



Záverečná karta projektu

Názov projektu

Evidenčné číslo projektu

APVV-19-0392

Rozvoj zberačov energie na čipe pre energeticky-autonómne elektronické systémy

Zodpovedný riešiteľ **prof. Ing. Viera Stopjaková, PhD.**

Príjemca

Slovenská technická univerzita v Bratislave - Fakulta elektrotechniky a informatiky

Názov pracoviska, na ktorom bol projekt riešený

Ústav elektroniky a fotoniky, Oddelenie návrhu a testovania integrovaných obvodov
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Slovenská technická univerzita v Bratislave

Názov a štát zahraničného pracoviska, ktoré spolupracovalo pri riešení

VUT Brno, Česká republika
Infineon Technologies, AG, Spolková republika Nemecko

Udelené patenty/podané patentové prihlášky, vynálezy alebo úžitkové vzory, ktoré sú výsledkami projektu

Žiadne

Najvýznamnejšie publikácie (knihy, články, prednášky, správy a pod.) zhrňujúce výsledky projektu – uveďte aj publikácie prijaté do tlače

Vedecké práce v karentovaných časopisoch: 8

KUMNGERN, Montree - KULEJ, Tomasz - KHATEB, Fabian - STOPJAKOVÁ, Viera - RANJAN, Rajeev K. Nanopower multiple-input DTMOs OTA and its applications to high-order filters for biomedical systems. In AEÜ International Journal of Electronics and Communications. Vol. 130, (2021), Art. no. 153576 [9] s. ISSN 1434-8411 (2020: 3.183 - IF, Q2 - JCR Best Q, 0.547 - SJR, Q2 - SJR Best Q). V databáze: SCOPUS: 2-s2.0-85098972173 ; CC: 000610794500012 ; WOS: 000610794500012 ; DOI: 10.1016/j.aeue.2020.153576.

POTOČNÝ, Miroslav - KOVÁČ, Martin - ARBET, Daniel - ŠOVČÍK, Michal - NAGY, Lukáš - STOPJAKOVÁ, Viera - RAVASZ, Richard. Low-voltage DC-DC converter for IoT and on-chip energy harvester applications. In Sensors. Vol. 21, Iss. 17 (2021), Art. no. 5721 [18] s. ISSN 1424-8220 (2020: 3.576 - IF, Q1 - JCR Best Q, 0.636 - SJR, Q2 - SJR Best Q). V databáze: SCOPUS: 2-s2.0-85113331581 ; DOI: 10.3390/s21175721 ; WOS: 000695605800001 ; CC: 000695605800001.

VAVRINSKÝ, Erik - STOPJAKOVÁ, Viera - KOPÁNI, Martin - KOSNÁČOVÁ, Helena. The concept of advanced multi-sensor monitoring of human stress. In Sensors. Vol. 21, Iss. 10 (2021), Art. no. 3499 [27] s. ISSN 1424-8220 (2020: 3.576 - IF, Q1 - JCR Best Q, 0.636 - SJR, Q2 - SJR Best Q). V databáze: SCOPUS: 2-s2.0-85105798343 ; CC: 000662545100001 ; WOS: 000662545100001 ; DOI: 10.3390/s21103499.

KHATEB, Fabian - KUMNGERN, Montree - KULEJ, Tomasz - AKBARI, Meysam -

STOPJAKOVÁ, Viera. 0.5 V, nW-range universal filter based on multiple-input transconductor for biosignals processing. In *Sensors*. Vol. 22, no. 22 (2022), Art. no. 8619 [13] s. ISSN 1424-8220 (2021: 3.847 - IF, Q2 - JCR Best Q, 0.803 - SJR, Q1 - SJR Best Q). V databáze: DOI: 10.3390/s22228619 ; SCOPUS: 2-s2.0-85142767671 ; WOS: 000887566600001 ; CC: 000887566600001.

KULEJ, Tomasz - KHATEB, Fabian - ARBET, Daniel - STOPJAKOVÁ, Viera. A 0.3-V high linear Rail-to-Rail Bulk-Driven OTA in 0.13 μm CMOS. In *IEEE Transactions on Circuits and Systems II : Express Briefs*. Vol. 69, iss. 4 (2022), s. 2046-2050. ISSN 1549-7747 (2021: 3.691 - IF, Q2 - JCR Best Q, 1.112 - SJR, Q1 - SJR Best Q). V databáze: IEEE: 9684515 ; WOS: 000773270900015 ; CC: 000773270900015 ; SCOPUS: 2-s2.0-85123359424 ; DOI: 10.1109/TCSII.2022.3144095.

KHATEB, Fabian - KUMNGERN, Montree - KULEJ, Tomasz - STOPJAKOVÁ, Viera - PSYCHALINOS, Costas. 0.3-V, 357.4-nW Voltage-Mode First-Order Analog Filter Using a Multiple-Input. In *IEEE Access*. Vol. 11, (2023), s. 96636-96647. ISSN 2169-3536 (2022: 3.900 - IF, Q2 - JCR Best Q, 0.926 - SJR, Q1 - SJR Best Q). V databáze: IEEE: 10238474 ; WOS: 001067581100001 ; CC: 001067581100001 ; SCOPUS: 2-s2.0-85171574386 ; DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3311518.

MALJAR, David - ŠOVČÍK, Michal - POTOČNÝ, Miroslav - ONDICA, Róbert - ARBET, Daniel - STOPJAKOVÁ, Viera. Digital Calibration of Input Offset Voltage and Its Implementation in FDDA Circuits. In *Electronics*. Vol. 12, iss. 22 (2023), Art. no. 4615 [22] s. ISSN 2079-9292 (2022: 2.900 - IF, Q2 - JCR Best Q, 0.628 - SJR, Q2 - SJR Best Q). V databáze: DOI: 10.3390/electronics12224615 ; SCOPUS: 2-s2.0-85178355517 ; WOS: 001120636500001 ; CC: 001120636500001.

NAGY, Lukáš - POTOČNÝ, Miroslav - ONDICA, Róbert - HUDEC, Adam - STOPJAKOVÁ, Viera. A novel ultra low-voltage/low-power rail-to-rail comparator topology in nanoscale CMOS technology. In *AEÜ International Journal of Electronics and Communications*. Vol. 166, (2023), Art. no. 154651 [8] s. ISSN 1434-8411 (2022: 3.200 - IF, Q2 - JCR Best Q, 0.757 - SJR, Q2 - SJR Best Q). V databáze: DOI: 10.1016/j.aeue.2023.154651 ; WOS: 001053261100001 ; CC: 001053261100001 ; SCOPUS: 2-s2.0-85153529286.

Vedecké práce v časopisoch registrovaných v databázach WoS alebo SCOPUS: 16

ONDICA, Róbert - HUDEC, Adam - MALJAR, David - STOPJAKOVÁ, Viera. Efficiency study of MPPT algorithms in HDL for full integration of solar-powered voltage converter. In *ICETA 2023: 21st Year of International Conference on Emerging eLearning Technologies and Applications: Information and communication technologies in learning*. Starý Smokovec, Slovakia. October 26-27, 2023. Danvers : IEEE, 2023, S. 389-394. ISBN 979-8-3503-7068-3. V databáze: DOI: 10.1109/ICETA61311.2023.10343727; IEEE: 10343727.

Príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách:

HUDEC, Adam - NAGY, Lukáš - KOVÁČ, Martin - KOHÚTKA, Lukáš - STOPJAKOVÁ, Viera. Maximum power point tracking circuit for an energy harvester in 130 nm CMOS technology. In *Applied electronics 2020 : 25th International conference*. Pilsen, Czech Republic. September 8-9, 2020, 2020, S. 55-58. ISSN 1803-7232. ISBN 978-80-261-0891-7. V databáze: IEEE: 9232903 ; SCOPUS: 2-s2.0-85096363298 ; DOI: 10.23919/AE49394.2020.9232903.

MALJAR, David - ARBET, Daniel - STOPJAKOVÁ, Viera. 130 nm CMOS fully differential SC filter for ultra-low voltage Σ - Δ converter. In *Applied electronics 2020 : 25th International conference*. Pilsen, Czech Republic. September 8-9, 2020, 2020, S. 77-80. ISSN 1803-7232. ISBN 978-80-261-0891-7. V databáze: IEEE: 9232802 ; DOI: 10.23919/AE49394.2020.9232802.

ONDICA, Róbert - ARBET, Daniel - KOVÁČ, Martin - STOPJAKOVÁ, Viera. Feasibility study towards increasing efficiency of fully on-chip DC-DC boost converter. In *Applied electronics 2020 : 25th International conference*. Pilsen, Czech Republic. September 8-9, 2020, S. 93-96. ISSN 1803-7232. ISBN 978-80-261-0891-7. V databáze: IEEE: 9232811 ; DOI: 10.23919/AE49394.2020.9232811.

ARBET, Daniel - POTOČNÝ, Miroslav - KOVÁČ, Martin - NAGY, Lukáš - STOPJAKOVÁ, Viera. Fully on-chip low-drop regulator for low-power applications. In *MIPRO 2021 : 44th International convention on information and communication technology, electronics and microelectronics*. Opatija, Croatia. September 27-October 1, 2021. Rijeka : Croatian Society for Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics, 2021, S. 112-117. ISSN 1847-3946.

HUDEC, Adam - RAVASZ, Richard - ARBET, Daniel - STOPJAKOVÁ, Viera. A control system for automated evaluation and tuning of ASIC parameters. In Applied electronics 2021 : 26th International conference. Pilsen, Czech Republic. September 7-8, 2021. Pilsen : University of West Bohemia, 2021, S. 51-54. ISSN 1803-7232. ISBN 978-80-261-0972-3. V databáze: SCOPUS: 2-s2.0-85116448122 ; IEEE: 9542883 ; DOI: 10.23919/AE51540.2021.9542883.

MALJAR, David - ŠOVČÍK, Michal - ARBET, Daniel - STOPJAKOVÁ, Viera. Enhanced reliability of fully differential difference amplifier through on-chip digital calibration. In DDECS 2021 : IEEE 24th International symposium on design and diagnostics of electronic circuits and systems. Vienna, Austria. April 7-9, 2021. Danvers : IEEE, 2021, S. 119-122. ISSN 2473-2117. ISBN 978-1-6654-3595-6. V databáze: IEEE: 9417022 ; WOS: 000672620200023 ; SCOPUS: 2-s2.0-85105586344 ; DOI: 10.1109/DDECS52668.2021.9417022.

ONDICA, Róbert - ARBET, Daniel - KOVÁČ, Martin - STOPJAKOVÁ, Viera. Investigation of Inductor-based Fully On-chip Boost Converter. In MIXDES 2021 : Proceedings of 28th International Conference Micdes Design of Integrated Circuits and Systems. Łódź, Poland. June 24-26, 2021. Lodž : University of Technology, 2021, S. 115-119. ISBN 978-83-63578-19-0. V databáze: IEEE: 9497548 ; WOS: 000706973500021 ; SCOPUS: 2-s2.0-85112403099 ; DOI: 10.23919/MIXDES52406.2021.9497548.

ARBET, Daniel - KOVÁČ, Martin - MALJAR, David - NAGY, Lukáš - STOPJAKOVÁ, Viera. High power supply rejection LDO regulator for switching applications. In MIPRO 2022 : 45th Jubilee International Convention on Information, Communication and Electronic Technology. Opatija, Croatia. May 23-27, 2022. Rijeka : Croatian Society for Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics, 2022, S. 162-167. ISSN 1847-3946. ISBN 978-953-233-103-5. V databáze: SCOPUS: 2-s2.0-85133942028 ; DOI: 10.23919/MIPRO55190.2022.9803648.

MALJAR, David - ARBET, Daniel - KOVÁČ, Martin - ONDICA, Róbert - STOPJAKOVÁ, Viera. Autocalibration approach for improving robustness of analog ICs. In DDECS 2022 : IEEE 25th International symposium on design and diagnostics of electronic circuits and systems. Prague, Czech Republic. April 6-8, 2022. Danvers : IEEE, 2022, 54-59. ISBN 978-1-6654-9430-4. V databáze: SCOPUS: 2-s2.0-85130432532 ; WOS: 000835725500010 ; DOI: 10.1109/DDECS54261.2022.9770155.

MALJAR, David - ARBET, Daniel - STOPJAKOVÁ, Viera. The autocalibration of analog ICs for suppressing the influence of process variations. In ELEKTRO 2022 : 14th International Conference Elektro 2022. Krakow, Poland. May 23-26, 2022. Piscataway : IEEE, 2022, [4] s. ISSN 2691-0616. ISBN 978-1-6654-6726-1. V databáze: DOI: 10.1109/ELEKTRO53996.2022.9803448 ; SCOPUS: 2-s2.0-85133961947.

NAGY, Lukáš - POTOČNÝ, Miroslav - STOPJAKOVÁ, Viera. Ultra low-power rail-to-rail voltage comparator in 65 nm CMOS technology. In ICECCME 2022 : International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering. Male, Maldives. November 16-18, 2022. Danvers : IEEE, 2022, S. 1806-1809. ISBN 978-1-6654-7095-7. V databáze: DOI: 10.1109/ICECCME55909.2022.9988140 ; IEEE: 9988140.

ONDICA, Róbert - KOVÁČ, Martin - MALJAR, David - STOPJAKOVÁ, Viera. Fully integrated multi-layer stacked structure of integrated inductor with patterned ground shield. In BEC 2022 : 18th Biennial baltic electronics conference. Tallinn, Estonia. October 4-6, 2022. Danvers : IEEE, 2022, [6] s. ISBN 978-1-6654-6294-5. V databáze: DOI: 10.1109/BEC56180.2022.9935589 ; SCOPUS: 2-s2.0-85142438766 ; IEEE: 9935589.

RAVASZ, Richard - HUDEC, Adam - ARBET, Daniel - STOPJAKOVÁ, Viera. On-chip current sensing approaches for DC-DC converters. In DDECS 2022 : IEEE 25th International symposium on design and diagnostics of electronic circuits and systems. Prague, Czech Republic. April 6-8, 2022. Danvers : IEEE, 2022, S. 64-67. ISBN 978-1-6654-9430-4. V databáze: SCOPUS: 2-s2.0-85130443276 ; WOS: 000835725500011 ; DOI: 10.1109/DDECS54261.2022.9770112.

KOVÁČ, Martin - POTOČNÝ, Miroslav - ARBET, Daniel - ONDICA, Róbert - RAVASZ, Richard - STOPJAKOVÁ, Viera. Low-power CMOS frequency comparator. In MIPRO 2023 : 46th ICT and Electronics Convention. Opatija, Croatia. May 22-26, 2023. Rijeka : Croatian Society for Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics, 2023, S. 212-217. ISSN 1847-3946. V databáze: SCOPUS: 2-s2.0-85164953400 ; DOI: 10.23919/MIPRO57284.2023.10159783 ; IEEE: 10159783.

RAVASZ, Richard - MALJAR, David - ARBET, Daniel - STOPJAKOVÁ, Viera - KUBINEC, Peter. Design of the slope detection circuit for on-chip current sensing. In MIXDES 2023 : 30th International Conference Micdes Design of Integrated Circuits and Systems. Kraków, Poland. June 29-30, 2023. Lodž : University of Technology, 2023, S. 111-115. ISBN 978-83-63578-23-7. V databáze: IEEE: 10203248 ; WOS: 001050841200019 ; DOI: 10.23919/MIXDES58562.2023.10203248 ; SCOPUS: 2-s2.0-85169469467.

NAGY, Lukáš - ŠOVČÍK, Michal - STOPJAKOVÁ, Viera. Design of Ultra-Low Power Comparator in 65 NM CMOS Technology with Rail-to-Rail Input Range. In AFRICON 2023 : Proceedings. Nairobi, Kenya. September 20-22, 2023. Piscataway : IEEE, 2023, S. 662-665. ISSN 2153-0033. ISBN 979-8-3503-3621-4. V databáze: IEEE: 10293614 ; DOI: 10.1109/AFRICON55910.2023.10293614 ; SCOPUS: 2-s2.0-85177641494.

Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách: 3

NAGY, Lukáš - ARBET, Daniel - KOVÁČ, Martin - POTOČNÝ, Miroslav - ŠOVČÍK, Michal - STOPJAKOVÁ, Viera. Low-power Rail-to-Rail comparator in 130 nm CMOS technology. In Radioelektronika 2022 : 32th International Conference. Košice, Slovakia. April 21-22, 2022. Danvers : IEEE, 2022, S. 82-85. ISBN 978-1-7281-8686-3. V databáze: SCOPUS: 2-s2.0-85130142999 ; WOS: 000856002200018.

ONDICA, Róbert - KOVÁČ, Martin - RAVASZ, Richard - MALJAR, David - HUDEC, Adam - STOPJAKOVÁ, Viera. Fully integrated on-chip inductors: an overview. In ICETA 2022 : 20th Anniversary of IEEE International Conference on Emerging eLearning Technologies and Applications : Information and communication technologies in learning. Starý Smokovec, Slovakia. October 20-21, 2022. Danvers : IEEE, 2022, S. 472-478. ISBN 979-8-3503-2033-6. V databáze: DOI: 10.1109/ICETA57911.2022.9974657 ; IEEE: 9974657.

ONDICA, Róbert - HUDEC, Adam - MALJAR, David - STOPJAKOVÁ, Viera. Efficiency study of MPPT algorithms in HDL for full integration of solar-powered voltage converter. In ICETA 2023 : 21st Year of International Conference on Emerging eLearning Technologies and Applications : Information and communication technologies in learning. Starý Smokovec, Slovakia. October 26-27, 2023. Danvers : IEEE, 2023, S. 389-394. ISBN 979-8-3503-7068-3. V databáze: DOI: 10.1109/ICETA61311.2023.10343727 ; IEEE: 10343727.

Okrem týchto vybraných publikácií, bolo v rámci projektu publikovaných ďalších 15 príspevkov v zborníkoch na zahraničných a domácich vedeckých konferenciách (pre nedostatok miesta ich neuvádzame).

Uplatnenie výsledkov projektu

Navrhnutý, vyrobený a meraním overený systém zberača energie z okolia plne integrovaný na čipe dokáže pokryť nielen vlastné požiadavky na napájanie jednotlivých stavebných blokov, ale aj poskytnúť dostatok využiteľnej energie (výkonu) na napájanie ďalšieho elektronického systému v rámci regulovanej 1,5 V (1,2 V) napäťovej domény. Toto zistenie bolo tiež potvrdené i v rámci finalizácie správy pre projekt ECSEL JU Grant Agreement n. 876868 (PROGRESSUS), kde bol systém využitý ako napájací zdroj pre riadiaci obvod AC/DC napäťového meniča na 230 V.

Vedecké poznatky získané počas riešenia projektu ako aj dosiahnuté experimentálne výsledky majú potenciál na priame využitie v aplikáciách napäťových meničov plne integrovaných na čipe, ale aj v oblasti návrhu nízko-prikonových IO a energeticky-úsporných integrovaných systémov. Možno konštatovať, že sa nám podarilo vyvinúť samo-napájaný elektronický systém, ktorý je použiteľný v širokej škále bezdrôtových energeticky-autonómnych elektronických aplikácií (napr. senzorické siete, IoT zariadenia, či medicínske implantovateľné zariadenia).

Expertíza a získané výsledky budú využité taktiež pri riešení schváleného medzinárodného projektu HORIZONT-JU-IA pod názvom „ECS4DRES - Electronic Components and Systems for flexible, coordinated and resilient Distributed Renewable Energy Systems“, zameraného na aplikovaný výskum a inovácie v oblasti rozvoja elektronických komponentov a systémov pre distribúciu energie z obnoviteľných zdrojov, ktorého riešenie začne v roku 2024. V rámci tohto projektu na báze spolupráce medzinárodných akademických inštitúcií a nadnárodných firiem a výskumných inštitúcií je možno očakávať priamy transfer získaných výsledkov do priemyselnej praxe.

Z dôvodu pokračovania začatého výskumu a ďalšieho možného vylepšenia vlastností navrhnutého systému zberača energie bol pripravený a podaný nadväzujúci projekt APVV-23-0071 "Implementácia monolitického systému meniča napätia pre alternatívne zdroje

energie v CMOS technológii", ktorého zámerom je implementácia celého systému (vrátane doteraz problematických častí) a druhý výrobný beh s následným overením účinnosti prenosu energie.

Súhrn výsledkov riešenia projektu a naplnenia cieľov projektu v slovenskom jazyku (max. 20 riadkov)

1. Analýza možnosti plnej integrácie cievky na čip v štandardnej CMOS technológii s cieľom zvýšenia jej plošnej indukčnosti pomocou špeciálnych návrhových techník.
 2. Analýza vplyvu použitia jednotlivých návrhových techník na elektrické (sériový odpor, indukčnosť, faktor kvality) a neelektrické (plocha) vlastnosti integrovanej cievky a následná integrácia výslednej štruktúry na čip.
 3. Návrh nových zapojení (topológií) analógových obvodových blokov (napr. detektor prechodu prúdu nulou, relaxačný oscilátor, frekvenčný komparátor a iné) s dôrazom na nízkonákladové požiadavky systému.
 4. Návrh a analýza vlastností DC-DC meniča napätia smerom nahor a jeho modifikácií ako jadra zberača energie založeného na využití energie zo slnečného žiarenia.
 5. Verifikácia hraníc funkčnosti navrhnutých blokov a celého systému prostredníctvom simulácií jednotlivých blokov a merania prototypových čipov.
 6. Návrh testovacej DPS pre meranie vlastností a základných charakteristík navrhnutého zberača energie. Vytvorenie meracieho pracoviska na meranie základných vlastností analógových IO ako aj vytvorenie programu na automatizovanie meraní.
 7. Vyšetrenie vlastností navrhnutého a vyrobeného integrovaného meniča napätia pre zber energie z prostredia a vytvorenie funkčného systému použiteľného ako „zelený“ zdroj energie pre napájanie ďalších nízkonákladových systémov.
- Vyššie uvedený súhrn najvýznamnejších získaných poznatkov a dosiahnutých výsledkov predstavuje naplnenie všetkých stanovených cieľov projektu.

Súhrn výsledkov riešenia projektu a naplnenia cieľov projektu v anglickom jazyku (max. 20 riadkov)

1. Feasibility analysis of full on-chip integration of inductor in a standard CMOS technology with the aim of increasing its surface inductance using special layout techniques.
2. Analysis of the impact of the use of individual layout techniques on the electrical (series resistance, inductance, quality factor) and non-electrical (area) properties of the integrated inductor and full integration of the resulting structure.
3. Design of novel circuits (topologies) of analog circuit blocks (e.g. zero-crossing current detector, relaxation oscillator, frequency comparator, etc.) with emphasis on low-power system requirements.
4. Design and analysis of a step-up DC-DC voltage converter and its modifications as the core of an energy harvester based on the solar radiation.
5. Verification of functional limits of designed blocks and the system through simulations of individual blocks and measurement of prototype chips.
6. Design of a test PCB for measuring the properties and basic characteristics of the designed energy harvester. The creation of a measurement workplace for measuring the basic properties of analog IOs as well as the design of a program for automating measurements.
7. Investigation of the properties of the designed and manufactured integrated voltage converter for harvesting energy from the environment and creating a functional system usable as a "green" energy source for powering other low-power systems.