

СИНТЕЗ ЗАКОНА УПРАВЛЕНИЯ МОСТОВЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ НАПРЯЖЕНИЯ ВЫСОКОЙ МОЩНОСТИ

С. А. АЛЕКСАНДРОВА¹, А. П. БАЕВ², Н. А. НИКОЛАЕВ¹, О. В. СЛИТА¹

¹Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: Alexandrova_sophie@mail.ru

²НИИ точной механики, 195256, Санкт-Петербург, Россия

Представлен модифицированный метод фазового управления мостовым преобразователем напряжения постоянного тока высокой мощности. Предложенная методика основана на изменении частоты коммутации силовых ключей. В целях улучшения динамических характеристик синтезируемой системы и повышения надежности и долговечности преобразователя, что достигается ограничением максимального тока, коммутируемого транзисторами мостового инвертора, разработан алгоритм синтеза ПИ-регулятора с настраиваемыми параметрами, значения которых зависят от напряжения питания.

Ключевые слова: мостовой инвертор, мягкая коммутация, фазовое управление, интервальная математическая модель, ПИ-регулятор с настраиваемыми параметрами, изменяемая несущая частота ШИМ

Введение. В качестве вторичных источников питания и частотных преобразователей для управления электродвигателями [1, 2] в различных отраслях промышленности широко используются транзисторные преобразователи. При низком входном напряжении и требуемых высоких выходных напряжении и мощности применяется мостовая схема преобразователя напряжения [3—8]. Оптимальной по количеству элементов топологией является мостовая схема с повышающим трансформатором и добавочной индуктивностью [9].

В работах [10, 11] представлены способы повышения КПД подобных преобразователей путем вариации частоты широтно-импульсного регулирования (ШИМ) при изменении нагрузки в диапазоне от 25 до 100 %. Выбор частоты проводят исходя из условий достижения мягкой коммутации.

Так как нагрузкой мостового инвертора является трансформатор с дросселем, выбор несущей частоты ШИМ, которая в два раза меньше частоты коммутации транзисторов, является важной комплексной задачей. Увеличение несущей частоты ШИМ позволяет уменьшить линейные размеры сердечника трансформатора при сохранении выходной мощности, что ведет к уменьшению потерь на вихревые токи и гистерезис, но потери, обусловленные переключением силовых ключей, значительно увеличиваются [12]. Анализ функционирования транзисторных модулей [13] подтверждает эффективность изменения несущей частоты ШИМ для увеличения КПД.

При задании входного напряжения и параметров модели в интервальной форме возможно получение параметрически робастной системы с использованием метода модального управления [14]. В работе [15] рассмотрен случай неизмеримости вектора состояния с использованием наблюдающего устройства. Однако перечисленные методы проигрывают по быстродействию и затрачиваемым ресурсам ПИ-регулятору с настраиваемыми параметрами. В настоящей статье предложен метод фазового управления мостовым преобразователем, основанный на изменении частоты коммутации транзисторов. Этот метод позволяет ограничить максимальные токи, коммутируемые силовыми ключами, что увеличивает срок службы дорогостоящих полупроводниковых элементов.

Постановка задачи. Для описания объекта управления рассмотрим функциональную схему силовой части преобразователя, представленную на рис. 1, а, где DC — источник напряжения постоянного тока; VT1—VT4 — IGBT-транзисторы мостового инвертора; VD1—VD4 — диоды; L — добавочная индуктивность; T — высокочастотный повышающий трансформатор; C_f — емкостный фильтр; R_H — активное сопротивление нагрузки [1]. На рис. 1, б представлены графические результаты моделирования: сигналы S_1 — S_4 , управляющие транзисторами VT1—VT4. Между управляющими сигналами пар транзисторов (VT1—VT2 и VT4—VT3) введено время задержки, обеспечивающее мягкую коммутацию ключей [1] — переключение при нулевом напряжении. Фазовое широтно-импульсное регулирование реализовано посредством смещения управляющих сигналов S_3 и S_4 относительно сигналов S_1 и S_2 . Также на рис. 1, б, представлена временная зависимость напряжения на выходе мостового инвертора, характеризуемого разнополярными прямоугольными импульсами с амплитудой, равной напряжению питания инвертора, длительность импульсов идентична и равна $T_{\text{ШИМ}}K_{\text{ШИМ}}$, где $T_{\text{ШИМ}}$ — период ШИМ, $K_{\text{ШИМ}}$ — коэффициент ШИМ.

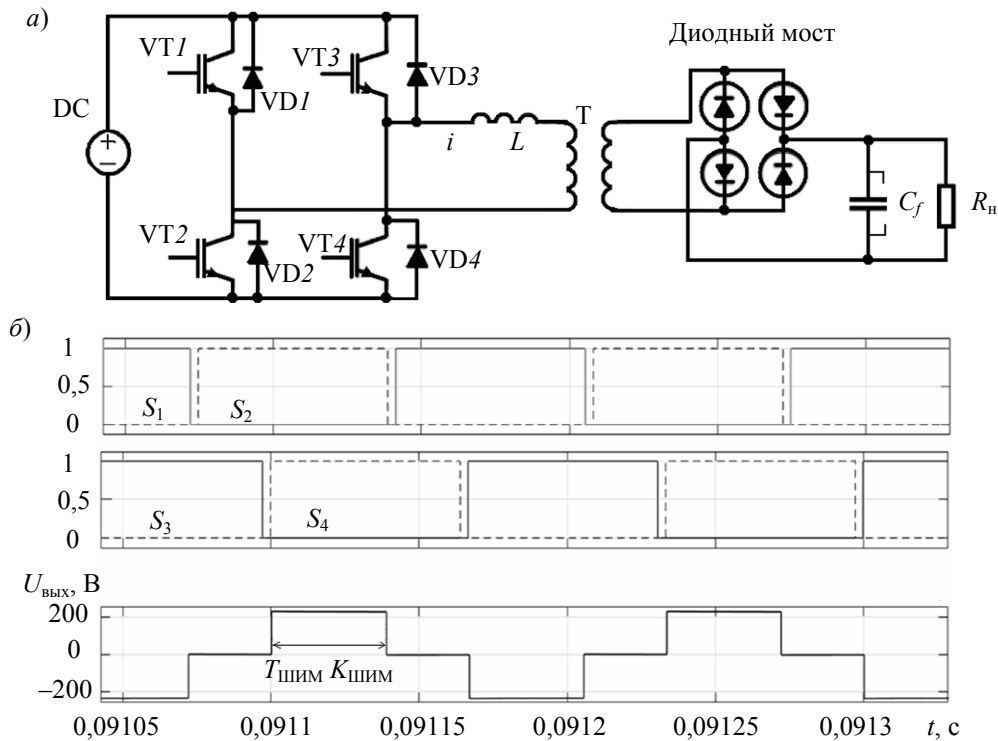


Рис. 1

Фазовое управление определяется следующим соотношением [1]:

$$U_{\text{вых}} / U_{\text{п}} = 2K_{\text{ШИМ}}k_{\text{тр}}, \quad (1)$$

где $U_{\text{вых}}$ — напряжение на выходе преобразователя, $U_{\text{п}}$ — напряжение питания, $k_{\text{тр}}^{-1}$ — коэффициент трансформации; выражение (1) позволяет рассчитать $K_{\text{ШИМ}}$ для каждого значения $U_{\text{п}}$.

Введем обозначение для эффективного коэффициента заполнения — $d = 2K_{\text{ШИМ}}$, который является сигналом управления синтезируемой замкнутой системой.

Рассмотрим передаточную функцию преобразователя „управляющий сигнал d — напряжение на выходе $U_{\text{вых}}$ “ [16]:

$$W(s) = \frac{B(s)}{A(s)} = \frac{U_{\text{вых}}(s)}{d(s)} = \frac{k_{\text{тр}}U_{\text{п}}}{s^2L'C_f + sL'/R_H + 1}, \quad (2)$$

где s — оператор Лапласа; $A(s)$, $B(s)$ — полиномы; $U_{\text{вых}}(s)$ — преобразование Лапласа на-

пряжения $U_{\text{вых}}$; $d(s)$ — преобразование Лапласа сигнала управления d ; L' — эквивалентная суммарная индуктивность инвертора (сумма индуктивности рассеяния трансформатора и добавочной индуктивности, приведенная ко вторичной обмотке трансформатора).

В связи со сложностью определения значения индуктивности рассеяния трансформатора [12] суммарная индуктивность задана в интервальной форме [17]: медианное значение суммарной индуктивности L'_0 равно 4 мкГн, вариация $[\Delta L'] = [-0,1L'_0; 0,1L'_0]$; напряжение питания определено в интервальной форме: $[U_{\text{п}}] = 247,5 + [-72,5; 72,5]$ В; нагрузка может изменяться в пределах 20 %, $[R_{\text{н}}] = 3,35 + [-0,37; 0,37]$ Ом. Тогда коэффициенты $A(s)$, $B(s)$ модели (2) принимают следующий вид: $[a_1] = \frac{1}{[L']C_f}$, $[a_2] = \frac{1}{C_f[R_{\text{н}}]}$, $[b_1] = \frac{k_{\text{тр}}[U_{\text{п}}]}{[L']C_f}$.

Задача заключается в следующем: обеспечить заданные показатели качества проектируемой системы, в состав которой входит интервальный объект управления (2), — время переходного процесса не более 5 с, перерегулирование не более 5 %; повысить КПД рассматриваемого устройства и обеспечить ограничение токов, коммутируемых транзисторами, на уровне $I_{\text{max},3} = 1000$ А.

Основной результат. Согласно [12] эффективная частота ШИМ $f_{\text{sw}0}$ для исследуемого преобразователя составляет 7,25 кГц, а выведенные зависимости максимального тока, коммутируемого транзисторами, и среднего тока I_{av} на выходе инвертора от $K_{\text{ШИМ}}$ и f_{sw} характеризуются выражениями

$$I_{\text{max}} \approx \frac{U_{\text{п}}K_{\text{ШИМ}}}{f_{\text{sw}}L'}, \quad I_{\text{av}} = \frac{I_{\text{max}}(L'R_c + I_{\text{max}}L'U_{\text{п}})}{T_{\text{ШИМ}}}, \quad (3)$$

где R_c — эквивалентное сопротивление схемы замещения инвертора, $f_{\text{sw}} = 1/T_{\text{ШИМ}}$ — несущая частота ШИМ.

В соответствии с (3) можно сделать вывод, что при необходимости фиксации тока I_{max} , в целях увеличения срока службы и исключения выхода из строя силовых транзисторов, следует при постоянных значениях L' , R_c обеспечить стабилизацию и поддержание значения I_{av} при увеличении напряжения питающей сети, что возможно лишь при уменьшении $T_{\text{ШИМ}}$, а значит, при увеличении частоты f_{sw} .

Для увеличения КПД преобразователя предлагается настраивать частоту коммутации транзисторов [18] согласно алгоритму, схема которого представлена на рис. 2.

Обеспечим требуемые показатели качества замкнутой системы путем введения обратной связи по напряжению с помощью пропорционально-интегрального (ПИ) регулятора [19]:

$$W_{\text{pi}}(s) = k(1+1/Ts), \quad (4)$$

где k , T — параметры регулятора.

Введем обозначение $k_u = k/T$. Интервальный характеристический полином (ИХП) замкнутой системы порядка n примет вид

$$[D(s)] = s \sum_{i=1}^{n+1} [a_i] s^{i-1} + [b_1](ks + k_u). \quad (5)$$

Для построения ПИ-регулятора для интервального объекта управления воспользуемся

положениями интервальной алгебры [17] и модифицируем алгоритмы синтеза ПИ-регуляторов линейных САУ [20].

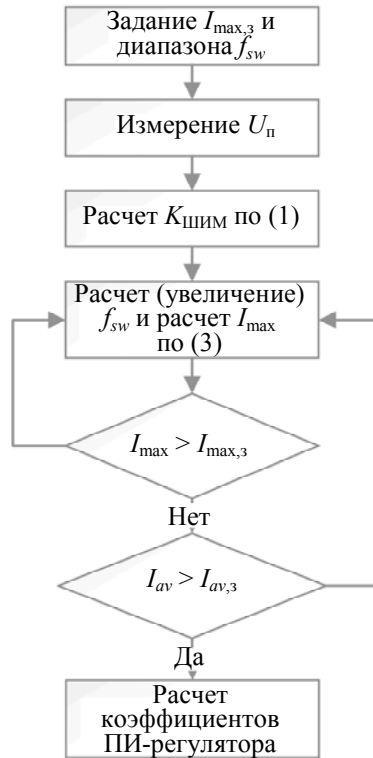


Рис. 2

Рассмотрим добротность по скорости D , определяемую коэффициентами ИХП (5):

$$D = \frac{k_u [b_1]}{[a_1]}, \quad (6)$$

откуда для параметра k_u получим

$$k_u = \frac{D [a_1]}{[b_1]}. \quad (7)$$

Параметр k определяется для собственных чисел замкнутой системы, значения которых задаются исходя из требуемых показателей качества, т.е. степени устойчивости ζ , обеспечивающей заданное время переходного процесса [19]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{c_{m-1} c_{m+2}}{[c_m - c_{m+1}(n-m-1)\zeta][c_{m+1} - c_{m+2}(n-m-2)\zeta]} < 0,465, \quad 0 < m < n-3; \\ c_r - c_{r+1}(n-r-1)\zeta \geq 0, \quad 0 < r < n-2; \\ c_0 - c_1\zeta + \frac{2c_2\zeta^2}{3} \geq 0, \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

где c_i — параметры ИХП (5): $c_i = a_i$ при $i = \overline{2, n+1}$, $[c_1] = [b_1]k + [a_1]$, $[c_0] = [b_1]k_u$.

Используя систему (8) для рассчитанного k_u , можно найти параметр k . Анализ выражений (7) и (8) показывает, что для достижения заданных показателей качества системы для

всего диапазона значений $[b_1]$ следует настраивать параметры регулятора k, k_u (4).

Данная задача может быть реализована с помощью постоянной или периодической корректировки пары коэффициентов регулятора $[k_u(b_1), k]$. Для рассматриваемого случая можно использовать прямые методы корректировки [19].

Структурная схема замкнутой системы представлена на рис. 3, а, а результаты ее моделирования в виде графиков переходных процессов — на рис. 3, б, где U_1 — переходная характеристика с параметрами регулятора k_0, T_0 и $f_{sw0} = 7,25$ кГц, $U_{п0} = 175$ В; U_2 — переходная характеристика с настраиваемыми параметрами регулятора k, T и $f_{sw} = 10$ кГц, $U_{п} = 320$ В; полученные результаты иллюстрируют достижение желаемых показателей замкнутой системы: перерегулирование составляет 0 %, а время переходного процесса меньше 2,5 с.

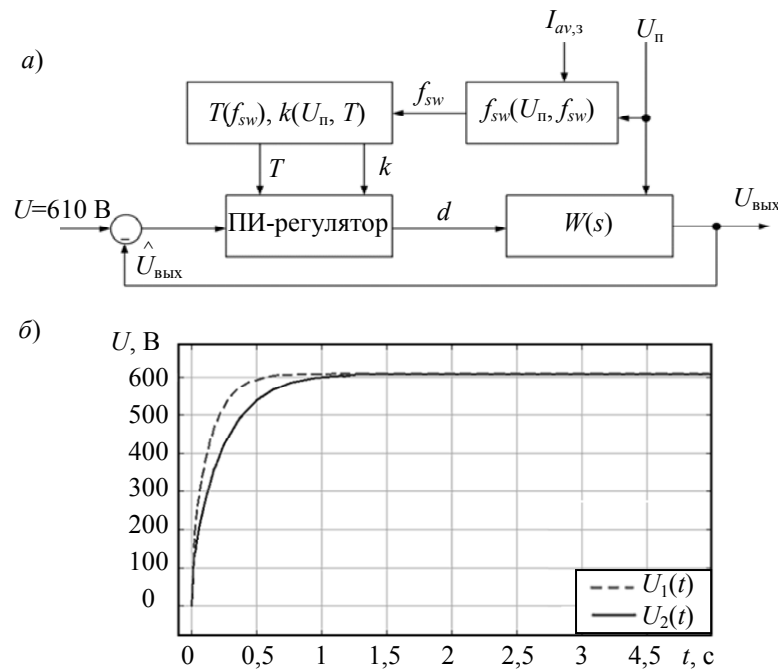


Рис. 3

Заключение. Предложен способ управления мостовым преобразователем с настройкой параметров ПИ-регулятора в зависимости от напряжения питания инвертора. Разработанный метод можно доработать и использовать и при одновременном изменении нагрузки в широком диапазоне от 10 до 100 %. В настоящее время проводятся экспериментальные исследования по применению предложенного метода на установке со следующими параметрами: напряжение питания от 175 до 320 В, выходное стабилизированное напряжение 610 В, максимальный коммутируемый ток выбранных транзисторов 1250 А, номинальная выходная мощность 100 кВт.

Работа выполнена при государственной поддержке ведущих университетов Российской Федерации (субсидия 08-08).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Erickson R., Maksimovic D. Fundamentals of Power Electronics. Norwell, MA: Kluwer Acad., 2001. 885 p.
2. Мелешин В. И., Овчинников Д. А. Управление транзисторными преобразователями электроэнергии. М.: Техносфера, 2011. 576 с.
3. Koo G. B., Moon G. W., Youn M. J. Analysis and design of phase shift full bridge converter with series-connected two transformers // IEEE Transact. Power Electronics. 2004. Vol. 19, N 2. P. 411—419.

4. Jang Y., Jovanovic M. M. A new family of full-bridge ZVS converter // IEEE Transact. Power Electronics. 2004. Vol. 19, N 3. P. 701—708.
5. Jain P. K., Kang W., Soin H., Xi Y. Analysis and design considerations of a load an line independent zero voltage switching full bridge DC/DC converter topology// IEEE Transact. Power Electronics. 2002. Vol. 17, N 5. P. 649—657.
6. Jang Y., Jovanovic M. M. A new PWM ZVS full-bridge converter // IEEE Transact. Power Electronics. 2007. Vol. 22, N 3. P. 987—994.
7. Jeon S. J., Cho G. H. A Zero-voltage and zero-current switching full bridge DC-DC converter with transformer isolation // IEEE Transact. Power Electronics. 2001. Vol. 16, N 5. P. 573—580.
8. Sabate J. A., Vlatkovic Y., Ridel R. B., Lee F. C., Cho B. Design considerations for high-voltage high-power full-bridge zero-voltage-switched PWM converter // IEEE Appl. Power Electronics Conf. Proc. 1990. P. 275—284.
9. Александрова С. А., Баев А. П., Гончаренко М. Р., Николаев Н. А., Слита О. В. Метод подбора добавочной индуктивности мостового преобразователя напряжения с мягким переключением // Докл. Томск. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. 2017. Т. 20, № 3. С. 220—225.
10. Zhao L., Li H., Liu Y., Li Z. High efficiency variable-frequency full-bridge converter with a load adaptive control method based on the loss model // Energies. 2015. Vol. 8, N 4. P. 2647—2673.
11. Mallik A., Khalib A. Variable switching frequency state feedback control of a phase shifted full bridge DC/DC converter // IEEE Transact. Power Electronics. 2016. Vol. 32, N 8. P. 6523—6531.
12. Chen Z., Liu S., Ji F. A power loss comparison of two full bridge converters with auxiliary net-works // Proc. of the 7th Intern. Power Electronics and Motion Control Conf. (IPEMC), Harbin, China. 2012. P. 1888—1893.
13. Alexandrova S., Baev A., Goncharenko M., Nikolaev N., Slita O. Practical implementation of high power and efficiency DC-DC full-bridge PWM boost converter// Proc. of the Intern. Conf. on Information and Digital Technologies, Zilina, Slovakia. 2017.
14. Akunov T. A., Alexandrova S. A., Slita O. V., Sudarchikov S. A., Ushakov A. V. The problem of qualitative research of the Khariton robust stability of continuous systems // Problems of Control and Informatics. 2016. N 4. P. 100—108.
15. Ibrahim O., Nor Z. Y., Nordin S., Khalid Y. A. Development of observer state output feedback for phase-shifted full bridge DC-DC converter control // IEEE Open Access Journal. 2017. Vol. 5. P.18143—18154.
16. Di Capua G., Shirsavar S. A., Hallworth M. A., Femia N. An enhanced model for small-signal analysis of the phase-shifted full-bridge converter // IEEE Transact. on Power Electronics. 2004. P. 99—102.
17. Калмыков С. А., Шокин Ю. И., Юлдашев З. Х. Методы интервального анализа. Новосибирск: Наука, 1986. 222 с.
18. Александрова С. А., Баев А. П., Николаев Н. А., Слита О. В. Синтез закона управления мостового преобразователя напряжения с мягким переключением на базе изменения частоты коммутации транзисторов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. Т. 18, № 4. С. 700—703.
19. O'Dwyer A. Handbook of PI and PID Controller Tuning Rules. London: Imperial College Press, 2009. 608 p.
20. Goyvoronsky S. A., Ezangin T. A. Robust control of complex dynamic units with interval plant // Proc. of the 2nd IEEE Intern. Conf. on System and Compute Science (ICSCS), Villeneuve d'Ascq, France. 2013. P. 201—204.

Сведения об авторах

- Софья Александровна Александрова** — канд. техн. наук; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; инженер;
E-mail: Alexandrova_sophie@mail.ru
- Андрей Петрович Баев** — канд. техн. наук; НИИ точной механики, сектор разработки устройств систем автоматики; руководитель сектора;
E-mail: baevap.niitm@gmail.com
- Николай Анатольевич Николаев** — канд. техн. наук, доцент; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: nikona@yandex.ru
- Ольга Валерьевна Слита** — канд. техн. наук, доцент; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: o-slita@yandex.ru

Поступила в редакцию
21.05.19 г.

Ссылка для цитирования: Александрова С. А., Баев А. П., Николаев Н. А., Слита О. В. Синтез закона управления мостовым преобразователем напряжения высокой мощности // Изв. вузов. Приборостроение. 2019. Т. 62, № 9. С. 843—850.

SYNTHESIS OF THE CONTROL LAW OF A HIGH-POWER BRIDGE VOLTAGE CONVERTER

S. A. Alexandrova¹, A. P. Baev², N. A. Nikolaev¹, O. V. Slita¹

¹ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia
E-mail: Alexandrova_sophie@mail.ru

²JSC Research Institute of Fine Mechanics, 195256, St. Petersburg, Russia

A modified method of phase control is developed for a high-power dc bridge voltage converter is developed. The proposed method is based on variation of power transistors switching frequency. Предложенная методика основана на изменении частоты коммутации силовых ключей. In order to improve dynamic indices characteristics of the designed system and reliability and durability of the converter it is proposed to restrict maximal current switched by transistors and to use an algorithm of PI-control law with adjustable parameters which values depend on supply voltage.

Keywords: full-bridge inverter, soft commutation, pulse-width control, interval plant model, PI-controller with adjustable parameters, variable switching frequency

REFERENCES

1. Erickson R., Maksimovic D. *Fundamentals of power electronics*, Norwell, Mass, Kluwer Academic, 2001, 885 p.
2. Meleshin V.I., Ovchinnikov D.A. *Upravleniye tranzistornymi preobrazovatelyami elektroenergii* (Control of Transistor Power Converters), Moscow, 2011, 576 p. (in Russ.)
3. Koo G.B., Moon G.W., Youn M.J. *IEEE Trans. Power Electron.*, 2004, no. 2(19), pp. 411–419.
4. Jang Y., Jovanovic M.M. *IEEE Trans. Power Electron.*, 2004, no. 3(19), pp. 701–708.
5. Jain P.K., Kang W., Soin H., Xi Y. *IEEE Trans. Power Electron.*, 2002, no. 5(17), pp. 649–657.
6. Jang Y., Jovanovic M.M. *IEEE Trans. Power Electron.*, 2007, no. 3(22), pp. 987–994.
7. Jeon S.J., Cho G.H. *IEEE Trans. Power Electron.*, 2001, no. 5(16), pp. 573–580.
8. Sabate J.A., Vlatkovic Y., Ridel R.B., Lee F.C., Cho B. *IEEE Applied Power Electronics Conference Proceedings*, 1990, pp. 275–284.
9. Alexandrova S.A., Baev A.P., Goncharenko M.R., Nikolaev N.A., Slita O.V. *Proceedings of TUSUR*, 2017, no. 3(20), pp. 220–225. (in Russ.)
10. Zhao L., Li H., Liu Y., Li Z. *Energies*, 2015, no. 4(8), pp. 2647–2673.
11. Mallik A., Khalib A. *IEEE Trans. Power Electron.*, 2016, no. 8(32), pp. 6523–6531.
12. Chen Z., Liu S., Ji F. *Proceedings of the 7th Intern. Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC)*, China, 2012, pp. 1888–1893.
13. Alexandrova S., Baev A., Goncharenko M., Nikolaev N., Slita O. *Proceedings of the Intern. Conf. on Information and Digital Technologies*, 2017.
14. Akunov T.A., Alexandrova S.A., Slita O.V., Sudarchikov S.A., Ushakov A.V. *Problems of Control and Informatics*, 2016, no. 4, pp. 100–108.
15. Ibrahim O., Nor Z.Y., Nordin S., Khalid Y.A. *IEEE Open Access Journal*, 2017, vol. 5, pp. 18143–18154.
16. Di Capua G., Shirsavar S.A., Hallworth M.A., Femia N. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2004, pp. 99–102.
17. Kalmykov S.A., Shokin Yu.I., Yuldashev Z.Kh. *Metody interval'nogo analiza* (Interval Analysis Methods), Novosibirsk, 1986, 222 p. (in Russ.)
18. Alexandrova S.A., Baev A.P., Nikolaev N.A., Slita O.V. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2018, no. 4(18), pp. 700–703. (in Russ.)
19. O'Dwyer A. *Handbook of PI and PID controller tuning rules*, 3rd Edition, London, Imperial College Press, 2009, 608 p.
20. Goyvoronsky S.A., Ezangin T.A. *Proceedings of the 2nd IEEE Intern. Conference on System and Compute Science (ICSCS)*, 2013, pp. 201–204.

Data on authors

Sophia A. Alexandrova	—	PhD; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; Engineer; E-mail: Alexandrova_sophie@mail.ru
Andrey P. Baev	—	PhD; JSC Research Institute of Fine Mechanics, Department of Control Systems Engineering; Head of the Department; E-mail: baevap.niitm@gmail.com
Nikolay A. Nikolaev	—	PhD, Associate Professor; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: nikona@yandex.ru

Olga V. Slita

— PhD, Associate Professor; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: o-slita@yandex.ru

For citation: Alexandrova S. A., Baev A. P., Nikolaev N. A., Slita O. V. Synthesis of the control law of a high-power bridge voltage converter. *Journal of Instrument Engineering*. 2019. Vol. 62, N 9. P. 843—850 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-9-843-850