

Научная статья

УДК 621.311.62

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31105>



А.В. Быстров  , С.Г. Зверев

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

 stalex81@yandex.ru

ОБРАТНОХОДОВОЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ НА КЛЮЧЕ С ОБЩИМ КОЛЛЕКТОРОМ, СТОКОМ – ЭМИТТЕРНЫЙ ИСТОКОВЫЙ ПОВТОРИТЕЛЬ

Аннотация. В настоящей статье представлен базовый обратноходовой преобразователь (*Flyback*) с инвертированной полярностью напряжения на выходе. Рассмотрены важные вопросы, возникающие при проектировании подобных устройств, такие как эффекты паразитных элементов, защита от неисправностей и включение силового ключа по схеме с общим коллектором, стоком (эмиттерный, истоковый повторитель). Исследовано влияние транзисторного ключа на тепловые режимы печатных узлов электронных устройств. Показано, что, если не учитывать тепловые процессы в печатных платах на этапе разработки, это может привести к снижению надежности электронных устройств. Моделирование и анализ выполнены в среде *Matlab Simulink*. Основной областью приложений рассматриваемого в работе инвертирующего обратноходового преобразователя является его работа в сетях 0,4 кВ в качестве источника вторичного питания.

Ключевые слова: импульсный преобразователь, обратноходовой преобразователь, общим коллектором, стоком, эмиттерный истоковый повторитель, печатные платы, тепловые процессы.

Для цитирования:

Быстров А.В., Зверев С.Г. Обратноходовой преобразователь на ключе с общим коллектором, стоком – эмиттерный истоковый повторитель // Глобальная энергия. 2025. Т. 31, № 1. С. 79–87. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31105>



A.V. Bystrov ✉, S.G. Zverev

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
St. Petersburg, Russia

✉ stalex81@yandex.ru

FLYBACK CONVERTER WITH A KEY ACTING AS A COMMON COLLECTOR, DRAIN – EMITTER, SOURCE FOLLOWER

Abstract. This paper presents a basic flyback converter with inverted polarity of the output voltage. Important issues arising in the design of such devices are considered, such as the effects of parasitic elements, protection against faults and inclusion of a power switch according to the scheme with a common collector, drain (emitter, source follower). The effect of a transistor switch on thermal conditions of printed circuit boards of electronic devices is investigated. It is shown that if thermal processes in printed circuit boards are not considered at the development stage, this can lead to a decrease in the reliability of electronic devices. Modeling and analysis are performed in the Matlab Simulink environment. The main area of application of the inverting flyback converter considered in the paper is its operation in 0.4 kV networks as a secondary power source.

Keywords: pulse converter, flyback converter, common collector, drain, emitter source follower, printed circuit boards, thermal processes.

Citation:

Bystrov A.V., Zverev S.G., Flyback converter with a key acting as a common collector, drain-emitter, source follower, *Global Energy*, 31 (01) (2025) 79–87, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31105>

Введение

Растущий рынок потребительской электроники гарантирует постоянный промышленный интерес к потребительским источникам вторичного питания (ИВП) для адаптеров, зарядок ноутбуков, мобильных телефонов и светодиодных светильников. Следовательно, универсальные адаптеры, совместимые с несколькими устройствами разных выходных напряжений, обещают стать новым стандартом. Топология *Flyback* является популярным выбором из-за малого количества деталей и становится все более привлекательным вариантом для адаптеров средней мощности 50–100 Вт [1, 2].

Разработка и исследование новых топологий ИВП и их преимуществ перед существующими являются актуальными задачами, поскольку их решение напрямую связано, прежде всего, с повышением эффективности и надежности ИВП и снижением производственных затрат. Существует ряд известных работ, в которых повышение эффективности осуществляется посредством новой стратегии управления ключом от первичной части преобразователя [1, 3] и другими стратегиями оптимизации работы преобразователя [5, 6], основанными на функционировании ключа в квазирезонансном режиме [2, 4]. Однако в этих работах рассматривается ключ с общим эмиттером, истоком.

В этой статье представлена новая стратегия устройства на базе *Flyback*. В отличие от стандартного подхода, такая концепция предлагает изменить схему включения ключевого элемента. Это увеличивает время наработки устройства на отказ – более простое включение, выключение устройства и его плавный пуск, а также имеет ряд преимуществ перед теми ИВП, которые в настоящее время выпускаются промышленностью.

Цель данной статьи — исследовать осуществимость предложенной концепции посредством математической модели ИВП в среде *Matlab Simulink*, обосновать ее преимущества перед традиционной стратегией построения ИВП, установить воздействие быстро изменяющейся нагрузки на величину выходного напряжения.

Методы и материалы

Традиционно в преобразователях ключи работают по схеме с общим эмиттером (ОЭ), или общим истоком (ОИ), но при превышении допустимой температуры паразитные сопротивления переводят его в приоткрытое состояние. Новая концепция предлагает заменить ключ по схеме с ОЭ (ОИ) на ключ по схеме с общим коллектором (ОК), или общим стоком (ОС), при этом дополнительно ввести индуктивную связь между формирователем импульсов управления и затвором ключа, а контроллер управления перенести на вторичную часть преобразователя. Это обеспечит прямой доступ к выходному напряжению, допуская более простое, быстрое и точное его измерение без необходимости какой-либо дополнительной оптической обратной связи, а также не позволит ключу находиться в приоткрытом состоянии. Для доказательства осуществимости изложенной концепции были разработаны и исследованы имитационные модели в среде *Matlab Simulink*. Было обнаружено, что предложенные концепции построения ИВП улучшают свойства разработанного устройства. Эффективность ИВП при полной нагрузке была измерена на уровне 90,77%, что делает предлагаемую концепцию хорошо подготовленной для конкуренции с другими современными решениями ИВП [6, 7]. Поэтому следует ожидать, что универсальные источники питания будут совместимы со многими устройствами и различными выходными напряжениями.

Характеристика термостойкости печатной платы (ПП) — температура стеклования T_g , при которой вещество, из которого она сделана, переходит из твердого состояния в мягкое. Обычно для *PCB* из СТЭФ $T_g = 130^\circ\text{C}$ [8, 9]. Другими словами, если ПП нагревается выше 130°C , она быстро ухудшает свои электрофизические свойства: вы не только получите нестабильную механическую структуру, это приведет к деструкции ПП и сокращению срока службы электронного устройства в целом [8, 10]. Для оценки тепловыделения могут быть использованы принципы, обсуждаемые в [11, 12].

Даже в правильно спроектированных ПП с учетом их теплопроводности, тепловыделения и охлаждения могут быть зоны перегрева, способные привести к прогару ПП и даже их возгоранию. Чаще всего зоны перегрева находятся в области большой разности потенциалов и около выводов мощных транзисторов, впаянных в ПП (рис. 1) [12, 13].

Зоны $R1$ и $R2$ — паразитные резисторы, и их величины определяются объемным удельным сопротивлением СТЭФ. Зона $R1$ — сопротивление СТЭФ между коллектором и эмиттером. Зона $R2$ — сопротивление СТЭФ между коллектором и затвором. Величины $R1$ и $R2$ определяются в Ом соотношением [14, 15]:

$$R = \frac{\rho_v l}{S}, \quad (1)$$

где ρ_v — удельное объемное сопротивление СТЭФ, Ом*мм; l — длина участка зоны перегрева, мм; S — площадь сечения зоны перегрева, мм².

При толщине СТЭФ 1,5 мм и ширине металлизации отверстий посадочного места для транзистора 4 мм $S = 6 \text{ мм}^2$, а $l = 1,5 \text{ мм}$. При нормальном тепловом режиме печатной платы [14] $\rho_v = 10^8 \text{ Ом*мм}$, тогда из соотношения (1) $R1 = R2 = 25 \text{ МОм}$.

В случае нарушения отвода тепла в электронном устройстве, неточного теплового расчета ПП и неправильной компоновки на ней электронных компонентов формируются зоны перегрева (рис. 1). Если сравнить зоны $R1$ и $R2$, то теплоотвод от зоны $R1$ значительно эффективнее,

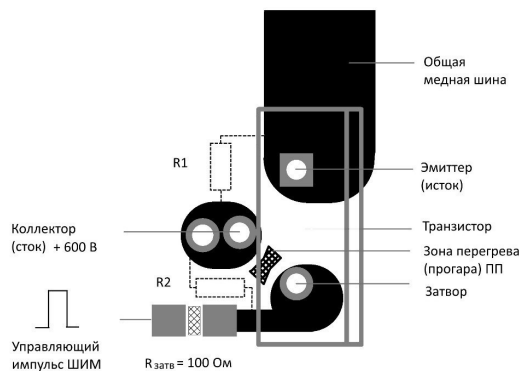


Рис. 1. Фрагмент ПП с впаянным мощным транзистором
Fig. 1. Fragment of the printed circuit board with a soldered-in powerful transistor

потому что имеется хороший тепловой контакт с общей медной шиной, через которую и отводится тепло. В зоне $R2$ тепло отводится через контакт этой зоны с окружающей средой. Такой тепловой контакт имеет неэффективный отвод тепла. Ввод тепла в данную зону осуществляется через коллекторный вывод транзистора. При перегреве транзистора в зоне $R2$ формируется область с температурой, значительно превышающей температуру стеклования T_g . В результате перегрева зоны $R2$ ρ_v падает до $10^5 \text{ Ом} \cdot \text{мм}$ [14]. Согласно выражению (1), сопротивление зоны $R2 = 25 \text{ кОм}$, что существенно влияет на режим работы транзистора при управляющем сигнале ШИМ затвора $U_g = 0 \text{ В}$. В этом случае в схеме замещения (рис. 2а) сопротивления $R2$ и $R_{затв}$ работают как делитель напряжения $+600 \text{ В}$.

Таким образом, на резисторе $R_{затв}$ создается разность потенциалов около $2,4 \text{ В}$, которая прикладывается плюсом к затвору и минусом к истоку, что превышает пороговое напряжение транзистора. У транзистора $SPP20N60C3$ пороговое напряжение затвора $V_{GS(th)} = 2,1 \text{ В}$ [4, 7], при напряжении $2,4 \text{ В}$ транзистор находится в приоткрытом состоянии.

Рассмотренные эффекты приводят к дополнительному разогреву транзистора и зоны $R2$. Только в зоне $R2$ выделяется в виде тепла $P = U^2/R2 = 6002/25000 = 14,4 \text{ Вт}$. В данном случае температура перегрева зоны $R2$ находится из соотношения [13, 14]:

$$\Delta T = R_{th} * P, \quad (2)$$

где R_{th} — значение эффективного теплового сопротивления для ПП, $0,9 \text{ }^\circ\text{C/Вт}$; P — дополнительная мощность зоны $R2$, Вт.

Тогда перегрев зоны $R2$ составит $\Delta T = 14,4 * 0,9 = 12,96 \text{ }^\circ\text{C}$, что приведет к дальнейшему ухудшению параметров ПП, разогреву зоны перегрева и отказу электронного устройства.

Для снижения влияния этих эффектов и увеличения времени наработки электронного устройства на отказ предлагается включать электронный ключ преобразователя по схеме с ОС (ОК) (эмиттерный, истоковый повторитель) (рис. 2б). Когда транзисторный ключ открыт и энергия из сети передается в нагрузку, делитель из сопротивлений зон $R1$ и $R2$ шунтируется малым сопротивлением ключа. Таким образом, в зонах $R1$ и $R2$ не выделяется тепло и не происходит их разогрев, что и увеличивает время наработки электронного устройства на отказ.

С другой стороны, на затворе транзистора присутствует плавающее напряжение с амплитудой, равной входному напряжению преобразователя. Отсюда следует, что между затвором и формирователем импульсов управления необходима гальваническая развязка в виде импульсного трансформатора (рис. 3).

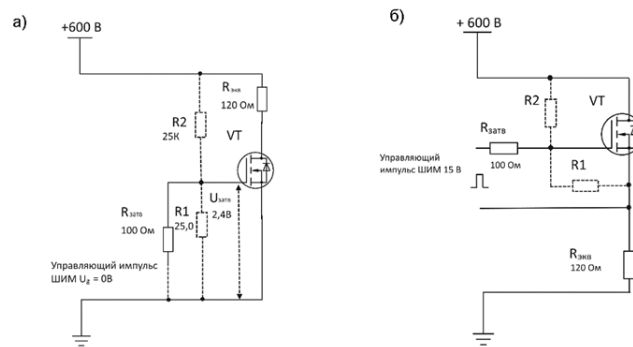


Рис. 2. Схема замещения фрагмента ПП с впаянным мощным транзистором при превышении температуры стеклования T_g : а) на ключе с общим эмиттером, истоком; б) на ключе с общим коллектором, стоком (эмиттерный, истоковый повторитель)

Fig. 2. Equivalent circuit of the printed circuit board fragment with a soldered-in high-power transistor when the glass transition temperature T_g is exceeded: a) a switch a common emitter, source circuit; b) a switch a common collector, drain (emitter, source follower) circuit

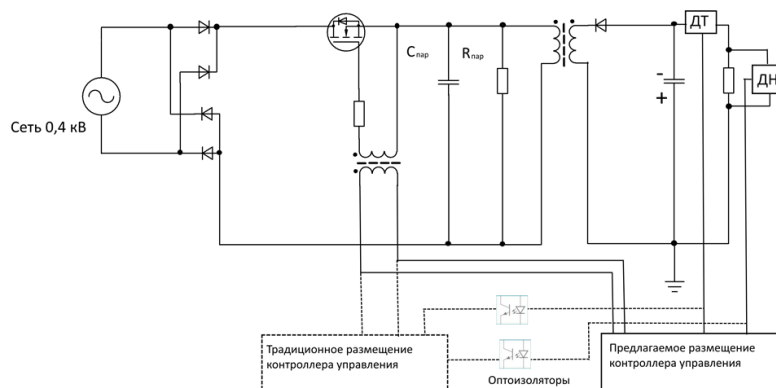


Рис. 3. Упрощенная топология *Flyback* преобразователя с инвертированной полярностью напряжения на выходе
Fig. 3. Simplified *Flyback* converter topology with inverted output voltage polarity

При наличии гальванической развязки между затвором и формирователем импульсов управления можно отказаться от оптоизоляторов и разместить контроллер управления на вторичной стороне преобразователя. Это дает преимущество перед традиционной топологией, снижает количество электронных компонентов и улучшает стабильность выходного напряжения. Стандартные высоковольтные оптоизоляторы добавляют 100 нс ко времени распространения сигналов измерения от вторичной части, что снижает максимальную частоту преобразования [1, 3]. Еще одно преимущество данной топологии — не требуется дополнительных компонентов для плавного пуска и выключателей. При подключенном преобразователе к сети и выключенном транзисторе на всех электрических цепях, паразитных емкостях $C_{пар}$ и сопротивлениях $R_{пар}$ (рис. 3) отсутствует разность потенциалов. Плавный пуск ИВП осуществляется контроллером управления.

Имитационная модель силовой части *Flyback* преобразователя (рис. 4) испытывалась в среде *Matlab Simulink* [7, 16]. В качестве сопротивлений зон перегрева в электрическую цепь включались резисторы $R1$ и $R2$ с характеристикой материала ПП из СТЭФ.

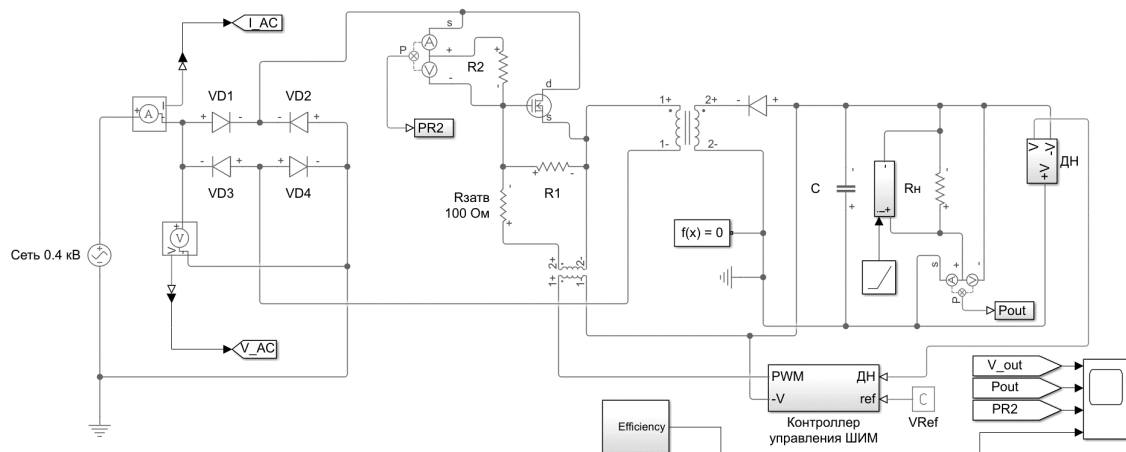


Рис. 4. Имитационная модель силовой части *Flyback* преобразователя
Fig. 4. Simulation model of the power section of the *Flyback* converter

Результаты и обсуждение

В ходе испытания имитационной модели выходное напряжение стабилизировалось, а мощность в нагрузке линейно нарастала. При этом вычислялись мощность, выделяемая в зоне перегрева $R2$, и общий КПД. Моделирование проводилось как для ключа с ОИ, так и для ключа с ОС при одинаковых условиях. В результате моделирования получены графики изменения этих величин во времени, которые представлены на рис. 5.

Из графика мощности, выделяемой в зоне $R2$ для ключа с ОИ (рис. 5а), видно, что слабо зависит от увеличения нагрузки. С учетом положительной обратной связи между сопротивлением зоны $R2$ и выделяемой мощностью, с учетом соотношения (1) это приведет к дальнейшему разогреву зоны, причем добавится действие приоткрытого состояния ключа. Для ключа с ОС

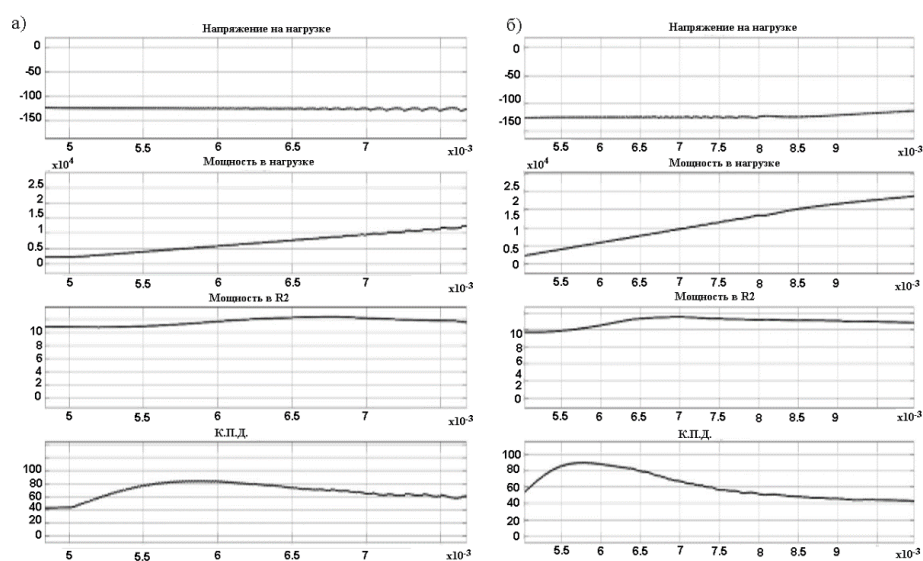


Рис. 5. Графики характеристик: а) для ключа с ОИ; б) для ключа с ОС
Fig. 5. Characteristic graphs: a) for a switch common-source circuit; b) for a switch common drain circuit

на графике (рис. 5б) заметно снижение выделяемой мощности, которое обусловлено главным образом закрытием приоткрытого ключа, так как известно, что увеличение потенциала на истоке приводит к снижению потенциала на затворе (обратная отрицательная связь). Дополнительно зона $R2$ шунтируется ключом. Таким образом, изложенные факты приведут к снижению температуры зоны $R2$. Также из графиков следует, что при приближении к максимальной нагрузке для ключа с ОИ напряжение на нагрузке имеет колебательный характер с увеличением амплитуды. Для ключа с ОС это явление отсутствует. Это означает, что отсутствие оптоизоляторов в цепи обратной связи снижает время отклика на изменение напряжения на нагрузке.

Заключение

В статье представлены результаты исследования разработанных имитационных моделей стандартной и предложенной концепции топологий. Показано, что предложенные концепции построения источника вторичного питания улучшают свойства разработанного устройства:

- снижают выделения мощности в зоне перегрева, что приводит к увеличению срока службы электронного устройства, а также уменьшают количество электронных компонентов и производственные затраты;
- обеспечивают быстрый отклик на изменение напряжения на нагрузке, что позволяет увеличивать частоту преобразования и, как следствие, улучшать характеристики источника вторичного питания.

Применение в разрабатываемой топологии ключа с общим коллектором, стоком увеличивает время наработки на отказ и позволяет отказаться от выключателей и пусковых токоограничивающих электронных компонентов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Dong H., Xie X., Zhang L.** A new primary PWM control strategy for CCM synchronous rectification flyback converter, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 35 (5) (2020) 4457–4461. DOI: 10.1109/TPEL.2019.2944492
- [2] **Haider W., Ha Q.P.** A lossless passive snubber for soft-switching of flyback converters, 2024 IEEE 19th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), (2024) 1–6. DOI: 10.1109/ICIEA61579.2024.10664895
- [3] **Tang C.-Y., Lin W.-Z., Tan Y.-C.** An active clamp flyback converter with high precision primary-side regulation strategy, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 37 (9) (2022) 10281–10289. DOI: 10.1109/TPEL.2022.3162960
- [4] **Sadikoglu F., Bakhtiari S., Babaei E.** Design of quasi-resonant flyback converter integrated by fuzzy controller, 15th International Conference on Applications of Fuzzy Systems, Soft Computing and Artificial Intelligence Tools (ICAFTS), 610 (2023) 31–39. DOI: 10.1007/978-3-031-25252-5_10
- [5] **Yu Y., Kong M., Yan J., Lu Y.** Optimization strategy for output voltage of CCM flyback converter based on linear active disturbance rejection control, *Applied Sciences*, 13 (23) (2023) 12786. DOI: 10.3390/app132312786
- [6] **Li Y., You Y., Han Y., Guo W., Qian L., Zhu G.** An elimination scheme of long and short periods for flyback converter, *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 70 (6) (2023) 2052–2056. DOI: 10.1109/TCSII.2023.3234410
- [7] **Goudarzian A., Khosravi A., Raeisi H.A.** Modeling, design and control of a modified flyback converter with ability of right-half-plane zero alleviation in continuous conduction mode, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 26 (2021) 101007. DOI: 10.1016/j.jestech.2021.05.011
- [8] **Шугал Я.Л.** Фольгированные слоистые пластики в электротехнической промышленности. М.: Информстандартэлектро, 1968. 32 с.

- [9] **Смельницкий Ф.С., Горелов Н.В., Коновалов П.Г.** Фольгированные слоистые пластики для печатных схем. М.: Энергия, 1969. 176 с.
- [10] **Сотникова С.Ю., Кононова Н.А., Ландер Л.Б., Цветков В.Э., Яловнаров С.В.** Влияние печатных проводников на тепловой режим радиоэлектронных приборов, Известия высших учебных заведений. Приборостроение, 65 (10) (2022) 712–724. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-10-712-724
- [11] **Панкин А.М., Коровкин Н.В.** Алгоритмы систем диагностирования новых энергетических объектов // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2016. № 4 (254). С. 98–105. DOI: 10.5862/JEST.254.11
- [12] **Wan Y., Huang H.** Thermal performance analysis and prediction of printed circuit boards, Journal of Circuits, Systems and Computers, 32 (13) (2023) 2350225. DOI: 10.1142/S0218126623502250
- [13] **Лезинов А.** Расчет теплового сопротивления между переходом СВЧ МИС на печатной плате и окружающей средой // Электроника НТБ. 2017. № 5 (00165). С. 116–118. DOI: 10.22184/1992-4178.2017.165.5.116.118
- [14] **Vellvehi M., Perpiñà X., León J., Aviñó-Salvadó O., Ferrer C., Jordà X.** Local thermal resistance extraction in monolithic microwave integrated circuits, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 68 (12) (2020) 12840–12849. DOI: 10.1109/TIE.2020.3040684
- [15] **Bergman T.L., Lavine A.S., Incropera F.P., DeWitt D.P.** Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 7th ed. Hoboken: Wiley, 2011. 1072 p.
- [16] **Володин В.Я.** Малосигнальная модель обратного преобразователя // Практическая силовая электроника. 2022. № 2 (86). С. 14–25.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

БЫСТРОВ Александр Васильевич — старший преподаватель, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.
E-mail: stalex81@yandex.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9338-2535>

ЗВЕРЕВ Сергей Геннадьевич — заместитель директора Института энергетики, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.
E-mail: s.zverev@spbstu.ru

REFERENCES

- [1] **H. Dong, X. Xie, L. Zhang,** A new primary PWM control strategy for CCM synchronous rectification flyback converter, IEEE Transactions on Power Electronics, 35 (5) (2020) 4457–4461. DOI: 10.1109/TPEL.2019.2944492
- [2] **W. Haider, Q.P. Ha,** A lossless passive snubber for soft-switching of flyback converters, 2024 IEEE 19th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), (2024) 1–6. DOI: 10.1109/ICIEA61579.2024.10664895
- [3] **C.-Y. Tang, W.-Z. Lin, Y.-C. Tan,** An active clamp flyback converter with high precision primary-side regulation strategy, IEEE Transactions on Power Electronics, 37 (9) (2022) 10281–10289. DOI: 10.1109/TPEL.2022.3162960
- [4] **F. Sadikoglu, S. Bakhtiari, E. Babaei,** Design of quasi-resonant flyback converter integrated by fuzzy controller, 15th International Conference on Applications of Fuzzy Systems, Soft Computing and Artificial Intelligence Tools (ICAFTS), 610 (2023) 31–39. DOI: 10.1007/978-3-031-25252-5_10
- [5] **Y. Yu, M. Kong, J. Yan, Y. Lu,** Optimization strategy for output voltage of CCM flyback converter based on linear active disturbance rejection control, Applied Sciences, 13 (23) (2023) 12786. DOI: 10.3390/app132312786

- [6] Y. Li, Y. You, Y. Han, W. Guo, L. Qian, G. Zhu, An elimination scheme of long and short periods for flyback converter, *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 70 (6) (2023) 2052–2056. DOI: 10.1109/TCSII.2023.3234410
- [7] A. Goudarzian, A. Khosravi, H.A. Raeisi, Modeling, design and control of a modified flyback converter with ability of right-half-plane zero alleviation in continuous conduction mode, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 26 (2021) 101007. DOI: 10.1016/j.jestch.2021.05.011
- [8] Ia.L. Shugal, *Fol'girovannye sloistye plastiki v elektrotekhnicheskoi promyshlennosti* [Foiled laminated plastics in the electrical industry]. Moscow: Informstandartelektro, 1968. 32 p.
- [9] F.S. Smel'nitskii, N.V. Gorelov, P.G. Konovalov, *Fol'girovannye sloistye plastiki dlia pechatnykh skhem* [Foil laminated plastics for printed circuits]. Moscow: Energiia, 1969. 176 p.
- [10] S.Yu. Sotnikova, N.A. Kononova, L.B. Lander, V.E. Tsvetkov, S.V. Yalovnarov, Influence of Printed Conductors on the Thermal Regime of Radio-Electronic Devices, *Journal of Instrument Engineering*, 65 (10) (2022) 712–724. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-10-712-724
- [11] A.M. Pankin, N.V. Korovkin, Algorithms of new power-producing objects diagnosis systems, *St. Petersburg Polytechnic University Journal of Engineering Sciences and Technology*, 4 (254) (2016) 98–105. DOI: 10.5862/JEST.254.11
- [12] Y. Wan, H. Huang, Thermal performance analysis and prediction of printed circuit boards, *Journal of Circuits, Systems and Computers*, 32 (13) (2023) 2350225. DOI: 10.1142/S0218126623502250
- [13] A. Lezinov, Raschet teplovogo soprotivleniia mezhdru perekhodom SVCH MIS na pechatnoi plate i okruzhaiushchei sredoi [Calculation of thermal resistance between the junction of microwave microcircuits on a printed circuit board and the environment], *Electronics: Science, Technology, Business*, 5 (00165) (2017) 116–118. DOI: 10.22184/1992-4178.2017.165.5.116.118
- [14] M. Vellvehi, X. Perpiñà, J. León, O. Aviñó-Salvadó, C. Ferrer, X. Jordà, Local thermal resistance extraction in monolithic microwave integrated circuits, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 68 (12) (2020) 12840–12849. DOI: 10.1109/TIE.2020.3040684
- [15] T.L. Bergman, A.S. Lavine, F.P. Incropera, D.P. DeWitt, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 7th ed. Hoboken: Wiley, 2011. 1072 p.
- [16] V.Ya. Volodin, Small-signal model of a flyback converter, *Prakticheskaya silovaya elektronika* [Practical Power Electronics], 2 (86) (2022) 14–25.

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Alexandre V. BYSTROV – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: stalex81@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9338-2535>

Sergey G. ZVEREV – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: s.zverev@spbstu.ru

Поступила: 11.12.2024; Одобрена: 21.03.2025; Принята: 22.03.2025.

Submitted: 11.12.2024; Approved: 21.03.2025; Accepted: 22.03.2025.