OPEN ACCESS

PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY

Mariusz ZDANOWSKI[1], Arkadiusz KASZEWSKI[2], Mariusz OKNIŃSKI[3], Janusz WIŚNIEWSKI[4]

ORCID: [1]0000-0001-8653-0093, [2]0000-0002-5424-0347

DOI: 10.15199/48.2025.11.35

Elementy magnetyczne w układzie podwójnego mostka aktywnego: studium projektowo-badawcze

Magnetic components in a Dual Active Bridge circuit: a design and research study

[1] dr inż. Mariusz Zdanowski, Politechnika Warszawska, Instytut Sterowania i Elektroniki Przemysłowej, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, e-mail: mariusz.zdanowski@pw.edu.pl

[2] dr hab. inż. Arkadiusz Kaszewski, Politechnika Warszawska, Instytut Sterowania i Elektroniki Przemysłowej, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa

[3] mgr inż. Mariusz Okniński, APS Energia SA, ul. Strużańska 14, 05-126 Stanisławów Pierwszy

[4] dr inż. Janusz Wiśniewski, APS Energia SA, ul. Strużańska 14, 05-126 Stanisławów Pierwszy

Adres do korespondencji: mariusz.zdanowski@pw.edu.pl

Streszczenie: Artykuł przedstawia badania symulacyjne, etapy opracowania (projekt, budowa) oraz testy laboratoryjne podzespołów magnetycznych dedykowanych do pracy w obwodzie pośredniczącym przekształtnika o strukturze podwójnego mostka aktywnego (ang. Dual Active Bridge, DAB) dedykowanego do współpracy z magazynem energii elektrycznej. W pracy przedstawiono problematykę związaną z występowaniem zjawisk naskórkowości oraz efektu zbliżeniowego w kontekście elementów magnetycznych pracujących przy podwyższonej częstotliwości (80 kHz) oraz mocy na poziomie 35 kVA. Przeprowadzono analizę geometryczną uzwojeń i dokonano oceny wpływu ich ułożenia na wartość indukcyjności rozproszenia. Artykuł ilustrują rezultaty prowadzonych badań symulacyjnych oraz eksperymentalnych, służące do analizy i porównania uzyskanych wyników w kontekście zastosowanej procedury projektowania elementów magnetycznych.

Słowa kluczowe: podwójny mostek aktywny, magazyn energii elektrycznej, transformator, dławik, geometria uzwojeń

Abstract: The paper presents simulation studies, development stages (design, construction) and laboratory tests of magnetic components dedicated to work in the intermediate circuit of a converter with a dual active bridge structure (DAB) dedicated to cooperation with an electrical energy storage. The paper presents the issues related to the occurrence of skin effects and proximity effects in the context of the operation of magnetic elements operating at an increased frequency (80 kHz) and power at the level of 35 kVA. A geometric analysis of the windings was carried out and an assessment of the effect of their arrangement on the value of the leakage inductance was made. The article illustrates the results of the conducted simulation and experimental studies, used to analyze and compare the obtained results in the context of the applied procedure for designing magnetic elements.

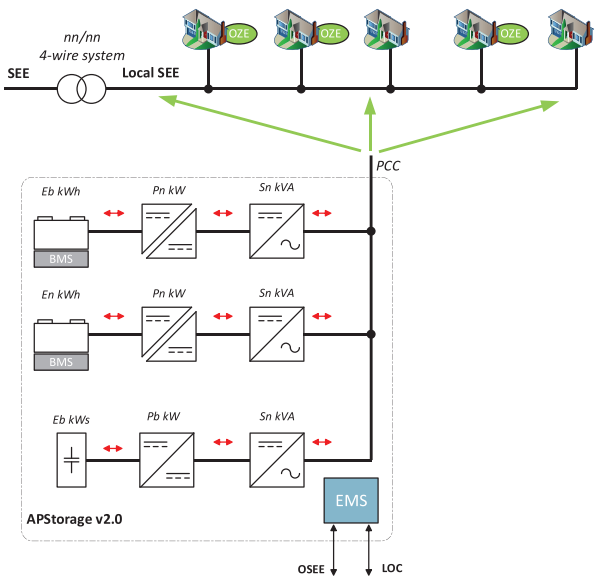
Keywords: dual active bridge, energy storage, transformer, inductor, winding geometry

Wstęp

Transformacja energetyczna, jaka ma obecnie miejsce w polskim systemie elektroenergetycznym uwzględniająca m.in. aspekty dotyczące pozyskiwania energii elektrycznej z odnawialnych źródeł energii (OZE) jest w obszarze zainteresowania wielu jednostek naukowych oraz instytucji przemysłowych. Rosnąca z roku na rok liczba instalacji fotowoltaicznych oraz elektrowni wiatrowych (dla przykładu pod koniec roku 2024 do 33,6 GW, czyli wzrost o 18,2% względem roku poprzedniego [1]) jest powodem zwiększenia stosunku mocy generowanej z odnawialnych źródeł energii do mocy pozyskiwanej z konwencjonalnych źródeł, przy czym szczyt produkcji energii elektrycznej z OZE (głównie z instalacji fotowoltaicznych), będąc zależnym od uwarunkowań pogodowych, przypada na godziny popołudniowe, co jest często powodem niewykorzystania nadwyżek produkcyjnych. Tego typu sytuacje skłaniają do chęci magazynowania energii elektrycznej, celem jej dyspozycji również w innych ramach czasowych, co ma często miejsce zarówno w gospodarstwach domowych jak

i większej infrastrukturze energetycznej (np. zakłady przemysłowe). Niewątpliwą zaletą tego typu rozwiązań, oprócz możliwości pełnego wykorzystania produkowanej energii elektrycznej jest możliwość zarządzania zmagazynowaną energią, ale również uniezależnienie się od dostaw energetycznych, np. w przypadku zaniku lub czasowego odłączenia źródła (przejście do trybu pracy wyspowej). Korzyści posiadania zasobnika energii oraz urządzeń przekształcania do postaci użytkowej mogą również przejawiać się w postaci możliwości poprawy parametrów energetycznych (np. współczynnika zawartości wyższych harmonicznych napięcia/prądu) [2], [3].

Wzrost penetracji odnawialnych źródeł energii, które charakteryzują się zmiennością dostarczanej energii, powoduje istotne problemy w systemie elektroenergetycznym (SEE) takie jak sztywność sieci, większe odchylenia częstotliwości oraz stabilność. Uwidacznia się to szczególnie w SEE opartych głównie na OZE, w tym w mikrosieciach oraz przyszłych inteligentnych systemach elektroenergetycznych. Jak wspomniano wcześniej, magazyny energii są niezbędne do ułatwiania integracji OZE zarówno w mikrosieciach, jak i w systemach elektroenergetycznych. Te systemy wykorzystują różne technologie magazynowania energii (mechaniczne, termalne, elektryczne, elektrochemiczne i chemiczne), z każdą z nich związane są odmienne właściwości użytkowe [4], [5]. Interfejsem pomiędzy magazynem energii a SEE, w zdecydowanej większości przypadków i często jedyną możliwą opcją, jest układ przekształcania energii.



Rys. 1. Schemat ideowy jednego z wariantów systemu APStorage 2.0 (EMS – Energy Management System, LOC – Interfejs komunikacyjny dla użytkownika, OSEE – Interfejs komunikacyjny dla operator SEE,,PCC – Point of Common Coupling, SEE – System Elektroenergetyczny)

Schemat ideowy, przedstawiający koncepcję jednego z wariantów projektowanego w ramach projektu systemu APStorage 2.0, zamieszczony jest na rysunku 1. Jako źródło energii zastosowano dwie technologie magazynowania energii: elektrochemiczną (dwa magazyny oparte na ogniwach Li-ion) i elektryczną (bateria ultrakondensatorów). Każdy z nich dołączony jest do systemu SEE w punkcie (PPC – Point of Common Coupling) poprzez dwukierunkowe przekształtnik napięcia DC/DC i DC/AC. Zarządzenie energią/mocą w systemie APStorage 2.0 realizowane jest poprzez system zarządzania energią (EMS), w którym wbudowana jest funkcjonalność rozdziału energii pomiędzy poszczególne magazyn i układy przekształtnikowe.

Zastosowanie magazynów energii elektrycznej w mikrosieciach prądu stałego lub/i przemiennego wymusza konieczność zapewnienia odpowiedniego dopasowania napięciowego oraz izolacji galwanicznej w torze transferu energii elektrycznej. Dlatego w tego typu przypadkach stosuje się zazwyczaj układy dwukierunkowego przesyłu energii o strukturze podwójnego mostka aktywnego (ang. Dual Active Bridge, DAB). Chęć wysokosprawnego i efektywnego przekształcania energii elektrycznej determinuje często projektantów tego typu układów do sięgania po przyrządy półprzewodnikowe zdolne do pracy z podwyższoną częstotliwością przełączeń (np. elementy z węglika krzemu, ang. Silicon Carbide, SiC), co skłania (poprawiona) do przeprowadzenia dodatkowych analiz uwzględniających wpływ podwyższonej częstotliwości na pracę elementów magnetycznych. Wzrost częstotliwości stanowi uwydatnienie większego oddziaływania zjawisk zachodzących w tych podzespołach, co może przekładać się na ich poprawną pracę, jak również rzutować na wartość strat mocy w nich występujących. Oprócz elementów półprzewodnikowych, nieodzownymi podzespołami są transformator zapewniający separację galwaniczną oraz dławik, dzięki któremu możliwy jest kontrolowany przepływ prądu i energii. Prowadzenie procesu projektowego uwzględnia również analizy dotyczące rozkładu geometrycznego uzwojeń [6], [7], w tym często występowanie zintegrowanych form elementów magnetycznych [8], [9]. W niniejszej pracy przedstawiono wyniki analiz dotyczące niezależnie pracujących elementów magnetycznych występujących w przekształtniku DAB.

Studium symulacyjno – projektowe

W ramach prowadzonych prac dokonano doboru poszczególnych wartości odnoszących się do rdzenia oraz uzwojenia, a następnie przy zastosowaniu

oprogramowania GeckoMagnetics zweryfikowano poprawność wykonanego projektu. W niniejszym rozdziale przedstawiono również wyniki analiz symulacyjnych odnoszące się do geometrii uzwojeń i ich wpływu na wartość indukcyjności rozproszenia oraz pokazano uzyskane wyniki odnoszące się do strat mocy występujących w poszczególnych elementach składowych.

Transformator

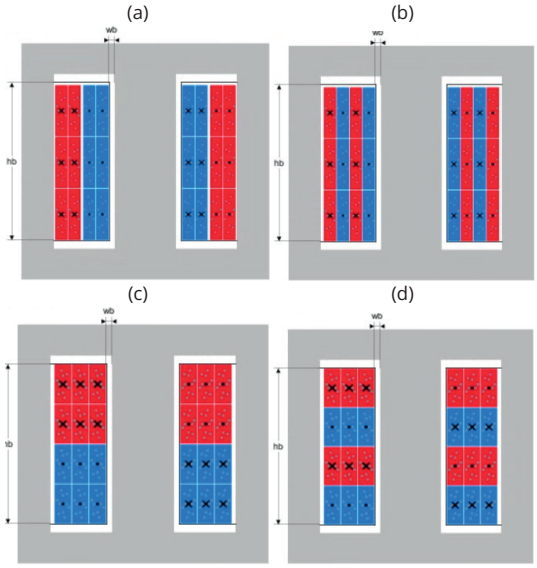
Pierwszym z podzespołów poddanych analizie projektowej był transformator, którego moc znamionową przyjęto na poziomie 35 kVA, pracujący przy podwyższonej częstotliwości (80 kHz), podstawowe parametry elektryczne tego elementu zestawiono w tabeli 1. Na podstawie elektrycznych danych wejściowych przygotowano wstępny projekt transformatora obejmujący swoim zakresem dobór rdzenia magnetycznego oraz określenie parametrów uzwojenia.

Tabela 1. Parametry elektryczne opracowywanego transformatora

Parametr	Wartość	Jednostka
Częstotliwość f	80	kHz
Przekładnia n	1:1	-
Napięcie strony pierwotnej/ wtórnej U_1/U_2	800/800	V
Moc znamionowa P_n	35	kVA

W toku prowadzonych prac, stosując procedurę bazującą na obliczeniach iloczynu okna rdzenia oraz pola przekroju poprzecznego kolumny będącej w otoczeniu uzwojeń, dobrano rdzeń typu E80/38/20 wykonany z materiału 3C90, przy czym aby zapewnić transformację mocy na zakładanym poziomie zastosowano 7 zestawów kształtek rdzeni, uzyskując wówczas sumaryczne pole przekroju poprzecznego środkowych kolumn równe 2744 mm^2. Zakładając przy tym maksymalną wartość indukcji magnetycznej B_{max} na poziomie 150 mT określono liczbę zwojów strony pierwotnej oraz wtórnej ($n_1 = n_2 = 6$ zw.), a następnie dobrano materiał nawojowy w postaci licy złożonej z 630 pojedynczych żył o średnicy 0,1 mm. Mając na uwadze prądy uzwojeń co do wartości skutecznych równe 60 A, przy założeniu gęstości prądu w przewodniku J na poziomie 3 A/mm^2 przewidziano zastosowanie równolegle pięciu przewodów nawojowych o powyższych parametrach geometrycznych.

Uzyskane drogą analityczną dane dotyczące rdzenia oraz uzwojenia zostały zastosowane podczas prowadzonego studium symulacyjnego, które ukierunkowano na analizy dotyczące wpływu geometrii uzwojeń na parametry transformatora, takie jak indukcyjność rozproszenia, straty mocy czy uwarunkowania termiczne. W tym celu przewidziano cztery konfiguracje uzwojeń pierwotnego oraz wtórnego, uwzględniające zarówno ułożenie warstwowe (Rys. 2 a) oraz b)) oraz sekcjonowane (Rys. 2 c) oraz d)).



Rys. 2. Graficzna prezentacja sposobów realizacji uzwojeń w transformatorze podczas prowadzonego studium symulacyjnego: a) uzwojenia skonfigurowane warstwowo; b) warstwowo z przeplataniem; c) uzwojenia sekcjonowane; d) sekcjonowane z przeplataniem

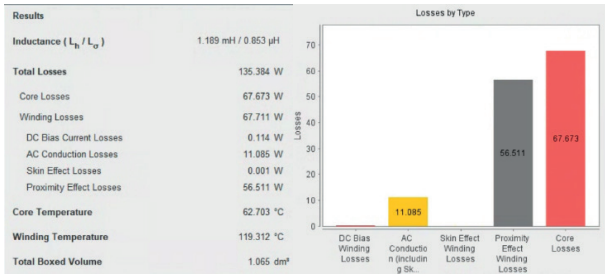
Uwzględniono również możliwość wzajemnego przeplatania warstw/sekcji uzwojeń co powinno pozytywnie wpłynąć na redukcję wartości szczytowych pola magnetycznego, a tym samym ograniczenia indukcyjności rozproszenia [10] ÷ [12], która wpływa na przyrost strat mocy [13]. Odległości między poszczególnymi zwojami oraz między uzwojeniami ustalono na 0,2 mm.

Tabela 2. Indukcyjność magnesująca i rozproszenia w transformatorze o różnych konfiguracjach uzwojeń

Parametr	(a)	(b)	(c)	(d)
L_h / mH	1,352			
L_δ / μH	1,787	0,931	16,491	8,23

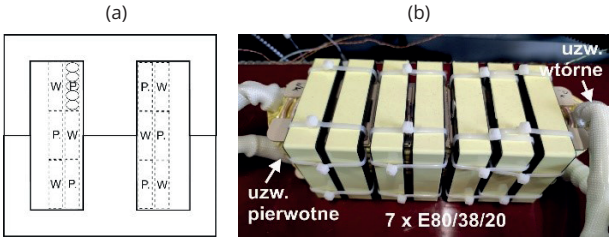
Rezultaty zamieszczone w tabeli 2 świadczą o najkorzystniejszym efekcie w postaci redukcji indukcyjności rozproszenia dla przypadku geometrii uzwojeń uwzględniającej konfigurację warstwową z zastosowaniem przeplatania warstw uzwojenia pierwotnego oraz wtórnego. Wartość indukcyjności na poziomie 1 μH powinna zagwarantować najmniejszą możliwą stratę mocy związaną ze strumieniami rozproszenia, co potwierdzają dalsze analizy symulacyjne mające na celu określenie poszczególnych składowych strat mocy. Z zamieszczonych na rysunku 3 rezultatów wynika, że dominującymi stratami mocy są występujące

w rdzeniu (około 68 W), przy czym dominuje również składowa wynikająca z efektu zbliżeniowego (około 56 W). Straty mocy występujące z przewodzonego prądu o składowej przemiennej stanowią zaledwie 11 W, natomiast zastosowanie licy eliminuje przyrost strat mocy związanych ze zjawiskiem naskórkowości.



Rys. 3. Składowe strat mocy występujących w transformatorze dla wariantu uzwojeń warstwowych przeplatanych, uzyskane drogą symulacji (materiał rdzenia 3C94)

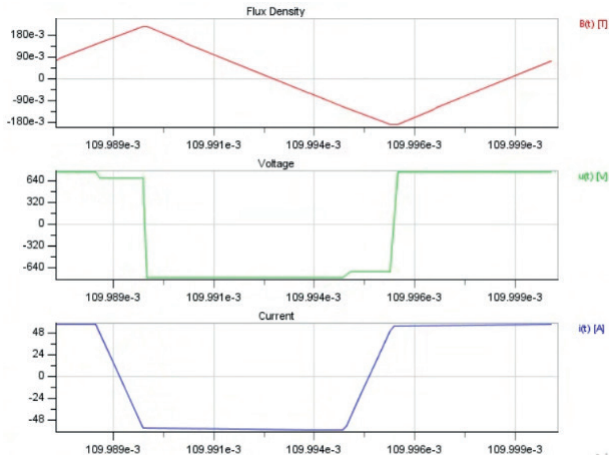
Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono redukcję indukcyjności rozproszenia, która ma bezpośredni wpływ na przyrost strat mocy, dla przypadku sekcjonowania uzwojeń, w którym zastosowano dodatkowe przeplatanie. Mając na uwadze powyższe zdecydowano się na realizację praktyczną transformatora, który zaprezentowano na rysunku 4. Przedstawiona geometria uzwojenia, w postaci wzajemnego przeplatania zwojów (Rys. 4a) powinna przyczynić się do zmniejszenia wartości indukcyjności rozproszenia, a tym samym przyczynić się do ograniczenia powstawania prądów wirowych i częściowej eliminacji wpływu zjawiska zbliżeniowego. Dodatkowo, zastosowana lica, złożona z żył o średnicy 0,1 mm, przy częstotliwości na poziomie 80 kHz pozytywnie wpłynie na redukcję zjawiska naskórkowości.



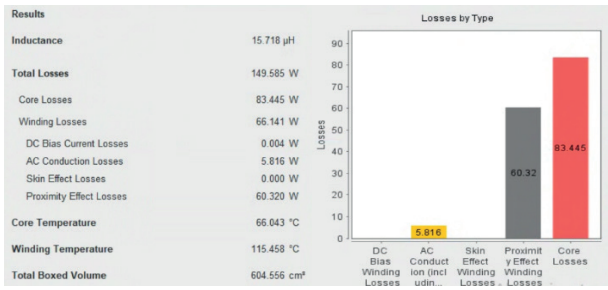
Rys. 4. Graficzna prezentacja sposobu realizacji uzwojeń w transformatorze (a) oraz fotografia wykonanego prototypu (b)

Dławik

Parametry dławika zostały zdefiniowane na podstawie wcześniejszych prac symulacyjnych odnoszących się do warunków pracy przekształtnika typu DAB. W wyniku tych prac założono wymaganą indukcyjność na poziomie 17 µH, dzięki czemu możliwe będzie przekształcanie mocy o wartości znamionowej. Dobrano rdzeń typu K8020E26 wykonany z materiału KoolMu o przenikalności 26u, gdzie zastosowano 3 zestawy kształtek rdzeni, zwiększając tym samym pole przekroju poprzecznego kolumny będącej w otoczeniu uzwojenia, dla którego określono liczbę 10 zwojów. Powyższe wartości stanowiły dane wejściowe do sporządzenia modelu symulacyjnego dławika, który następnie został zastosowany w układzie DAB wraz z uprzednio zamodelowanym transformatorem. W wyniku prowadzonych prac symulacyjnych, dla wymuszenia prostokątnego i wartości międzyszczytowej indukcji magnetycznej na poziomie 380 mT (Rys. 5), uzyskano wartości poszczególnych składowych strat mocy (Rys. 6), których sumaryczna wartość wynosi około 150 W. Dominują straty występujące w rdzeniu (około 84 W) oraz uzwojeniu wynikające ze zjawiska zbliżeniowego (~60 W), przy niespełna 6 W strat związanych ze składową przemienną prądu płynącego przez uzwojenia.



Rys. 5. Oscylogram prezentujący od góry: chwilową wartość indukcji magnetycznej B(t), napięcie uzwojenia dławika u_L(t) oraz prąd uzwojenia i_L(t) wyznaczone w drodze prowadzonych symulacji

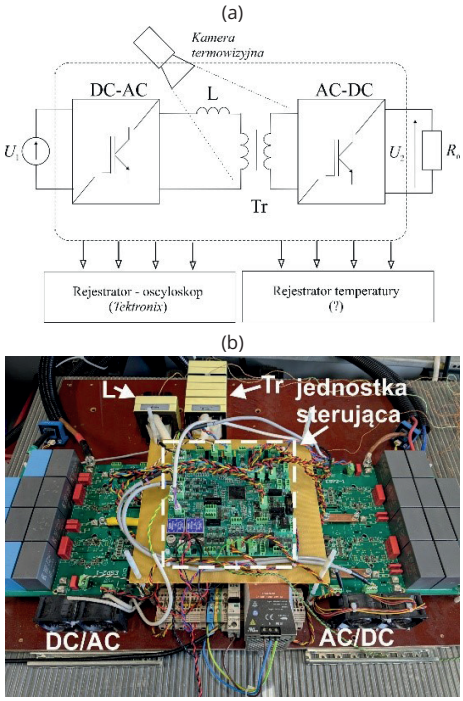


Rys. 6. Składowe strat mocy występujących w dławiku, uzyskane drogą symulacji (rdzeń 00K8020E26, materiał KoolMu)

Badania laboratoryjne

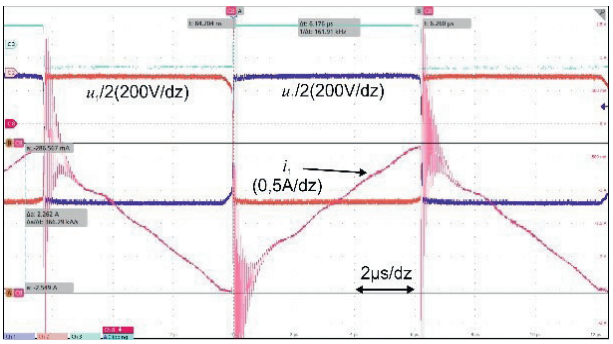
Elementy magnetyczne opracowane na podstawie przedstawionego studium symulacyjno–projektowego zostały wykonane w formie podzespołów o cechach prototypu, które następnie poddano badaniom laboratoryjnym. Na rysunku 7 przedstawiono schemat oraz

fotografię obwodu testowego, gdzie wyszczególniono badane elementy magnetyczne.



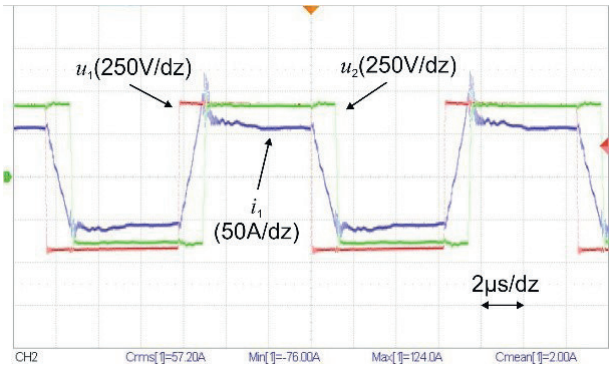
Rys. 7. Schemat (a) oraz fotografia obwodu (b) do testów elementów magnetycznych

W pierwszej kolejności zweryfikowano pracę transformatora podczas próby jałowej, zasilając uzwojenie pierwotne źródłem napięcia kształtu prostokątnego i amplitudzie tego napięcia równej 800 V. W tym czasie rejestrowano prąd uzwojenia strony pierwotnej odpowiadający za magnesowanie rdzenia, otrzymując oscylogram zaprezentowany na rysunku 8. Widoczne na rysunku tłumione oscylacje mają związek z impulsową pracą układu oraz występowaniem obwodowych parametrów pasożytniczych, takich jak pojemności uzwojeń, doprowadzeń oraz indukcyjności połączeń. Na podstawie otrzymanych rezultatów wyznaczono indukcyjność magnesującą transformatora, która wyniosła około 2,1 mH, co odpowiada wartości uzyskanej podczas prowadzonych badań symulacyjnych.



Rys. 8. Oscylogram prezentujący próbę jałową transformatora: napięcie strony pierwotnej (czerwony) i wtórnej (zielony) transformatora, oraz prąd uzwojenia (czerwony)

W kolejnym etapie prac badawczych opracowany prototyp transformatora został obciążony i przetestowany w warunkach znamionowej pracy. W tym celu, w konfiguracji przekształtnika o topologii podwójnego mostka aktywnego, w którym sygnały sterujące między mostkami zostały przesunięte względem siebie o kąt 33 st. el. wymuszono przepływ prądu w uzwojeniach o wartości skutecznej około 57 A (Rys. 9), przy zachowaniu napięć strony pierwotnej i wtórnej na tym samym poziomie (U1=U2=800 V). Elementy magnetyczne pracowały w warunkach wymuszonego przepływu powietrza, co zapewniło zastosowanie dwóch wentylatorów o wymiarach 120x120x38mm, gwarantujących przepływ powietrza na poziomie 3,34 m^3/min. Otrzymane wyniki świadczą o uzyskaniu poprawnych wartości elektrycznych, a tym samym oczekiwanej pracy transformatora w warunkach transformacji napięcia o kształcie prostokątnym.

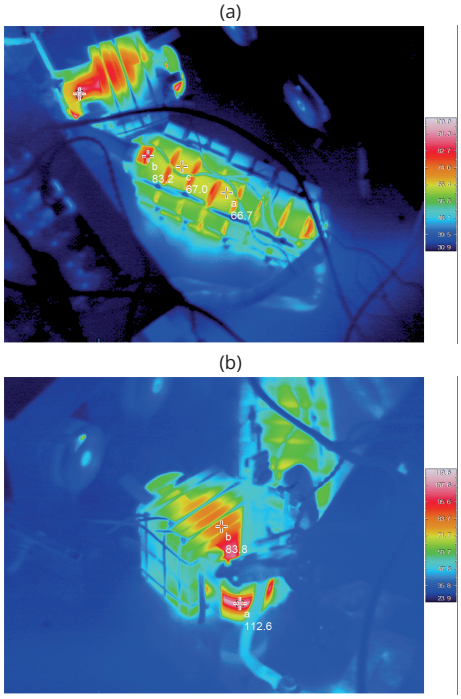


Rys. 9. Oscylogram prezentujący pracę układu DAB: napięcie strony pierwotnej (czerwony) i wtórnej (zielony) transformatora, oraz prąd uzwojenia (niebieski)

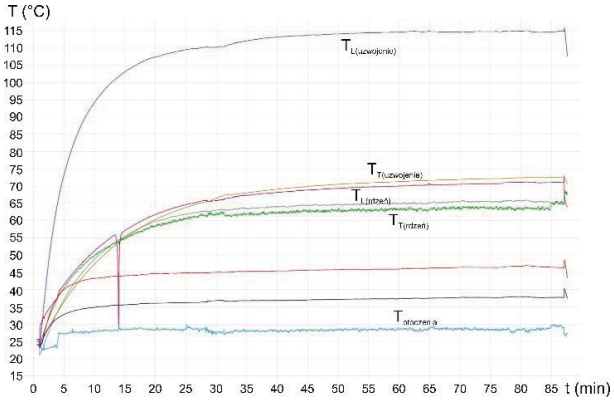
Dodatkowym elementem badań eksperymentalnych było dokonanie obserwacji termicznych. W tym celu rejestrowano temperaturę transformatora podczas pracy w znamionowych warunkach. Efektem prowadzonych badań była rejestracja obrazów termicznych (Rys. 10) oraz wyznaczenie krzywych temperatur mierzonych w charakterystycznych miejscach elementów magnetycznych, takich jak rdzeń oraz uzwojenie dławika oraz transformatora (Rys. 11).

Próba grzania podzespołów trwała do czasu ustalenia termicznego, które stwierdzono po upływie 85 minut od momentu rozpoczęcia badania. Po tym czasie zaobserwowano ustalenie temperatur na poziomie 65ºC (rdzeń) i 80ºC (uzwojenie) w przypadku transformatora oraz 80ºC (rdzeń) i 115ºC (uzwojenie) dla dławika. Temperatura uzwojenia dławika osiąga wartość maksymalną w miejscu realizacji szczeliny powietrznej co ma związek z występowaniem strumieni rozproszenia, które wnikając w część uzwojenia ograniczają jego rezystancję wypadkową. Niemniej jednak, uzyskane wyniki wskazują na poprawną pracę

elementów magnetycznych i uwarunkowania termiczne, zapewniające stabilną oraz bezpieczną pracę przy parametrach znamionowych.



Rys. 10. Obraz termiczny przedstawiający rozkład temperatury na powierzchni transformatora (a) oraz dławika (b) pracujących w warunkach znamionowych



Rys. 11. Pomiary temperatur na elementach magnetycznych

Podsumowanie

W niniejszej pracy przedstawiono wybrane aspekty projektowo–badawcze dotyczące opracowania elementów magnetycznych (transformatora i dławika) stosowanych w obwodach pośredniczących przekształtnika typu DAB, będących sprzęgiem między magazynem energii elektrycznej a obwodem napięcia stałego w mikrosieci. Mając na uwadze wysokoczęstotliwościowe aspekty pracy elementów, prowadzono analizy obejmujące swoim zakresem wpływ zjawisk naskórkowości oraz przylegania na wartości strat mocy występujących w tych podzespołach. W wyniku prowadzonych prac zaprojektowano, wykonano oraz poddano badaniom prototypy transformatora i dławika, w których w celu redukcji strat mocy związanej z występowaniem zjawiska naskórkowości zastosowano licę, a w przypadku redukcji wpływu efektu zbliżeniowego w transformatorze odpowiednią geometrię uzwojeń. Przeprowadzone studium symulacyjne wskazało odpowiednią drogę do realizacji powyższych założeń, a uzyskane drogą eksperymentu wyniki świadczą o poprawności wykonanego procesu projektowego. Istotnym aspektem prowadzonych prac były badania termiczne, z których wynika że przy zakładanej mocy układu, na poziomie 35 kW niezbędne jest zapewnienie odpowiedniego, wymuszonego obiegu powietrza dla projektowanych elementów magnetycznych.

Praca finansowana przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach Strategicznego Programu Badań Naukowych i Prac Rozwojowych „Nowe technologie w zakresie energii" dla projektu o numerze NTE-I/0035/2021-00 pt: "AP-Storage 2.0. Modułowy – konfigurowalny, zdalnie sterowalny i cyberbezpieczny, system magazynowania i kondycjonowania energii elektrycznej".

Przyjęto: 10.11.2025, **zaakceptowano:** 12.11.2025, **opublikowano:** 24.11.2025

LITERATURA

[1] Dane statystyczne dotyczące OZE w Polsce, źródło: https://www.rynekelektryczny.pl/moc-zainstalowana-oze--w-polsce/, dostęp maj 2025

[2] M. H. Saeed, W. Fangzong, B. A. Kalwar and S. Iqbal, "A Review on Microgrids' Challenges & Perspectives," in IEEE Access, vol. 9, pp. 166502-166517, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3135083

[3] Y. Tahir, M. F. Nadeem, A. Ahmed, I. A. Khan and F. Qamar, "A Review on Hybrid Energy Storage Systems in Microgrids," 2020 3rd International Conference on Computing, Mathematics and Engineering Technologies (iCoMET), Sukkur, Pakistan, 2020, pp. 1-7, doi: 10.1109/iCoMET48670.2020.9073919

[4] Farivar, G.G., Manalastas Jr., W., Dehghani Tafti, H., Ceballos, S., Sanchez-Ruiz, A., Lovell, E.C., Konstantinou, G., Townsend, C.D., Srinivasan, M., Pou, J., "Grid-Connected Energy Storage Systems: State-of-the-Art and Emerging Technologies," Proceedings of the IEEE, vol. 111, no. 4, 2023, doi 10.1109/JPROC.2022.3183289

[5] Calero, F., Cañizares, C.A., Bhattacharya, K., Anierobi, C., Calero, I., Zambroni de Souza, M.F., Farrokhbadi, M., Guzman, N.S., Mendieta, W., Peralta, D., Solanki, B.V., Padmanabhan, N., Violante, W., "A Review of Modeling and Applications of Energy Storage Systems in Power Grids," Proceedings of the IEEE, vol. 111, no. 7, 2023, doi: 10.1109/JPROC.2022.3158607

[6] Zou S., Singhabahu C., Chen J., Khaligh A., A comprehensive design approach for a three-winding planar transformer, IET Power Electronics, Volume 15, Issue 8 (2022), 717–727

[7] Dira Y.S., Ramli A.Q., Amirulddin U.A.U., Tan N.M.L., A modelling technique to determine the high frequency transformer leakage inductance using the winding structure, Sci Rep 15, 2373 (2025). https://doi.org/10.1038/s41598-025-86816-z

[8] Y. Xiao, X. Guo, C. Li and Z. Zheng, "A Leakage Inductance Adjustment Model of Hybrid Winding Arrangement Medium Frequency Transformer," 2023 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Nashville, TN, USA, 2023, pp. 5677-5683, doi: 10.1109/ECCE53617.2023.10362277

[9] S. Rahman, V. Sidorov, A. Chub and D. Vinnikov, "High--Frequency Split-Bobbin Transformer Design with Adjustable Leakage Inductance," 2021 IEEE 62nd International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON), Riga, Latvia, 2021, pp. 1-5, doi: 10.1109/RTUCON53541.2021.9711708

[10] Chen B., Analysis of Effect of Winding Interleaving on Leakage Inductance and Winding Loss of High Frequency Transformers, Journal of Electrical Engineering & Technology, 14, 1211–1221 (2019). https://doi.org/10.1007/s42835–019–00129–6

[11] Kolahian P., Grimm F., Baghdadi M., A Comprehensive Review on Planar Magnetics and the Structures to Reduce the Parasitic Elements and Improve Efficiency, Energies, Volume 16, Issue 7 (2023), 1–28

[12] Zhang K., Chen W., Cao X., Pan P., Azeem S.W., Qiao G., Accurate Calculation and Sensitivity Analysis of Leakage Inductance of High-Frequency Transformer With Litz Wire Winding, IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 35, no. 4, pp. 3951-3962, April 2020, doi: 10.1109/TPEL.2019.2936523

[13] Zurek S., Qualitative FEM study of proximity loss reduction by various winding configurations – Part I, Transformers magazine, (2016), vol. 3, pp. 72–101