

Szerokopasmowy czujnik prądu do zastosowań w energoelektronice

Maciej Chojowski , Aleksander Dziadecki , Marcin Baszyński ,
Roman Dudek , Andrzej Stobiecki , Józef Skotniczny

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej, Kraków

Streszczenie: W pracy przedstawiono koncepcję szerokopasmowego i niskokosztowego czujnika prądu przeznaczonego zwłaszcza do zastosowań w energoelektronice. Prezentowany czujnik składa się z równolegle połączonych czujnika prądu wykorzystującego efekt Halla (typu LEM) oraz przekładnika prądowego. Szerokie pasmo czujnika (poczynając od składowej stałej) i umiarkowany koszt budowy predestynują to urządzenie do wykorzystania zarówno w pomiarach i rejestracji przebiegów prądu, jak i w zamkniętych układach regulacji systemów energoelektronicznych. Wykonano i przetestowano układ doświadczalny pozwalający na pomiar prądów bipolarnych o maksymalnym natężeniu do 40 A. Zaprezentowano podstawy teoretyczne i wyniki prac laboratoryjnych obejmujących badania statyczne i dynamiczne proponowanego czujnika.

Słowa kluczowe: czujnik prądu, czujnik szerokopasmowy, czujnik niskokosztowy, czujnik Halla, przekładnik prądowy

BROADBAND CURRENT SENSOR FOR POWER ELECTRONICS APPLICATIONS

Abstract: The paper presents the concept of a broadband and low-cost current sensor intended especially for applications in power electronics. The presented sensor consists of a Hall effect (LEM type) current sensor connected in parallel with a current transformer. The wide band of the proposed sensor (starting with the constant component) and the moderate construction cost make the proposed sensor exceptionally well suited to work both in the measurement and recording of current waveforms, as well as in closed-loop control systems of power electronic systems. An experimental setup allowing the measurement of bipolar currents up to 40 A was made and tested. The theoretical basis and results of laboratory static and dynamic tests of the proposed sensor are presented in the paper.

Keywords: current sensor, wide bandwidth sensor, low-cost sensor, Hall sensor, current transformer

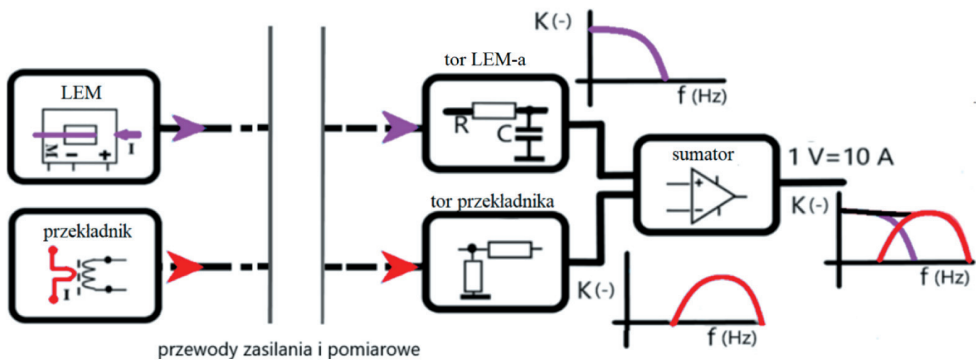
1. Wprowadzenie

Urządzenia energoelektroniczne są coraz częściej wykorzystywane zarówno w przemyśle, jak i w zastosowaniach powszechnego użytku. Ich złożone algorytmy sterowania zwykle wymagają pomiaru prądu w określonym punkcie (punktach) obwodu (Costa et al. 2001). Rezystancyjne czujniki pomiarowe (boczniki) w specjalnych wykonaniach mogą mieć pasmo robocze od zera do nawet powyżej 1 GHz (Filipski i in. 2008, Pogliano i in. 2009). Są one proste w budowie i tanie, niestety nie zapewniają galwanicznej izolacji pomiędzy obwodem mocy a obwodem sygnałowym (Zhang W. i in. 2021). Ponadto do mierzonego obwodu wprowadzana jest dodatkowa rezystancja czujnika (a zatem dodatkowe straty), a często także jego niepomijalna indukcyjność. Innym rodzajem stosowanego czujnika prądu jest przekładnik prądowy. Jest on prosty w budowie i zapewnia izolację galwaniczną. Ma szerokie pasmo robocze, rzędu kilku megaherców, jednak ograniczone od dołu (nie przenosi składowej stałej) (Cataliotti i in. 2008, Kondrath i Kazimierczuk 2009, Rodrigo-Mor i in. 2020). Kolejnym stosowanym rozwiązaniem jest cewka Rogowskiego (Ahmed i in. 2012, Li i in. 2015). Jako jej zalety wymieniane są izolacja galwaniczna i małe wymiary, niepowodujące konieczności zmiany geometrii obwodu energoelektronicznego. Wadą jest ograniczenie pasma przenoszenia od dołu (nie przenosi składowej stałej) (Ahmed i in. 2012). Następnym stosowanym rozwiązaniem są czujniki wykorzystujące efekt Halla (Dalessandro i in. 2006, 2007, Xu i in. 2015, Sun i in. 2016, Burkhard 2019, Weiss i in. 2019). Ich główne zalety to: pasmo od zera do kilkuset kiloherców, bardzo dobra liniowość, mały dryft temperaturowy oraz nieinwazyjny pomiar (brak strat pomiarowych). W pracach Dalessandro i in. (2006) oraz Burkharda (2019) pokazano sposób na znaczne zwiększenie szerokości pasma czujnika Halla, jednak przedstawione układy różnią się od rozwiązania zaproponowanego w artykule. Proponowana metoda polega na dodaniu wysokoczęstotliwościowego przekładnika prądowego, który jest przeznaczony do przenoszenia sygnałów o znacznie wyższej częstotliwości niż czujnik Halla. Umożliwia to pełne wykorzystanie charakterystyki dolnoprzepustowej czujnika Halla oraz charakterystyki górnoprzepustowej przekładnika prądowego (Burkhard 2019, Chojowski i in. 2021). Charakterystyka częstotliwościowa przekładnika prądowego co prawda nie pozwala na przesyłanie sygnału o najwyższych częstotliwościach (Cataliotti i in. 2008, Kondrath i Kazimierczuk 2009), ale częstotliwości te znajdują się powyżej docelowego zakresu częstotliwości proponowanego czujnika. Zmiana przenikalności rdzenia i pojemności międzyzwojowe ograniczają górną częstotliwość pasma przekładnika. Dodatkowo pojawia się również problem niedopasowania charakterystyk wzmocnienia obu czujników, co jest związane z rezystancjami przekładnika prądowego (Dalessandro i in. 2006).

2. Opis analityczny proponowanego czujnika

2.1. Zasada działania

Przetworniki LEM zapewniają izolację galwaniczną i umożliwiają pomiar prądów bipolarnych. Problemem komercyjnych czujników opartych na efekcie Halla jest stosunkowo niska górna częstotliwość pracy. Proponowany czujnik prądu (PCP) pozwoli na wykorzystanie wszystkich zalet przetwornika LEM, ale znacząco zwiększy pasmo częstotliwości (odpowiedź dla sygnałów szybkozmiennych). Zaproponowane rozwiązanie można uznać za niedrogi układ rozszerzający możliwości pomiarowe przetwornika LEM (rys. 1).



Rys. 1. Ogólna koncepcja proponowanego czujnika PCP

W proponowanym rozwiązaniu do przetwornika LEM dodano przekładnik prądowy (PP) w celu rozszerzenia pasma pomiarowego. Cały układ pomiarowy składa się z dwóch czujników (LEM + PP) i dostarcza dwa sygnały pomiaru prądu (rys. 1). Sygnały wyjściowe są sumowane w obwodzie analogowym w celu wytworzenia bipolarnego sygnału napięciowego reprezentującego mierzony prąd. Transmitancja czujnika $H_{cz}(s)$ składa się z sumy transmitancji przetwornika LEM $H_{LEM}(s)$ i przekładnika prądowego $H_{PP}(s)$:

$$H_{cz}(s) = H_{LEM}(s) + H_{PP}(s) \quad (1)$$

Przed operacją sumowania sygnałów pomiarowych wzajemnie dopasowano wzmocnienia tych sygnałów w układzie analogowym (rys. 1).

2.2. Model toru przetwornika LEM

W przypadku badanego czujnika wprowadzono dodatkowy dolnoprzepustowy filtr RC (rys. 1) o transmitancji określonej zależnością (2). Charakterystyki wzmocnienia

i przesunięcia fazowego tego filtru mają istotne znaczenie dla właściwości zaproponowanego czujnika.

$$H_{RC}(s) = \frac{U_{RC}(s)}{U_{LEM}(s)} = \frac{K_{RC}}{RCs + 1} \quad (2)$$

Częstotliwość graniczna filtru RC wynosi:

$$f_{grRC} = \frac{1}{2\pi RC} \quad (3)$$

2.3. Model przekładnika prądowego

Dolna częstotliwość graniczna f_{LF} filtru górnoprzepustowego reprezentującego przekładnik prądowy (Kondrath i Kazimierczuk 2009) wynosi:

$$f_{LF} \approx \frac{R_m}{2\pi L} \quad (4)$$

gdzie:

L – indukcyjność magnesująca,

R_m – rezystancja opornika pomiarowego.

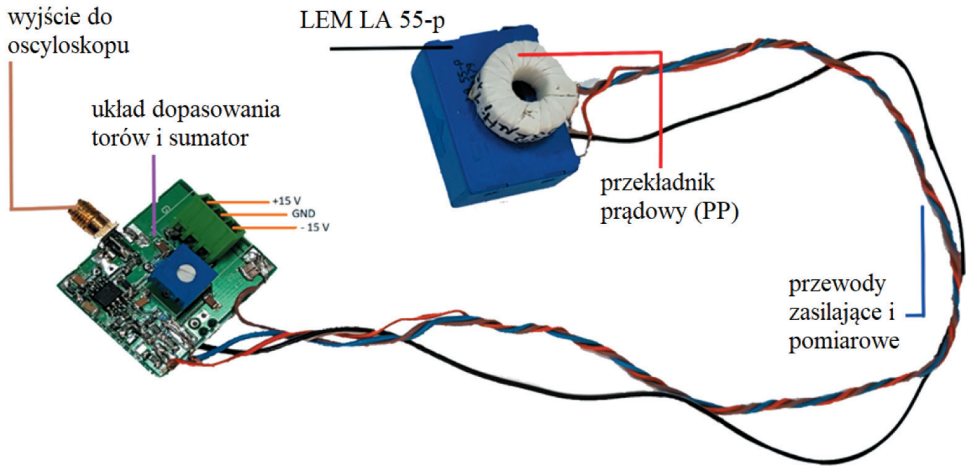
Dla najwyższych częstotliwości PP zachowuje się jak filtr dolnoprzepustowy, dlatego trzeba uwzględnić pojemność międzyzwojową C_p . Górna częstotliwość graniczna f_{HF} zależy od tej pojemności pasywnościowej filtru i można ją wyznaczyć ze wzoru:

$$f_{HF} \approx \frac{1}{2\pi R_m C_p} \quad (5)$$

Przedstawiona analiza modelu transformatora pozwala na określenie kluczowych parametrów czujnika. Pojemność C_p może być wyznaczona za pomocą układu pomiarowego opisanego przez Barlika i in. (2016) oraz Chojowskiego i in. (2020).

3. Wykonanie czujnika

Prototyp proponowanego czujnika, oparty na koncepcji z rysunku 1, został przygotowany na płycie PCB. Przetwornik LEM oraz przekładnik prądowy umieszczono poza płytką, w odległości około 0,5 m od niej (rys. 2). Przetwornik LEM LA 55-P zasilany był napięciem bipolarnym o wartości ± 15 V. Zasilanie obwodu wzmacniacza operacyjnego AD8000TRDZ zapewniały stabilizatory liniowe (diody Zenera – TZMB6V2-GS08). Przekładnik prądowy o przekładni 100:1 wykonany został z wykorzystaniem rdzenia ferrytowego Mn-Zn (parametr $A_L = 63$ nH).

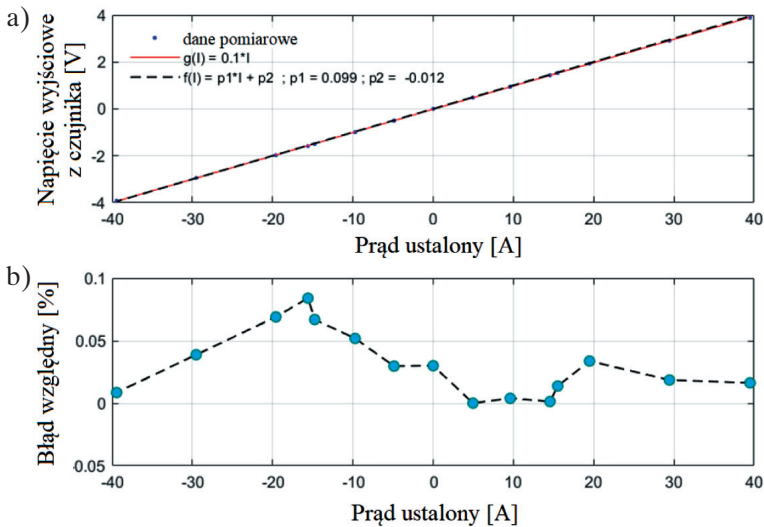


Rys. 2. Prototyp proponowanego czujnika

4. Wyniki eksperymentalne

4.1. Charakterystyka statyczna

Pierwszy test proponowanego czujnika przeprowadzono w celu wyznaczenia charakterystyki napięcia wyjściowego w funkcji mierzonego prądu. Test przeprowadzono przy użyciu źródła napięcia stałego i rezystora obciążającego $4,7 \Omega$ (1 kW). Zmierzoną charakterystykę przedstawiono na rysunku 3.

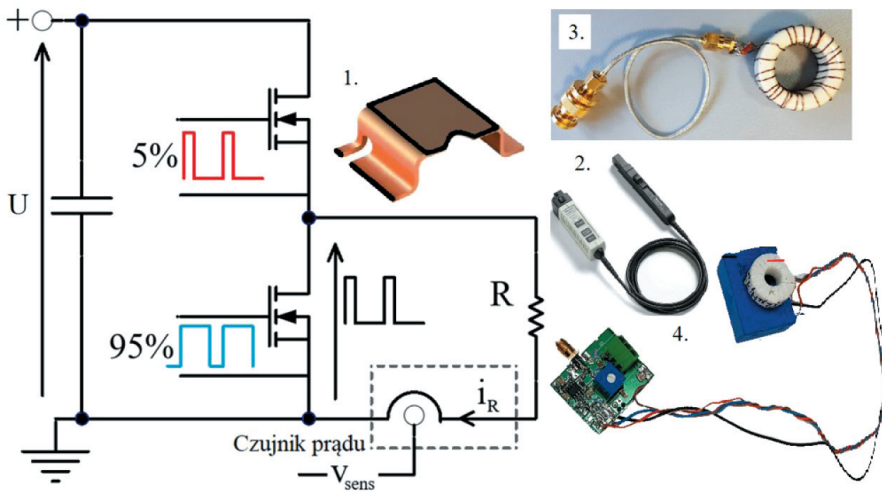


Rys. 3. Napięcie wyjściowe czujnika w funkcji mierzonego prądu (a) oraz błąd względny (b)

Dane pomiarowe aproksymowano funkcją $f(I)$. Na rysunku pokazano także krzywą teoretyczną $g(I)$. Maksymalny względny błąd procentowy pomiaru charakterystyki statycznej względem krzywej teoretycznej nie przekracza 0,1%. Charakterystyka statyczna zależy od parametrów czujnika Halla, który odpowiada za przenoszenie składowych DC w proponowanym czujniku.

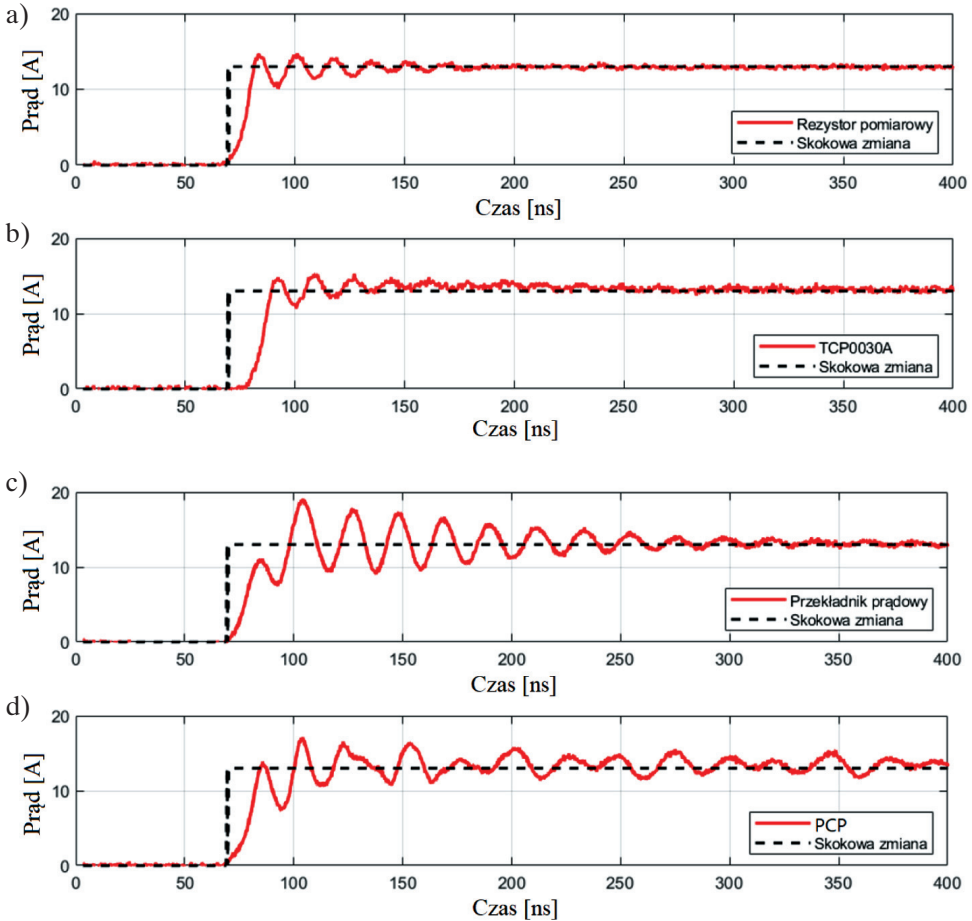
4.2. Charakterystyka dynamiczna

W celu uzyskania odpowiedzi dynamicznej czujnik został przetestowany za pomocą prostego generatora impulsów prądowych. Na rysunku 4 przedstawiono obwód testowy. Rezystor o niskiej indukcyjności był podłączony do źródła napięcia stałego przez układ półmostka z tranzystorami MOSFET,ysterowanego z niską wartością współczynnika wypełnienia (około 5%, $f = 30$ kHz). Pozwoliło to na wygenerowanie prostokątnego sygnału prądu o małej wartości średniej.



Rys. 4. Obwód do generacji impulsu prądowego i cztery porównywane czujniki prądu: 1 – rezystor pomiarowy z sondą pasywną TPP1000 (TEKTRONIX 2022a), 2 – sonda prądowa TCP0030A (TEKTRONIX 2022b), 3 – przekładnik prądowy dużej częstotliwości (pasmo -3 dB dla około 12 MHz), 4 – PCP (rys. 2)

W celu określenia własności dynamicznych czujnika zmierzono impuls prądowy i porównano uzyskany sygnał pomiarowy z sygnałem pomiarowym innych dostępnych komercyjnie sond. Wyniki pomiaru impulsów prądowych za pomocą rezystora pomiarowego z sondą TPP1000, sondy TCP0030A, przekładnika i proponowanego czujnika (PCP) zostały przedstawione na rysunku 5.



Rys. 5. Przebiegi prądu zmierzone za pomocą: a) rezystora pomiarowego z sondą TPP1000; b) sondy TCP0030A; c) przekładnika; d) czujnika PCP

Uzyskane wyniki analizy przebiegów czasowych zestawiono w tabeli 1. Te wyniki pozwalają jednoznacznie określić zalety proponowanego czujnika. Proponowany czujnik pozwala na uzyskanie szybszej odpowiedzi (opóźnienie odpowiedzi – tab. 1) w porównaniu do TCP0030A oraz do rezystora pomiarowego. Preregulowanie dodatnie jest również podobne jak w przypadku rezystora. Obwód PCP nie ma filtra wyjściowego, ale filtr może być użyty w przypadku dużych przeregulowań lub oscylacji przy szybszych zboczach, co wyeliminuje przeregulowania i oscylacje, ale wygładzi zbocze i zwiększy czas narastania zbocza. Opóźnienie w sondzie prądowej Tektronix jest najprawdopodobniej spowodowane użyciem filtrów w systemie (pasmo sondy jest ograniczone do 120 MHz), ale po krótkim opóźnieniu (opóźnienie odpowiedzi – tab. 1) sygnał na wyjściu sondy TCP0030A gwałtownie wzrasta do wartości ustalonej.

Tabela 1

Porównanie odpowiedzi rezystora do pomiaru prądu, sondy TCP0030A, przekładnika i proponowanego czujnika (PCP) – na podstawie rysunku 5

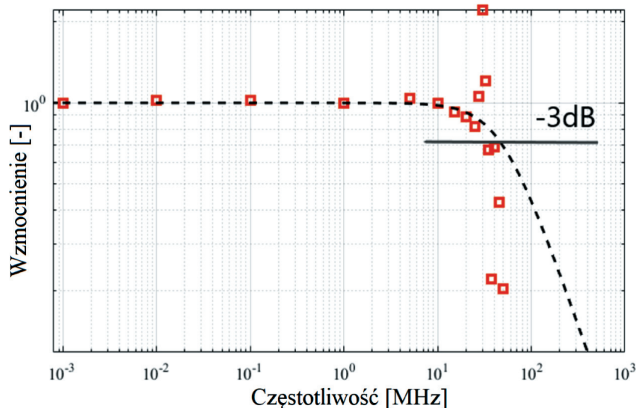
Parametr	Rezystor pomiarowy	TCP0030A	PP	PCP
Opóźnienie odpowiedzi (zwłoka czasowa) [ns]	2,3	7,3	3,1	3,0
Czas narastania zbocza (od 10% do 90%) [ns]	8,7	9,5	23,4	11,7
Przeregulowanie (dodatnie) [A]	14,7	15,2	18,9	16,9
Przeregulowanie (ujemne) [A]	10,1	10,9	8,9	7,5
Czas do wystąpienia szczytu [ns]	108,2	109,6	103,6	103,4

Zidentyfikowane zbocza narastające i opadające można wykorzystać do określenia pasma czujnika. Najczęściej czasy narastania (t_{rise}) i opadania (t_{fall}) są mierzone między 10% a 90% ustalonej wartości. Można wyróżnić kilka wzorów w celu przybliżenia wymaganego pasma (Zhang Z. i in. 2017, Nitzsche i in. 2018). Pasma przenoszenia zostało wyznaczone na podstawie zależności (Zhang Z. i in. 2017, Nitzsche i in. 2018):

$$f_{BW-UF} \approx \frac{0,35}{\min(t_{rise}, t_{fall})} \approx 29,91 \text{ MHz} \quad (6)$$

4.3. Analiza częstotliwościowa

Charakterystyka częstotliwościowa (rys. 6) została uzyskana za pomocą generatora wysokiej częstotliwości (o wyjściowym sygnale sinusoidalnym około 100 mA). Linią przerywaną zaznaczono analityczną charakterystykę proponowanego czujnika uzyskaną na podstawie częstotliwości granicznej ze wzoru (6). Pasma podanego czujnika (-3 dB) w wyniku badania generatorem wynosi około 35 MHz (co dobrze koresponduje z zależnością (6)).



Rys. 6. Charakterystyka wzmocnienia czujnika w funkcji częstotliwości; pokazano również krzywą teoretyczną na podstawie pasma obliczonego z zależności (6)

5. Wnioski

W artykule przedstawiono koncepcję czujnika prądu, który powstał jako połączenie przemysłowego czujnika prądu LEM i przekładnika prądowego. Ogólne porównanie z dostępnymi czujnikami pokazuje, że PCP ma większą szerokość pasma i zakres pomiaru prądu. Przedstawione w niniejszym artykule wyniki badań potwierdzają, że proponowany czujnik prądu ma lepsze właściwości niż oryginalny przetwornik LEM, na przykład znacznie szersze pasmo (rozszerzone pasmo wysokich częstotliwości – do kilku megaherców). Czujnik może mierzyć prąd bipolarny do 40 A z izolacją galwaniczną. Czujnik wytwarza bezpieczny napięciowy sygnał wyjściowy (1 V to 10 A, jest to wzmacnienie teoretyczne) i ma taki sam układ zasilania jak komercyjny czujnik LEM (+15 V oraz -15 V). Niski koszt modyfikacji czujnika (wzmacniacz i przekładnik prądowy to najdroższe elementy dodatkowe) czyni go konkurencyjnym czujnikiem w porównaniu z komercyjnymi czujnikami wysokopasmowymi (do kilku megaherców). PCP wykorzystuje dostępne na rynku elementy (PP i LEM). Oba urządzenia pomiarowe generują sygnał wyjściowy typu prądowego, co pozwala na umieszczenie układu dopasowującego w pewnej odległości od punktu pomiarowego (LEM i PP). Jest to istotną i nową cechą czujnika. Sygnały wyjściowe typu prądowego znacznie zmniejszają wpływ szumu na mierzony sygnał.

Niniejsza praca powstała w ramach grantu TECHMATSTRATEGI/347200/11/NCBR/2017 udzielonego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.

Literatura

- Ahmed A., Coulbeck L., Castellazzi A., Johnson C.M., 2012, *Design and test of a PCB Rogowski coil for very high dI/dt detection*, [w:] *15th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC), 2012: 4–6 Sept. 2012, Novi Sad, Serbia*, IEEE, Piscataway, s. DS1a.2-1–DS1a.2-4. <https://doi.org/10.1109/EPEPEMC.2012.6397192>.
- Barlik R., Grzejszczak P., Zdanowski M., 2016, *Determination of the basic parameters of the high-frequency planar transformer*, *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 92, nr 6, s. 71–78. <https://doi.org/10.15199/48.2016.06.13>.
- Burkhard U., 2019, *Open-source wideband (DC to MHz range) isolated current sensor*, *HardwareX*, vol. 5, e00057. <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2019.e00057>.
- Cataliotti A., Di Cara D., Di Franco P.A., Emanuel A.E., Nuccio S., 2008, *Frequency response of measurement current transformers*, [w:] *2008 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference: Victoria, BC, Canada, 12–15 May 2008*, IEEE, Piscataway, s. 1254–1258. <https://doi.org/10.1109/IMTC.2008.4547234>.
- Chojowski M., Piróg S., Baszyński M., Dziadecki A., 2020, *Pojemności pasożytnicze w układach energoelektronicznych*, *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 96, nr 6, s. 76–80. <https://doi.org/10.15199/48.2020.06.14>.

- Chojowski M., Dziadecki A., Baszyński M., Dudek R., Stobiecki A., Skotniczny J., 2021, *Wide bandwidth and inexpensive current sensor for power electronics – an augmented LEM current sensor*, *Energies*, vol. 14, 4194. <https://doi.org/10.3390/en14144194>.
- Costa F., Poulichet P., Mazaleyrat F., Laboure E., 2001, *The current sensors in power electronics, a review*, *EPE Journal*, vol. 11(1), s. 7–18. <https://doi.org/10.1080/09398368.2001.11463473>.
- Dalessandro L., Karrer N., Kolar J. W., 2006, *A novel isolated current sensor for high-performance power electronics applications*, [w:] *Twenty-First Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, APEC '06., Dallas, TX, USA*, IEEE, Piscataway, s. 1–9. <https://doi.org/10.1109/APEC.2006.1620594>.
- Dalessandro L., Karrer N., Kolar J. W., 2007, *High-performance planar isolated current sensor for power electronics applications*, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 22(5), s. 1682–1692. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2007.904198>.
- Filipski P.S., Boecker M., Garcocz M., 2008, *20-A to 100-A AC–DC coaxial current shunts for 100-kHz frequency range*, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 57(8), s. 1637–1641. <https://doi.org/10.1109/TIM.2008.923783>.
- Kondrath N., Kazimierczuk M.K., 2009, *Bandwidth of current transformers*, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 58, no. 6, s. 2008–2016. <https://doi.org/10.1109/TIM.2008.2006134>.
- Li H., Beczkowski S., Munk-Nielsen S., Lu K., Wu Q., 2015, *Current measurement method for characterization of fast switching power semiconductors with silicon steel current transformer*, [w:] *2015 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Charlotte, NC, USA*, IEEE, Piscataway, s. 2527–2531. <https://doi.org/10.1109/APEC.2015.7104706>.
- Nitzsche M., Zehelein M., Tröster N., Roth-Stielow J., 2018, *Precise voltage measurement for power electronics with high switching frequencies*, [w:] *PCIM Europe 2018: International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management Proceedings, Nuremberg, 05–07 June 2018*, VDE Verlag, Berlin – Offenbach, s. 1356–1361. <https://doi.org/10.18419/opus-10745>.
- Pogliano U., Bosco G.C., Serazio D., 2009, *Coaxial shunts as AC–DC transfer standards of current*, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 58(4), s. 872–877. <https://doi.org/10.1109/TIM.2008.2008469>.
- Rodrigo-Mor A., Muñoz F.A., Castro-Heredia L.C., 2020, *Principles of charge estimation methods using high-frequency current transformer sensors in partial discharge measurements*, *Sensors*, vol. 20(9), 2520. <https://doi.org/10.3390/s20092520>.
- Sun C., Wen Y., Li P., Ye W., 2016, *Self-contained wireless hall current sensor applied for two-wire zip-cords*, *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 52(7), s. 1–4. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2016.2524671>.
- TEKTRONIX, INC., 2022a, *TPP1000 Datasheet Passive Probe*, <https://www.tek.com/en/products/oscilloscopes/probes/passive-probe> [dostęp: 22.03.2022].

- TEKTRONIX, INC., 2022b, *TCP0030A Datasheet 30 A AC/DC Current Probe*, <https://www.tek.com/datasheet/30-ac-dc-current-probe> [dostęp: 22.03.2022].
- Weiss R., Itzke A., Reitenspieß J., Hoffmann I., Weigel R., 2019, *A novel closed loop current sensor based on a circular array of magnetic field sensors*, *IEEE Sensors Journal*, vol. 19(7), s. 2517–2524. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2018.2887302>.
- Xu C., Liu J., Zhang Q., Xu C., Yang Y., 2015, *Investigation of the thermal drift of open-loop Hall effect current sensor and its improvement*, [w:] *2015 IEEE International Workshop on Applied Measurements for Power Systems (AMPS 2015), Aachen, Germany, 23 – 25 September 2015*, IEEE, Piscataway, s. 19–24. <https://doi.org/10.1109/AMPS.2015.7312732>.
- Zhang W., Zhang Z., Wang F., Brush E.V., Forcier N., 2021, *High-bandwidth low-inductance current shunt for wide-bandgap devices dynamic characterization*, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 36(4), s. 4522–4531. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2020.3026262>.
- Zhang Z., Guo B., Wang F.F., Jones E.A., Tolbert L.M., Blalock B.J., 2017, *Methodology for wide band-gap device dynamic characterization*, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 32(12), s. 9307–9318. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2017.2655491>.