

С. М. Пересада¹
 Є. О. Ніконенко¹
 С. М. Ковбаса¹
 О. В. Стаценко¹

СТІЙКІСТЬ ДВОКОНТУРНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ НАПРУГОЮ DC-DC ПЕРЕТВОРЮВАЧА

¹Національний технічний університет України
 «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Розглянуті питання розробки та дослідження двоконтурних систем керування напругою ланки постійного струму підвищувальних DC-DC перетворювачів, які мають суттєво нелінійну і немініально-фазову математичну модель. Обґрунтовано метод аналізу класичних систем керування підвищувальними DC-DC перетворювачами, які є аналогічними до систем векторно-керованих електроприводів, в яких регулятор швидкості замінюється на регулятор напруги ланки постійного струму.

Показано, що за умови розділення у часі процесів керування вхідним струмом і напругою ланки постійного струму DC-DC перетворювача можна розглядати динаміку системи керування зниженого порядку на основі теорії сингулярно-вироджених систем. Водночас доведено, що динаміка системи зниженого порядку за умови дії підпорядкованого алгоритму керування є локально (асимптотично) стійкою. Визначено, що умови розділення процесів регулювання у часі є аналогічними для систем підпорядкованого лінеаризуючого керування з пропорційним або пропорційно-інтегральним регулятором напруги. Розділення процесів керування у часі досягається, коли внутрішній контур регулювання струму є набагато швидшим за зовнішній контур регулювання напруги.

Проведене методом математичного моделювання дослідження свідчить, що за умови розділення процесів регулювання вхідного струму і напруги ланки постійного струму у часі динаміка системи керування вихідною напругою DC-DC перетворювача повного порядку наближається до динаміки системи керування зниженого порядку. Алгоритм керування має типову структуру сучасних керованих перетворювачів, які застосовуються для керування напругою в гібридних джерелах живлення електричних транспортних засобів. Аналіз результатів математичного моделювання показав, що в досліджуваному підвищувальному DC-DC перетворювачі вплив опору індуктивності вхідного кола на стійкість та показники якості регулювання напругою ланки постійного струму є несуттєвим.

Ключові слова: підвищувальний DC-DC перетворювач, регулятор напруги, похибка регулювання, доведення стійкості, теорія сингулярно-вироджених систем.

Вступ

Підвищувальні DC-DC перетворювачі широко застосовуються для підвищення постійної напруги, наприклад, в електричних транспортних засобах для керування потоками потужності комбінованих джерел живлення [1].

Математична модель підвищувального DC-DC перетворювача (бустера) є моделлю другого порядку, водночас вона є суттєво нелінійною і немініально-фазовою [2], [3].

Типова двоконтурна структура з регуляторами струму і напруги відома [4], однак, внаслідок нелінійності моделі, в літературі відсутній доказ стійкості системи керування на основі моделі повного порядку DC-DC перетворювача [4], а також відсутні рекомендації щодо налаштування системи керування. В роботі проаналізовано стійкість двоконтурних систем регулювання напруги підвищувальних DC-DC перетворювачів з пропорційним регулятором (П-регулятором) струму та пропорційним і пропорційно-інтегральним регулятором (ПІ-регулятором) напруги [5] згідно з теорією сингулярно-вироджених систем.

Метою роботи є доказ локальної стійкості системи керування напругою підвищувального DC-DC перетворювача, а також встановлення умов, за яких можна розглядати модель системи зниженого порядку, та формулювання рекомендацій щодо налаштування регуляторів.

Математична модель та постановка задачі

Математична модель підвищувального DC-DC перетворювача, рис. 1, в усереднених координатах має вигляд [2]

$$\dot{V} = \frac{1}{C} \left(\frac{1}{V} ui - i_L \right), \quad \dot{i} = \frac{1}{L} (-Ri + E - u), \quad (1)$$

де V, I — напруга ланки постійного струму і струм індуктивності; C, L, R — вихідна ємність, індуктивність та опір вхідного кола; i_L — струм навантаження; E — вхідна напруга; u — керувальний вплив.

Нехай виконуються такі припущення: параметри моделі (1) відомі та сталі; струм навантаження $i_L = \text{const}$, вхідна напруга

$E = \text{const}$; задане значення вихідної напруги $V^* = \text{const}$, $V^* > 0$.

За цих припущень необхідно синтезувати алгоритм стабілізації напруги, який забезпечує локальну асимптотичну стійкість системи, так щоби похибка регулювання напруги ланки постійного струму $\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{V} = 0$, де $\tilde{V} = V - V^*$.

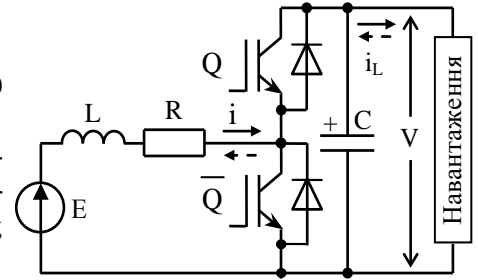


Рис. 1. Схема DC-DC перетворювача

Доказ стійкості

Оскільки паразитичний опір індуктивності R є нехтовно малим, то для аналізу вважатимемо, що $R = 0$.

Визначимо похибку регулювання струму у вигляді $\tilde{i} = i - i^*$, де i^* — заданий струм. За умови використання П-регулятора струму

$$u = E + Lk_i \tilde{i}, \quad (2)$$

де $k_i > 0$ — коефіцієнт пропорційного регулятора струму.

Рівняння динаміки контуру регулювання струму набуває вигляду

$$\dot{\tilde{i}} = -k_i \tilde{i} - \dot{i}^*, \quad (3)$$

де \dot{i}^* — похідна від заданого струму i^* .

З (1) і (2) рівняння динаміки напруги для $V^* = \text{const}$ буде мати вигляд

$$\dot{\tilde{V}} = \frac{1}{C} \left(\frac{1}{V} (Ei^* + Lk_i \tilde{i} i^* + E\tilde{i} + Lk_i \tilde{i}^2) - i_L \right). \quad (4)$$

Випадок П-регулятора напруги

Алгоритм стабілізації напруги в (4) з властивостями лінеаризації зворотним зв'язком сформуємо так:

$$i^* = \left(\frac{E}{CV} \right)^{-1} (-k_v \tilde{V}), \quad V > 0, \quad (5)$$

де $k_v > 0$ — коефіцієнт пропорційного регулятора напруги, $E/CV \gg 0$.

Після підстановки (5) в (4) отримаємо рівняння динаміки замкненої системи у вигляді

$$\dot{\tilde{V}} = -k_v \tilde{V} + \frac{E}{CV} \tilde{i} - \frac{L}{E} k_i k_v \tilde{V} \tilde{i} + \frac{L}{CV} k_i \tilde{i}^2 - \frac{\dot{i}_L}{C}; \quad \dot{\tilde{i}} = -k_i \tilde{i} + \left(\frac{E}{CV} \right)^{-1} k_v \dot{\tilde{V}}. \quad (6)$$

Для подальшого аналізу вважатимемо, що коефіцієнт $E/CV = \text{const}$. Виконано лінеаризацію (6) в околі положення рівноваги $(\tilde{V}, \tilde{i}) = 0$. Для цього знехтувано квадратичними складовими, які пропорційні $\tilde{V} \tilde{i}$ та \tilde{i}^2 в першому рівнянні (6),

$$\dot{\tilde{V}} = -k_v \tilde{V} + \frac{E}{CV} \tilde{i} - \frac{i_L}{C}; \quad \dot{\tilde{i}} = -k_i \tilde{i} + \left(\frac{E}{CV} \right)^{-1} k_v \dot{\tilde{V}}. \quad (7)$$

Визначимо

$$k_i = k_v / \varepsilon, \quad 0 < \varepsilon < 1 \quad (8)$$

як «малий» додатний параметр в (7), тоді

$$\dot{\tilde{V}} = -k_v \tilde{V} + \frac{E}{CV} \tilde{i} - \frac{i_L}{C}; \quad \varepsilon \dot{\tilde{i}} = -k_v \tilde{i} + \varepsilon \left(\frac{E}{CV} \right)^{-1} k_v \dot{\tilde{V}}. \quad (9)$$

Відповідно до теорії сингулярно-вироджених систем [6], розв'язок зниженого порядку для системи (9), коли $k_i \gg 1$ ($\varepsilon \rightarrow 0$), знаходиться за умови $\varepsilon = 0$, тобто

$$\dot{\tilde{V}} = -k_v \tilde{V} - \frac{i_L}{C}, \quad \tilde{i} = 0, \quad (10)$$

де \bar{x} — позначення змінної в системі зниженого порядку.

Таким чином, система другого порядку (7), за умови $k_i \gg k_v$ має розв'язок зниженого порядку

$$\dot{\tilde{V}} = -k_v \tilde{V} - \frac{i_L}{C}. \quad (11)$$

Відповідно до теорії сингулярно-вироджених систем, різниця між розв'язками для систем повного та зниженого порядку має порядок величини ε , а саме

$$\tilde{V}(t) = \bar{V} + O(\varepsilon). \quad (12)$$

Тобто, за достатньо «малих» значень ε (коли $k_i \gg k_v$) усі рішення будуть наближатися до $\tilde{V} = 0$, $\tilde{i} = 0$ за умови $i_L = 0$. Таким чином, вихідна нелінійна система (6) є локально стійкою.

Випадок ПІ-регулятора напруги

З (4) алгоритм асимптотичного відпрацювання напруги з властивостями лінеаризації зворотним зв'язком сформуємо у вигляді ПІ-регулятора

$$i^* = \left(\frac{E}{CV} \right)^{-1} (-k_v \tilde{V} + x_v); \quad \dot{x}_v = -k_{vi} \tilde{V}, \quad (13)$$

де $(k_v, k_{vi}) > 0$ — пропорційний і інтегральний коефіцієнти регулятора напруги.

Після підстановки (13) в (4) отримаємо рівняння динаміки системи у вигляді

$$\dot{\tilde{V}} = -k_v \tilde{V} + x_v + \left(\frac{E}{CV} + \frac{L}{E} k_i x_v \right) \tilde{i} - \frac{1}{E} L k_i k_v \tilde{V} \tilde{i} + \frac{L}{CV} k_i \tilde{i}^2 - \frac{i_L}{C}; \quad \dot{x}_v = -k_{vi} \tilde{V}; \quad \dot{\tilde{i}} = -k_i \tilde{i} + \left(\frac{E}{CV} \right)^{-1} (k_{vi} \tilde{V} + k_v \dot{\tilde{V}}). \quad (14)$$

За концептуальною лінією аналізу, аналогічно попередньому випадку, виконаємо лінеаризацію системи в околі положення рівноваги $(\tilde{V}, \tilde{i}) = 0$ та перепишемо (14) згідно з (8), тоді

$$\dot{\tilde{V}} = -k_v \tilde{V} + x_v + \left(\frac{E}{CV} + \frac{L}{E} k_i x_v \right) \tilde{i} - \frac{i_L}{C}; \quad \dot{x}_v = -k_{vi} \tilde{V}; \quad \varepsilon \dot{\tilde{i}} = -k_v \tilde{i} + \varepsilon \left(\frac{E}{CV} \right)^{-1} (k_{vi} \tilde{V} + k_v \dot{\tilde{V}}). \quad (15)$$

Розв'язок зниженого порядку для системи (15) для $k_i \gg k_v$ ($\varepsilon \rightarrow 0$) буде

$$\dot{\tilde{V}} = -k_v \tilde{V} + \bar{x}_v; \quad \dot{\bar{x}}_v = -k_{vi} \tilde{V}, \quad \tilde{i} = 0, \quad (16)$$

де $\bar{x}_v = \bar{x}_v - i_L / C$.

Таким чином система третього порядку (14), за умови $k_i \gg k_v$, має розв'язок зниженого порядку

$$\dot{\tilde{V}} = -k_v \tilde{V} + \bar{x}_v; \quad \dot{\bar{x}}_v = -k_{vi} \tilde{V}. \quad (17)$$

Отже, для достатньо малих значень ε (коли $k_i \gg k_v$) розв'язки (15) сходяться до нуля $\tilde{V} = \bar{x}_v = \tilde{i} = 0$ за умови $i_L = 0$. Водночас інтегральна складова x_v забезпечує оцінку постійної компоненти $i_L / C = \text{const}$. Система зниженого порядку є лінійною і стійкою, тому вихідна неліній-

на система (14) є локально асимптотично стійкою.

Структурну схему системи керування показано на рис. 2. Результати моделювання показують, що для фізично існуючих значень R отримані результати зберігаються, і для достатньо малих ε динаміка контуру регулювання струму є на порядок швидшою за динаміку контуру напруги.

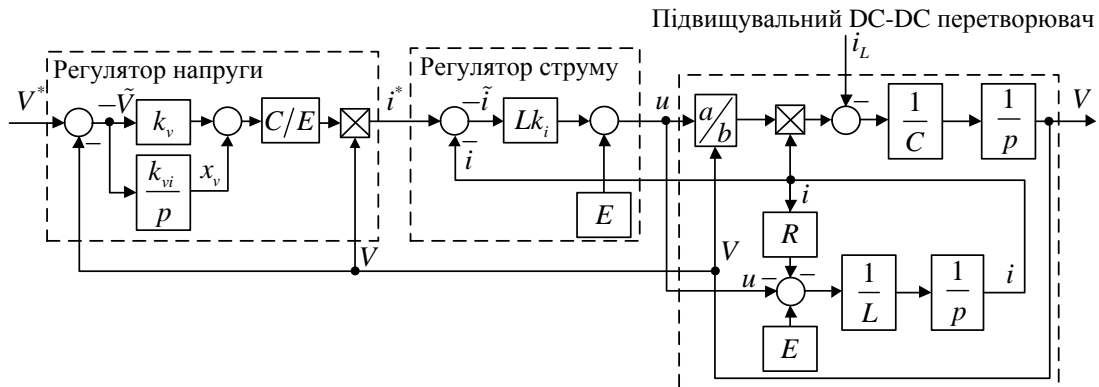


Рис. 2. Структурна схема системи керування

Динамічна поведінка підсистем напруги і струму визначається налаштуванням регулятора напруги $k_v > 0$, $k_{vi} > 0$ і регулятора струму $k_i > 0$, відповідно. При цьому стандартне налаштування встановлює співвідношення $k_{vi} = k_v^2/4$ для $\zeta = 1$; $k_{vi} = k_v^2/2$ для $\zeta = 0,707$; ζ — коефіцієнт демпфування в контурі регулювання напруги. Швидкодія контуру визначається частотою власних недемпфованих коливань $\omega_{0v}^2 = k_{vi}$.

Результати математичного моделювання

Для дослідження моделюванням вважатимемо, що параметри моделі (1) дорівнюють [7], [8]: індуктивність вхідного кола $L = 0,011$ Гн, внутрішній опір $R = 0,5$ Ом, ємність конденсатора ланки постійного струму $C = 500$ мкФ, вхідна напруга $E = 25$ В. Задане значення напруги дорівнює $V_{dc}^* = 50$ В, початкове значення напруги встановлено $V_{dc}(0) = 50$ В. Умовами тесту передбачено прикладання струму навантаження 1 А в момент часу 0,05 с.

Розділення у часі процесів регулювання напруги та струму у відповідності до рівнянь (14) встановлено визначенням $\varepsilon = k_v/k_i = 0,2$ для коефіцієнта демпфування $\zeta = 1$. Для $\omega_{0v} = 175$ рад/с значення коефіцієнтів регуляторів дорівнюють: $k_v = 350$; $k_{vi} = k_v^2/4$; $k_i = 1750$.

На *першому етапі* порівнюється динаміка систем повного і зниженого порядку. Метою цього дослідження є підтвердження можливості застосування системи зниженого порядку для аналізу та синтезу підсистеми регулювання напруги. Для випадку системи зниженого порядку взято $\tilde{i} = 0$. Перехідні процеси в умовах цього тесту показані на рис. 3 для випадку застосування ПІ-регулятора напруги. Динамічну поведінку похибки відпрацювання напруги та вхідного струму показано тільки в момент під'єднання навантаження.

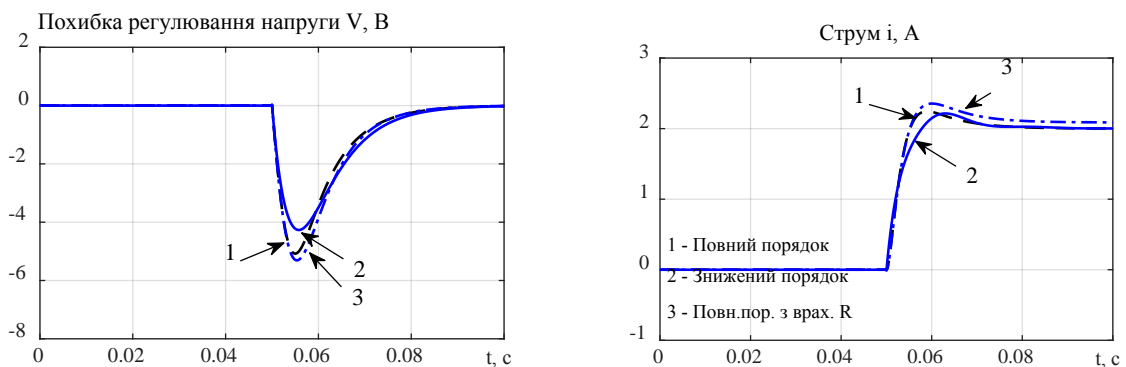


Рис. 3. Перехідні процеси: 1 — в системі повного порядку; 2 — в системі зниженого порядку; 3 — системі повного порядку з урахуванням опору індуктивності R

З рис. 3 випливає, що динамічна поведінка систем повного і зниженого порядку практично однакова для розділення процесів керування напруги і струму у часі за малих ε . У такому випадку динаміка контуру регулювання струму є швидшою за динаміку контуру регулювання напруги. Врахування опору R приводить лише до незначного збільшення значення струму під навантаженням.

На *другому етапі* досліджено динамічну поведінку регулювання напруги за зміни співвідношення між налаштуванням контурів струму і напруги. При цьому коефіцієнт регулятора напруги залишився $k_v = 350$, а налаштування регулятора струму $k_i = k_v/\varepsilon$ визначалося коефіцієнтом ε .

Графіки перехідних процесів в системі зниженого порядку показані на рис. 4 як «еталонні». З ними порівнювалися перехідні процеси в системі з об'єктом керування повного порядку за різних співвідношень у налаштуваннях регуляторів напруги та струму, що забезпечують різне часове розділення процесів керування: $\varepsilon = 0,2$ — графік 1, $\varepsilon = 0,5$ — графік 2, $\varepsilon = 0,8$ — графік 3.

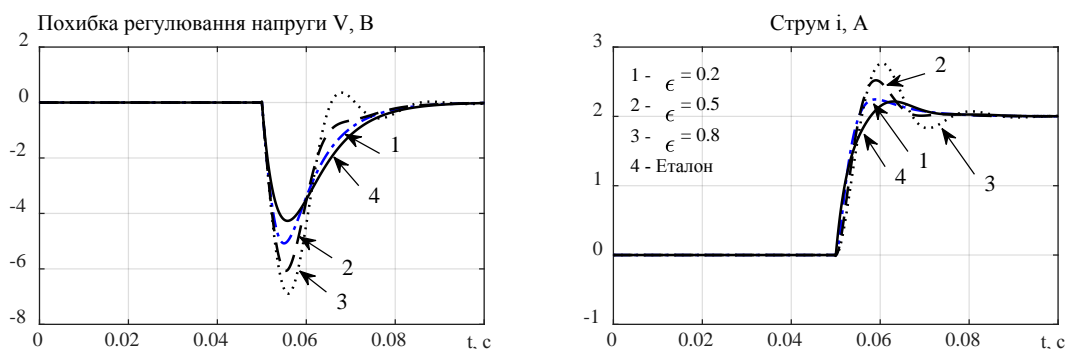


Рис. 4. Порівняння перехідних процесів в системі повного порядку

З рис. 4 випливає, що умова $\varepsilon = 0,2$ для розроблення алгоритму керування є достатньою для розділення у часі процесів регулювання струму та напруги. При цьому процеси регулювання струму та напруги стають квазірозв'язаними і наближаються до еталонних, що і було основною ідеєю у проектуванні алгоритму керування.

Важливо зазначити, що силові системи з електричним чи електромеханічним перетворенням енергії мають подібну структуру рівнянь динаміки до структури підвищувального DC-DC перетворювача, до прикладу: системи генерування на основі АГ, системи керування машиною подвійного живлення, системи керування напругою ланки постійного струму силових активних фільтрів, системи керування вихідною напругою входних керованих випрямлячів тощо [7], [8].

Висновки

Доведено локальну стійкість двоконтурних систем керування напругою підвищувального DC-DC перетворювача з П-регулятором струму і П(П)-регулятором напруги на основі теорії сингулярно-вироджених систем. Встановлено, що за умови розділення процесів керування струмом і напругою у часі, можна розглядати динаміку системи зниженого порядку. Показано, що врахування опору індуктивності майже не впливає на стійкість системи і на результати математичного моделювання системи зниженого порядку.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] A. Yazdani, and R. Iravani, *Voltage-sourced converters in power systems*, Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2010.
- [2] V. A. Caliskan, O. C. Verghese, and A. M. Stankovic, "Multifrequency averaging of DC/DC converters," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 14, no. 1, pp. 124-133, Jan. 1999. <https://doi.org/10.1109/63.737600>.
- [3] K. L. Shenoy, C. G. Nayak, and R. Mandi, "State space analysis of boost DC/DC converter with voltage mode control," *AIP Conference Proceedings*, AIP Publishing, vol. 1859, no. 1, 2017, pp. 1-7. <https://doi.org/10.1063/1.4990215>.
- [4] M. Forouzesh, Y. Pp. Siwakoti, S. A. Gorji, F. Blaabjerg, and B. Lehman, "Step-up DC-DC converters: A comprehensive review of voltage-boosting techniques, topologies, and applications," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 32, no. 12, pp. 9143-9178, dec. 2017. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2017.2652318>.
- [5] S. Peresada, S. Kovbasa, D. Pristupa, D. Pushnitsyn, and Y. Nikonenko, "Nonlinear control of voltage source AC-DC and DC-DC boost converters," *Bulletin of National Technical University Kharkiv Polytechnic Institute. Problems of Automated Electrodrives. Theory and Practice. Power Electronics and Energy Efficiency*, Kharkiv, no. 27, pp. 84-88, 2017.
- [6] P. V. Kokotović, H. K. Khalil, and J. O'Reilly, *Singular perturbation methods in control: analysis and design*. London, Orlando: Academic Press, 1986.

[7] С. М. Пересада, С. Н. Ковбаса, Є. О. Ніконенко, і С. В. Божко, «Концепція експериментального дослідження електромеханічних систем електричних транспортних засобів з гібридними джерелами живлення,» *Технічна електродинаміка*, № 5, вересень/жовтень, с. 55-60, 2018. <https://doi.org/10.1109/ELNANO.2019.8783731>.

[8] S. Peresada, Y. Nikonenko, S. Kovbasa, A. Kuznetsov, and D. Pushnitsyn, "Rapid prototyping station for batteries-supercapacitors hybrid energy storage systems," in *IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, Kyiv, Ukraine, April 16-18, pp. 826-831, 2019. <https://doi.org/10.1109/ELNANO.2019.8783731>.

Рекомендована кафедрою електромеханічних систем автоматизації, в промисловості і на транспорті ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 26.10.2021

Пересада Сергій Михайлович — д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри автоматизації електромеханічних систем та електроприводу;

Ніконенко Євген Олексійович — аспірант кафедри автоматизації електромеханічних систем та електроприводу, e-mail: evgeniy.nykonenko@gmail.com ;

Ковбаса Сергій Миколайович — д-р техн. наук, доцент, доцент кафедри автоматизації електромеханічних систем та електроприводу;

Стаценко Олексій Володимирович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри автоматизації електромеханічних систем та електроприводу.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ

S. M. Peresada¹
Ye. O. Nikonenko¹
S. M. Kovbasa¹
O. V. Statsenko¹

Stability of Cascaded Voltage Control Systems of DC-DC Converters

¹National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

The paper is devoted to research and development of the cascaded DC-link voltage control systems for DC-DC boost converters whose mathematical model is highly nonlinear and non-minimum phase. The relevance of the analysis method for classic control systems for DC-DC boost converters is substantiated, which are similar to vector-controlled electric drives systems if the speed controller is replaced by DC-link voltage controller.

It is shown that the reduced-order solution of initial nonlinear system dynamics can be obtained giving the time-scale separation between the input current and the DC-link voltage control processes based on the singular perturbation systems theory. In its turn, it is concluded that the reduced-order system dynamics is locally (asymptotically) stable if cascaded control algorithm is applied. The similarity of the time-scale separation conditions for the cascaded control systems with proportional and proportional-integral DC-link voltage controller is shown. The time-scale separation of the control processes is achieved if inner current regulation loop is much faster than the outer voltage regulation loop.

The simulation study demonstrates that if the time-scale separation conditions between the input current and the DC-link voltage regulation are met then the full-order system dynamics of the DC-link voltage regulation of DC-DC boost converters is close to the reduced-order system dynamics. The control algorithm has a typical structure of the modern controlled converters applied in hybrid energy storage systems for electric vehicles. From the results of the simulation study, it follows that the influence of the inner resistance of the input inductance on the system stability and quality indicators of the DC-link voltage control process is insignificant for the investigated DC-DC boost converter.

Keywords: DC-DC boost converter, voltage controller, regulation error, stability proof, singular perturbation systems theory.

Peresada Serhii M. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Chair of Electromechanical Systems Automation and Electrical Drives;

Nikonenko Yevhen O. — Post-Graduate Student of the Chair of Electromechanical Systems Automation and Electrical Drives, e-mail: evgeniy.nykonenko@gmail.com ;

Kovbasa Serhii M. — Dr. Sc. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Chair of Electromechanical Systems Automation and Electrical Drives;

Statsenko Oleksii V. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Chair of Electromechanical Systems Automation and Electrical Drives

С. М. Пересада¹
 Е. А. Никоненко¹
 С. Н. Ковбаса¹
 А. В. Стаценко¹

Устойчивость двухконтурных систем управления напряжением DC-DC преобразователя

¹Национальный технический университет Украины
 «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

Рассмотрены вопросы разработки и исследования двухконтурных систем управления напряжением звена постоянного тока повышающих DC-DC преобразователей, которые имеют существенно нелинейную и неминимально-фазовую математическую модель. Обоснован метод анализа классических систем управления повышающих DC-DC преобразователей, которые являются аналогичными системам векторно-управляемых электроприводов, в которых регулятор скорости заменяется на регулятор напряжения звена постоянного тока.

Показано, что при условии разделения во времени процессов управления входным током и напряжением звена постоянного тока возможно рассматривать динамику системы управления пониженного порядка на основе теории сингулярно-вырожденных систем. В свою очередь, доказано, что динамика системы пониженного порядка при условии действия подчиненного алгоритма управления является локально (асимптотически) устойчивой. Определено, что условия разделения процессов регулирования во времени являются аналогичными для систем подчиненного линейризирующего управления с пропорциональным и пропорционально-интегральным регулятором напряжения. Разделение процессов управления во времени достигается, если внутренний контур регулирования тока является намного более быстрым, чем внешний контур регулирования напряжения.

Проведенное методом математического моделирования исследование свидетельствует, что при условии разделения процессов регулирования входного тока и напряжения звена постоянного тока во времени динамика системы управления выходным напряжением DC-DC преобразователя полного порядка приближается к динамике системы управления пониженного порядка. Алгоритм управления имеет типичную структуру современных управляемых преобразователей, использующихся для управления напряжением в гибридных источниках питания электрических транспортных средств. Анализ результатов математического моделирования показал, что в исследованном повышающем DC-DC преобразователе влияние сопротивления индуктивности входной цепи на устойчивость и показатели качества регулирования напряжения звена постоянного тока является несущественным.

Ключевые слова: повышающий DC-DC преобразователь, регулятор напряжения, ошибка регулирования, доказательство устойчивости, теория сингулярно-вырожденных систем.

Пересада Сергей Михайлович — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой автоматизации электромеханических систем и электропривода;

Никоненко Евгений Алексеевич — аспирант кафедры автоматизации электромеханических систем и электропривода, e-mail: evgeniy.nykonenko@gmail.com ;

Ковбаса Сергей Николаевич — д-р техн. наук, доцент, доцент кафедры автоматизации электромеханических систем и электропривода;

Стаценко Алексей Владимирович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры автоматизации электромеханических систем и электропривода