

Napęd wodorowy w kategorii pozadrogowej

mgr inż. Aleks Jagielski

Streszczenie

Badania nad wprowadzeniem napędu wodorowego w maszynach kategorii „non-road” zyskują na znaczeniu w kontekście znaczącego udziału tego sektora w globalnej emisji substancji szkodliwych oraz gazów cieplarnianych. Niniejsza rozprawa doktorska analizuje zasadność wykorzystania wodorowego ogniwa paliwowego jako składnika systemu napędowego w zastosowaniach „non-road”, wykorzystując jako obiekt badawczy wielopaliwowy układ napędowy zintegrowany z jachtem motorowym. W ramach przeprowadzonych analiz dokonano kompleksowego przeglądu literatury w celu pozyskania aktualnej wiedzy dotyczącej wymagań technicznych, uwarunkowań prawnych oraz praktycznych ograniczeń związanych z integracją ogniw paliwowych w kategorii NRMM (*Non-Road Mobile Machinery*). Przegląd skoncentrowano na identyfikacji rozwiązań charakteryzujących się największym potencjałem konwersji na napęd wodorowy oraz na szczegółowej analizie regulacji prawnych wpływających na wdrażanie technologii wodorowych w sektorze NRMM. Analiza objęła systematyczną klasyfikację maszyn według ich funkcji operacyjnej, parametrów nośności oraz specyficznych wymagań eksploatacyjnych, co umożliwiło identyfikację elementów napędu potencjalnie kompatybilnych z technologią ogniw paliwowych zasilanych wodorem. Analizę przeprowadzono dla zróżnicowanego spektrum maszyn obejmującego koparki, spycharki, ciągniki rolnicze, ciężkie pojazdy użytkowe oraz jednostki pływające. Szczególnie uwzględniono maszyny charakteryzujące się wysokim zapotrzebowaniem na moc, długimi cyklami pracy oraz eksploatacją w odległych lokalizacjach, ponieważ cechy te stanowią warunki dla wykorzystania wodorowych ogniw paliwowych, które wykazują przewagę w zakresie gęstości energetycznej w porównaniu z systemami opartymi wyłącznie na akumulatorach elektrochemicznych jako źródle napędu. Zastosowanie napędu zasilanego wodorem w tego typu maszynach wiąże się z kompleksowymi wymogami regulacyjnymi, obejmującymi zarówno normy emisji substancji szkodliwych, jak i protokoły bezpieczeństwa związane z magazynowaniem oraz obsługą infrastruktury wodorowej. Przepisy Unii Europejskiej wprowadzają stopniowo bardziej rygorystyczne limity emisji dla maszyn oraz urządzeń pozadrogowych, co sprzyja przejściu na wodorowe ogniwa paliwowe jako bezemisyjną technologię alternatywną. Pomimo tego postępu, kwestie bezpieczeństwa operacyjnego, takie jak wykorzystanie wodoru w przestrzeniach zamkniętych oraz wymagania infrastrukturalne dotyczące stacji tankowania, nadal stanowią istotne wyzwania techniczne oraz ekonomiczne. W rozprawie dokonano analizy tych ograniczeń, wskazując, że mimo stopniowej adaptacji przepisów w regionach takich jak UE oraz USA, występują nadal luki w regulacjach dla sektora „non-road”, które wymagają uzupełnienia w celu umożliwienia szerszego wdrożenia technologii wodorowych. Po przeprowadzeniu przeglądu literatury oceniono możliwość praktycznego zastosowania wodorowych ogniw paliwowych w analizowanych maszynach na przykładzie katamaranu wyposażonego w wielopaliwowy układ napędowy. Analizę skoncentrowano na efektywności energetycznej napędu, systemach magazynowania wodoru oraz niezbędnych modyfikacjach technicznych istniejących konfiguracji silnikowych. Wyniki przeprowadzonych badań wykazały, że ogniwa paliwowe oferują istotne korzyści w zakresie redukcji emisji szkodliwych składników spalin, obniżenia poziomu hałasu oraz poprawy sprawności rzeczywistej, szczególnie w porównaniu z napędami wykorzystującymi wyłącznie silniki spalinowe, w tym

głównie jednostki o zapłonie samoczynnym. Wykazano jednocześnie ograniczenia związane z wysokimi kosztami inwestycyjnymi, wyzwaniem magazynowania wodoru wynikającymi z dużych gabarytów zbiorników oraz koniecznością wzmocnienia konstrukcji maszyn w celu montażu infrastruktury technicznej obsługującej ogniwa paliwowe. W celu oceny praktycznych możliwości wykorzystania ogniw paliwowych zasilanych wodorem przeprowadzono badania eksperymentalne z wykorzystaniem jednostki pływającej napędzanej silnikami spalinowymi oraz porównano uzyskane wyniki z badaniami prototypu katamaranu wyposażonego w wodorowe ogniwa paliwowe.

Abstract

Research on the implementation of hydrogen propulsion in non-road machinery is gaining significance in the context of this sector's substantial contribution to global emissions of harmful substances and greenhouse gases. This doctoral dissertation analyzes the viability of utilizing hydrogen fuel cells as components of propulsion systems in non-road applications, employing a multi-fuel propulsion system integrated with a motor yacht as the research subject. Within the scope of the conducted analyses, a comprehensive review of specialized literature was performed to acquire current knowledge concerning technical requirements, legal frameworks, and practical limitations associated with fuel cell integration in this category of applications. The review focused on identifying machinery characterized by the greatest potential for conversion to hydrogen propulsion and on detailed analysis of legal regulations affecting the implementation of hydrogen technologies in the non-road mobile machinery (NRMM) sector. The analysis encompassed systematic classification of machinery according to their operational functions, load-bearing parameters, and specific operational requirements, which enabled identification of propulsion elements potentially compatible with hydrogen fuel cell technology. The analysis was conducted for a diverse spectrum of machinery including excavators, bulldozers, agricultural tractors, heavy commercial vehicles, and floating units. Priority consideration was given to machinery characterized by high power demands, extended operating cycles, and operation in remote locations, as these characteristics constitute optimal conditions for utilizing hydrogen fuel cells, which demonstrate advantages in terms of energy density compared to systems based exclusively on electrochemical batteries as propulsion sources. Implementation of hydrogen-powered propulsion in such machinery involves complex regulatory requirements, encompassing both emission standards for harmful substances and safety protocols related to hydrogen infrastructure storage and handling. European Union regulations are progressively introducing more stringent emission limits for non-road machinery and equipment, which favors the transition to hydrogen fuel cells as a zero-emission alternative technology. Despite this progress, operational safety issues, such as hydrogen utilization in confined spaces and infrastructural requirements concerning refueling stations, continue to present significant technical and economic challenges. This dissertation analyzes these limitations, indicating that despite gradual adaptation of regulations in regions such as the EU and USA, gaps remain in non-road sector regulations that require completion to enable broader implementation of hydrogen technologies. Following the literature review, the practical applicability of hydrogen fuel cells in the analyzed machinery was evaluated using a catamaran equipped with a multi-fuel propulsion system as an example. The analysis concentrated on

propulsion energy efficiency, hydrogen storage systems, and necessary technical modifications to existing engine configurations. Results of the conducted research demonstrated that fuel cells offer significant benefits in terms of reducing harmful exhaust emissions, decreasing noise levels, and improving actual efficiency, particularly compared to propulsion systems utilizing exclusively internal combustion engines, primarily compression-ignition units. Simultaneously, limitations were identified related to high investment costs, hydrogen storage challenges resulting from large tank dimensions, and the necessity of reinforcing machinery structures to accommodate technical infrastructure supporting fuel cells. To evaluate practical possibilities for utilizing hydrogen-powered fuel cells, experimental research was conducted using a combustion engine-powered floating unit, and the obtained results were compared with studies of a catamaran prototype equipped with hydrogen fuel cells.