

**Roman Dudek, Stanisław Kosiorowski, Andrzej Stobiecki**  
Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

## **OSCYLACJE W FILTRACH WEJŚCIOWYCH PRZEKSZTAŁTNIKOWYCH NAPĘDÓW TRAKCYJNYCH**

### **OSCILLATIONS IN INPUT FILTERS OF CONVERTER-BASED TRACTION DRIVES**

**Abstract:** LC input filters are applied in the traction drives with DC or AC motors controlled with the power electronic systems. As follows from experience in operation of the electric mine locomotives the most frequent reason for faults of these systems are faults of the filter's capacitors. Oscillations of voltage and current during the transient states of the drive operation can be one of the reasons for the damage of the capacitors. In this paper, special attention is paid to the angular frequency of oscillations of the voltage across the filter capacitor in transient states of drive operation. This quantity can be used in diagnostic and elimination of fault operation of the power electronic systems of the vehicles' drives. On the basis of a simplified model of the traction system, non-linear equation describing the system is formulated, linearized characteristic equation is given and minimum value of the filter capacity ensuring stable operation of the system is determined. The relationship determining the angular frequency is derived. The analysis of the influence of the filter capacity, inductance and resistance of the traction network, supply source voltage and power of the drive on the angular frequency of the oscillations of the voltage across the filter capacitor is carried out using simulations in the IsSpice program. Selected results of tests of the laboratory traction drive system equipped with a traction motor of the mine locomotive type Ld 31 are presented in the last section of the paper.

#### **1. Wprowadzenie**

Na wejściu trakcyjnych układów napędowych z silnikami prądu stałego lub silnikami prądu przemiennego sterowanymi poprzez układy energoelektroniczne stosuje się filtry LC. Filtry te ograniczają wzajemne negatywne oddziaływanie przekształtników i sieci trakcyjnej (straty mocy, przepięcia, zakłócenia elektromagnetyczne). Na podstawie doświadczeń z eksploatacji elektrycznych lokomotyw kopalnianych z impulsowymi układami sterowania stwierdzono [3], że najczęstszymi przyczynami awarii tych układów są uszkodzenia kondensatorów filtru. Jednym z powodów tych awarii mogą być przepięcia w niestabilnych stanach pracy napędu lub oscylacje w przebiegach prądu i napięcia w przejściowych, stabilnych stanach pracy. W artykule zwrócono szczególną uwagę na pulsację (częstotliwość kątową) oscylacji napięcia kondensatora filtru w przejściowych stanach pracy napędu. Wielkość ta może być wykorzystana do diagnostyki i eliminacji awaryjnych stanów pracy energoelektronicznych układów sterowania napędem pojazdu, na przykład przy projektowaniu filtrów w układach zabezpieczeń [1, 9].

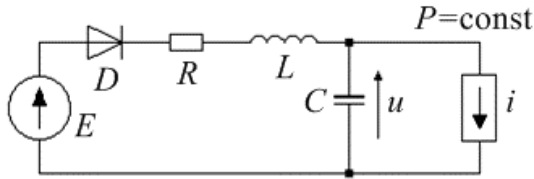
W celu wyprowadzenia wzoru na częstotliwość kątową oscylacji napięcia kondensatora filtru przedstawiono pobieżnie – na podstawie zna-

nych w literaturze zależności [7] – sposób formułowania nieliniowych równań opisujących system trakcyjny, wyznaczono punkty równowagi, dokonano linearyzacji i na podstawie równania charakterystycznego zlinearyzowanego układu określono minimalną wartość pojemności kondensatora filtru, która zapewnia stabilną pracę układu. Zasadniczą część artykułu dotyczy wyprowadzenia wzoru na pulsację napięcia kondensatora filtru w oparciu o otrzymaną wcześniej postać równania charakterystycznego oraz badań symulacyjnych wpływu pojemności kondensatora, indukcyjności i rezystancji sieci trakcyjnej oraz napięcia zasilania i mocy układu napędowego na pulsację oscylacji napięcia kondensatora. W końcowej części artykułu zamieszczono wybrane wyniki badań laboratoryjnych trakcyjnego układu napędowego z silnikiem lokomotywy kopalnianej Ld 31.

#### **2. Pulsacja oscylacji napięcia kondensatora filtru**

Pulsację oscylacji napięcia kondensatora filtru wyznaczono na podstawie analizy uproszczonego schematu zastępczego dla najprostszego systemu trakcyjnego uwzględniającego filtr wejściowy tylko jednego pojazdu, układ napę-

dowy pojazdu wraz z przekształtnikiem impulsowym oraz indukcyjność i rezystancję sieci trakcyjnej (rys. 1) [5, 8, 9].



Rys. 1. Schemat zastępczy uproszczonego systemu trakcyjnego

Źródło napięcia z diodą modeluje podstację trakcyjną, elementy  $R$ ,  $C$  i  $L$  są zastępczymi parametrami źródła zasilania, sieci trakcyjnej oraz filtra wejściowego pojazdu. Źródło prądowe modeluje obciążenie pojazdu w ustalonym stanie pracy, przy stałym momencie obciążenia i stałej prędkości kątowej, a więc przy stałej mocy napędu  $P$ , niezależnie od wartości napięcia na kondensatorze  $C$ .

Równanie opisujące przebiegi napięcia kondensatora filtra  $u(t)$  dla stanu pracy silnikowej napędu (z pominięciem diody  $D$ ) ma postać:

$$LC \frac{d^2 u}{dt^2} + \left( RC - \frac{LP}{u^2} \right) \frac{du}{dt} + u + \frac{RP}{u} = E. \quad (1)$$

Na podstawie powyższego równania w publikacji [7] wyznaczono punkty równowagi (krytyczne). Istotne praktyczne znaczenie ma punkt równowagi:

$$u_1 = u_0 = \frac{E + \sqrt{E^2 - 4RP}}{2}. \quad (2)$$

Na podstawie macierzy Jacobiego zapisano równanie charakterystyczne [7]:

$$LC\lambda^2 - \left( RC - \frac{PL}{u_0^2} \right) \lambda + 1 = 0. \quad (3)$$

Następnie sformułowano warunki umożliwiające określenie minimalnej wartości pojemności kondensatora filtra zapewniającej stabilną pracę układu. Uzyskana zależność ma postać:

$$C > \frac{2LP}{R \left( E^2 - 2RP + E\sqrt{E^2 - 4RP} \right)}. \quad (4)$$

Na podstawie powyższej zależności oraz badań symulacyjnych i laboratoryjnych [6] stwierdzono, że wzrost rezystancji sieci trakcyjnej (zły stan trakcji dolnej) może być przyczyną pojawiania się oscylacji w przebiegach prądu i napięcia kondensatora filtra. Natomiast z prezentowanych w literaturze krajowej i zagranicznej zależności wynika, że ze wzrostem rezystancji  $R$  następuje tłumienie oscylacji (wzra-

sta obszar stabilnej pracy) [2]. Stwierdzono również, że bocznikowanie kondensatora filtra rezystancją  $R_C$  nie zawsze eliminuje oscylacje, a nawet może być ich przyczyną.

W zależności od wartości wyróżnika równania charakterystycznego przebiegi napięcia kondensatora filtra mogą mieć różną postać. Wyróżnik równania charakterystycznego (3) wynosi:

$$\Delta = \left( \frac{R}{L} - \frac{P}{u_0^2 C} \right)^2 - \frac{4}{LC} \left( 1 - \frac{RP}{u_0^2} \right). \quad (5)$$

Na podstawie równania charakterystycznego i wyróżnika wyznaczono pierwiastki równania:

$$\lambda_1 = -\alpha + \beta, \quad \lambda_2 = -\alpha - \beta, \quad (6)$$

przy czym:

$$\alpha = \frac{R}{2L} - \frac{P}{u_0^2 C}, \quad (7)$$

$$\beta = \sqrt{\left( \frac{R}{2L} - \frac{P}{2u_0^2 C} \right)^2 - \frac{1}{LC} \left( 1 - \frac{RP}{u_0^2} \right)}. \quad (8)$$

Dla  $\Delta > 0$  przebieg napięcia kondensatora ma charakter aperiodyczny. Dla przykładowych wartości parametrów  $P = 50$  kW,  $L = 3$  mH,  $R = 0,1$   $\Omega$ ,  $E = 250$  V otrzymano  $C \in (0; 0,00073)$  F  $\cup$   $C > 1,14$  F. Z praktycznego punktu widzenia takie wartości pojemności kondensatora filtra wejściowego są mało prawdopodobne w napędach trakcyjnych, na przykład lokomotyw kopalnianych. Podobna sytuacja występuje dla  $\Delta = 0$ .

Zatem istotne znaczenie może mieć przypadek  $\Delta < 0$ . Wtedy wielkość  $\beta$  jest liczbą urojoną. Wprowadzając oznaczenie  $\beta = j\omega$  i podstawiając do równania (8) otrzymano:

$$-\omega^2 = \alpha^2 - \frac{1}{LC} \left( 1 - \frac{RP}{u_0^2} \right),$$

a po przekształceniach:

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} \left( 1 - \frac{RP}{u_0^2} \right) - \left( \frac{R}{2L} - \frac{P}{u_0^2 C} \right)^2}. \quad (9)$$

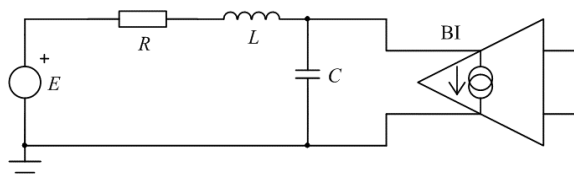
Po podstawieniu wzoru (2) do równania (9) ostatecznie otrzymuje się zależność określającą pulsację  $\omega$  oscylacji (drgań) napięcia kondensatora filtra wejściowego:

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} \left( 1 - \frac{RP}{\left( \frac{E + \sqrt{E^2 - 4RP}}{2} \right)^2} \right) - \left( \frac{R}{2L} - \frac{P}{C \left( \frac{E + \sqrt{E^2 - 4RP}}{2} \right)^2} \right)^2}. \quad (10)$$

Na podstawie zależności (10) można stwierdzić, że pulsacja oscylacji napięcia kondensatora filtru wejściowego zależy od wielu parametrów, to jest sumarycznej indukcyjności układu, pojemności kondensatora filtru, sumarycznej rezystancji układu, napięcia źródła zasilania i mocy układu napędowego. Z uwagi na złożoną i trudną do interpretacji postać wzoru (10) analizę wpływu poszczególnych wielkości na pulsację napięcia kondensatora filtru wykonano wykorzystując program symulacyjny IsSpice.

### 3. Badania symulacyjne pulsacji napięcia na kondensatorze

Model symulacyjny do badań wpływu parametrów systemu trakcyjnego na pulsację napięcia kondensatora zaproponowano w oparciu o uproszczony schemat systemu trakcyjnego dla pracy silnikowej napędu (rys. 1). Źródło prądu  $i$  zamodelowano jako behawioralne źródło prądowe B o oznaczeniu BI.

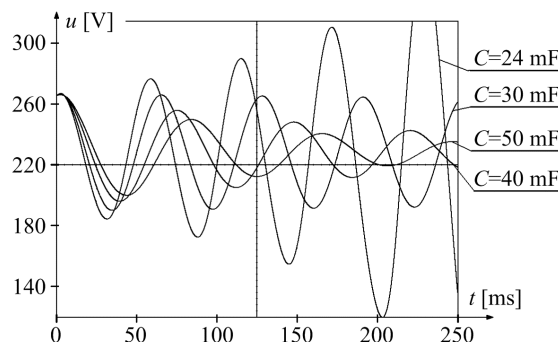


Rys. 2. Model symulacyjny

Na podstawie modelu symulacyjnego dokonano badań wpływu pojemności kondensatora filtru, indukcyjności i rezystancji sieci trakcyjnej, napięcia źródła zasilania i mocy układu napędowego na pulsację napięcia kondensatora filtru. Zakres zmian wielkości podczas badań symulacyjnych ustalono na podstawie następujących wartości dotyczących elektrycznej lokomotywy kopalnianej Ld 31 z impulsowym układem sterowania: napięcie zasilania trakcji 250 V (-30%÷20%), indukcyjność sieci trakcyjnej 1,3÷2 mH/km [4], rezystancja sieci trakcyjnej 0,11 Ω/km, dane silnika:  $P_n = 41,5$  kW,  $U_n = 250$  V,  $I_n = 205$  A, indukcyjność dławika filtru wejściowego 2 mH, pojemność kondensatora filtru 24 mF.

#### 3.1 Pojemność kondensatora filtru

Przykładowe przebiegi napięcia kondensatora filtru dla różnych wartości pojemności kondensatora  $C$ , przy ustalonych wartościach pozostałych parametrów:  $P = 50$  kW,  $E = 250$  V,  $L = 3$  mH,  $R = 0,1$  Ω, zamieszczono na rysunku 3, a czas trwania okresu przebiegu i wartość pulsacji podano w tabeli 1.



Rys. 3. Przebiegi napięcia kondensatora filtru dla różnych pojemności kondensatora  $C$

Dla pojemności większych od wartości wynikającej z zależności (4) przebiegi mają charakter drgań oscylacyjnych tłumionych, a przebiegi uzyskane dla mniejszych pojemności – charakter drgań narastających.

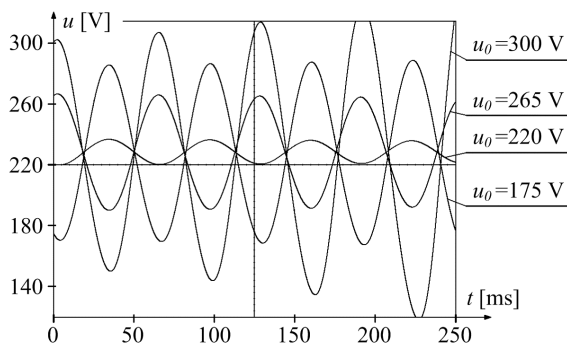
Tabela 1. Pulsacja napięcia w funkcji pojemności kondensatora filtru

$C$ [mF]	15	24	30	40	50
$T$ [ms]	44,8	54,1	62,8	72,6	81,3
$\omega$ [1/sek]	140,3	116	100	86,5	77,2

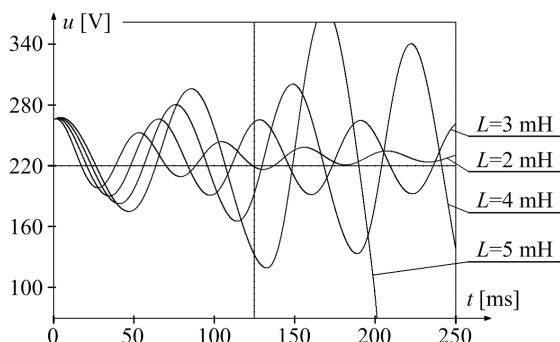
Z zestawionych w tabeli 1 wartości wynika, że zwiększenie pojemności o ponad 100%, z 24 mF na 50 mF, powoduje zmniejszenie pulsacji napięcia kondensatora o około 30%. Stwierdzono również, że wartość początkowa napięcia na kondensatorze filtru praktycznie nie wpływa na pulsację napięcia kondensatora. Wybrane przebiegi napięcia kondensatora filtru dla różnych warunków początkowych i ustalonych pozostałych parametrów  $P = 50$  kW,  $E = 250$  V,  $L = 3$  mH,  $R = 0,1$  Ω,  $C = 30$  mF przedstawiono na rysunku 4.

#### 3.2 Indukcyjność sieci trakcyjnej

Badania symulacyjne wpływu indukcyjności na pulsację napięcia kondensatora filtru wykonano przy ustalonych pozostałych wartościach  $P = 50$  kW,  $E = 250$  V,  $R = 0,1$  Ω,  $C = 30$  mF. Na podstawie uzyskanych w wyniku symulacji przebiegów napięcia kondensatora (rys. 5) wyznaczono dla poszczególnych wartości indukcyjności pulsację, a wyniki podano w tabeli 2.



Rys. 4. Przebiegi napięcia na kondensatorze dla różnych wartości  $u_0$



Rys. 5. Przebiegi napięcia na kondensatorze dla różnych wartości indukcyjności

Przebiegi uzyskane dla mniejszych indukcyjności mają charakter drgań oscylacyjnych tłumionych, a dla większych indukcyjności, zgodnie z zależnością (4), mają charakter drgań narastających.

Tabela 2. Pulsacja napięcia w funkcji indukcyjności

$L$ [mH]	2	3	4	5	6
$T$ [ms]	51,3	62,8	73,9	84,4	89,5
$\omega$ [1/sek]	122,4	100	85	74,4	70,2

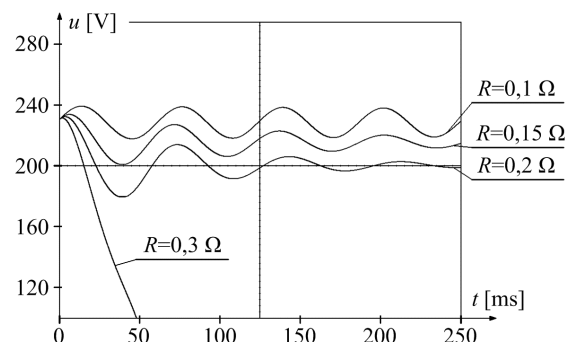
Wraz ze zwiększeniem się indukcyjności o 100%, z 3 mH na 6 mH, zmniejsza się pulsacja napięcia, podobnie jak w przypadku zmiany pojemności kondensatora, o około 30%.

### 3.3 Rezystancja sieci trakcyjnej

Przykładowe przebiegi napięcia kondensatora filtru uzyskane w wyniku badań wpływu rezystancji  $R$  na pulsację tego napięcia, przy ustalonych pozostałych parametrach  $P = 50$  kW,  $E = 250$  V,  $L = 3$  mH,  $C = 30$  mF, podano na rysunku 6, a wartości liczbowe zestawiono w tabeli 3.

Na podstawie przedstawionych rezultatów można stwierdzić, że zmiana rezystancji nie wpływa tak istotnie na pulsację, jak indukcyjność i pojemność. Na przykład zwiększenie rezystancji o 100%, z  $0,1 \Omega$  na  $0,2 \Omega$ , powoduje

zmniejszenie pulsacji napięcia o około 10%.



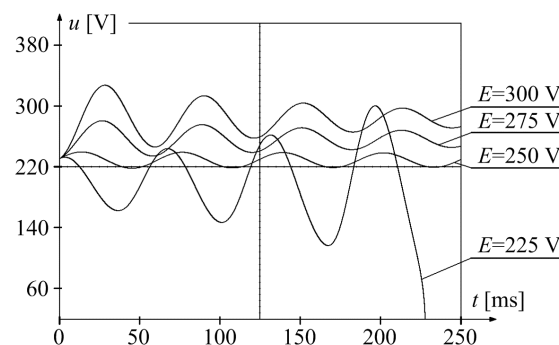
Rys. 6. Przebiegi napięcia na kondensatorze dla różnych wartości rezystancji

Tabela 3. Pulsacja napięcia w funkcji rezystancji

$R$ [ $\Omega$ ]	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25
$T$ [ms]	61	62,7	65,3	69,6	77,8
$\omega$ [1/sek]	102,9	100,1	96,1	90,2	80,7

### 3.4 Napięcie źródła zasilania

Dla ustalonych wartości parametrów  $P = 50$  kW,  $L = 3$  mH,  $R = 0,1 \Omega$ ,  $C = 30$  mF wykonano badania symulacyjne wpływu napięcia źródła zasilania na pulsację. Wyznaczone wartości okresu i pulsacji oscylacji podano w tabeli 4, a przykładowe przebiegi zamieszczono na rysunku 7.



Rys. 7. Przebiegi napięcia na kondensatorze dla różnych wartości napięcia zasilania

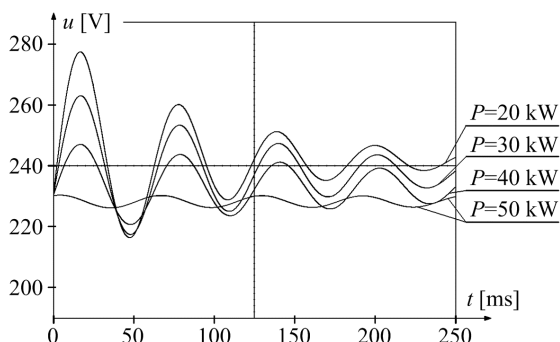
Tabela 4. Pulsacja napięcia w funkcji napięcia źródła zasilania

$E$ [V]	175	200	225	250	300
$T$ [ms]	72,6	66	64,4	62,7	61,8
$\omega$ [1/sek]	86,5	95,1	97,5	100,2	101,7

Z otrzymanych rezultatów wynika, że wartość napięcia zasilania istotnie wpływa na pulsację kondensatora filtru. Na przykład zmiana napięcia zasilania o około 70%, z 175 V na 300 V, powoduje zwiększenie pulsacji napięcia kondensatora o około 20%.

### 3.5 Moc układu napędowego

Przeprowadzono badania symulacyjne wpływu mocy układu napędowego na pulsację napięcia kondensatora przy ustalonych wartościach parametrów  $E = 250 \text{ V}$ ,  $L = 3 \text{ mH}$ ,  $R = 0,1 \Omega$ ,  $C = 30 \text{ mF}$ . Dla poszczególnych wartości mocy wyznaczono pulsację, a wyniki podano w tabeli 5. Wybrane przebiegi napięcia na kondensatorze zaprezentowano na rysunku 8.



Rys. 8. Przebiegi napięcia na kondensatorze dla różnych wartości mocy układu napędowego

Tabela 5. Pulsacja napięcia w funkcji mocy układu napędowego

$P$ [kW]	10	20	30	40	50
$T$ [ms]	60,6	61	61,5	62	62,7
$\omega$ [1/sek]	103,6	102,9	102,2	101,3	100,2

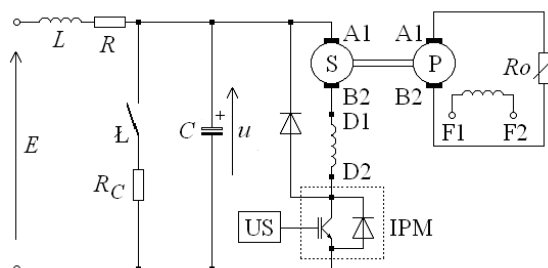
Z zamieszczonych rezultatów obliczeń (tab. 5) wynika, że dla przyjętych parametrów układu, nawet przy stosunkowo dużym zakresie zmian mocy napędu, zmiany pulsacji napięcia kondensatora filtru są nieznaczne (poniżej kilku procent).

### 4. Wyniki badań laboratoryjnych

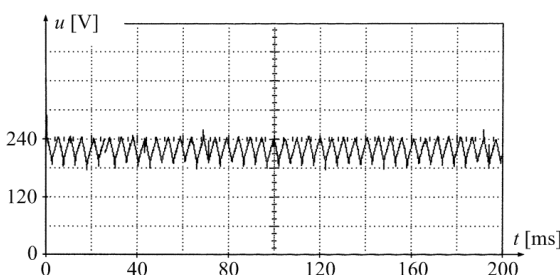
Do weryfikacji wybranych zależności pulsacji napięcia kondensatora filtru w funkcji parametrów układu wykorzystano laboratoryjny układ impulsowego sterowania silnikiem LDa 327a o mocy  $P_n = 41,5 \text{ kW}$  elektrycznej lokomotywy kopalnianej Ld 31, obciążonym prądnicą obcowzbudną (rys. 9). Silnik sterowany jest poprzez przekształtnik impulsowy prądu stałego z inteligentnym modulem mocy IPM300DSA060 ze stałą częstotliwością impulsowania  $200 \text{ Hz}$ . Układ sterowania US wyposażony jest w regulator prędkości i regulator prądu.

Badając napięcie kondensatora filtru zmieniano wartość napięcia źródła zasilania przy ustalonych pozostałych parametrach układu ( $C = 6,6 \text{ mF}$ ,  $L = 5,5 \text{ mH}$ ,  $R = 0,1 \Omega$ ). Na rysunkach 10 i 11 przedstawiono oscylogramy napięcia kondensatora dla dwóch różnych na-

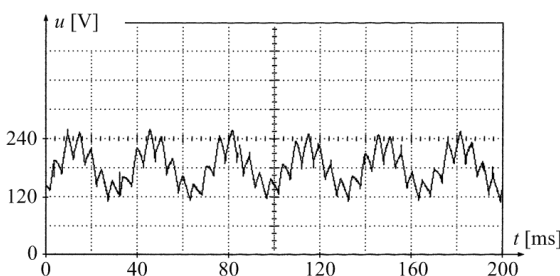
pięć zasilania  $200 \text{ V}$  i  $240 \text{ V}$ . Średnie wartości prądu silnika ( $I = 100 \text{ A}$ ) oraz napięcia silnika ( $U_s = 95 \text{ V}$ ) w obu przypadkach były takie same.



Rys. 9. Schemat laboratoryjnego układu impulsowego sterowania silnikiem



Rys. 10. Przebieg napięcia kondensatora filtru dla  $E = 240 \text{ V}$

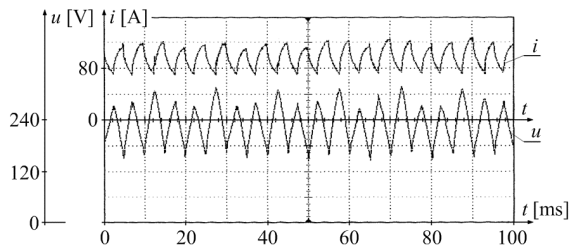


Rys. 11. Przebieg napięcia kondensatora filtru dla  $E = 200 \text{ V}$

Zmniejszenie wartości napięcia źródła zasilania o  $40 \text{ V}$  spowodowało pojawienie się nietłumionych oscylacji o znacznej wartości około  $120 \text{ V}$ . Na podstawie wyznaczonego z oscylogramu okresu drgań (rys. 11) wyliczono pulsację napięcia kondensatora filtru, która wynosi  $\omega = 181 \text{ rad/s}$ . Pulsacja obliczona ze wzoru (10) dla podanych w tym przypadku wartości parametrów elementów wynosi  $\omega = 161 \text{ rad/s}$ . Rozbieżność między wynikami nie przekracza  $15\%$ .

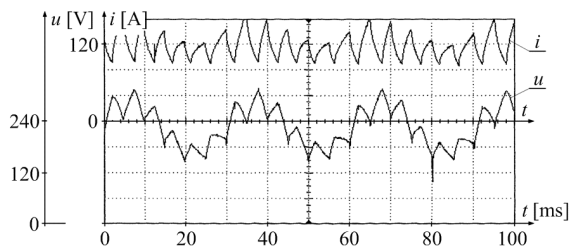
Oscylogramy przebiegów prądu silnika i napięcia kondensatora filtru, uzyskane przy następujących wartościach parametrów układu:  $E = 250 \text{ V}$ ,  $C = 3,3 \text{ mF}$ ,  $L = 2 \text{ mH}$ ,  $R = 0,15 \Omega$ , średnia wartość napięcia i prądu silnika  $U_s = 120 \text{ V}$ ,  $I = 100 \text{ A}$ , zamieszczono na rysunku 12. W tym przypadku różnica między wartością pulsacji obliczoną z wzoru (10)

i równą 382,5 rad/s oraz wartością pulsacji przebiegu napięcia wyznaczoną na podstawie oscylogramu z rysunku 12 ( $\omega = 410,7$  rad/s) nie przekracza 10%.



Rys. 12. Przebiegi napięcia kondensatora ( $u$ ) i prądu silnika ( $i$ )

Przebiegi napięcia kondensatora filtra i prądu silnika po zmianie wartości parametrów układu ( $E = 250$  V,  $C = 6,6$  mF,  $L = 5,5$  mH,  $R = 0,15$   $\Omega$ ,  $I = 125$  A,  $U_s = 120$  V) przedstawiono na rysunku 13. Z oscylogramu napięcia wyznaczono wartość pulsacji tego napięcia, która wynosi 209 rad/s. Wartość pulsacji obliczona ze wzoru (10) wynosi 162,5 rad/s. Zatem w tym przypadku różnica przekracza 20%.



Rys. 13. Przebiegi napięcia kondensatora ( $u$ ) i prądu silnika ( $i$ )

## 5. Podsumowanie

Na podstawie badań laboratoryjnych można stwierdzić, że przebiegi napięcia kondensatora filtra w niestabilnych stanach pracy nie mają charakteru drgań narastających. Różnice pomiędzy pulsacją obliczoną ze wzoru (10) i pulsacją przebiegów z oscylogramów otrzymanych w układzie laboratoryjnym są stosunkowo duże. Przyczyną wymienionych rozbieżności mogą być między innymi uproszczony model systemu trakcyjnego, sposób wyznaczania prądu wejściowego przekształtnika, wynikający z założenia stałej mocy czynnej odbiornika, pominięcie wpływu podmagnesowania dławika filtra składową stałą prądu na wartość indukcyjności.

## 6. Literatura

[1]. Bae B-H, Cho B-H, Sul S-K Sul.: *Damping control strategy for vector controlled traction drive*. Materiały konferencji EPE 2001, Graz

[2]. Carpita M., Zuegler H., Pellerin M., Stefanutti P.: *Transformer used as a DC link filter inductance in DC high power traction applications*. Materiały konferencji EPE 2005, Dresden

[3]. Dudek R., Kosiorowski S., Żuchowicz M.: *Doświadczenia eksploatacyjne tyrystorowych układów sterowania lokomotyw kopalnianych*. Materiały konferencji MET 1995, s. 57-62, Warszawa

[4]. Dudek W., Machowski J.: *Sieci trakcyjne w górnictwie*. Wydawnictwo Śląsk, Katowice, 1967

[5]. Karwowski K., Skibicki J.: *Wybrane stany przejściowe w trakcyjnym układzie zasilania i ich wpływ na energoelektroniczne pojazdy sieciowe*. Materiały konferencji MET 2003, s. 274-278, Warszawa

[6]. Kosiorowski S., Stobiecki A.: *Warunki stabilnej pracy trakcyjnych układów napędowych sterowanych impulsowo*. Materiały konferencji SENE 2007, s. 247-252, Łódź

[7]. 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

[8]. Mosskull H.: *DC-link stabilization of an induction machine drive*. Materiały konferencji EPE 2003, Toulouse

[9]. Walczyna A., Hasse K.: *Sposób i układ do tłumienia niestabilności filtra wejściowego i podharmonicznych prądu sieci w napędach z przekształtnikami impulsowymi lub falownikami napięcia*. Patent PL 176313

## Autorzy

dr inż. Roman Dudek, Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Automatyki Napędu i Urządzeń Przemysłowych, email: dudek@agh.edu.pl

dr inż. Stanisław Kosiorowski, Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Automatyki Napędu i Urządzeń Przemysłowych,

email: kosiorsk@kaniup.agh.edu.pl

dr inż. Andrzej Stobiecki, Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Automatyki Napędu i Urządzeń Przemysłowych, email: astob@agh.edu.pl