Electric locomotives equipped with the control systems based on both SCR thyristors and IGBT transistors are used in Polish underground mines. Transistor-based converters are less complicated, smaller and cheaper. Direct replacement of the thyristor by the transistor is usually not possible, and there are problems connected with operation of the transistor-based system that do not occur during operation of the thyristor-based systems. This paper is devoted to one of them. It was observed during the tests of the trolley mining locomotive Ld 30 equipped with the transistor-based control system that the voltage across the input filter capacitor increases to the values dangerous for the elements of the control system. The drive system of the Ld 30 locomotive is brief described in the paper, the simplified analysis of phenomena causing the increase of the capacitor voltage is given and the applied method of counteracting this phenomenon is presented. Selected results of the laboratory tests of the transistor-based drive system operating in dynamic braking mode are also shown. It is explained, why increase of voltage across the filter capacitor is not observed in case of the locomotive equipped with the thyristor-based converter system.

Keywords: traction drive, pulse-mode control system, dynamic braking

* Dr inż. Roman Dudek, dr inż. Andrzej Stobiecki, Katedra Automatyki Napędu i Urządzeń Przemysłowych, Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza.

1. Wstęp

Hamowanie dynamiczne silnika szeregowego prądu stałego to praca prądnicowa maszyny z przekazywaniem energii na dołączony rezystor. Stosowane jest zarówno w układach oporowej regulacji prędkości, jak i w napędach przekształtnikowych. Hamowanie dynamiczne jest podstawowym (najczęściej wykonywanym) hamowaniem w elektrycznych lokomotywach kopalnianych wyposażonych w silniki szeregowo.

Opracowane w Katedrze Automatyki Napędu i Urządzeń Przemysłowych Akademii Górniczo-Hutniczej tyrystorowe układy sterowania TUSDELK były wykorzystywane do modernizacji krajowych lokomotyw dołowych Ld 31, Ld 21 i starszego typu Ld 30. W 2006 r. w Zakładach Górniczych „Polkowice-Sieroszowice” oddano do użytku lokomotywę Ld 30 wyposażoną w układ TUSDELK z tranzystorowym przekształtnikiem impulsowym z modułami IPM.

Wykorzystanie w przekształtnikach modułów IPM ma wiele zalet [3], m.in. pozwala na wyeliminowanie obwodów komutacyjnych niezbędnych w przypadku tyrystorów typu SCR. Zwykle nie jest jednak możliwa prosta podmiana w strukturze przekształtnika tranzystora IGBT – podstawowego elementu modułu IPM, za tyrystor główny SCR.

Podczas hamowania dynamicznego, w czasie wyłączenia łącznika głównego (tyrystor SCR, tranzystor IGBT) i bezpośrednio po, dochodzi do doładowania kondensatorów filtra wejściowego przekształtnika. Wzrost napięcia jest źródłem potencjalnego zagrożenia zarówno dla samych kondensatorów, jak i elementów półprzewodnikowych.

W niniejszym artykule przedstawiono opis zjawiska doładowywania kondensatorów filtra w trakcie hamowania oraz zaprezentowano rozwiązanie zapobiegające jego negatywnym skutkom, przyjęte w lokomotywie Ld 30.

2. Zmodernizowana lokomotywa Ld 30

Kopalniana lokomotywa typu Ld 30 zasilana jest z sieci trakcyjnej napięciem 250 V DC i napędzana dwoma silnikami szeregowymi typu LD 055 o następujących danych znamionowych (D60): $P_N = 41,5$ kW, $I_N = 185$ A, $n_N = 520$ obr/min. Rozruch i regulacja prędkości odbywają się poprzez zmianę rezystancji w obwodzie silników oraz poprzez zmianę połączenia silników z szeregowego na równoległe.

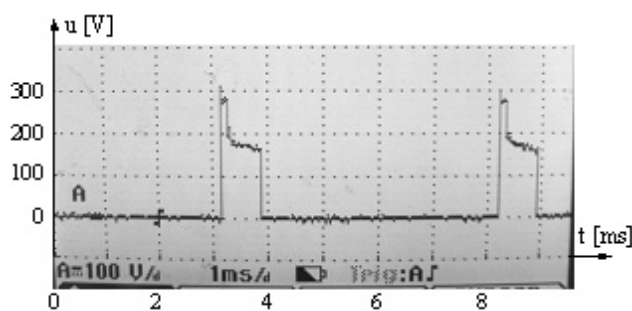
Zastosowany w lokomotywie układ sterowania TUSDELK, z przekształtnikiem impulsowym wykorzystującym dwa moduły IPM typu PM300DSA060, umożliwia realizację podstawowych stanów pracy napędu. Rozruch i regulację prędkości silników uzyskuje się poprzez zmianę średniej wartości napięcia podawanego na połączone na stałe równoległe silniki za pomocą tranzystorów, pracujących ze stałą częstotliwością impulsowania równą 200 Hz. Impulsy bramkowe tranzystorów, a w konsekwencji także przebiegi wielkości elektrycznych obu silników, są przesunięte względem siebie o połowę okresu impulsowania, zatem częstotliwość składowych zmiennych przebiegów prądu i napięcia filtra wejściowego oraz sieci trakcyjnej wynosi 400 Hz. Wielkością zadawaną dla stanu jazdy jest prędkość lokomotywy. Siłę hamowania reguluje się poprzez zmianę prądu silników za pomocą tranzystorów pracujących w charakterze modulatorów rezystancji. Zastosowane diody samoczynnego osłabiania wzbudzenia ograniczają – przy dużych prędkościach lokomotywy – maksymalne wartości sił elektromotorycznych silników.

Opis, schemat obwodu głównego oraz sposób realizacji podstawowych stanów pracy zmodernizowanej lokomotywy – oznaczonej jako LdT 30 – przedstawiono w literaturze [3].

3. Próby uruchomieniowe lokomotywy

W czasie prób uruchomieniowych lokomotywy LdT 30 w ZG „Polkowice-Sieroszowice” stwierdzono, że podczas hamowania dynamicznego dochodzi do narastania napięcia na kondensatorach filtru sieciowego. Obserwowano przyrosty rzędu kilkudziesięciu woltów na sekundę. W przeliczeniu był to ułamek wolta na okres impulsowania przekształtnika.

Zarejestrowany w kopalni przebieg napięcia na rezystorze hamowania podczas hamowania dynamicznego pojedynczym silnikiem przedstawiono na oscylogramie zamieszczonym na rys. 1. Bezpośrednio po wyłączeniu tranzystora, przez ponad 100 μ s, napięcie na rezystorze hamowania osiągało wartość około 280 V, by następnie zmaleć do wartości wynikającej z wartości rezystancji (1,2 Ω) i prądu hamowania (\approx 150 A). Podwyższone w początkowym okresie napięcie odpowiadało napięciu na kondensatorach filtru. Narastające podczas hamowania napięcie na kondensatorach stanowiło zagrożenie dla samych kondensatorów, jak i dla modułów IPM.



Rys. 1. Przebieg napięcia na rezystorze hamowania przy hamowaniu z użyciem jednego silnika

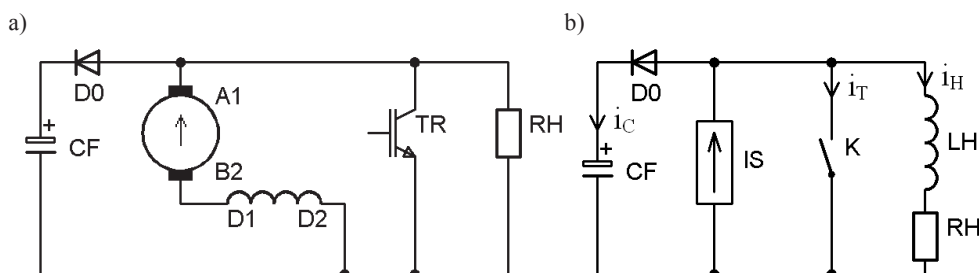
Fig. 1. Waveform of voltage across the braking resistor at braking using single motor

4. Narastanie napięcia na kondensatorach filtru – analiza zjawiska

Uproszczony schemat obwodu pojedynczego silnika dla stanu hamowania dynamicznego przedstawiono na rys. 2a. Obwód silnika bocznikowany jest rezystorem hamowania RH i zwierającym go tranzystorem TR oraz gałęzią kondensatora filtru CF z diodą zerową D0. Analiza schematu, przy założeniu, że napięcie na kondensatorze CF ma większą wartość niż wartość iloczynu rezystancji hamowania i chwilowej wartości prądu silnika, nie wskazuje, dlaczego dochodzi do doładowania kondensatora filtru w chwili wyłączenia tranzystora.

W lokomotywie LdT 30 maksymalną, możliwą do zadania, wartość prądu hamowania silnika określono na poziomie wartości znamionowej prądu silnika (185 A). Uwzględniając pulsacje prądu przy częstotliwości impulsowania przekształtnika 200 Hz, można oszacować maksymalną chwilową wartość prądu na poziomie 200 A. Iloczyn wartości maksymalnej prądu i rezystancji hamowania (1,2 Ω) wznosi 240 V. Jest to wartość mniejsza od znamiono-

wej wartości napięcia sieci trakcyjnej 250 V, czyli wartości napięcia na kondensatorach filtru w stanie pracy silnikowej napędu. Sytuacje, w których wartość napięcia na kondensatorach filtru jest mniejsza niż 250 V, nie będą rozważane w niniejszym artykule jako niestanowiące zagrożenia.



Rys. 2. Schemat obwodu silnika dla stanu hamowania dynamicznego: a) uproszczony, b) zastępczy z uwzględnieniem indukcyjności rezystora hamowania

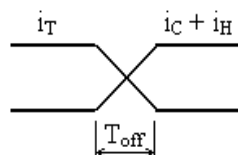
Fig. 2. Diagram of motor circuit in dynamic braking mode: a) simplified, b) equivalent, with inductance of the braking resistor

Zastosowany w lokomotywie LdT 30 rezystor hamowania składa się z 4 połączonych szeregowo jednakowych sekcji, każda o rezystancji $0,3 \Omega$. Sekcje zostały wykonane jako cewki powietrzne. Dla rezystorów o takiej konstrukcji można wyznaczyć indukcyjność, korzystając ze wzorów i nomogramów zamieszczonych w literaturze [6]. Dla rozważanej pojedynczej sekcji indukcyjność oszacowano na $15 \mu\text{H}$. Pomiar dokonany miernikiem indukcyjności MLR-3 potwierdził tę wartość.

Dla potrzeb analizy zjawiska doładowywania kondensatorów filtru w trakcie hamowania dynamicznego przyjęto schemat zastępczy zamieszczony na rys. 2b. Uwzględnia on, oprócz rezystancji hamowania R_{HP} również indukcyjność pasożytniczą L_H rezystora hamowania. Łącznik K reprezentuje tranzystor. Przy rezystancji silnika $0,11 \Omega$ i indukcyjności szacowanej na 10 mH [4] elektromagnetyczną stałą czasową silnika można określić na 91 ms . Biorąc pod uwagę, że czas, w którym dochodzi do ładowania kondensatorów filtru (przy $u_{CF} \geq 250 \text{ V}$) wynosi $100\text{--}200 \mu\text{s}$ (rys. 1), można przyjąć, że w tym czasie wartość prądu silnika I_S pozostaje stała.

4.1. Procesy podczas wyłączenia tranzystora

Do analizy przyjęto, że w czasie T_{off} wyłączenia tranzystora prąd tranzystora maleje liniowo od wartości $i_T = I_S$ do zera. W trakcie wyłączenia prąd silnika I_S jest przejmowany przez kondensatory filtru (prąd i_C) i rezystor hamowania (prąd i_H), czyli $i_S = i_T + i_C + i_H$. Bezpośrednio po wyłączeniu spełniony jest warunek $I_S = i_C + i_H$. Graficznie przedstawiono to na rys. 3.



Rys. 3. Zlinearyzowane przebiegi prądów podczas wyłączania tranzystora

Fig. 3. Linearized waveforms of currents during transistor turn-off

W czasie doładowywania kondensatorów filtru, obejmującym również czas T_{off} , napięcie na rezystorze hamowania jest równe napięciu na kondensatorach (pomijając spadek napięcia na przewodzącej diodzie $D0$).

$$U_{CF} = i_H R_H + L_H \frac{di_H}{dt} \quad (1)$$

Minimalny, w stosunku do wartości napięcia na kondensatorach filtru, jego przyrost w jednym okresie impulsowania (por. rozdz. 2), pozwala na przyjęcie upraszczającego założenia o stałości napięcia na kondensatorach filtru w czasie pojedynczego doładowania. Stąd w zapisie równania (1) $u_{CF} = U_{CF} = \text{const}$. Rozwiązanie równania ma postać

$$i_H = \frac{U_{CF}}{R_H} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_H}} \right) \quad (2)$$

gdzie T_H to stała czasowa rezystora hamowania.

$$T_H = \frac{L_H}{R_H} \quad (3)$$

Korzystając z wzoru (2) można określić wartość prądu rezystora hamowania i_H po czasie wyłączenia tranzystora $t = T_{\text{off}}$. Założono, że w momencie rozpoczęcia wyłączania tranzystora prąd silnika $I_s = 200$ A (wartość znamionowa, z uwzględnieniem pulsacji prądu silnika), napięcie na kondensatorach filtru $U_{CF} = 250$ V (znamionowe napięcie sieci trakcyjnej) oraz $T_{\text{off}} = 2 \mu\text{s}$ [5], $R_H = 1,2 \Omega$, $L_H = 60 \mu\text{H}$. Uzyskany wynik to $i_H(t = T_{\text{off}}) = 8,1$ A. Praktycznie można przyjąć, że podczas wyłączania tranzystora prąd silnika w całości przejmowany jest przez kondensatory filtru.

Wychodząc z założenia o liniowym zmniejszaniu się prądu tranzystora w procesie wyłączenia (rys. 3), można zapisać warunek $\frac{di_T}{dt} = -\frac{I_s}{T_{\text{off}}}$. Pozwala to łatwo oszacować, przy jakim maksymalnym napięciu kondensatorów filtru U_{CFm} proces doładowywania nie będzie już występował. Nastąpi to, gdy w czasie wyłączania tranzystora będzie spełniony warunek $I_s = i_T + i_H$, czyli przy $i_C = 0$. Można więc zapisać

$$U_{CFm} = L_H \frac{I_s}{T_{\text{off}}} + I_s R_H \quad (4)$$

Dla określonych wcześniej danych $U_{CFm} = 6240$ V. W rzeczywistym przekształtniku część energii przejmuje sieć odciążająca tranzystora, a kondensatory filtra bocznikowane są rezystorem rozładowczym, koniecznym ze względu na bezpieczeństwo prac serwisowych (w przypadku lokomotywy LdT 30 jest to rezystor $2,5$ k Ω , przy $C_F = 20$ mF). Uwzględnienie w analizie tych elementów obniżyłoby spodziewaną maksymalną wartość napięcia na kondensatorach filtra, jednak byłaby ona i tak zdecydowanie wyższa od wartości dopuszczalnych (kondensatory filtra typu K01450102 1000 μ F – 450 V, moduł IPM typu PM300D-SA060 – 600 V).

4.2. Doładowanie kondensatorów filtra w czasie pojedynczego cyklu pracy przekształtnika

Dla przebiegu z rys. 1, przy jeszcze dopuszczalnej wartości napięcia na kondensatorach filtra rzędu 280 V, czas doładowania ma wartość poniżej 200 μ s. Wartość czasu t_C , w którym następuje doładowanie kondensatorów filtra jako efekt pojedynczego wyłączenia tranzystora, można wobec tego obliczyć przy upraszczającym założeniu o stałej wartości prądu silnika I_S (stałą czasową silnika określono na 91 ms).

Proces doładowania trwa od momentu rozpoczęcia wyłączania tranzystora do chwili, gdy prąd kondensatorów filtra zmaleje do zera. Dla momentu ukończenia procesu doładowania ($i_C = 0$), korzystając z równania (2), można zapisać

$$I_S = i_H = \frac{U_{CF}}{R_H} \left(1 - e^{-\frac{t_C}{T_H}} \right) \quad (5)$$

Po przekształceniu uzyskuje się wyrażenie na czas doładowywania t_C

$$t_C = -T_H \ln \left(1 - \frac{R_H I_S}{U_{CF}} \right) \quad (6)$$

Dla przyjętych wcześniej wartości T_H i R_H , przy $U_{CF} = 250$ V oraz $I_S = 200$ A otrzymuje się $t_C = 161$ μ s.

Korzystając z warunku: $I_S = i_C + i_H + i_T$, gdzie $i_T = 0$ dla $t \geq T_{\text{off}}$ i równania (2) można zapisać wzór na wartość średnią prądu ładowania kondensatorów filtra I_{Cav} za okres impulsowania $T_i = 5$ ms. Ponieważ bateria kondensatorów filtra jest wspólna dla przekształtników obu silników, a impulsy bramkowe tranzystorów są przesunięte względem siebie o połowę okresu, to proces doładowania następuje dwukrotnie w ciągu okresu impulsowania.

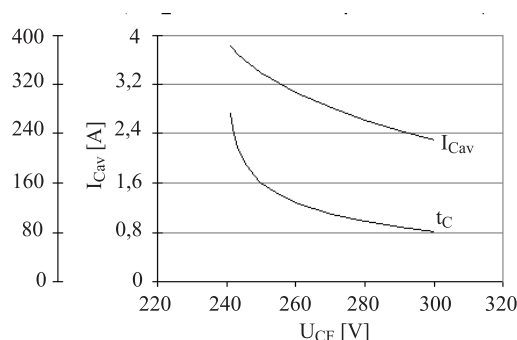
$$I_{Cav} = 2 \left[\frac{1}{T_i} \int_0^{t_C} i_C dt \right] = 2 \left[\frac{1}{T_i} \int_0^{t_C} (I_S - i_H - i_T) dt \right] = \frac{2}{T_i} \left[\int_0^{t_C} \left[I_S - \frac{U_{CF}}{R_H} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_H}} \right) \right] dt - \int_0^{T_{\text{off}}} \left(I_S - \frac{I_S}{T_{\text{off}}} t \right) dt \right] \quad (7)$$

Po wyczeniu z równania (5) wartości wyrazu $e^{-\frac{t_C}{T_H}}$ i po podstawieniu uzyskanego wyrażenia do wzoru na prąd średni I_{Cav} otrzymuje się

$$I_{Cav} = \frac{2}{T_i} \left[I_S \left(t_C + T_H - \frac{T_{\text{off}}}{2} \right) - t_C \frac{U_{CF}}{R_H} \right] \quad (8)$$

Przy wartościach danych jak poprzednio, z uwzględnieniem $t_c = 161 \mu\text{s}$, uzyskuje się $I_{Cav} = 3,38 \text{ A}$. Dla małych wartości czasów wyłączenia T_{off} człon związany z prądem i_T we wzorze (7) można pominąć.

Wzory (6) i (8) wykorzystano do graficznego przedstawienia zależności czasu doładowania kondensatorów filtra t_c i średniej wartości prądu doładowania I_{Cav} od wartości napięcia U_{CF} na kondensatorach (rys. 4).



Rys. 4. Czas doładowania kondensatorów filtra t_c i średnia wartość prądu doładowania I_{Cav} w funkcji wartości napięcia U_{CF} na kondensatorach

Fig. 4. Duration t_c of additional charging of the filter capacitor and average value I_{Cav} of the charging current versus value of voltage U_{CF} across the capacitor

Wzory (6) i (8) można również wykorzystać do obliczenia przyrostów energii ΔE i napięcia na kondensatorach filtra ΔU_{CF} po jednokrotnym wyłączeniu tranzystora, czyli po czasie t_c . Przyjmując, że napięcie na kondensatorach przed wyłączeniem tranzystora było równe U_{CF0} , można zapisać

$$E_0 = C_F \frac{U_{CF0}^2}{2} \quad (9)$$

Po zakończeniu procesu doładowania energia zgromadzona w polu elektrycznym kondensatorów będzie równa

$$E_{0+t_c} = E_0 + \Delta E = E_0 + \int_0^{t_c} p dt = E_0 + \int_0^{t_c} u_C i_C dt \quad (10)$$

Wykorzystując wcześniejsze założenie o znikomo małym przyroście napięcia na kondensatorach za jeden okres impulsowania, można we wzorze (10) przyjąć $u_C = U_{CF0}$, czyli

$$\Delta E = \int_0^{t_c} u_C i_C dt = U_{CF0} \int_0^{t_c} i_C dt \quad (11)$$

Ponieważ

$$I_{Cav} = \frac{2}{T_i} \int_0^{t_c} i_C dt \quad (12)$$

oraz

$$\Delta E = \frac{1}{2} U_{CF0} I_{cav} T_i \quad (13)$$

to w efekcie

$$\Delta E = U_{CF0} \left[I_S \left(t_C + T_H - \frac{T_{off}}{2} \right) - t_C \frac{U_{CF}}{R_H} \right] \quad (14)$$

Dla przyjętych danych: $U_{CF0} = 250$ V, $I_S = 200$ A, $t_C = 161$ μ s, $C_F = 20$ mF, $R_H = 1,2$ Ω , $L_H = 60$ μ H, $T_H = 50$ μ s przyrost energii wynosi $\Delta E = 2,11$ J. Do obliczenia wartości przyrostu napięcia można zastosować wzór

$$E_{0+t_c} = E_0 + \Delta E = C_F \frac{(U_{CF0} + \Delta U_{CF})^2}{2} \quad (15)$$

Dla tych samych danych, co przy obliczaniu ΔE , uzyskuje się $\Delta U_{CF} = 0,42$ V.

Powyższe rozważania wskazują, że choć wartość maksymalnego, możliwego teoretycznie do uzyskania napięcia na kondensatorach filtru zależy, przy danych parametrach rezystora hamowania, od czasu wyłączenia zaworu półprzewodnikowego i wartości wyłączanego prądu silnika, to szybkość narastania napięcia na kondensatorach filtru zależy od wynikowej częstotliwości impulsowania przekształtnika (w przekształtniku lokomotywy LdT 30 jest to 2×200 Hz = 400 Hz). Należy to uwzględnić, rozważając zwiększenie częstotliwości impulsowania w celu zmniejszenia wartości parametrów filtru wejściowego przekształtnika (zmniejszenie pojemności filtru, przy danej częstotliwości, już samo w sobie będzie skutkować szybszym narastaniem napięcia na kondensatorach).

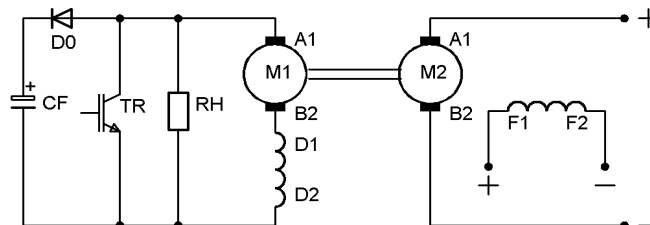
4.3. Badania laboratoryjne

W celu potwierdzenia prowadzonych rozważań przeprowadzono badania laboratoryjne z wykorzystaniem silnika trakcyjnego typu LDa 327a (stosowanego w lokomotywach kopalnianych typu Ld 31) o następujących parametrach znamionowych (D60): $U_N = 250$ V, $P_N = 45$ kW, $I_N = 205$ A, $n_N = 1080$ obr/min, $R_T = 0,038$ Ω , $R_W = 0,0802$ Ω . Schemat stanowiska zamieszczono na rys. 5. Napęd laboratoryjny tworzyła maszyna obcowzbudna (M2) typu MP-41 o mocy 12 kW oraz napędzany przez nią silnik szeregowy (M1) typu LDa 327a, realizujący hamowanie dynamiczne na rezystor RH 1,2 Ω . Funkcję tranzystora TR pełnił moduł inteligentny PM300DSA060, stosowany w przekształtniku lokomotywy LdT 30. Był on impulsowany ze stałą częstotliwością 200 Hz. Bateria kondensatorów filtru CF miała pojemność 20 mF. Stosunkowo mała moc maszyny obcowzbudnej nie zezwalała na pełne obciążenie silnika M1, będącego w stanie pracy prądnicowej.

Na rysunku 6a przedstawiono narastanie napięcia na kondensatorach filtru dla jednokowej wartości prądu wyłączanego silnika $I_S = 80$ A, lecz przy różnych wartościach prędkości i współczynnika wysterowania ε , definiowanego jako

$$\varepsilon = \frac{t_z}{T_i} \quad (16)$$

gdzie t_z to czas przewodzenia tranzystora.

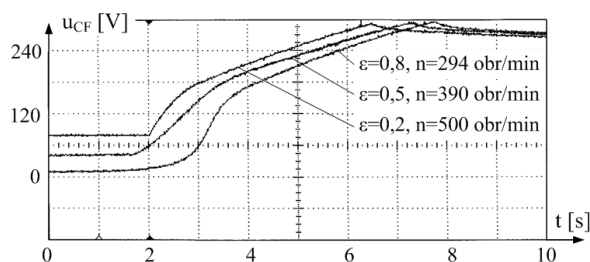


Rys. 5. Schemat układu laboratoryjnego

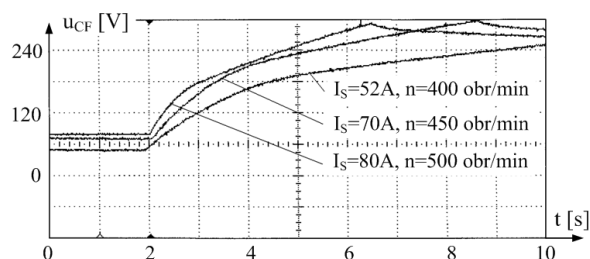
Fig. 5. Diagram of the laboratory system

Dopuszczalna wartość napięcia wykorzystywanych kondensatorów filtra była przyczyną blokowania pracy tranzystora dla napięć powyżej 300 V. Prezentowane przebiegi potwierdzają, że decydujące znaczenie dla szybkości narastania napięcia na kondensatorach filtra, przy określonym łączniku półprzewodnikowym i rezystorze hamowania oraz określonej częstotliwości impulsowania, ma wartość prądu wyłączanego. Dla porównania na rys. 6b zamieszczono przebiegi napięcia kondensatorów filtra uzyskane przy stałej wartości współczynnika wysterowania $\varepsilon = 0,2$.

a)



b)

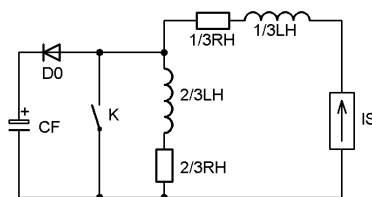
Rys. 6. Przebiegi napięcia na kondensatorach filtra: a) prąd wyłączany $I_S = 80$ A, b) współczynnik wysterowania $\varepsilon = 0,2$ Fig. 6. Waveforms of voltage across the filter capacitor: a) current at turn-off $I_S = 80$ A, b) duty cycle $\varepsilon = 0,2$

5. Przekształtnik tyrystorowy lokomotywy LdT 31

Zjawisko doładowywania kondensatorów filtra przekształtnika podczas hamowania dynamicznego, stanowiące poważne zagrożenie w lokomotywie LdT 30, w przekształtniku lokomotywy LdT 31 z układem TUSDELK jest praktycznie niezauważalne. W niniejszym rozdziale podjęto próbę wyjaśnienia tego faktu.

Kopalniana lokomotywa LdT 31 wyposażona jest w dwa silniki typu LDa 327a, połączone na stałe równolegle. W lokomotywie zabudowano układ sterowania TUSDELK z przekształtnikami tyrystorowymi przeznaczonymi do regulacji wartości średniej napięcia podawanego na silniki i stopnia osłabienia pola magnetycznego (praca ciągła silnika jest możliwa tylko przy osłabionym polu) oraz pracujące jako modulatory rezystancji hamowania [2]. Przekształtniki pracują ze stałą częstotliwością impulsowania 200 Hz, przy przesunięciu impulsów bramkowych tyrystorów o połowę okresu względem siebie. Funkcję łączników głównych pełnią tyrystory SCR typu ST303C10CFK0 o czasie wyłączenia $T_{\text{off}} = 20 \mu\text{s}$ [1].

Do analizy zjawiska doładowywania kondensatorów filtra wykorzystano schemat zastępczy zamieszczony na rys. 7. Zbliżona wartość mocy silników stosowanych w lokomotywach LdT 30 i LdT 31 powoduje, że w obu przypadkach pojemność filtra wejściowego jest jednakowa $C_F = 20 \text{ mF}$. Rezystory hamowania lokomotywy LdT 31 zbudowane są z trzech sekcji (są to sekcje tego samego typu, co w przypadku rezystorów hamowania lokomotywy LdT 30), przy czym tylko dwie sekcje są zwierane łącznikiem tyrystorowym (łącznik K na rys. 7).



Rys. 7. Schemat zastępczy obwodu dla stanu hamowania dynamicznego

Fig. 7. Equivalent diagram of the circuit in dynamic braking mode

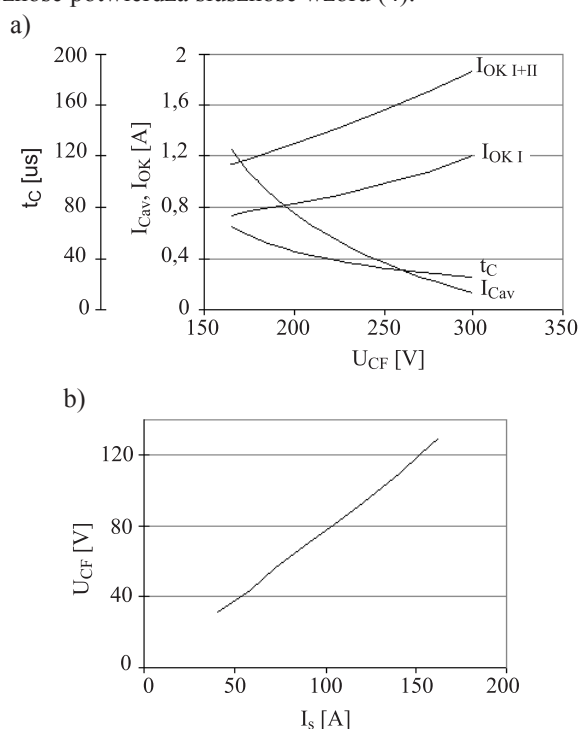
Analizując proces doładowywania kondensatorów filtra wejściowego lokomotywy LdT 31 podtrzymano poczynione wcześniej założenia upraszczające o liniowym przebiegu prądu wyłączenia tyrystora, stałej wartości prądu silnika I_S w czasie doładowywania kondensatorów (wartości elektromagnetycznych stałych czasowych obu omawianych silników są zbliżone) oraz o stałej wartości napięcia na kondensatorach podczas jednego okresu impulsowania. Stosując wzory (2) oraz (4) i wykorzystując zestaw danych: $U_{CF} = 250 \text{ V}$, $I_S = 200 \text{ A}$, $C_F = 20 \text{ mF}$, $T_i = 5 \text{ ms}$, $T_{\text{off}} = 20 \mu\text{s}$, $R_H = 0,9 \Omega$, $L_H = 45 \mu\text{H}$, $T_H = 50 \mu\text{s}$, można dokonać obliczeń następujących wielkości:

- wartość prądu rezystora hamowania na koniec procesu wyłączenia tyrystora $i_H(t = T_{\text{off}}) = 137,4 \text{ A}$.
- maksymalna wartość napięcia na kondensatorach filtra $U_{CFm} = 420 \text{ V}$.

Uzyskana maksymalna wartość napięcia na kondensatorach unaocznia zasadniczy wpływ czasu wyłączenia łącznika T_{off} na przebieg procesu doładowania i jest jeszcze jednym dowodem, że zamiana w strukturze przekształtnika tyrystora SCR na tranzystor IGBT, mając wiele zalet, rodzi również problemy.

Obliczona wartość U_{CFm} , choć rząd wielkości mniejsza niż w przypadku przekształtnika tranzystorowego, także jest nadmierna. W układzie przekształtnika lokomotywy LdT 31 nie są jednak obserwowane tak duże wartości. Wynika to z faktu, że niezbędne do wyłączenia tyrystorów SCR obwody komutacyjne przekształtnika układu TUSDELK (mogą one pracować niezależnie od obwodów obciążenia) czerpią energię z kondensatorów filtru. Na rys. 8a przedstawiono zależności czasu doładowania kondensatorów filtru t_c i wartości średniej prądu doładowania I_{Cav} w funkcji napięcia na kondensatorach filtru U_{CF} . Wykorzystano przy tym wzory (6) i (8). Na tym rysunku przedstawiono również charakterystyki prądu pobieranego przez obwody komutacyjne uzyskane w wyniku pomiarów laboratoryjnych. Wskazują one, że podczas hamowania lokomotywy z niepracującym przekształtnikiem osłabiania pola (realizowana jest tylko modulacja rezystancji hamowania, stan awaryjny) – charakterystyka I_{OKI} , uzyskiwane wartości napięć na kondensatorach filtru będą większe niż przy pracy obu przekształtników – charakterystyka I_{OKI+II} . Charakterystyki ilustrują bardzo dogodną własność z punktu widzenia rozpatrywanego zjawiska – narastanie prądu obwodów komutacyjnych wraz ze wzrostem napięcia na kondensatorach filtru.

Na rysunku 8b zilustrowano zależność napięcia U_{CF} od prądu wyłączanego I_s . Uzyskana laboratoryjnie zależność potwierdza słuszność wzoru (4).



Rys. 8a) czas doładowania kondensatorów filtru t_c , średnia wartość prądu doładowania I_{Cav} i prąd obwodów komutacyjnych w funkcji napięcia na kondensatorach U_{CF} , b) napięcie na kondensatorach U_{CF} w funkcji prądu wyłączanego I_s

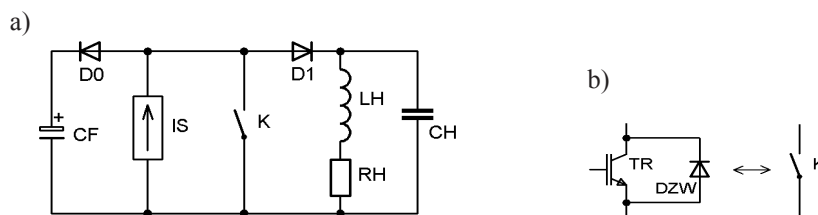
Fig. 8a) duration t_c of additional charging of the filter capacitor, average value I_{Cav} of the charging current and current I_{OK} of the commutation circuits versus voltage U_{CF} across the capacitor; b) voltage U_{CF} across the capacitor versus current I_s at turn-off

Podsumowując, można stwierdzić, że proces doładowywania kondensatorów filtru zachodzi również w układzie przekształtnika lokomotywy LdT 31, jednak skala zjawiska jest zdecydowanie mniejsza.

6. Kondensator bocznikujący rezystor hamowania

Analiza zjawisk w układzie przekształtnika tyrystorowego wskazuje, że najprostszym, a równocześnie skutecznym sposobem ograniczenia doładowywania kondensatorów filtru podczas hamowania dynamicznego lokomotywy wyposażonej w przekształtniki z szybkimi, w pełni sterowanymi łącznikami półprzewodnikowymi jest zastosowanie rezystora bocznikującego kondensatory filtru. Struktura obwodu głównego lokomotywy LdT 30 pozwala na dołączanie rezystora do kondensatorów tylko na czas hamowania. Wzór (8) oraz uzyskana na jego podstawie charakterystyka $I_{cav} = f(U_{CF})$, pokazana na rysunku 4, umożliwiają dobór wartości rezystancji.

W lokomotywie LdT 30 zastosowano jednak rozwiązanie polegające na zbocznikowaniu rezystora hamowania kondensatorem (oznaczanym dalej jako CH) o pojemności 50 μF . Na rys. 9a przedstawiono schemat zastępczy pozwalający na analizę zjawisk zachodzących podczas hamowania dynamicznego w tak zmodyfikowanym obwodzie pojedynczego silnika.



Rys. 9a) schemat zastępczy obwodu z dodatkowym kondensatorem CH,
b) reprezentacja tranzystora łącznikiem

Fig. 9a) equivalent diagram of the circuit with additional capacitor CH;
b) representation of the transistor using a switch

Zarówno kondensatory filtru, jak i kondensator bocznikujący rezystor hamowania mają zdolność przejmowania prądu silnika po wyłączeniu tranzystora, z tym że energia gromadzona w kondensatorze bocznikującym jest każdorazowo oddawana na rezystor w czasie przewodzenia tranzystora. W przypadku kondensatorów filtru nie ma takiej możliwości, co więcej – jak wynika z wzoru (14) – wraz ze wzrostem napięcia na nich, maleje ilość energii przyjmowana po kolejnych wyłączeniach tranzystora. Przy pewnym napięciu na kondensatorach filtru proces ich doładowywania ustaje, a prąd silnika przepływa już tylko przez kondensator bocznikujący i rezystor hamowania. Dla takiego stanu po wyłączeniu tranzystora obowiązują równania

$$I_S = i_H + i_{CH} = i_H + C_H \frac{du_{CH}}{dt} \quad (17)$$

$$u_{CH} = u_H = i_H R_H + L_H \frac{di_H}{dt} \quad (18)$$

Ich przekształcenie prowadzi do równania

$$I_S = i_H + C_H R_H \frac{di_H}{dt} + C_H L_H \frac{d^2 i_H}{dt^2} \quad (19)$$

Dla wartości parametrów $R_H = 1,2 \Omega$, $L_H = 60 \mu\text{H}$ i $C_H = 50 \mu\text{F}$ spełniony jest warunek podany nierównością (20), co sprawia, że przebiegi w rozważanym obwodzie będą miały charakter oscylacyjny.

$$R_H < 2 \sqrt{\frac{L_H}{C_H}} \quad (20)$$

Uzyskane wartości współczynnika tłumienia α (21) i pulsacji własnej ω_0 (22) wskazują, że pomimo oscylacyjnego charakteru – procesy wynikłe z wyłączenia tranzystora już po krótkim czasie ($\frac{1}{2f_0} = 210 \mu\text{s}$) wejdą w fazę quasi-ustaloną. Ilustrują to przebiegi prezentowane na rys. 9a uzyskane w wyniku symulacji (IsSpice), dla warunków początkowych $i_H(0) = 0$, $u_{LH}(0) = L_H \frac{di_H}{dt} = 0$

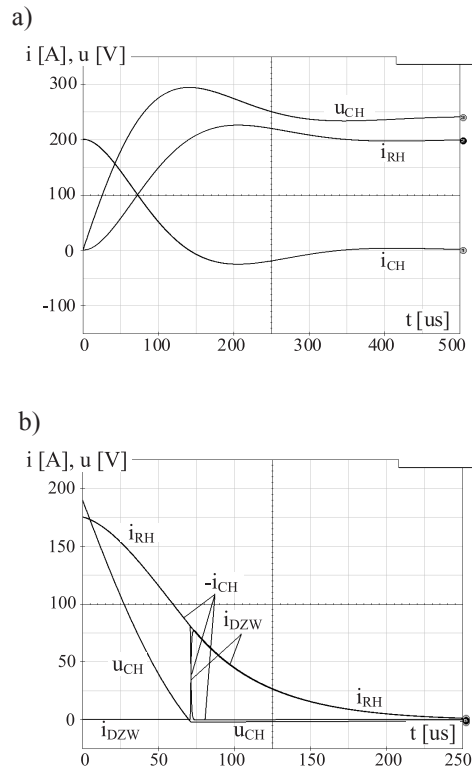
$$\alpha = \frac{R_H}{2L_H} \quad \alpha = 10\,000 \frac{\Omega}{\text{H}} \quad (21)$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{L_H C_H} - \alpha^2} \quad f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = 2,43 \text{ kHz} \quad (22)$$

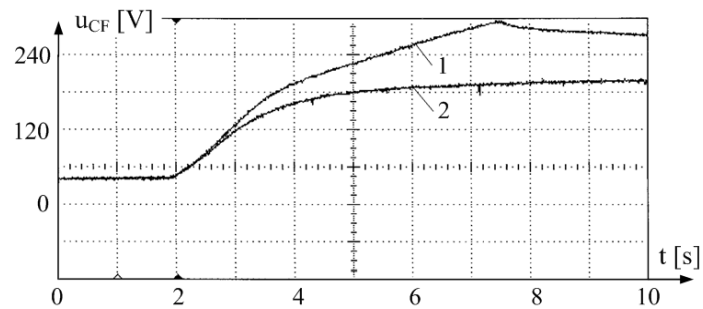
Po załączeniu tranzystora dochodzi do przepływu prądu w obwodzie rezystor hamowania – kondensator bocznikujący. Z chwilą rozładowania energii zgromadzonej w kondensatorze dalszy przepływ prądu rezystora, związany z energią pola magnetycznego części indukcyjnej (LH) rezystora hamowania, kontynuowany jest poprzez diodę zwrotną DZW tranzystora (por. rys. 9b).

Analiza przebiegów z rys. 10b wskazuje, że dla bardzo krótkich czasów przewodzenia tranzystora (poniżej $80 \mu\text{s}$) kondensator CH nie ulegnie całkowitemu rozładowaniu, a więc zmaleje jego zdolność do przyjęcia energii po wyłączeniu tranzystora. Równocześnie jednak, w tak krótkim czasie, prąd rezystora hamowania nie spadnie do zera, co z kolei spowoduje skuteczne ograniczenie zjawiska doładowania kondensatorów filtru.

Skuteczność działania kondensatora bocznikującego rezystor hamowania jako elementu ograniczającego efekt doładowania kondensatorów filtru potwierdzają przebiegi zamieszczone na rys. 11, uzyskane na stanowisku laboratoryjnym opisanym w rozdz. 4.3.



Rys. 10. Przebiegi: a) po wyłączeniu tranzystora, b) po załączeniu tranzystora
 Fig. 10. Waveforms: a) after transistor turn-off, b) after transistor turn-on

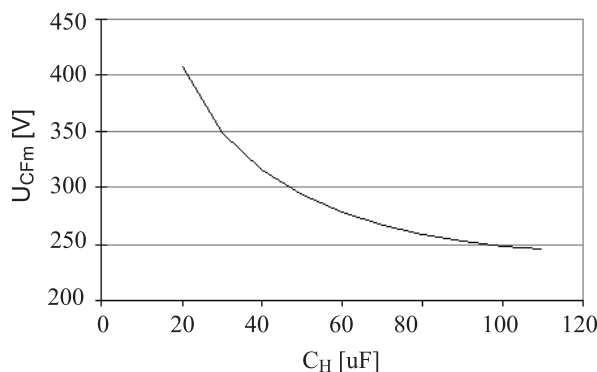


Rys. 11. Przebiegi napięcia na kondensatorach filtru przy $\epsilon = 0,5$, $n = 390$ obr/min, $I_s = 80$ A
 w obwodach: 1) bez kondensatora bocznikującego, 2) z kondensatorem bocznikującym

Fig. 11. Waveforms of voltage across the filter capacitor at $\epsilon = 0,5$, $n = 390$ rpm, $I_s = 80$ A in circuits:
 1) without capacitor CH, 2) with capacitor CH

Uzyskaną w wyniku symulacji zależność maksymalnego napięcia na kondensatorach filtru od pojemności kondensatora bocznikującego rezystor hamowania, przedstawiono na rys. 12.

Zastosowanie kondensatora bocznikującego rezystor hamowania o pojemności $C_H = 50 \mu\text{F}$ pozwala ograniczyć wartość napięcia na kondensatorach filtru do poziomu 300 V, to jest do maksymalnej dopuszczalnej wartości napięcia sieci trakcyjnej.



Rys. 12. Maksymalne napięcie na kondensatorach filtru w funkcji pojemności kondensatora bocznikującego rezystor hamowania dla prądu silnika $I_s = 200 \text{ A}$

Fig. 12. Maximum voltage across the filter capacitor versus capacitance of the capacitor C_H at motor current $I_s = 200 \text{ A}$

Literatura

- [1] DACPOL. *Podzespoły dla elektroniki*, Katalog firmy DACPOL, 1998.
- [2] Dudek R., Kosiorowski S., Żuchowicz M., *Impulsowy układ dwustrefowej regulacji prędkości kątowej silników trakcyjnych lokomotyw dołowych*, Mechanizacja i Automatyza Górnictwa, nr 4–5 (265), 1992, 12-15.
- [3] Dudek R., Żuchowicz M., *Układ sterowania elektrycznej lokomotywy kopalnianej z inteligentnymi modułami mocy*, Materiały XII Ogólnopolskiej Konferencji Naukowej Trakcji Elektrycznej SEMTRAK 2006, Zakopane 2006.
- [4] Dudek W., Machowski J., *Sieci trakcyjne w górnictwie*, Wydawnictwo „Śląsk”, Katowice 1967.
- [5] *Mitsubishi Semiconductors 1996, Power Module MOS*, Wydawnictwo firmy Mitsubishi Electric, 1996.
- [6] Tunia H., Smirnow A., Nowak M., Barlik R., *Układy energoelektroniczne, Obliczanie, modelowanie, projektowanie*, WNT, Warszawa 1982.