

# Synteza regulatorów ślizgowych dla obniżającego napięcie przetwornika DC-DC ze słabo tłumionym wejściowym filtrem LC

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono wyniki badań struktury i analizę doboru parametrów regulatora ślizgowego dla obniżającego napięcie przetwornika DC-DC ze słabo tłumionym wejściowym filtrem LC. W rozdziale teoretycznym zaprezentowano koncepcję dwóch regulatorów ślizgowych dla różnych zmiennych ślizgowych, a następnie udowodniono stabilność zaproponowanych rozwiązań. Rozdział opisujący wyniki badań symulacyjnych potwierdził użyteczność wykorzystania teorii sterowania ślizgowego do regulacji przetwornika DC-DC ze słabo tłumionym wejściowym filtrem LC. Pracę zakończono prezentacją oceny jakościowej wyników badań laboratoryjnych

**Abstract.** The article presents the results of structure tests and analysis of the selection of parameters of the sliding mode regulator for a buck DC-DC converter with a low damped input LC filter. The theoretical chapter presents the concept of a regulator for two sliding variables, and then proves the stability of the proposed solutions. The chapter describing the results of simulation tests confirmed the usefulness of using sliding mode control theory to stabilize a DC-DC converter with low damped input LC filter. The article ends with the presentation of laboratory tests results (**Sliding mode control of DC-DC buck converter with low damped input LC filter**)

**Słowa kluczowe:** sterowanie ślizgowe, przetwornik DC-DC, słabo tłumiony filtr LC

**Keywords:** sliding-mode control, DC-DC converter, low damped LC filter

## Wstęp

Powszechnie stosowany we współczesnych układach przetwarzania energii, wejściowy filtr LC, odpowiada za ograniczenie niekorzystnego oddziaływania urządzeń energoelektronicznych na sieć zasilającą. Zapewnia również stałe napięcie, które jest niezbędnym elementem w procesie przetwarzania większości przetworników DC-DC o różnych topologiach. Sam filtr, jako praktycznie bezstratny układ drugiego rzędu jest elementem skłonny do oscylacji, co rzutuje bezpośrednio na stabilność całej struktury regulacji przetwornika DC-DC.

Przeprowadzony przez autorów przegląd literatury wskazuje jednoznacznie, że aktywne metody tłumienia oscylacji w obwodach wejściowych przetworników i przekształtników energoelektronicznych są bieżącym oraz istotnym problemem automatyki. W porównaniu z rozwiązaniami pasywnymi [1, 2], charakteryzują się bowiem zdecydowanie lepszą sprawnością oraz pozwalają na zmniejszenie gabarytów urządzenia. Celowe wydaje się więc poszukiwanie nowych struktur regulacji, w których eliminacja skłonności do powstawania drgań jest jednym z zadań stawianych algorytmowi sterowania. Ważne jest również zapewnienie możliwości łatwej implementacji sprzętowej w rzeczywistych układach przetworników. Kryteria te spełniają aktywne metody tłumienia oscylacji w obwodach wejściowych przetworników energoelektronicznych, wykorzystujące do tego celu teorię sterowania ślizgowego [3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15].

## Synteza regulatora ślizgowego dla obniżającego napięcie przetwornika DC-DC ze słabo tłumionym filtrem wejściowym LC

W tym rozdziale referatu zostały przedstawione, zaproponowane przez autorów pracy, dwie płaszczyzny ślizgowe dedykowane dla układów przetworników energoelektronicznych z wejściowym filtrem LC. W przekonaniu autorów, rozwiązania te zapewniają stabilną pracę układu oraz tłumienie niepożądanych oscylacji prądu w dławiku oraz napięcia na kondensatorze wejściowego filtra LC. W każdym z proponowanych rozwiązań zostaje wykorzystana zmienna ślizgowa będąca funkcją niepełnego wektora stanu. Dla obu badanych przypadków została przeprowadzona, na drodze obliczeń matematycznych, synteza sterowania równoważnego. Uzyskane w ten sposób sterowanie równoważne jest opisane zależnością nieliniową. Podstawienie otrzymanej

postaci sterowania równoważnego do równań układu prowadzi do opisu dynamiki obiektu, który jest również nieliniowy. Przy wykorzystaniu operacji linearyzacji oraz iteracji układu przez zestaw parametrów brzegowych, determinowanych przez wartość obciążenia, udaje się pokazać jakie parametry zaproponowanych zmiennych ślizgowych zapewniają stabilność układu regulacji w szerokim spektrum punktów pracy (obciążeń).

Topologię przetwornika DC-DC z wejściowym filtrem LC dla obciążenia rezystancyjnego i obciążenie o charakterze stałej mocy przedstawiono na rys. 1.

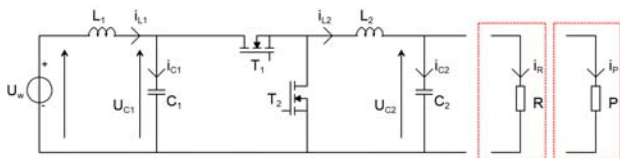
Uwzględnienie obecności dodatkowych elementów struktury układu w procesie syntezy regulatora ślizgowego, wymaga wzięcia pod uwagę faktu, że wejściowy filtr LC jest obiektem, dla którego załączenie tranzystora spowoduje wzbudzenie się drgań (gasnących lub niegasnących w zależności od parametrów zastępczych wybranych elementów gromadzących energię). Należałoby, zatem wybrać taką zmienną ślizgową, która zapewniłaby tłumienie powstających drgań, a jednocześnie nie wpłynęłaby znacząco na dynamiczne zachowanie obiektu. Równania dynamiki obiektów, w takim przypadku można zapisać jako

$$\begin{aligned}
 \frac{di_{L1}}{dt} &= \frac{1}{L_1}(U_w - U_{C1}) \\
 \frac{dU_{C1}}{dt} &= \frac{1}{C_1}(i_{L1} - \delta i_{L2}) \\
 \frac{di_{L2}}{dt} &= \frac{1}{L_2}(\delta U_{C1} - U_{C2}) \\
 \frac{dU_{C2}}{dt} &= \frac{1}{C_2}(i_{L2} - i_r) = \frac{1}{C_2}\left(i_{L2} - \frac{U_{C2}}{R}\right)
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{di_{L1}}{dt} &= \frac{1}{L_1}(U_w - U_{C1}) \\
 \frac{dU_{C1}}{dt} &= \frac{1}{C_1}(i_{L1} - \delta i_{L2}) \\
 \frac{di_{L2}}{dt} &= \frac{1}{L_2}(\delta U_{C1} - U_{C2}) \\
 \frac{dU_{C2}}{dt} &= \frac{1}{C_2}(i_{L2} - i_p) = \frac{1}{C_2}\left(i_{L2} - \frac{P}{U_{C2}}\right)
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

gdzie  $L_1, L_2, C_1, C_2$  - wartości parametrów obwodu,  
 $i_{L1}, i_{L2}, i_r, i_p, U_{C1}, U_{C2}$  - wartości prądów oraz napięć

występujących na elementach obwodu,  $\delta$  - współczynnik wypełnienia,  $R, P$  - rezystancja i moc obciążenia.



Rys.1. Topologia przetwornika DC-DC obniżającej napięcie z wejściowym filtrem LC dla dwóch typów obciążeń.

Analiza układu wykazała, że załączenie tranzystora  $T_1$  i komplementarne wyłączenie  $T_2$ , w chwili gdy napięcie na kondensatorze  $C_1$  jest większe od napięcia wejściowego spowoduje wytłumienie powstałych oscylacji, natomiast sytuacja odwrotna, tzn. załączenie tranzystora  $T_1$  i komplementarne wyłączenie  $T_2$ , w chwili gdy napięcie na kondensatorze  $C_1$  jest mniejsze od napięcia wejściowego spowoduje ich wzmacnienie. Analogiczne wnioski wyciągnięto dla przypadku energii kondensatora  $C_1$ . Powyższe rozważania oraz analiza układu bez wejściowego filtra LC, przedstawiona w pracach [6, 13], doprowadziły do wyboru następujących zmiennych ślizgowych:

$$(3) \quad s = (U_{zad} - U_{C2}) + c_2(-\dot{U}_{C2}) + c_3(U_{C1} - U_w)$$

oraz

$$(4) \quad s = (U_{zad} - U_{C2}) + c_2(-\dot{U}_{C2}) + c_3(E_{C1} - E_w)$$

gdzie  $E_{C1}, E_w$  to odpowiednio wartość energii kondensatora  $C_1$  oraz wartość energii wynikającej z wartości napięcia zasilania.

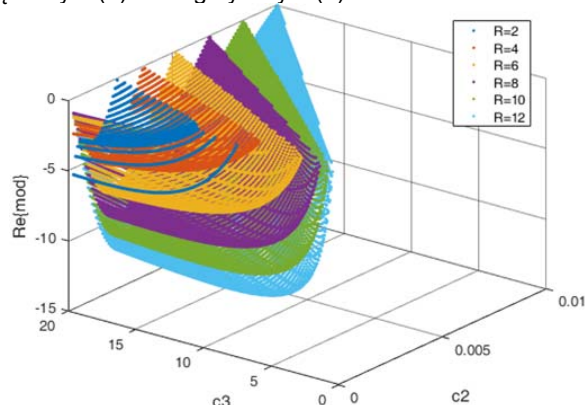
W celu wyznaczenia dynamiki przetwornika, w czasie trwania ruchu ślizgowego, niezbędne było wyznaczenie sterowania równoważnego. Autorzy pracy skorzystali tu z powszechnie stosowanego w teorii sterowania ślizgowego założenia, że w czasie trwania ruchu ślizgowego, zmienna ślizgowa oraz jej pochodna powinny być równe zero. Korzystając z tych założeń wyznaczono sterowanie równoważne w postaci współczynników  $\delta$ . Następnie otrzymane zależności podstawiono do równań obiektów i zlinearyzowano w okolicy zadanych punktów pracy. Do obliczeń zakresu parametrów  $c_2$  i  $c_3$ , dla których zlinearyzowany układ regulacji jest stabilny, wykorzystano wartości parametrów przetwornika z poniższej tabeli.

Tabela 1. Wartości parametrów przetwornika

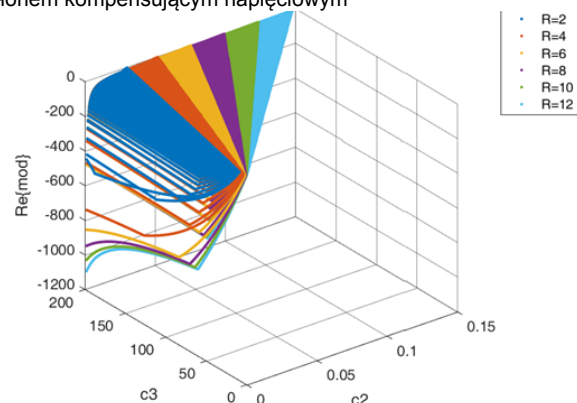
Nazwa parametru	Wartość	
$L_1$	100 $\mu$ H	
$C_1$	600 $\mu$ F	
$L_2$	990 $\mu$ H	
$C_2$	1 mF	
$U_{zad}$	24 V	
$U_w$	48 V	
Obciążenie (R   P)	2 – 12 $\Omega$	50 – 300 W

W celu przedstawienia graficznej interpretacji wpływu doboru parametrów  $c_2$  i  $c_3$  na stabilność układu stworzono w programie Matlab, specjalny skrypt obliczający wartości dominujących modów transmitancji. Na rysunkach 2 - 5 przedstawiono zbiory punktów, pokazujących zależność wartości części rzeczywistej dominującego modu transmitancji układu zlinearyzowanego od parametrów  $c_2$  i  $c_3$  dla różnych punktów pracy, determinowanych przez rezystancję lub moc obciążenia. Punkty zostały narysowane tylko dla przypadków, w których układ gwarantuje stabilność (wartość części rzeczywistej dominującego modu transmitancji jest mniejsza od zera). Dzięki temu widoczny staje się zakres zmian parametrów  $c_2$  i  $c_3$ , dla których układ zlinearyzowany jest stabilny. Rysunki 2 oraz 3 przed-

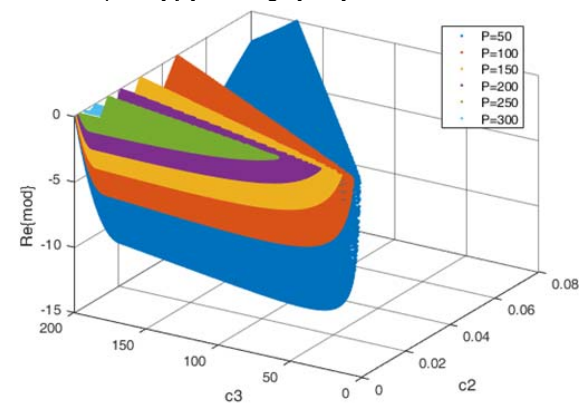
stawiają przypadek obciążenia rezystancyjnego dla zmiennych ślizgowych z członem kompensującym napięciowym (3) i energetycznym (4).



Rys.2. Nałożenie poszczególnych zbiorów punktów, dla parametrów  $c_2$  i  $c_3$ , dla wybranych wartości rezystancji obciążenia. Wartość rezystancji obciążenia  $R$  podano w  $\Omega$ . Zmienna ślizgowa z członem kompensującym napięciowym



Rys.3. Nałożenie poszczególnych zbiorów punktów, dla parametrów  $c_2$  i  $c_3$ , dla wybranych wartości rezystancji obciążenia. Wartość rezystancji obciążenia  $R$  podano w  $\Omega$ . Zmienna ślizgowa z członem kompensującym energetycznym

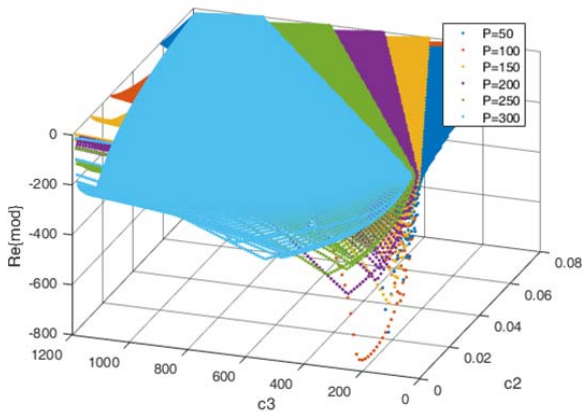


Rys.4. Nałożenie poszczególnych zbiorów punktów, dla parametrów  $c_2$  i  $c_3$ , dla wybranych wartości mocy obciążenia. Wartość mocy obciążenia  $P$  podano w W. Zmienna ślizgowa z członem kompensującym napięciowym

Rysunki 4 oraz 5 przedstawiają przypadek obciążenia o charakterze stałej mocy dla zmiennych ślizgowych z członem kompensującym napięciowym (3) i energetycznym (4).

Analiza zbiorów punktów przedstawionych na rysunkach 2-5, pozwala na określenie wpływu rezystancji obciążenia lub mocy obciążenia na stabilność układu przetwornika DC-DC dla danych wartości współczynników  $c_2$  i  $c_3$ . Widoczne jest, że zakres parametrów zapewniających stabilność, maleje wraz ze wzrostem obciążenia. Jednocześnie parametry, które gwarantują stabilność dla największego analizowanego obciążenia, zapewniają stabilność również

dla mniejszych obciążeń. Powyższe wnioski są niezależne od typu rozważanego obciążenia.



Rys.5. Nałożenie poszczególnych zbiorów punktów, dla parametrów  $c_2$  i  $c_3$ , dla wybranych wartości mocy obciążenia. Wartość mocy obciążenia  $P$  podano w  $W$ . Zmienna ślizgowa z członem kompensującym energetycznym

Aby rozwiązać problem tzw. chatteringu, a także aby móc zastosować modulator PWM, wybrano dobrze znane i często stosowane [10, 11, 16, 17, 18, 19] prawo sterowania z funkcją nasycenia.

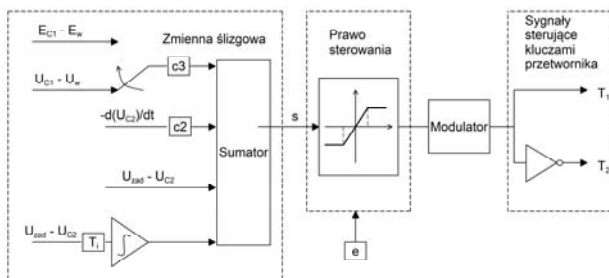
$$(5) \quad u = \text{sat}(s) = \begin{cases} -1 & \text{dla } s < -e \\ \frac{1}{e} s & \text{dla } |s| \leq e \\ 1 & \text{dla } s > e \end{cases}$$

Niestety, w takim przypadku, w układzie regulacji pojawia się uchyb w stanie ustalonym, wynikający z wprowadzenia ciągłego prawa sterowania. Można go wyeliminować dodając człon całkujący do zmiennej ślizgowej. Zmienne ślizgowe z członem tłumiącym uwzględniającym napięcie na kondensatorze  $C_1$  oraz z członem tłumiącym uwzględniającym energię kondensatora  $C_1$  przybierają postać

$$(6) \quad s = (U_{zad} - U_{C2}) + c_2(-\dot{U}_{C2}) + c_3(U_{C1} - U_w) + T_i \int (U_{zad} - U_{C2})$$

oraz

$$(7) \quad s = (U_{zad} - U_{C2}) + c_2(-\dot{U}_{C2}) + c_3(E_{C1} - E_w) + T_i \int (U_{zad} - U_{C2})$$



Rys.6. Regulator ślizgowy z ciągłym sygnałem sterującym oraz modulatorem PWM

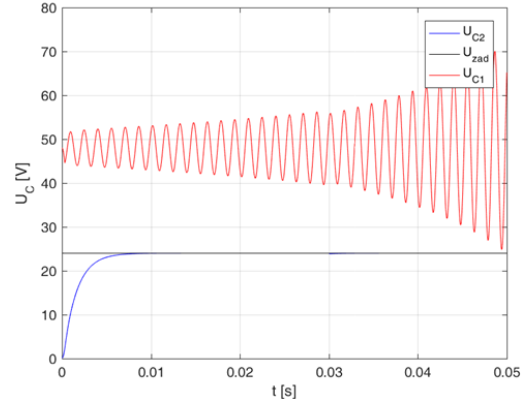
Zakładając że stała  $T_i$  członu całkującego jest ograniczona oraz to, że sam człon oddziałuje jedynie na sygnały wolnozmiennie, odbiegające zdecydowanie od częstotliwości istotnych z punktu widzenia stabilności układu, można uznać, że zakres współczynników, dla których zamknięty układ regulacji jest stabilny nie ulegnie zmianie. Wartości parametrów wyliczone dla zmiennych ślizgowych bez obecności członu całkującego, będą również zasadne dla omawianych przypadków.

Biorąc pod uwagę zmienne ślizgowe (6), (7) oraz przyjmując ciągłe prawo sterowania z równania (5), regulator ślizgowy ma postać pokazaną na rysunku.

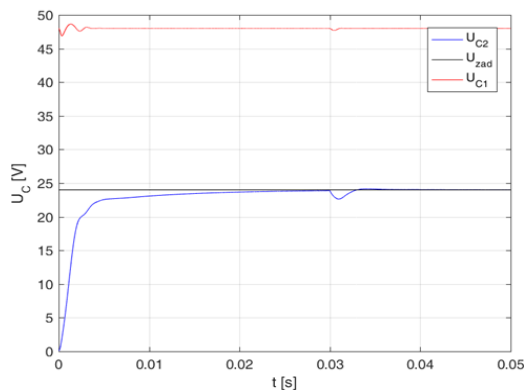
### Badania symulacyjne układu regulacji ślizgowej przetwornicy DC-DC ze słabo tłumionym wejściowym filtrem LC.

Dla regulatora ślizgowego z rysunku 6 wykonano badania symulacyjne dla przetwornika DC-DC z wejściowym filtrem LC, dla dwóch typów obciążeń. Przykładowe wyniki tych badań umieszczono poniżej.

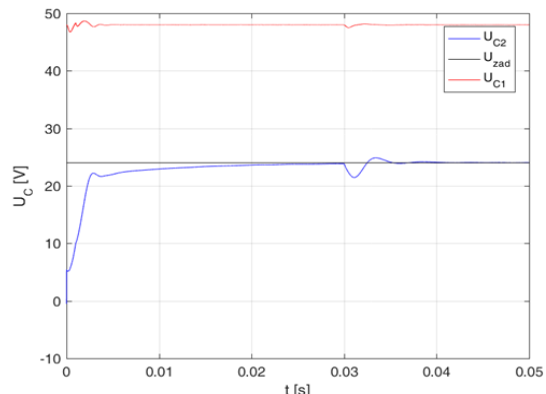
Pierwszym z obciążeń, dla których przeprowadzono badania symulacyjne jest obciążenie rezystancyjne. Dane dotyczące wartości elementów układu zaczerpnięto z tabeli 1. Przetwornik startuje z obciążeniem  $8 \Omega$ , a następnie po czasie 0,03 s od chwili rozpoczęcia symulacji dokonywana jest skokowa zmiana obciążenia do wartości  $4 \Omega$ .



Rys.7. Start przetwornicy przy sterowaniu prostą ślizgową z równania (7) oraz prawa sterowania z równania (5) dla współczynników  $c_2 = 0.0015$ ,  $c_3 = 0$  oraz  $T_i = 150$ . Częstotliwość modulacji 65kHz



Rys.8. Start przetwornicy z zastosowaniem powierzchni ślizgowej z równania (7) oraz prawa sterowania z równania (6) dla współczynników  $c_2 = 0.0015$ ,  $c_3 = 150$  oraz  $T_i = 150$ . Częstotliwość modulacji 65kHz



Rys.9. Start przetwornicy z zastosowaniem powierzchni ślizgowej z równania (6) oraz prawa sterowania z równania (5) dla współczynników  $c_2 = 0.0015$ ,  $c_3 = 50$  oraz  $T_i = 150$ . Częstotliwość modulacji 65kHz

Drugim z typów obciążeń, dla których przeprowadzono badania symulacyjne jest obciążenie o charakterze stałej mocy. Dane dotyczące wartości elementów układu zaczerpnięto z tabeli 1. Przetwornik startuje z obciążeniem 100 W, a następnie po czasie 0,03 s od chwili rozpoczęcia symulacji dokonywana jest skokowa zmiana obciążenia do wartości 200 W

Wyniki badań symulacyjnych potwierdziły skłonność układu do występowania oscylacji w elementach filtra wejściowego (rys. 7) oraz możliwość eliminacji tych oscylacji w przypadku zastosowania algorytmu uwzględniającego prawo sterowania z równania (5).

### Badania laboratoryjne

Aby wykazać użyteczność oraz poprawność rozważań analitycznych z poprzednich rozdziałów, wykonano badania laboratoryjne przetwornika DC-DC obniżającego napięcie z wejściowym filtrem LC dla obciążenia rezystancyjnego i obciążenia o charakterze stałej. Badania zostały zrealizowane na specjalnie zbudowanym stanowisku laboratoryjnym. Fotografia 1 przedstawia stanowisko laboratoryjne.



Fot.1. Stanowisko laboratoryjne z przetwornicą DC-DC obniżającą napięcie i kartą dSpace

W trakcie badań przeprowadzono szereg prób, za każdym razem dokonując akwizycji danych dla trzech strategii sterowania. Badaniu poddano: algorytm ze zmienną ślizgową nie uwzględniającą członu tłumiącego, algorytm ze zmienną ślizgową uwzględniającą wartość napięcia na kondensatorze C<sub>1</sub> oraz algorytm ze zmienną ślizgową uwzględniającą wartość energii kondensatora C<sub>1</sub>. Przeprowadzono następujące badania stanów dynamicznych przetwornika DC-DC z wejściowym filtrem LC:

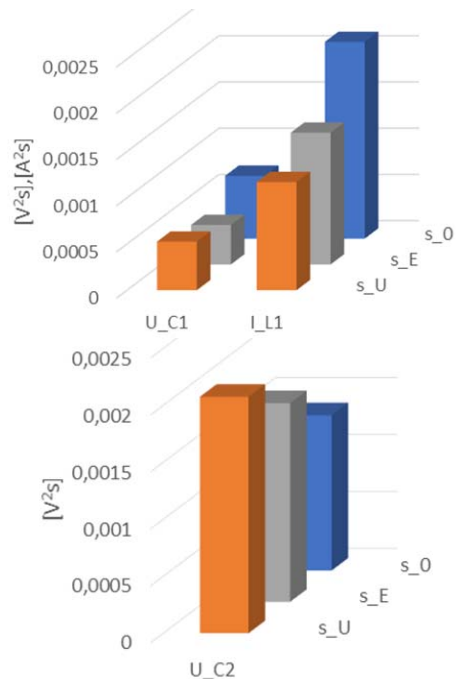
- start przetwornika z rozwartymi zaciskami wyjściowymi,
- start przetwornika pod obciążeniem,
- skokowa zmiana obciążenia.

Akwizycja danych pomiarowych i sam proces sterowania odbywał się z użyciem karty dSPACE. Kluczowe sygnały układu podlegały również równoległemu zapisowi z wykorzystaniem oscyloskopu. W celu oceny jakości zaproponowanych algorytmów postanowiono wykorzystać wskaźnik ISE (z ang. *Integral Square Error*).

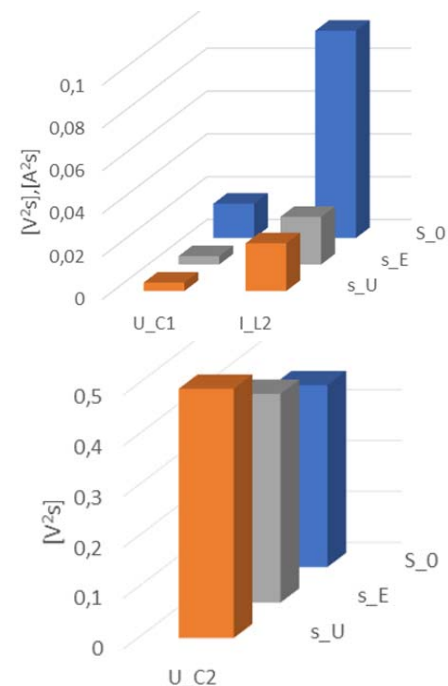
Wielkościami dla których zostały wyznaczone wskaźniki jakości są:

- uchyb napięcia wejściowego rozumiany, jako różnica między wartością napięcia zasilania ( $U_{zas}$ ) i napięciem kondensatora C<sub>1</sub> (U<sub>C1</sub>), który jest miarą oscylacji napięcia w filtrze wejściowym,
- uchyb prądu wejściowego, rozumiany jako różnica między przeliczonym na stronę pierwotną prądem dławika L<sub>2</sub> ( $i_{L2}$ ) i prądem dławika L<sub>1</sub> ( $i_{L1}$ ), który jest miarą oscylacji prądu w filtrze wejściowym,
- uchyb napięcia wyjściowego, rozumiany jako różnica między wartością zadaną i rzeczywistym napięciem

występującym na kondensatorze C<sub>2</sub> (U<sub>C2</sub>), który jest miarą odstępstwa napięcia wyjściowego od zadanego.



Rys. 10. Wskaźniki jakości ISE uchybu napięcia na kondensatora C<sub>1</sub>, prądu indukcyjności L<sub>1</sub> oraz uchybu napięcia wyjściowego. Skokowa zmiana obciążenia z 8 Ω do 4 Ω.



Rys.11. Wskaźniki jakości ISE uchybu napięcia kondensatora C<sub>1</sub>, prądu indukcyjności L<sub>1</sub> oraz uchybu napięcia wyjściowego. Skokowa zmiana obciążenia z 72 W do 144 W

W dalszej sekcji pracy dokonano analizy wartości uzyskanych wskaźników jakości. W celu zapewnienia wysokiej jakości uzyskanych wyników, pomiary kluczowych wartości sygnałów przetwornika (napięcia i prądy elementów gromadzących energię) zrealizowano za pomocą oscyloskopu MS07034A. Następnie stworzono skrypt w języku Matlab ułatwiający interpretację

otrzymanych danych pomiarowych. W przedstawionych wynikach obowiązują następujące oznaczenia:

- $s_0$  – oznacza zmienną ślizgową, w której nie uwzględniono członu tłumiącego oscylacje wejściowego filtra LC (kolor niebieski),
- $s_U$  – oznacza zmienną ślizgową, w której uwzględniono człon tłumiący oscylacje z napięciem kondensatora  $C_1$  (kolor pomarańczowy),
- $s_E$  – oznacza zmienną ślizgową, w której uwzględniono człon tłumiący oscylacje z energią kondensatora  $C_1$  (kolor szary).

Dokonując analizy wartości poszczególnych wskaźników zaprezentowanych na rysunkach 11 oraz 12 można dojść do wniosku, że zaproponowane algorytmy sterowania przetwornikiem DC-DC z wejściowym filtrem LC, tłumią w znacznym stopniu oscylacje prądu w indukcyjności  $L_1$  oraz napięcia na kondensatorze  $C_1$ . Należy przy tym zauważyć, że znaczna redukcja oscylacji nie wiąże się ze znaczącym pogorszeniem wartości wskaźnika napięcia wyjściowego. Ponadto algorytm sterowania ze zmienną ślizgową z członem tłumiącym uwzględniającym energię kondensatora  $C_1$ , w większości przypadków przynosi lepsze rezultaty pod względem wartości wskaźników jakości jak i przebiegów sygnałów przetwornika, niż algorytm ze zmienną ślizgową z członem tłumiącym uwzględniającym wartość napięcia na kondensatorze  $C_1$ .

### Podsumowanie

Celem pracy było przeprowadzenie syntezy regulatora ślizgowego, dla obniżającego napięcie przetwornika DC-DC, z wejściowym filtrem LC, dla obciążenia rezystancyjnego oraz obciążenia o charakterze stałej mocy. Zaprezentowano dwie płaszczyzny ślizgowe, które można zastosować w przypadku realizacji algorytmów regulacji przetwornika pracującego z obciążeniem o charakterze rezystancyjnym, jak i stałej mocy. Stabilność pokazanych struktur regulacji, dzięki procesowi linearyzacji została udowodniona dla szerokiego zakresu obciążeń.

Następnym elementem artykułu było przeprowadzenie badań symulacyjnych zaproponowanych struktur regulacji dla przetwornika DC-DC obniżającego napięcie z wejściowym filtrem LC. Badania wykonano dla dwóch typów obciążenia (obciążenia o charakterze rezystancyjnym oraz obciążenia o charakterze stałej mocy)

Zakończone pozytywnie badania symulacyjne potwierdziły słuszność przeprowadzonej analizy teoretycznej stabilności zaprezentowanych struktur regulacji.

W celu sprawdzenia jak proponowane struktury regulacji zachowują się w przypadku rzeczywistego przetwornika, przygotowano stanowisko laboratoryjne z przetwornikiem DC-DC obniżającym napięcie z wejściowym filtrem LC. Stanowisko wyposażono w kartę dSPACE, niezbędne elementy zasilające oraz kontrolno – pomiarowe. Następnie przeprowadzono badania rzeczywistego przetwornika z zaimplementowanymi strukturami regulacji, dla dwóch typów obciążeń (obciążenia rezystancyjnego oraz obciążenia o charakterze stałej mocy). Wykonano pomiary dla przypadku sygnału sterującego o charakterze ciągłym. Analiza wyników badań laboratoryjnych potwierdza słuszność przeprowadzonych analitycznych badań stabilności oraz badań symulacyjnych.

**Autorzy:** dr inż. Karol Tatar, Politechnika Łódzka, Instytut Automatyki, 90-924 Łódź, ul. B. Stefanowskiego 18/22, E-mail: karol.tatar@p.lodz.pl; dr inż. Piotr Leśniewski, Politechnika Łódzka, Instytut Automatyki, 90-924 Łódź, ul. B. Stefanowskiego 18/22, E-mail: piotr.lesniewski@p.lodz.pl; dr inż. Piotr Chudzik, Politechnika Łódzka, Instytut Automatyki, 90-924 Łódź, ul. B. Stefanowskiego 18/22, E-mail: piotr.chudzik@p.lodz.pl

### LITERATURA

- [1] Cespedes M., Xing L., Sun J., Constant-power load system stabilization by passive damping, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 26, no. 7, pp. 1832-1836, Lipiec 2011
- [2] Ling R., Maksimovic D., Leyva R., Second-order sliding-mode controller for higher-order DC-DC converters, *Proceeding of IEEE 15th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL)*, str. 1-7, Hiszpania, 2014
- [3] Sira-Ramirez H., Sliding motions in bilinear switched networks, *IEEE Transaction on circuits and systems*, Vol. 34, No. 8, 1987
- [4] Ling R., Maksimovic D., Leyva R., Second-order sliding-mode controller for higher-order DC-DC converters, *IEEE Transaction on Power Electronics*, V. 31, 2016
- [5] Ling R., Maksimovic D., Leyva R., State-machine realization of second-order sliding-mode control for synchronous buck DC-DC converters, *Proceedings of IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, str. 125-132, USA, 2013
- [6] Dominguez F., Fossas E., Martinez L., Stability analysis of a buck converter with input filter via sliding-mode approach, *Proc. IEEE Industrial electronics, control and instrumentation (IECON)*, Bolonia, Włochy, 1994
- [7] Gavagsaz-Ghoachani R., Phattanasak M., Zadni M., Martin J-P., Nahid-Mobarekeh B., Pierfederici S., Stability issue of DC-DC converters with input LC filter via flatness-based control, *Proc. IEEE Transportation electrification conference and expo (ITEC)*, Dearborn, USA, 2016
- [8] Phattanasak M., Gavagsaz-Ghoachani R., Martin J-P, Nahid-Mobarekeh B., Riedinger P., Improved performance of a control using switching command based on Lyapunov functions of a boost converter with LC input filter, *Proc. IEEE Electrical systems for aircraft, ship propulsion and road vehicle & international transportation electrification conference (ESARS-ITEC)*, Toulouse, Francja, 2016
- [9] Phattanasak M., Gavagsaz-Ghoachani R., Martin J-P, Phattanasak M., Gavagsaz-Ghoachani R., Martin J-P, Nahid-Mobarekeh B., Riedinger P., Nahid-Mobarekeh B., Comparative study of two control methods for a boost converter with LC input filter: indirect sliding-mode and flatness based control, *Proc. IEEE Renewable energy research and applications (ICRERA)*, Palermo, Włochy, 2015
- [10] Tatar K., Leśniewski P., Chudzik P., Sterowanie ślizgowe przetwornicy DC-DC ze słabo tłumionym wejściowym filtrem LC, *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 3, 106-110, 2018
- [11] Tatar K., Synteza regulatorów ślizgowych dla przetworników energoelektronicznych ze słabo tłumionymi wejściowymi filtrami LC, *Praca doktorska, Politechnika Łódzka*, 2019
- [12] Chudzik P., Tatar K., Lisowski G., Kowalski M., Zastosowanie uśredniania wielkości sinusoidalnych metodą najmniejszych kwadratów w algorytmach sterowania i redukcji zakłóceń, *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 5, str. 141-145, 2016
- [13] Sosa J.M., Silva-Vera E. D., Martinez-Rodriguez P.R., Valdez-Fernandez A. A., Control design for a quadratic buck converter with LC input filter, *Proc. IEEE International conference on power electronics (CIEP)*, Guanajuato, Meksyk, 2016
- [14] Ifikhar M. U., Godoy E., Lefranc P., Sadarnac D., Karimi C., A control strategy to stabilize PWM dc-dc converters with input filters using state-feedback and pole-placement, *Proc. IEEE Telecommunications Energy Conference (INTELEC)*, 14-18 Wrzesień 2008, 1-5
- [15] Huangfu Y., Pang S.; Nahid-Mobarekeh B.; Guo L.; Rathore A. K.; Gao F., Stability Analysis and Active Stabilization of On-board DC Power Converter System with Input Filter, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 65, no. 1, 790-799, Styczeń 2018
- [16] Utkin V. I., Variable structure systems with sliding modes, *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 22, nr 2, s212-222, 1977
- [17] Utkin V. I., Sliding Modes and their Applications in Variable Structure Systems, MIR, Moskwa, 1978
- [18] Utkin V. I., Variable structure systems: present and future, *Automation Remote Control*, vol. 44, nr 9, str. 1105-1119, 1983
- [19] Bartoszewicz A., Chattering attenuation in sliding mode control systems, *Control and Cybernetics*, vol. 29, nr 2, 2000, 585 - 594.