

УДК 621.314

С.Н. Титовский, Т.С. Титовская, Н.В. Титовская, В.Г. Середкин

## Влияние цифрового представления данных в контуре управления на работу импульсного стабилизатора напряжения

Рассматриваются основные отличия в работе импульсного стабилизатора напряжения с цифровым устройством линейного управления от стабилизатора с аналоговым устройством управления, связанные с появлением погрешностей при оцифровке данных. Проводится оценка влияния этих погрешностей на работу стабилизатора и показывается, что для их уменьшения отношение количества тактов в периоде работы стабилизатора к количеству квантов шкалы аналого-цифрового преобразователя не должно быть меньше единицы. Приводятся результаты экспериментальных исследований работы импульсного стабилизатора с цифровым устройством линейного управления.

**Ключевые слова:** импульсный стабилизатор напряжения, линейное управление, цифровое устройство управления.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2020-23-1-92-96

В настоящее время источники стабилизированного напряжения используются практически повсеместно. При построении таких источников разработчики отдают предпочтение импульсным стабилизаторам напряжения, так как, по сравнению с линейными стабилизаторами, они обладают неоспоримыми и весьма существенными преимуществами – это высокий коэффициент полезного действия, и, как следствие, низкое тепловыделение, а также малая масса и небольшие габаритные размеры [1, 2]. Использование цифрового контура управления импульсными стабилизаторами, по сравнению с аналоговой реализацией, исключает температурный и временной дрейф параметров, свойственный аналоговым схемам, и является современным предметом исследования [3–5]. В этих исследованиях внимание уделяется различным методам управления [6, 7], выполнению различных сервисных функций [8], а также приводятся результаты исследований необходимой разрядности цифрового представления данных [9, 10].

### Аналитическое исследование

Модель импульсного стабилизатора напряжения понижающего типа (рис. 1) содержит силовые узлы – ключ (S), катушку индуктивности (L), диод (D), а также устройство управления ключом (УУ) и источник эталонного напряжения [11, 12].

Устройство управления в данной модели представляет собой специализированный узел, выполняющий функции корректирующего звена стабилизатора, и включает в себя широтно-импульсный модулятор и вычислитель, определяющий длительность (скважность) импульсов, открывающих ключ.

Задачей устройства управления является генерация импульса открывания ключа, длительность которого зависит от отклонения измеренного выходного напряжения от эталонного:

$$T_{\text{имп}} = F(U_{\text{тек}}, U_{\text{эт}}), \quad 0 \leq T_{\text{имп}} \leq T_{\text{пер}}, \quad (1)$$

где  $T_{\text{имп}}$  – длительность импульса открывания ключа;  $U_{\text{тек}}$  – измеренное выходное напряжение;  $U_{\text{эт}}$  –

эталонное напряжение;  $T_{\text{пер}}$  – длительность периода работы (запуска) стабилизатора.

По сути  $F(U_{\text{тек}}, U_{\text{эт}})$  выполняет отображение диапазона изменения  $U_{\text{тек}}$  на диапазон изменения  $T_{\text{имп}}$ :

$$[U_{\text{тек}}^{\min}, U_{\text{тек}}^{\max}] \Rightarrow [T_{\text{имп}}^{\min}, T_{\text{имп}}^{\max}], \quad (2)$$

где  $U_{\text{тек}}^{\min}$ ,  $U_{\text{тек}}^{\max}$  – минимальное и максимальное значения  $U_{\text{тек}}$ ;  $T_{\text{имп}}^{\min}$ ,  $T_{\text{имп}}^{\max}$  – минимальное и максимальное значения  $T_{\text{имп}}$ .

В простейшем случае [11–14] можно использовать линейный (пропорциональный) закон управления

$$T_{\text{имп}} = T_0 + C(U_{\text{эт}} - U_{\text{тек}}), \quad (3)$$

где  $T_0$  и  $C$  – некоторые константы.

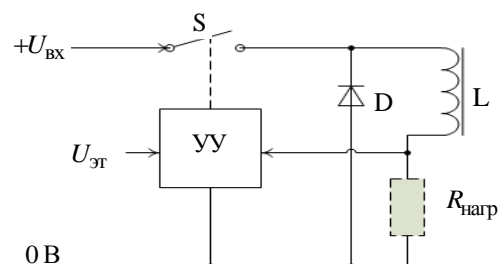


Рис. 1. Модель импульсного стабилизатора напряжения

В общем случае константу  $T_0$  можно определить как значение  $T_{\text{имп}}$ , при которой  $U_{\text{эт}}$  равно  $U_{\text{тек}}$  (на выходе стабилизатора присутствует необходимое напряжение). Если принять во внимание возможность изменения тока, протекающего через нагрузку вследствие изменения ее сопротивления в диапазоне от  $I_{\text{мин}}$  до  $I_{\text{мак}}$ , то  $T_0$  есть  $T_{\text{имп}}$ , при которой в случае среднего тока нагрузки, равного  $(I_{\text{мин}} + I_{\text{мак}})/2$ ,  $U_{\text{эт}}$  равно  $U_{\text{тек}}$ , и тогда

$$T_0 = (T_{\text{имп}}^{\min} + T_{\text{имп}}^{\max}) / 2, \quad (4)$$

и в предельном случае, когда  $T_{имп}^{min} = 0$ ,  $T_{имп}^{max} = T_{пер}$ ,

$$T_0 = T_{пер} / 2. \tag{5}$$

Константа  $C$  определяет чувствительность стабилизатора к изменению  $U_{тек}$ :

$$dT_{имп} = -C dU_{тек}, \tag{6}$$

где  $dT_{имп}$  – приращение длительности импульса;  $dU_{тек}$  – приращение выходного напряжения; и одновременно является масштабом отображения диапазона изменения  $U_{тек}$  на диапазон изменения  $T_{имп}$ , вследствие чего могут наблюдаться различные соотношения диапазонов изменения  $U_{тек}$  и  $T_{имп}$ , а также появляться неиспользуемые участки этих диапазонов (рис. 2).

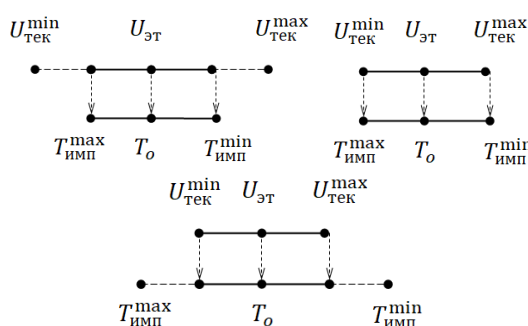


Рис. 2. Возможные соотношения диапазонов изменения  $U_{тек}$  и  $T_{имп}$ . Пунктиром показаны неиспользуемые участки диапазонов изменения  $U_{тек}$  и  $T_{имп}$

В случае использования аналогового контура управления, величины напряжений и длительностей импульсов являются непрерывными, и в рабочем диапазоне  $T_{имп}$  точно вычисляется согласно (3) для любого сочетания значений правой части уравнения.

При организации устройства управления в виде цифровой схемы (рис. 3) происходит переход к дискретным величинам, имеющим ограниченное количество значений.

На рис. 3 ADC – аналого-цифровой преобразователь; DC – цифровой вычислитель; CNT – счетчик тактовых импульсов; CMP – компаратор;  $\tau$  – тактовые импульсы.

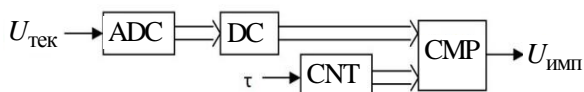


Рис. 3. Цифровой контур управления

Как видно из рис. 3,  $U_{тек}$  подвергается аналого-цифровому преобразованию, что приводит к отклонению измеренного значения от истинного на величину погрешности  $\Delta_U$ , которая, в свою очередь, зависит от разрядности используемого аналого-цифрового преобразователя (АЦП).  $U_{эт}$  превращается в константу из набора значений, используе-

мых для представления  $U_{тек}$ , и также содержит погрешность  $\Delta_U$ .

На рис. 3 показано, что  $T_{имп}$  в цифровой схеме формируется путем счета тактовых импульсов и фактически подменяется на ближайшее кратное периоду тактовых импульсов, что приводит к появлению погрешности  $\Delta_T$ , зависящей от длительности периода тактовых импульсов, а  $T_0$  превращается в константу из набора значений, используемых для представления  $T_{имп}$ , и также содержит погрешность  $\Delta_T$ .

С учетом дискретности величин в цифровом контуре управления закон (3), реализуемый вычислителем, превращается в

$$T_{имп} = T_0 + C (U_{эт} - U_{тек} + 2 \Delta_U) + 2 \Delta_T, \tag{7}$$

и тогда суммарная погрешность формирования  $T_{имп}$  оценивается как

$$\Delta = 2 C \Delta_U + 2 \Delta_T. \tag{8}$$

Из приведенного выражения видно, что константа  $C$  стала влиять не только на чувствительность стабилизатора, но и на погрешность формирования  $T_{имп}$  – с ее уменьшением уменьшается погрешность, вносимая аналого-цифровым преобразованием.

Для идеального АЦП погрешность зависит от соотношения измеряемого диапазона напряжений (шкалы) и разрядности получаемого кода:

$$\Delta_{adc} = \pm \frac{S_{max} - S_{min}}{2^{n+1}}, \tag{9}$$

где  $S_{max}$ ,  $S_{min}$  – максимальное и минимальное измеряемые напряжения АЦП;  $n$  – разрядность получаемого кода.

Для обеспечения корректного отображения (2) при условии минимальной погрешности  $\Delta_U$  необходимо совпадение шкалы АЦП и рабочего диапазона изменения  $U_{тек}$ :

$$S_{max} = U_{тек}^{max}, S_{min} = U_{тек}^{min}, \tag{10}$$

и тогда  $\Delta_U$  оценивается как

$$\Delta_U = \pm \frac{U_{тек}^{max} - U_{тек}^{min}}{2^{n+1}}. \tag{11}$$

Погрешность  $\Delta_T$  при соблюдении (4), (5) оценивается как

$$\Delta_T = \pm \frac{T_{пер}}{2N}, \tag{12}$$

где  $N$  – количество тактов в периоде работы стабилизатора.

Поскольку в дискретном варианте  $U_{тек}$  принимает одно из возможных  $2^n$  значений, а  $T_{имп}$  превращается в количество тактов, то для минимизации погрешности  $\Delta_T$ , необходимо иметь

$$N \geq 2^n, (N - 2^n) / 2 = 0, \tag{13}$$

так как в этом случае все  $2^n$  значений  $U_{\text{тек}}$  могут быть точно отображены на соответствующие количества тактов  $T_{\text{имп}}$  симметрично относительно  $T_0$ . При соблюдении данного условия  $\Delta_T$  обращается в ноль и (8) превращается в

$$\Delta = 2 C \Delta_U. \quad (14)$$

В дискретном варианте константа  $C$  становится отношением количества квантов АЦП и длительности периода работы стабилизатора в тактах:

$$C = \frac{2^n}{N}, \quad (15)$$

и для соблюдения условия (13) она не должна превышать единицы, а подбор чувствительности стабилизатора, согласно (15), должен осуществляться за счет изменения количества тактов в периоде работы  $T_{\text{пер}}$  с условием соблюдения (13).

#### Экспериментальные результаты

Корректность предложенной модели поведения импульсного стабилизатора напряжения с цифровым контуром управления, использующим линейный закон (7), была проверена на макетном образце, описанном в [15, 16], с использованием микроконтроллера ATmega128A1 с тактовой частотой 32 МГц и АЦП MAX1308 с  $n = 12$  и погрешностью  $\pm 1$  квант. На рис. 4 приведены осциллограммы тока, протекающего через нагрузку в статическом режиме (неизменном сопротивлении нагрузки) при различных значениях константы  $C$ .

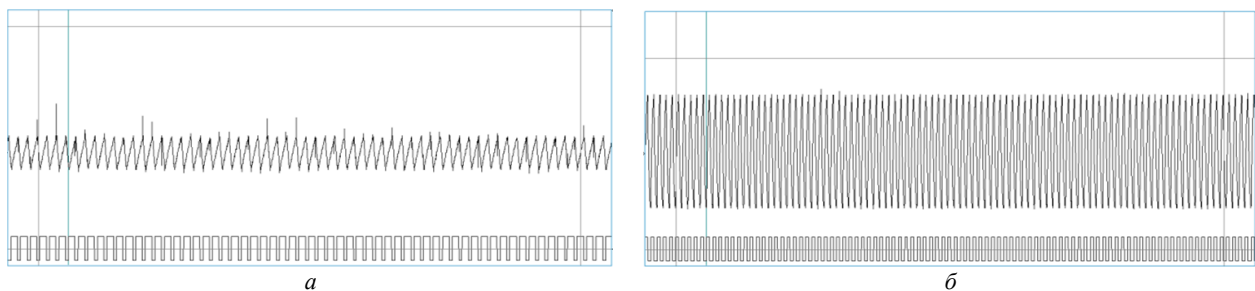


Рис. 4. Ток через нагрузку в статическом режиме:  
а –  $C = 4$  (длительность периода 1024 такта); б –  $C = 0,25$  (длительность периода 16384 такта)

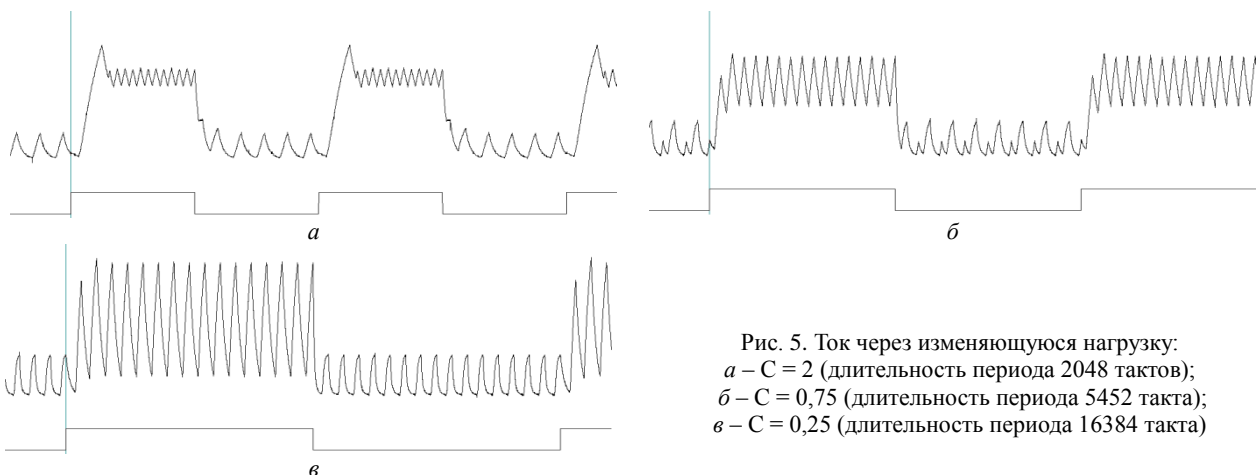


Рис. 5. Ток через изменяющуюся нагрузку:  
а –  $C = 2$  (длительность периода 2048 тактов);  
б –  $C = 0,75$  (длительность периода 5452 такта);  
в –  $C = 0,25$  (длительность периода 16384 такта)

На осциллограммах в нижней части показаны импульсы управления силовым ключом стабилизатора, в средней части – ток через нагрузку.

Приведенные осциллограммы в целом подтверждают закономерности, присутствующие в модели: при  $C = 4$  наблюдается небольшой колебательный процесс, который с уменьшением  $C$  уменьшается и при  $C = 0,25$  практически отсутствует.

С другой стороны, достаточно большое сходство полученных осциллограмм между собой позволяет сделать предположение о том, что в эксперименте использован АЦП с небольшой погрешностью, оказывающей слабое влияние на работу стабилизатора, и это влияние нуждается в дополнительном исследовании.

На том же макетном образце была проверена работа стабилизатора в условиях четырехкратного скачкообразного изменения сопротивления нагрузки через каждые шестнадцать периодов работы стабилизатора (импульсов управления ключом). Осциллограммы тока, протекающего через нагрузку в таком режиме, приведены на рис. 5.

На осциллограммах в нижней части показаны импульсы коммутации нагрузки стабилизатора, в средней части – ток через нагрузку.

Приведенные осциллограммы показывают, что увеличение константы  $C$  негативно влияет на работу стабилизатора, особенно на участках с низкой нагрузкой, так как в них присутствуют автоколебания, уменьшающиеся с уменьшением  $C$  и практически отсутствующие при  $C = 0,25$ .

Длительность переходных процессов (время выхода на режим при изменении нагрузки) невелика, но наблюдается небольшой выброс тока при выходе на режим с максимальной нагрузкой, который исчезает с уменьшением  $C$ .

#### Заключение

В представленной работе приведена аналитическая модель работы цифрового контура управления импульсным стабилизатором напряжения. Предложенная модель показывает, что для исключения погрешности цифрового представления длительности импульса открывания ключа отношение количества тактов в периоде работы стабилизатора к количеству квантов в шкале аналого-цифрового преобразования не должно быть меньше единицы. Дальнейшее увеличение этого отношения уменьшает влияние погрешности аналого-цифрового преобразования на работу стабилизатора.

#### Литература

1. Штрапенин Г. Новое поколение интегральных микросхем. National Semiconductor для импульсных источников питания // Компоненты и технологии. – 2007. – № 8. – С. 114–118.
2. Аналоговый мир Maxim. Новые микросхемы питания. – М.: Изд-во Maxim Integrated Products, 2014. – № 3. – 60 с.
3. Импульсный стабилизатор напряжения с цифровым управлением для автономной системы электропитания / Ю.В. Краснобаев и др. // Изв. Том. политех. ун-та. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329, № 11. – С. 61–73.
4. Быстродействующие импульсные стабилизаторы напряжения с модульным принципом построения и дискретным управлением / Ю.В. Краснобаев и др. // Журнал Сиб. фед. ун-та. Техника и технологии. – 2012. – Т. 5, № 3. – С. 327–339.
5. Tarchanidis K.N. Voltage Stabilizer Based on SPWM technique Using Microcontroller / K.N. Tarchanidis, J.N. Lygouras, P. Botsaris // Journal of Engineering Science and Technology Review. – 2013. – Vol. 6, No. 1. – P. 38–43.
6. Liang C. A fully integrated digital LDO with voltage peak detecting and push-pull feedback loop control / C. Liang, L. Liang, Z. Wang // IEICE Electronics Express. – 2018. – Vol. 15. – doi: 10.1587/elex.15.20180611. – Режим доступа: [https://www.jstage.jst.go.jp/article/elex/15/15/15\\_15.20180611/article](https://www.jstage.jst.go.jp/article/elex/15/15/15_15.20180611/article), свободный (дата обращения: 26.01.2020).
7. Nguyen-Van T. Digital adaptive hysteresis current control for multi-functional inverters / T. Nguyen-Van, R. Abe, K. Tanaka // Energies. – 2018. – Vol. 11, No. 9. – doi: 10.3390/en11092422. – Режим доступа: <https://www.mdpi.com/1996-1073/11/9/2422/htm>, свободный (дата обращения: 26.01.2020).
8. Fixed switching frequency digital sliding-mode control of DC-DC power supplies loaded by constant power loads with inrush current limitation capability / A.El Aroudi, B.A. Martínez-Treviño, E. Vidal-Idiarte, A. Cid-Pastor // Energies. – 2019. – Vol. 12, No. 6. – doi: 10.3390/en12061055. – Режим доступа: <https://www.mdpi.com/1996-1073/12/6/1055/htm>, свободный (дата обращения: 26.01.2020).
9. Hamidi A. A low-cost and flexible architecture of digitally controlled DC-DC converter to improve dynamic performance / A. Hamidi, A. Ahmadi, S. Karimi // Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences. – 2018. – Vol. 26, No. 5. – P. 2347–2360.

10. Titovskii S.N. Influence of the digital data representation error in the linear control contour of a pulse voltage stabilizer / S.N. Titovskii, N.V. Titovskaia, T.S. Titovskaya // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1399. – doi: 10.1088/1742-6596/1399/2/022051. – Режим доступа: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1399/2/022051>, свободный (дата обращения: 26.01.2020).

11. Мелешин В.И. Транзисторная преобразовательная техника. – М.: Техносфера, 2005. – 632 с.
12. Цыпкин Я.З. Теория линейных импульсных систем. – М.: Физматлит, 1963. – 968 с.
13. Иванчура В.И. Модульные быстродействующие стабилизаторы напряжения с ШИМ / В.И. Иванчура, Ю.В. Краснобаев. – Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2006. – 158 с.
14. Лукас В.А. Теория автоматического управления: учеб. для вузов. – М.: Недра, 1990. – 415 с.
15. Титовская Н.В. Применение микроконтроллера ATxmega в устройстве управления импульсным стабилизатором напряжения / Н.В. Титовская, С.Н. Титовский // Вестник КрасГАУ. – 2015. – № 7 (106). – С. 58–63.
16. Титовская Н.В. Организация устройства управления импульсным стабилизатором напряжения на базе микроконтроллера / Н.В. Титовская, С.Н. Титовский // Вестник КрасГАУ. – 2015. – № 8 (107). – С. 87–92.

#### Титовский Сергей Николаевич

Канд. техн. наук, доцент каф. информационных технологий и математического обеспечения информационных систем  
Красноярского государственного аграрного ун-та  
Мира пр-т, д. 90, г. Красноярск, Россия, 660049;  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8305-6867>  
Тел.: +7-950-414-01-31  
Эл. почта: [sntitovsky@rambler.ru](mailto:sntitovsky@rambler.ru)

#### Титовская Татьяна Сергеевна

Ст. преп. каф. вычислительной техники  
Сибирского федерального ун-та  
Свободный пр-т, д. 79, г. Красноярск, Россия, 660041.  
Тел.: +7 (391-2) 49-75-61  
Эл. почта: [nesesser@inbox.ru](mailto:nesesser@inbox.ru)

#### Титовская Наталья Викторовна

Канд. техн. наук, доцент, зав. каф. информационных технологий и математического обеспечения информационных систем  
Красноярского государственного аграрного ун-та  
Мира пр-т, д. 90, г. Красноярск, Россия, 660049;  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1021-1966>  
Тел.: +7-902-925-11-90  
Эл. почта: [nvtitov@yandex.ru](mailto:nvtitov@yandex.ru)

#### Середкин Вениамин Георгиевич

Канд. техн. наук, доцент каф. вычислительной техники  
Сибирского федерального ун-та  
Свободный пр-т, д. 79, г. Красноярск, Россия, 660041  
Тел.: +7 (391-2) 49-75-61  
Эл. почта: [benjven@yandex.ru](mailto:benjven@yandex.ru)

Titovskii S.N., Titovskaya T.S.,  
Titovskaia N.V., Seryodkin V.G.

### Influence of digital data representation in control circuit on pulse voltage stabilizer

The article discusses the main differences between the operation of a pulsed voltage stabilizer with a digital linear control device and a stabilizer with an analog control device associated with the data digitization errors. An assessment of the influence of these errors on the operation of the stabilizer is made, and it is shown that to reduce it, the ratio of the number of clock cycles in the period of stabilizer operation to the number of quanta on the analog-to-digital converter scale should not be less than one. The results of experimental studies of a pulse stabilizer with a digital linear control device are presented.

**Keywords:** pulse voltage stabilizer, linear control, digital control device.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2020-23-1-92-96

#### References

1. Shtrapenin G. *Novoe pokolenie integral'nykh mikroshem. National Semiconductor dlja impul'snykh istochnikov pitaniya* [New generation of integrated circuits. National Semiconductor for switching power supplies]. *Components and technologies*, 2007, no. 8, pp. 114–118 (in Russ).
2. *Analogovy mir Maxim. Novye mikroshemy pitaniya* [Analog world of Maxim. New power microcircuits]. Moscow, Maxim Integrated Products Publ., 2014, no. 3, 60 p. (in Russ).
3. Krasnobaev Y.V., Nepomnyashchii O.V., Ivanchura V.I., Pozharkova I.N., Yablonskiy A.P. [Pulsed Voltage Regulator with Digital Control for Autonomous Power Supply System]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 11, pp. 61–73 (in Russ).
4. Krasnobayev Y.V., Kapulin D.V., Goncharuk D.V. [Quick-Switching Voltage Regulator with Modular Principle and Discrete Control]. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*, 2012, vol. 5, no. 3, pp. 327–339 (in Russ).
5. Tarchanidis K.N., Lygouras J.N., Botsaris P. Voltage Stabilizer Based on SPWM technique Using Microcontroller. *Journal of Engineering Science and Technology Review*, 2013, vol. 6, no. 1, pp. 38–43.
6. Liang C., Liang L., Wang Z. A fully integrated digital LDO with voltage peak detecting and push-pull feedback loop control. *IEICE Electronics Express*, 2018, vol. 15, doi: 10.1587/elex.15.20180611. Available at: [https://www.jstage.jst.go.jp/article/elex/15/15/15\\_15\\_20180611/article](https://www.jstage.jst.go.jp/article/elex/15/15/15_15_20180611/article), (Accessed: January 26, 2020).
7. Nguyen-Van T., Abe R., Tanaka K. Digital adaptive hysteresis current control for multi-functional inverters. *Energies*, 2018, vol. 11, no. 9. doi: 10.3390/en11092422. Available at: <https://www.mdpi.com/1996-1073/11/9/2422/html>, (Accessed: January 26, 2020).
8. El Aroudi A., Martínez-Treviño B.A., Vidal-Idiarte E., Cid-Pastor A. Fixed switching frequency digital sliding-mode control of DC-DC power supplies loaded by constant power loads with inrush current limitation capability. *Energies*, 2019, vol. 12, no. 6. doi: 10.3390/en12061055. Available at: <https://www.mdpi.com/1996-1073/12/6/1055/html>, (Accessed: January 26, 2020).
9. Hamidi A., Ahmadi A., Karimi S. A low-cost and flexible architecture of digitally controlled DC-DC converter to improve dynamic performance. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 2018, vol. 26, no. 5, pp. 2347–2360.
10. Titovskii S.N., Titovskaia N.V., Titovskaya T.S. Influence of the digital data representation error in the linear control contour of a pulse voltage stabilizer. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1399. doi: 10.1088/1742-6596/1399/2/022051. Available at: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1399/2/022051>, (Accessed: January 26, 2020).
11. Meleshin V.I. *Tranzistornaya preobrazovatel'naya tekhnika* [Transistor converter technology]. Moscow: Tekhnosfera Publ., 2005. 632 p. (in Russ.).
12. Tsypkin Ya.Z. *Teoriya lineinykh impul'snykh sistem* [Theory of linear impulse systems]. Moscow, Fizmatlit Publ., 1963. 968 p. (in Russ.).
14. Lukas V.A. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya: Ucheb. dlya vuzov* [Theory of automatic control: Textbook for universities]. Moscow, Nedra Publ., 1990. 415 p. (in Russ.).
15. Titovskaia N.V., Titovskii S.N. *Primenenie mikrokontrollera ATxmega v ustroistve upravleniya impul'snym stabilizatorom napryazheniya* [Application of the ATxmega microcontroller in the control device of a switching voltage regulator]. *Vestnik KrasGAU* [Bulletin of KrasGAU], 2015, vol. 7 (106), pp. 58–63 (in Russ.).
16. Titovskaia N.V., Titovskii S.N. *Organizatsiya ustroistva upravleniya impul'snym stabilizatorom napryazheniya na baze mikrokontrollera* [Organization of a control device for a pulse voltage stabilizer based on a microcontroller]. *Vestnik KrasGAU* [Bulletin of KrasGAU], 2015, vol. 8 (107), pp. 87–92 (in Russ.).

#### Sergey N. Titovskii

Doctor of Engineering Sciences, Assistant Professor,  
Department of Information Technologies and Mathematical  
Support of Information Systems,  
Krasnoyarsk State Agrarian University  
90, Mira pr., Krasnoyarsk, Russia, 660049  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8305-6867>  
Phone: +7-950-414-01-31  
Email: [sntitovsky@rambler.ru](mailto:sntitovsky@rambler.ru)

#### Tatyana S. Titovskaya

Senior Lecturer, Department of Computing Technique,  
Siberian Federal University  
79, Svobodny pr., Krasnoyarsk, Russia, 660041  
Phone: +7 (391-2) 49-75-61  
Email: [nesesser@inbox.ru](mailto:nesesser@inbox.ru)

#### Natalya V. Titovskaia

Doctor of Engineering Sciences, Assistant Professor,  
Head of Department of Information Technologies  
and Mathematical Support of Information Systems,  
Krasnoyarsk State Agrarian University  
90, Mira pr., Krasnoyarsk, Russia, 660049  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1021-1966>  
Phone: +7-902-925-11-90  
Email: [nvtitov@yandex.ru](mailto:nvtitov@yandex.ru)

#### Veniamin G. Seryodkin

Doctor of Engineering Sciences, Assistant Professor,  
Department of Computing Technique,  
Siberian Federal University  
79, Svobodny pr., Krasnoyarsk, Russia, 660041  
Phone: +7 (391-2) 49-75-61  
Email: [benjven@yandex.ru](mailto:benjven@yandex.ru)