

Andrzej Stobiecki, Roman Dudek
AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

WPLYW WARUNKÓW POCZĄTKOWYCH NA STABILNOŚĆ PRZEKSZTAŁTNIKOWYCH NAPĘDÓW TRAKCYJNYCH

INFLUENCE OF INITIAL CONDITIONS ON STABILITY OF CONVERTER- BASED TRACTION DRIVES

Streszczenie: Postęp w dziedzinie projektowania i produkcji w pełni sterowalnych elementów półprzewodnikowych dużej mocy umożliwia zwiększenie częstotliwości pracy przekształtników układów napędowych pojazdów trakcyjnych. Przy zwiększonej częstotliwości pracy i określonych dopuszczalnych wahaniach napięcia i prądu sieci trakcyjnej zmniejszone mogą być pojemność i indukcyjność filtra wejściowego. Znaczne zmniejszenie wartości tych parametrów może być jednak niedopuszczalne, między innymi ze względu na konieczność zapewnienia stabilnej pracy układu napędowego. Stabilność pracy napędu trakcyjnego zależy od parametrów systemu trakcyjnego, takich jak rezystancja i indukcyjność sieci trakcyjnej i filtra, wartość napięcia zasilania, moc napędu i pojemność kondensatora filtra. W układzie nieliniowym także wartości początkowego prądu dławika i napięcia kondensatora filtra wpływają na warunki stabilnej pracy napędu. Na podstawie uproszczonego modelu zastępczego systemu trakcyjnego, obejmującego źródło zasilania, sieć trakcyjną, filtr wejściowy i układ napędowy pojazdu z regulatorami momentu i prędkości zbadano wpływ napięcia początkowego kondensatora i prądu początkowego dławika filtra na warunki stabilnej pracy napędu. Badania wykonano z wykorzystaniem programu Maple, a ich wyniki zweryfikowano modelując analizowany układ w programie IsSpice.

Abstract: Advance in a field of design and production of fully controllable high-power semiconductor devices enables increase of operating frequency of traction vehicle converter-based drive systems. Due to increased operating frequency and at determined allowable fluctuations of voltage and current in a traction network, the capacitance and inductance of an input filter can be significantly decreased. However, the significant change of the parameter values of these elements might be unacceptable, among other things due to necessity to ensure the stable operation of the drive system. Stability of the traction drive operation depends on parameters of the traction system such as resistance and inductance of traction network and input filter, supply voltage value, drive power and capacitance of the input filter capacitor. In a non-linear system, the initial values of input filter capacitor voltage and inductor current can also influence the conditions of the stable drive operation. On the basis of a simplified traction system model, consisting of an energy source, traction network, input filter and pulse-mode controlled drive system with speed and torque controllers, the analysis of influence of initial values of filter capacitor voltage and filter inductor current on conditions of stable drive operation was carried out. Necessary calculations were made using the Maple program and obtained results were verified by modelling the analysed system in IsSpice program.

Słowa kluczowe: *napęd trakcyjny, stabilność, warunki początkowe*
Keywords: *traction drive, stability, initial conditions*

1. Wstęp

W wielu polskich kopalniach węgla, rud metali i soli podziemny transport poziomy jest realizowany elektryczną trakcją przewodową. Pociągi prowadzone są najczęściej lokomotywami Ld21, o mocy godzinnej $P_h = 62$ kW i Ld31 ($P_h = 90$ kW), napędzanymi silnikami szeregowymi prądu stałego. Oba typy lokomotyw były modernizowane z wykorzystaniem energoelektronicznego układu sterowania TUSDELK [4]. Ponieważ modernizacji taboru w kopalniach nie prowadzono kompleksowo, na poszczególnych poziomach zwykle współpracują zmodernizo-

wane i „klasyczne” (z oporowym układem rozruchu i regulacji prędkości) lokomotywy tego samego typu, na przykład Ld31.

Aktualnie w ofercie dla górnictwa znajduje się lokomotywa Ld31 EM, o mocy 120 kW, wyposażona w nowoczesny układ napędowy z silnikami synchronicznymi wzbudzanymi magnesami trwałymi i falownikami napięcia [9].

Każdy energoelektroniczny układ napędowy jest wyposażony w filtr wejściowy LC, którego praca w pewnych warunkach może być niestabilna, co skutkuje pojawieniem się oscylacji

w filtrze i układzie napędowym (na przykład napięcia, prądu, momentu, prędkości) o stosunkowo dużych amplitudach [3, 6, 8].

Na warunki stabilnej pracy trakcyjnego układu napędowego wpływają parametry systemu trakcyjnego, takie jak rezystancja, indukcyjność, wartość napięcia zasilania oraz moc pojazdu [7]. Wartości tych parametrów mogą się zmieniać w szerokim zakresie w wyniku przemieszczania się pojazdu. Ponieważ system trakcyjny jest układem nieliniowym, również napięcie początkowe kondensatora filtru i prąd początkowy dławika filtru mogą wpływać na stabilną pracę układu. Celem artykułu są badania wpływu powyższych warunków początkowych na warunki stabilnej pracy systemu trakcyjnego.

2. Warunki stabilnej pracy systemu trakcyjnego

Analizę warunków stabilnej pracy przeprowadzono dla uproszczonego modelu systemu trakcyjnego, którego schemat przedstawiono na rysunku 1. W modelu uwzględniono źródło zasilające, sieć trakcyjną, filtr wejściowy oraz układ napędowy jednego pojazdu. Źródło napięcia E oraz dioda D reprezentują podstawę zasilającą, opornik R – rezystancję sieci trakcyjnej i dławika filtru wejściowego, dławik L – indukcyjność sieci trakcyjnej i dławika filtru, kondensator C – pojemność kondensatora filtru. Źródło prądu i modeluje napęd pojazdu w ustalonym stanie pracy przy stałym momencie obciążenia i stałej prędkości kątowej, a więc przy stałej mocy P , niezależnie od wartości napięcia na kondensatorze C . Taki model systemu trakcyjnego jest stosunkowo często wykorzystywany do analizy stabilności [2, 3, 6, 10]. Przyjęcie założenia o stałej mocy skutkuje hiperboliczną, a zatem silnie nieliniową, zależnością między napięciem kondensatora filtru, a prądem układu napędowego.

Dla stałych wartości parametrów elementów E , R , L i C oraz pomijając diodę D (dla stanu pracy silnikowej), układ prezentowany na rysunku 1 można opisać autonomicznym równaniem różniczkowym drugiego rzędu:

$$\frac{d^2 u}{dt^2} = \frac{1}{LC} \left[E - \left(RC - \frac{LP}{u^2} \right) \frac{du}{dt} - u - R \frac{P}{u} \right] \quad (1)$$

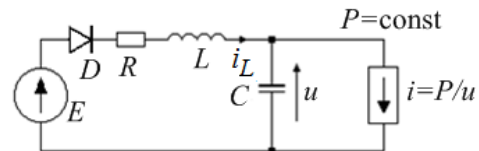
Po zastąpieniu tego równania układem dwóch równań różniczkowych pierwszego rzędu można wyznaczyć punkty równowagi badanego układu, o współrzędnych [7]:

$$u_1 = u_e = \frac{E + \sqrt{E^2 - 4RP}}{2}, \quad i_{L1} = i_{Le} = \frac{P}{u_e} \quad (2)$$

oraz

$$u_2 = \frac{E - \sqrt{E^2 - 4RP}}{2}, \quad i_{L2} = \frac{P}{u_2}. \quad (3)$$

Ze względu na dopuszczalne spadki napięcia w kopalnianej sieci trakcyjnej istotne praktyczne znaczenie ma tylko punkt równowagi u_e , i_{Le} .



Rys. 1. Schemat zastępczy układu

Pośrednia metoda Lapunowa (metoda linearyzacji) umożliwia badanie stabilności układu wokół punktów równowagi. Wykorzystując tę metodę, w pracy [7] określono warunek stabilnej pracy systemu trakcyjnego:

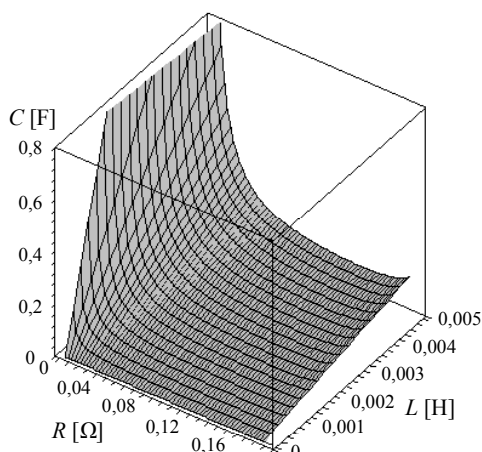
$$C > \frac{2PL}{R(E^2 - 2RP + E\sqrt{E^2 - 4RP})} \quad (4)$$

Wykres zależności $C = f(L, R)$ dla ustalonej wartości mocy napędu $P = 90$ kW i typowego napięcia źródła zasilania kopalnianej sieci trakcyjnej $E = 250$ V pokazano na rysunku 2. Na rysunku 3 przedstawiono przekroje uzyskanej powierzchni dla wybranych wartości indukcyjności systemu trakcyjnego. Analizując krzywe pokazane na rysunku 3 można stwierdzić, że wraz ze wzrostem rezystancji systemu, przy ustalonych pozostałych jego parametrach, minimalna pojemność wymagana do stabilnej pracy najpierw maleje, a następnie rośnie. Wzrost indukcyjności systemu trakcyjnego powoduje wzrost pojemności (rys. 2). Ten wniosek wynika też bezpośrednio z analizy zależności (4).

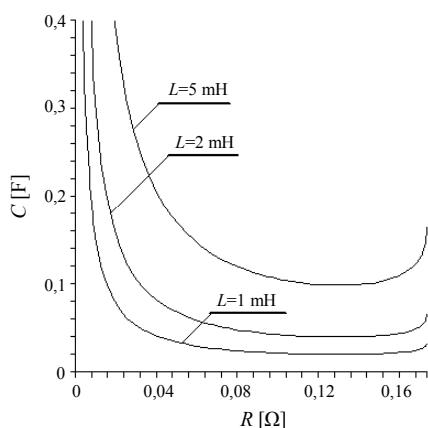
Zbadano także wpływ zmiany napięcia zasilania systemu na stabilność tego systemu. Przebieg zależności $C = f(E, R)$, dla ustalonych wartości mocy $P = 90$ kW i indukcyjności $L = 2$ mH, zaprezentowano na rysunku 4. Na podstawie wykresu widocznego na tym rysunku można stwierdzić, że w miarę wzrostu napięcia E maleje minimalna wartość pojemności niezbędnej do stabilnej pracy systemu.

Podczas ruchu pojazdu trakcyjnego rezystancja i indukcyjność systemu zmieniają się w zależności od odległości pojazdu od źródła zasilania.

Przyjmuje się, że indukcyjność jednego kilometra sieci trakcyjnej linii jednotorowej wynosi 2,2 mH [5]. Rezystancja sieci trakcyjnej zależy od rodzaju zastosowanych szyn i przewodów jezdnych, sposobu wykonania połączeń czołowych szyn, a także od stopnia zużycia szyn i przewodów. W tabeli 1 zestawiono wybrane parametry szyn, a w tabeli 2 - przewodów jezdnych stosowanych w polskim górnictwie. Rezystancja toru może się też zmieniać niezależnie od odległości, na skutek uszkodzeń szyn lub złączy szynowych.



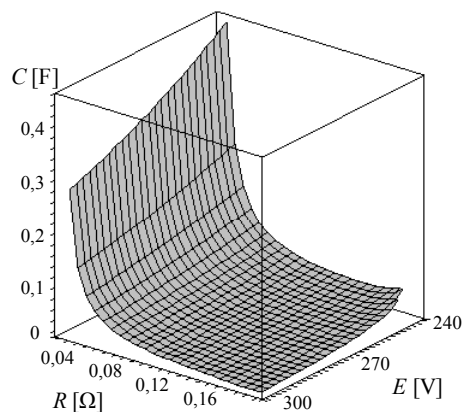
Rys. 2. Wykres zależności $C = f(L, R)$ dla $P = 90 \text{ kW}$ i $E = 250 \text{ V}$



Rys. 3. Zależność $C = f(R)$ dla wybranych wartości indukcyjności oraz dla $P = 90 \text{ kW}$ i $E = 250 \text{ V}$

Na rysunku 5 przedstawiono zależność minimalnej pojemności C_{\min} niezbędnej do zapewnienia stabilnej pracy systemu trakcyjnego od odległości pojazdu od źródła zasilania, dla wybranych konfiguracji sieci trakcyjnej. Założono, że linia kolejowa jest dwutorowa i że połączenia czołowe szyn są wykonane jako spawane (pominięto rezystancję połączeń czołowych). Przyjęto, że indukcyjność dławika filtra wej-

ściowego lokomotywy wynosi 2 mH. Indukcyjność i rezystancja układu zasilania sieci trakcyjnej zależą od warunków lokalnych i są trudne do oszacowania. Założono, że rezystancja układu zasilania i dławika filtra wejściowego jest równa $30 \text{ m}\Omega$, zaś indukcyjność układu zasilania - $0,1 \text{ mH}$. Uwzględniono fakt, że napięcie biegu jałowego przewoźnej stacji prostowniczej wynosi 270 V .



Rys. 4. Wykres zależności $C = f(E, R)$ dla $P = 90 \text{ kW}$ i $L = 2 \text{ mH}$

Tab. 1. Wybrane parametry szyn stosowanych w górnictwie [1, 5]

typ szyny	masa metra szyny [kg]	rezystancja jednostkowa toru pojedynczego [Ω/km]
S24	24,4	0,032
S30	30,3	0,026
S37	37,2	0,021
S42	42,48	0,018

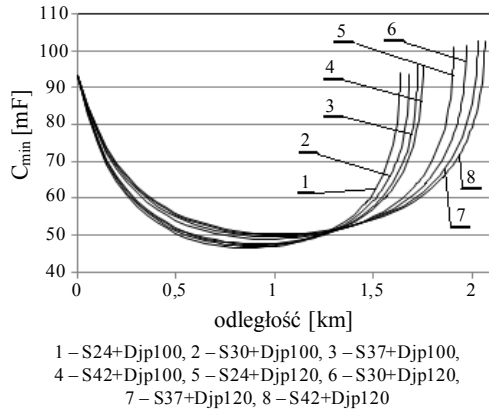
Tab. 2. Wybrane parametry przewodów jezdnych stosowanych w górnictwie [5]

typ przewodu jezdnych	pole przekroju [mm^2]	rezystancja jednostkowa [Ω/km]
Djp 100	100	0,179
Djp 120	120	0,149

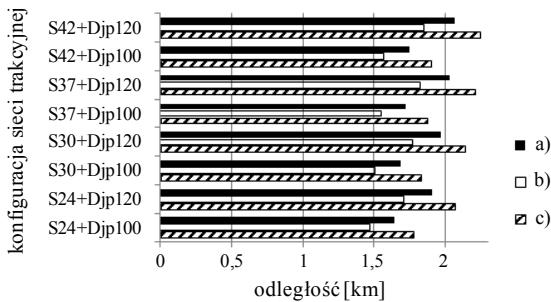
Charakterystyki widoczne na rysunku 5 są ograniczone od prawej strony. Ograniczenie to jest związane z możliwością dostarczenia do odbiornika danej mocy. Maksymalne odległości, dla których przy określonej konfiguracji sieci trakcyjnej i napięciu zasilania $E = 270 \text{ V}$ możliwe jest dostarczenie do pojazdu mocy $P = 90 \text{ kW}$, pokazano na rysunku 6 (przypadek a).

Wraz ze wzrostem odległości pojazdu pobierającego stałą moc od źródła zasilania rośnie spa-

dek napięcia w sieci trakcyjnej. Odległości, przy których spadek napięcia osiąga dopuszczalną wartość (30% U_n , czyli 75 V) przy zasilaniu pojazdu o mocy $P = 90$ kW, zaznaczono na rysunku 6 słupkami koloru białego (przypadek b).



Rys. 5. Zależność C_{min} od odległości pojazdu od źródła zasilania, dla $P = 90$ kW i $E = 270$ V, dla linii dwutorowej i różnych konfiguracji sieci trakcyjnej



Rys. 6. Maksymalna odległość od stacji zasilającej, przy której spełnione są kryteria a), b), c) (opis w tekście), dla różnych konfiguracji sieci trakcyjnej, linii dwutorowej i napięcia zasilania $E = 270$ V

Dla stacji prostownikowych zasilających trakcję dołową można określić skuteczny zasięg zasilania. Jest on definiowany jako odległość od stacji, przy której spadek napięcia w sieci trakcyjnej osiąga maksymalną dopuszczalną wartość przy uwzględnieniu obciążenia sieci trakcyjnej wynikającego z ruchu pociągów oraz przy założeniu, że musi być możliwy rozruch lokomotywy w najdalszym punkcie zasilanego odcinka [5]. Na rysunku 6 pokazano skuteczny zasięg zasilania stacji zasilającej dla różnych konfiguracji sieci trakcyjnej i dla sytuacji, w której stacja zasila jedną lokomotywę o mocy 90 kW (Ld31), znajdującą się w najdalszym punkcie sieci i wykonującą rozruch (przypadek c). Przyjęto, że rozruch wykonuje lokomotywa

z oporowym układem sterowania, a prąd rozruchowy elektrowozu jest równy jego prądowi jednogodzinnemu.

Z wykresu przedstawionego na omawianym rysunku wynika, że dla wszystkich rozpatrywanych przypadków konfiguracji sieci trakcyjnej warunek dostarczenia do napędu stałej mocy bez przekroczenia największego dopuszczalnego spadku napięcia powoduje silniejsze ograniczenie zasięgu stacji zasilającej, niż warunek zapewnienia możliwości rozruchu lokomotywy. Na podstawie charakterystyk minimalnej pojemności kondensatora filtru zapewniającej stabilną pracę napędu lokomotywy w funkcji odległości od podstacji zasilającej (rys. 5) i przy uwzględnieniu ograniczeń wynikających z wykresu na rysunku 6 można stwierdzić, że kondensator filtru wejściowego przekształtnikowego napędu lokomotywy Ld31 powinien mieć pojemność większą, niż $C_{min} = 93,4$ mF.

3. Wpływ warunków początkowych

Wpływ wartości napięcia początkowego kondensatora filtru wejściowego na stabilność pracy układu zbadano dla najgorszego przypadku ze względu na stabilność, czyli dla punktu, w którym do uzyskania stabilności wymagana jest największa wartość pojemności kondensatora, to jest około 93,4 mF. W rozpatrywanym systemie trakcyjnym opisywany stan występuje, gdy pojazd znajduje się bezpośrednio przy podstacji zasilającej (rys. 5). Obliczenia wykonano w programie Maple, rozwiązując równanie (1) dla przyjętej wartości początkowej napięcia kondensatora u_0 i początkowej wartości prądu dławika filtru i_{L0} określonej zależnością:

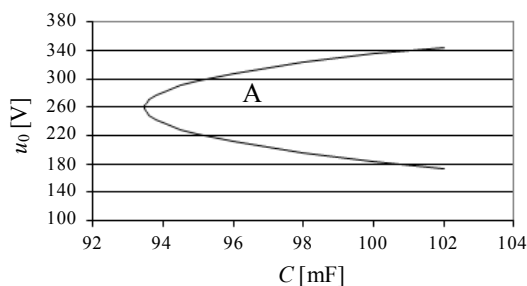
$$i_{L0} = \frac{P}{u_0}, \quad (5)$$

wynikającą z założenia o stałej mocy P układu napędowego. Badano, dla jakiej wartości napięcia początkowego kondensatora filtru oscylacje przebiegu napięcia kondensatora $u(t)$ nie mają jeszcze charakteru narastającego.

Przebieg zależności napięcia początkowego u_0 kondensatora filtru od pojemności C tego kondensatora, dla $P = 90$ kW i $E = 270$ V, pokazano na rysunku 7. System trakcyjny jest stabilny dla wartości u_0 leżących wewnątrz obszaru ograniczonego z lewej strony krzywą charakterystyki (obszar A).

W sieci trakcyjnej o napięciu znamionowym $U_n = 250$ V wartość napięcia może się zmieniać

w zakresie od 175 V do 283 V. Analizując charakterystykę zaprezentowaną na rysunku 7 można stwierdzić, że dla zapewnienia poprawnej pracy układu w rozpatrywanym systemie niezbędne jest zwiększenie pojemności kondensatora filtru o około 10% w stosunku do wartości uzyskanej na podstawie zależności (4).

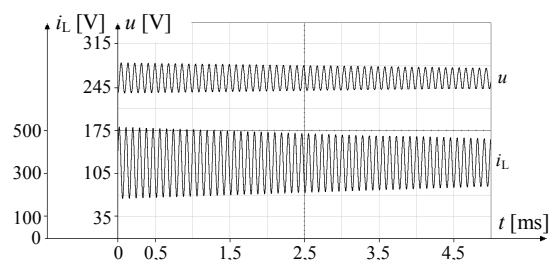


Rys. 7. Zależność $u_0 = f(C)$ dla $P = 90 \text{ kW}$ i $E = 270 \text{ V}$

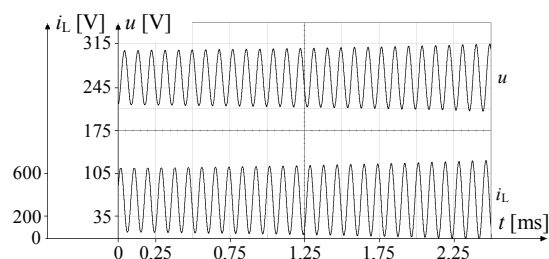
W celu weryfikacji wyników badań przeprowadzono symulację działania systemu trakcyjnego (rys. 1) w programie IsSpice. Na rysunkach 8 i 9 pokazano przebiegi napięcia kondensatora filtru wejściowego $u(t)$ oraz prądu dławika filtru $i_L(t)$, dla pojemności kondensatora $C = 95 \text{ mF}$, napięcia początkowego kondensatora $u_0 = 235 \text{ V}$ (rys. 8) i $u_0 = 215 \text{ V}$ (rys. 9) oraz niezmiennych pozostałych parametrów układu. Graniczne wartości napięcia początkowego kondensatora, między którymi praca układu napędowego jest stabilna, wynoszą dla tej pojemności $u_{0\min} = 222,2 \text{ V}$ oraz $u_{0\max} = 296,8 \text{ V}$. Analizując przebiegi widoczne na rysunkach 8 i 9 można stwierdzić, że dla napięcia początkowego $u_0 = 235 \text{ V}$, należącego do przedziału ($u_{0\min}, u_{0\max}$), praca układu jest stabilna, zaś dla napięcia początkowego $u_0 = 215 \text{ V}$, mniejszego od $u_{0\min}$ - niestabilna.

Zbadano również, jaki jest wpływ wartości napięcia początkowego kondensatora filtru na stabilność układu napędowego przy przemieszczaniu się pojazdu. Także w tym przypadku do obliczeń wykorzystano program Maple. Badania przeprowadzono dla następujących parametrów systemu trakcyjnego: $P = 90 \text{ kW}$, $E = 270 \text{ V}$, indukcyjność dławika filtru wejściowego i układu zasilania sieci trakcyjnej $2,1 \text{ mH}$, rezystancja dławika i układu zasilania $30 \text{ m}\Omega$. Założono, że lokomotywa jest wyposażona w kondensator filtru o najmniejszej dopuszczalnej wartości pojemności i że sieć trakcyjna linii dwutorowej składa się z szyn S37 i drutu jezdno Djp100. Charakterystykę będącą wynikiem obliczeń pokazano

na rysunku 10. Układ napędowy jest stabilny dla napięć początkowych z obszaru ograniczonego od lewej strony krzywą charakterystyki.

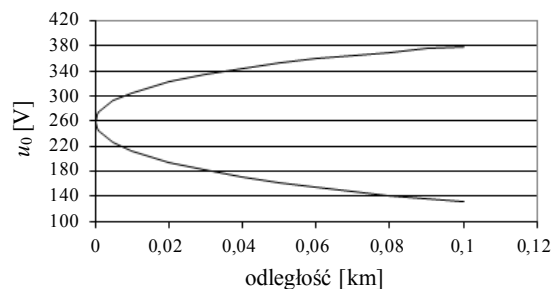


Rys. 8. Przebiegi napięcia kondensatora filtru wejściowego $u(t)$ i prądu dławika filtru $i_L(t)$ dla $C = 95 \text{ mF}$, $u_0 = 235 \text{ V}$



Rys. 9. Przebiegi napięcia kondensatora filtru wejściowego $u(t)$ i prądu dławika filtru $i_L(t)$ dla $C = 95 \text{ mF}$, $u_0 = 215 \text{ V}$

Na podstawie rysunku 10 można stwierdzić, że w miarę wzrostu odległości pojazdu od punktu zasilania (i zmniejszania się najmniejszej pojemności, przy której układ jest stabilny, rys. 5) maleje wrażliwość układu napędowego na wartość napięcia początkowego kondensatora filtru. Już w odległości 40 m od punktu zasilania stabilność układu napędowego lokomotywy jest zapewniona dla całego zakresu napięć występujących w górniczej sieci trakcyjnej o napięciu znamionowym 250 V .

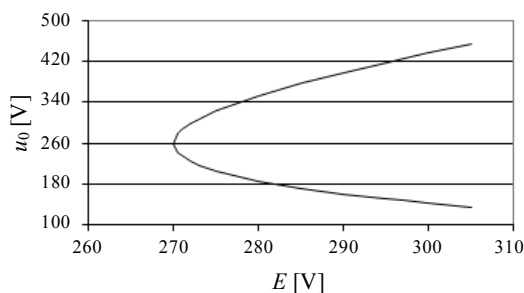


Rys. 10. Zależność napięcia początkowego u_0 kondensatora filtru od odległości od podstacji zasilającej

Napięcie kopalnianej sieci trakcyjnej może się zmieniać w granicach $70\% U_n \div 120\% U_n$. Jednocześnie w górniczych stacjach prostowniczych możliwe jest podniesienie napięcia strony

wtórnej transformatora o 10%, co powoduje wzrost napięcia biegu jałowego stacji do 297 V. Z wykresu na rysunku 4 wynika, że minimalna pojemność kondensatora filtru wejściowego, wymagana do zapewnienia stabilnej pracy układu napędowego, maleje ze wzrostem napięcia zasilania. Zmodernizowana lokomotywa Ld31, której kondensator dobrano uwzględniając warunki stabilnej pracy przy napięciu znamionowym sieci równym 250 V, będzie więc pracowała stabilnie także przy zwiększonym napięciu zasilania.

Zbadano, w jaki sposób stabilność systemu trakcyjnego zależy od napięcia początkowego kondensatora filtru wejściowego przy zmianie napięcia zasilania sieci trakcyjnej. Założono, że możliwe jest stopniowe podnoszenie wartości napięcia E . Przyjęto, że lokomotywa Ld31 znajdująca się przy podstacji trakcyjnej, jest wyposażona w kondensator filtru wejściowego o minimalnej dopuszczalnej pojemności, oraz że indukcyjność dławika filtru wejściowego i układu zasilania sieci trakcyjnej wynosi 2,1 mH, a rezystancja dławika i układu zasilania - 30 mΩ. W wyniku obliczeń otrzymano zależność pokazaną na rysunku 11. Przy napięciu zasilania $E = 297$ V układ napędowy jest stabilny dla wszystkich wartości napięć początkowych, jakie mogą pojawić się na kondensatorze (175 V ÷ 311 V).



Rys. 11. Zależność napięcia początkowego u_0 kondensatora filtru od napięcia E

4. Podsumowanie

W artykule przedstawiono wyniki badań wpływu wartości początkowych napięcia kondensatora i prądu dławika filtru wejściowego układu napędowego na stabilność tego układu, przeprowadzonych z wykorzystaniem uproszczonego modelu systemu trakcyjnego (rys. 1). Stwierdzono, że dla zakresu wartości napięć pojawiających się w górniczej sieci trakcyjnej niezbędne jest zwiększenie pojemności kondensatora filtru o około 10% w stosunku do pojemności wynikającej z zależności (4). Wpływ wartości

początkowych maleje przy wzroście odległości lokomotywy od podstacji zasilającej oraz przy zwiększeniu wartości napięcia zasilania sieci trakcyjnej.

5. Literatura

- [1]. Antoniuk J.: *Urządzenia i systemy transportu podziemnego w kopalniach*. Wydawnictwo Śląsk, Katowice 1990.
- [2]. Bae B-H., Cho B-H., Sul S-K.: *Damping control strategy for vector controlled traction drives*. Proc. of EPE 2001, Graz.
- [3]. Carpita M., Zueger H., Pellerin M., Stefanutti P.: *Transformer used as a DC link filter inductance in DC high power traction applications*. Proc. of EPE 2005, Dresden.
- [4]. Dudek R., Kosiorowski S., Żuchowicz M.: *Doświadczenia eksploatacyjne tyrystorowych układów sterowania lokomotyw kopalnianych*. Mat. konf. MET 1995, Warszawa, s. 57-62.
- [5]. Dudek W., Machowski J.: *Sieci trakcyjne w górnictwie*. Wydawnictwo Śląsk, Katowice 1967.
- [6]. Karwowski K., Skibicki J.: *Analiza stabilności pracy sieciowych pojazdów z napędem energoelektronicznym*. Mat. konf. SEMTRAK 2004, Kraków – Zakopane, s. 223-230.
- [7]. Kosiorowski S., Stobiecki A.: *Wpływ parametrów systemu zasilania na stabilność impulsowego układu sterowania lokomotyw kopalnianych*. Mat. konf. SEMTRAK 2006, Zakopane, s. 283-292.
- [8]. Kosiorowski S., Stobiecki A., Żuchowicz M.: *Wybrane zagadnienia stabilności trakcyjnych układów napędowych sterowanych impulsowo*. Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne nr 75, 2006, wyd. BOBRME KOMEL, s. 77-82.
- [9]. *Lokomotywa przewodowa Ld-31 EM*. <http://www.energomechanik.com.pl/p,s,gornictwo,g,ld31em.html> (luty 2013).
- [10]. Mosskull H.: *Stabilization of an induction motor drive with resonant input filter*. Proc. of EPE 2005, Dresden.

Autorzy

dr inż. Andrzej Stobiecki, dr inż. Roman Dudek
AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej, Katedra Energoelektroniki i Automatyki Systemów Przetwarzania Energii
email: astob@agh.edu.pl, dudek@agh.edu.pl

Informacje dodatkowe

Badania, których wyniki zostały zaprezentowane w niniejszym artykule, wykonano w ramach pracy statutowej 11.11.120.775.